



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

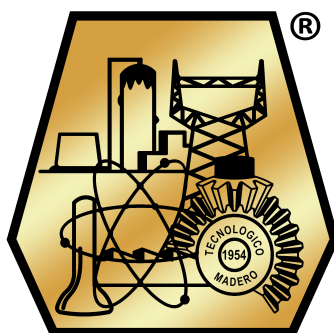


TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

TESIS

**"HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL ANALISIS DE
CIRCUITOS RECTIFICADORES CARGA R,RL Y RLG**

Que para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería Eléctrica

Presenta

Ing. Gustavo Rubén Rábago Tavera

G17070912

CVU 1315625

Director de la Tesis

M.C. Aarón González Rodríguez

CVU 314382

Co-director de la Tesis

Dr. Alfonso Barbosa Moreno



Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Ciudad Madero, Tamaulipas, **20/junio/2025**

Oficio No.: U2.048/25

Asunto: Autorización de impresión de tesis

C. GUSTAVO RUBEN RABAGO TAVERA
No. DE CONTROL G17070912
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

**"HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL ANALISIS DE CIRCUITOS RECTIFICADORES
CARGA R, RL Y RLG"**

El Jurado está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE:	M.C. AARON GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
SECRETARIO:	DR. ALFONSO BARBOSA MORENO
VOCAL:	M.C. EDUARDO NACÚ SALAS CABRERA
SUPLENTE:	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
DIRECTOR DE TESIS:	M.C. AARON GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
CO-DIRECTOR:	DR. ALFONSO BARBOSA MORENO

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Por mi patria y por mi bien"®

RAFAEL CASTILLO GUTIERREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

ccp. Archivo
RCG/ RCI/aecr



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos
C.P. 89440 Cd. Madero, Tam. Tel. (833) 3574820 ext. 3110
e-mail: depi_cdmadero@tecnm.mx www.tecnm.mx
www.cdmadero.tecnm.mx



Dedicatoria

A mis padres que me apoyaron siempre con lo que pudieron a mis tíos, quienes me alentaron a seguir adelante, a mi pareja, quien se volvió un lugar seguro donde poder acudir, a mis hermanos quienes me aconsejaban desde sus experiencias.

A mis maestros, quienes se enfocaron en ver mis deficiencias y trataron con mi ayuda de pulirlas para generar un mejor elemento ante la sociedad.

Y un especial agradecimiento a mi asesor quien me apoyo y guio lo mejor posible, con lo cual logramos cumplir con los objetivos.

Agradecimientos

A Dios quien es mi pastor y por el he llegado hasta donde estoy, por inundarme de bendiciones y conocimiento además de otorgarme su gracia , quien a pesar de las adversidades me sigue brindando su abrigo y me permite superar los obstáculos.

A mis padres; Gustavo Esteban y Rocío quienes me han dado su apoyo su guía y procuraron y procuran aun mi persona. Han sido mi guía y mi sustento y quienes espero estén orgullosos de mí.

A mis tíos Cesar Eduardo y Raúl Ruben, quienes apoyaron mi desarrollo y con quienes he contado desde siempre.

A mis hermanos Rosamaría Cidny y Cesar Raúl quienes han sido apoyo emocional en situaciones diversas y guía en ocasiones.

A mi novia Miriam Arely, quien me ha apoyado desde mis inicios cuando estuve en la carrera de ingeniería y quien continúa apoyándome en esta etapa de posgrado.

A mi asesor Aaron, quien no desespere y me apoyo tanto como le fue posible siempre tratándome desde la paciencia.

Resumen

Este proyecto consiste en el desarrollo de una herramienta computacional para el análisis de circuitos rectificadores, abordando un total de once casos: cinco circuitos controlados mediante tiristores (SCR) y seis no controlados, utilizando diodos. A lo largo del trabajo se explora el funcionamiento detallado de cada configuración, se presentan las fórmulas necesarias para calcular parámetros clave y se describe la evolución de los programas implementados. Los cálculos se realizan bajo condiciones ideales, es decir, sin considerar la caída de voltaje en los diodos ni las cargas internas de las fuentes de voltaje o de los generadores. El resultado final es un software que permite obtener de forma ágil y precisa los valores de interés, convirtiéndose en una herramienta útil para la enseñanza y el aprendizaje de estos circuitos.

Palabras claves: Análisis de circuitos rectificadores, diodos, tiristores (SCR), herramienta computacional, simulación ideal, modelado sin pérdidas, educación en ingeniería, rectificación de energía, software educativo.

Abstract

This project involves the development of a computational tool for analyzing rectifier circuits, covering a total of eleven cases: five circuits controlled by silicon-controlled rectifiers (SCRs) and six uncontrolled circuits using diodes. The study explores the detailed operation of each configuration, presents the necessary formulas to calculate key parameters, and describes the evolution of the implemented programs. All calculations are performed under ideal conditions—that is, without considering voltage drops across the diodes or internal loads within voltage sources or generators. The outcome is a software application that swiftly and accurately provides values of interest, becoming a valuable tool for teaching and learning about these circuits.

Keywords: rectifier circuit analysis, SCR (Silicon-Controlled Rectifier), diode-based circuits, computational tool, ideal conditions simulation, educational software, power electronics learning, circuit modeling, engineering education.

Índice general

Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Abstract	V
Lista de Figuras	XII
1. Antecedentes	16
1.1. Introducción	17
1.2. Planteamiento del problema	18
1.3. Justificación	19
1.4. Objetivos	19
1.4.1. Objetivos generales	19
1.4.2. Objetivo específicos	19
1.5. Hipótesis	20
1.6. Alcance y limitaciones	20
1.6.1. Alcance	20
1.6.2. Limitaciones	21
2. Marco teórico	22
2.1. Bases de funcionamiento del rectificador	23
2.2. Componentes controlados y no controlados	24
2.2.1. Diodos semiconductores	24
2.2.2. Rectificador de silicio controlado	25
2.3. Rectificadores Monofásicos Introducción	26
2.4. Funcionamiento del rectificador media onda no controlado de carga R	27
2.4.1. Fórmulas relacionadas al circuito rectificador de media onda carga R	28

2.5.	Rectificación de onda completa Carga R	29
2.5.1.	Fórmulas relacionadas al circuito rectificador de onda completa carga resistiva	30
2.6.	Funcionamiento de media onda con carga resistiva e inductiva (R-L)	32
2.6.1.	Análisis para la obtención de las fórmulas	34
2.6.2.	Fórmulas de la potencia	37
2.7.	Rectificador monofásico de onda completa con carga resistiva e inductiva (R-L)	37
2.7.1.	Cálculo de las Potencias en Circuito Rectificador Monofásico de RL de Onda Completa	39
2.8.	Rectificado monofásico de media onda con carga resistiva-inductiva y generador	40
2.9.	Rectificador monofásico de onda completa carga RL- Generador	45
2.9.1.	Comportamiento del circuito en el modo continuo	46
2.9.2.	Comportamiento del circuito en modo discontinuo	47
2.9.3.	Cálculo de las potencias	50
2.10.	Rectificador monofásico controlado por SCR media onda carga puramente resistiva	51
2.10.1.	Análisis del rectificador monofásico controlado por SCR de media ondacarga puramente resistiva	52
2.10.2.	Potencias en el circuito rectificador monofásico de media onda controlado por un SCR con carga puramente resistiva	53
2.11.	Rectificador monofásico de onda completa controlado por un SCR con carga puramente resistiva	54
2.11.1.	Potencias en el circuito rectificador monofásico de onda completa controlado por SCR con carga puramente resistiva	55
2.12.	Rectificador monofásico de media onda controlado por SCR con carga RL	56
2.12.1.	Fórmulas	57
2.12.2.	Fórmulas de potencia	58
2.12.3.	Fórmulas del tríodo SCR	58
2.13.	Circuito rectificador de onda completa controlado por SCR con carga RL	59
2.13.1.	Fórmulas en circuito rectificador RL onda completa, caso discontinuo	60
2.13.2.	Fórmulas en circuito RL onda completa caso continuo	61

2.13.3. Fórmulas de potencia	62
2.13.4. Fórmulas del triodo SCR	62
2.14. Circuito rectificador media onda controlado SCR carga RLG	63
2.14.1. Fórmulas del circuito rectificador de media onda controlado por SCR carga RLG.	64
2.14.2. Fórmulas de Potencia	64
2.15. Lenguaje de programación para la herramienta	65
2.15.1. El programa OCTAVE	65
2.15.2. ¿Qué es MATLAB?	67
2.15.3. Diferencias entre Octave y Matlab	67
2.15.4. Conclusiones en los softwares	68
3. Análisis de los circuitos y el software a programar	70
3.1. Acercamiento al programa GNU Octave para la elaboración de la herramienta computacional.	72
3.1.1. Editor GNU	73
3.2. Circuito rectificador de media onda no controlado carga R, codificación en Octave	73
3.2.1. Explicación de código	73
3.3. Circuito rectificador de onda completa no controlado carga R, codificación en Octave	76
3.3.1. Explicación del código	76
3.4. Circuito rectificador no controlado de media onda con carga RL, codificación en Octave	77
3.4.1. Programa en Octave análisis simbólico realizado	78
3.4.2. Programa en Octave sin análisis simbólicos	80
3.5. Circuito rectificador no controlado de onda completa carga RL codificación en Octave.	81
3.5.1. Explicación del código.	83
3.6. Circuito rectificador no controlado de media onda carga RL-Generador, codi- ficación en Octave.	84
3.6.1. Explicación del código	85

3.7. Circuito rectificador no controlado de onda completa carga RL-Generador, codificación en Octave	86
3.7.1. Explicación del código	87
3.8. Integración de los programas individuales en uno, mediante Octave.	89
3.8.1. Explicación del código	92
4. Diseño de programas en Matlab	93
4.1. Acercamiento al programa Matlab	95
4.2. Circuito rectificador media onda controlado por SCR con carga R	96
4.2.1. Explicación del código de programación.	97
4.3. Circuito rectificador controlado por SCR de onda completa con carga resistiva	99
4.3.1. Explicación del código de programación.	100
4.4. circuito rectificador controlado por SCR de media onda carga R-L	101
4.4.1. Explicación del código de programación	103
4.5. Circuito rectificador controlado por SCR's de onda completa con carga R-L	105
4.5.1. Explicación del código de programación	107
4.6. Circuito rectificador controlado por SCR's de onda completa con carga R-L Generador	109
4.6.1. Explicación del código de programación.	111
5. Diseño de la Interfaz en Matlab	113
5.1. Definir las Opciones	114
5.2. Definir los Campos Modificables	116
5.2.1. App. (Nombre del elemento). Value	119
5.2.2. Etiquetas	120
5.2.3. Botones	121
5.3. Funciones	122
5.3.1. Función "Titulo"	122
5.3.2. Función "LOnOff"	123
5.3.3. Función "VccOnOff"	123
5.3.4. Función "OndaElegirMO"	123
5.3.5. Función "TipoElegirNC"	123
5.3.6. Función "SalirButtonPushed"	123

5.3.7.	Función “LimpiarButtonPushed”	124
5.3.8.	Función “PeriodosSpinValueChanged”	124
5.3.9.	Función “Calcular”	124
5.4.	Variables Compartidas y Cálculos Compartidos Previos	125
5.5.	Análisis de los programas acorde a los circuitos	126
5.5.1.	Rectificador Controlado por SCR de Media Onda con Carga Puramente Resistiva	127
5.5.2.	Rectificador Controlado por SCR de Onda Completa con Carga Puramente Resistiva	128
5.5.3.	Rectificador controlado por SCR de Media Onda con carga Resistiva e Inductiva	129
5.5.4.	Rectificador Controlado por SCR de Onda Completa con Carga Resistiva e Inductiva	131
5.5.5.	Rectificador Controlado por SCR de Media Onda con Carga Resistiva, Inductiva y Generador	133
5.5.6.	Rectificador no Controlado de Media Onda con Carga Puramente Resistiva	135
5.5.7.	Rectificador no Controlado de Onda Completa con Carga Puramente Resistiva	136
5.5.8.	Rectificador no Controlado de Media Onda con Carga Resistiva e Inductiva	138
5.5.9.	Rectificador no Controlado de Onda Completa con Carga Resistiva e Inductiva	140
5.5.10.	Rectificador no Controlado de Media Onda con Carga Resistiva, Inductiva y Generador	141
5.5.11.	Rectificador no Controlado de Onda Completa con Carga Resistiva, Inductiva y Generador	143
5.5.12.	Cálculos Posteriores Compartidos, Visualización en la Interfaz y Gráficas	145
6.	Herramienta Computacional como app dentro de Matlab	147
6.1.	Explicación de operación de la herramienta computacional	148
6.1.1.	Ejecución del programa directamente desde el archivo	148
6.1.2.	Ejecución del programa desde Matlab	149

6.1.3.	Introducción de los valores de los componentes	152
6.1.4.	Presentación final de la pantalla inicial de la aplicación	154
6.2.	Ejemplos de operación de la herramienta computacional	154
6.2.1.	Ejemplo circuito rectificador monofásico onda completa controlado por SCR carga R	154
6.2.2.	Ejemplo Circuito rectificador de media onda no controlado con carga RL	156
6.2.3.	Ejemplo circuito rectificador de media onda no controlado carga RL- Generador	157
6.2.4.	Ejemplo circuito rectificador de media onda controlado por SCR con carga RL	158
6.3.	Conclusiones y objetivos a futuro	159

Bibliografía	160
---------------------	------------

Lista de Figuras

2.1. Diodo	24
2.2. Terminales de un diodo SCR	25
2.3. Rectificador de media onda no controlado.	27
2.4. Rectificador de onda completa con carga resistiva.	29
2.5. Circuito R-L rectificación a media onda.	32
2.6. Graficas de onda del Circuito RL de media onda.	32
2.7. Circuito R-L.	32
2.8. Formas de onda del circuito.	34
2.9. Circuito rectificador de onda completa carga RL.	37
2.10. Formas de onda del circuito RL.	38
2.11. Circuito RL-Generador de media onda monofásico.	40
2.12. Formas de onda del circuito RL-Generador.	40
2.13. Circuito RL-Generador onda completa.	45
2.14. Circuito rectificador de media onda controlado por SCR carga R.	51
2.15. Rectificador Monofásico Controlado por SCR.	52
2.16. Rectificador Monofásico de Onda Completa Controlado por un Diodo SCR con Carga Puramente Resistiva	54
2.17. Formas de onda del circuito.	54
2.18. Diagrama general de rectificador de media onda.	56
2.19. Formas de onda con respecto del voltaje en el rectificador RL media onda. . .	56
2.20. Circuito rectificador controlado por SCR con RL de onda completa.	59
2.21. Comportamiento en corriente discontinua.	59
2.22. Comportamiento con corriente Continua.	60
2.23. Circuito Rectificador carga RLG de media onda.	63
2.24. Graficas circuito RLG de media onda.	63
3.1. Página de inicio de Octave, Ventana de comandos.	72
3.2. Página de inicio de Octave Editor.	72

3.3. Codigo Gnu Octave circuito Rect. NC media onda carga R parte 1.	73
3.4. Codigo Gnu Octave circuito Rect. NC media onda carga R parte 2.	74
3.5. Diagrama de flujo para la lógica de la programación.	75
3.6. Muestra de resultados circuito Rectificador No controlado Carga R de media onda.	75
3.7. Resultados de Circuito rectificador no controlado onda completa carga R. . .	76
3.8. Circuito Rectificador no controlado de onda completa carga R Código. . . .	77
3.9. Circuito rectificador media onda no controlado carga R-L código parte 1. . .	78
3.10. Circuito rectificador media onda no controlado carga R-L código parte 2. . .	79
3.11. Resultados del programa.	79
3.12. Circuito rectificador no controlado media onda carga R-L v3.	81
3.13. Resultados del programa MO RL v3	81
3.14. Conducción de la corriente en la carga.	82
3.15. Ventana de resultados.	82
3.16. Programa para el circuito rectificador no controlado con carga RL.	84
3.17. Funcionalidad del código.	85
3.18. editor de código ("Código del programa rectificador no controlado media on- da carga RL-Generador").	86
3.19. Código de programa rectificador no controlado RL-Generador.	88
3.20. Funcionamiento del programa rectificador no controlado RL-Generador ejem- plo discontinuo.	89
3.21. Funcionamiento del programa rectificador no controlado RL-Generador ejem- plo continuo.	89
3.22. Menú de la herramienta computacional para el análisis de circuitos rectifica- dores en Octave.	90
3.23. Funcionamiento del circuito rectificador de onda completa con carga RL . . .	90
3.24. Funcionalidad del programa.	91
3.25. Lógica de programación de la herramienta computacional en GNU Octave. .	91
3.26. Código de programa rectificador no controlado RL-Generador.	92
4.1. Acercamiento al software Matlab	95
4.2. Ventana de comandos	95
4.3. Resultados del circuito rectificador controlado por SCR carga R	96

4.4. Grafica del circuito rectificador media onda controlado por SCR carga R . . .	97
4.5. Código del circuito rectificador de media onda controlado por SCR con carga R parte 1	98
4.6. Código del circuito rectificador de media onda controlado por SCR con carga R parte 2	99
4.7. Resultados del circuito rectificador de onda completa controlado por SCR con carga R	99
4.8. Código circuito Rectificador Monofásico de Onda Completa carga R, contro- lado por SCR parte 1	100
4.9. Código circuito Rectificador Monofásico de Onda Completa carga R, contro- lado por SCR parte 2	101
4.10. Código del programa circuito rectificador de media onda controlado por SCR carga R-L parte 1	102
4.11. Código del programa circuito rectificador de media onda controlado por SCR carga R-L parte 2	103
4.12. Entrega de resultados del programa circuito rectificador de media onda con- trolado por SCR carga R-L	104
4.13. Grafica de la corriente rectificada	104
4.14. Programa de circuito rectificador controlado por SCR carga RL parte 1 intro- ducción de variables.	105
4.15. Programa de circuito rectificador controlado por SCR carga RL parte 2 com- portamiento continuo.	106
4.16. Programa de circuito rectificador controlado por SCR carga RL parte 3 modo discontinuo.	107
4.17. Ejemplo de circuito en modo continuo.	108
4.18. Ejemplo de circuito en modo discontinuo.	109
4.19. Código del circuito rectificador controlado por SCR de media onda Carga R-L Generador. Parte 1.	110
4.20. Código del circuito rectificador controlado por SCR de media onda Carga R-L Generador. Parte 2.	111
4.21. Ejemplo con resultados del circuito rectificador controlado por SCR de media onda Carga R-L Generador.	112

5.1. Definicion de tipo.	115
5.2. Configuración del rectificador	115
5.3. Cargas habilitadas	116
5.4. Campos modificables.	117
5.5. Campos de la aplicación.	119
5.6. Etiquetas y región de resultados.	121
6.1. Herramienta computacional prototipo final.	148
6.2. Ejecutar el programa herramienta computacional.	149
6.3. Apertura de la app	149
6.4. Ejecución de la aplicación desde Matlab.	150
6.5. Abrir la herramienta desde Matlab.	150
6.6. Búsqueda del archivo	151
6.7. Design View y Code View	151
6.8. Apartado de los parámetros a controlar por el usuario.	152
6.9. Apartado para los resultados	153
6.10. Pantalla inicial edición final	154
6.11. Resultados del ejemplo rectificador monofásico onda completa controlado por SCR con carga R.	155
6.12. Resultados del ejemplo rectificador monofásico onda completa controlado por SCR con carga R en la herramienta computacional.	155
6.13. Resultados el circuito rectificador no controlado con carga RL	156
6.14. Resultados	157
6.15. Resultados de la aplicación	158

Antecedentes

En este capítulo se muestra una introducción al trabajo desarrollado, se presentan los antecedentes del trabajo, la definición del problema, la justificación del mismo, objetivos, una hipótesis, así como los alcances y limitaciones.

1.1. Introducción

En electrón de potencia existen cuatro clases para la realización de conversión de la energía eléctrica: 1) Corriente directa (CD o CC) a Corriente alterna (CA). Mediante la implementación de componentes electrónicos se puede convertir una alimentación directa en una alterna, la cual puede ser monofásico o inclusive polifásica, esta a su vez puede variar en frecuencia o en magnitud. 2) CA a CA, esta es una conversión de corriente alterna a corriente alterna, esta puede variar en frecuencia o magnitud sin pasar por una conversión de corriente directa. 3) CD a CD esta consiste en manipular su magnitud e inclusive su sentido siendo en la salida de signo opuesto a la entrada, por medio de componentes electrónicos como inversores. Y 4) CA a CD siendo esta por medio de componentes electrónicos de potencia, diodos semiconductores rectificadores o transistores de potencia [1].

Este proyecto solo abordará esta última clase conocida como rectificación, los circuitos rectificadores son dispositivos que convierten la corriente alterna a corriente directa, aquella que el usuario necesite, hoy en día se utiliza para muchos dispositivos de uso cotidiano como computadoras, televisores o celulares. Puede observar más al respecto en el apéndice B.

Los circuitos rectificadores, se dividen en dos categorías principales:

- Rectificación controlada por tiristores: Estos permiten controlar el momento en que comienza la conducción, lo que proporciona un control sobre la salida del rectificador.
- Rectificación no controlada por diodos semiconductores: Estos simplemente permiten el paso de corriente en una dirección, sin control sobre el momento de conducción.

Implementar esto mediante un software de fórmulas matemáticas es muy útil. Al crear un código con funciones específicas para cada tipo de rectificación, se podrá automatizar los cálculos necesarios para analizar diferentes modelos de rectificación en serie. Esto no solo facilitará el análisis, sino que también mejorará la precisión y eficiencia del proceso.

En la actualidad existen algunas calculadoras en línea, las cuales permiten realizar cálculos diversos específicos, también existe la calculadora corriente de carga máxima en rectificador monofásico de diodo de media onda con carga inductiva [2] y calculadora voltaje de

salida promedio del rectificador del diodo de punto medio de onda completa monofásico con carga R [3], por mencionar algunas, todas estas no proporcionan la información completa, es decir no cuenta con más de uno o datos de interés tras proporcionarle algunos. Resulta conveniente disponer de una más enfocada al uso educativo y profesional mediante un software para obtener los valores de interés en casos específicos, como son los voltajes en las cargas (eficaz y promedio), las corrientes en la carga, las potencias que consumen los circuitos y la potencia que entrega la fuente rectificada, así como el factor de potencia de los circuitos a evaluar.

Hoy en día, aunque se cuenta con un sinnúmero de números bibliográficos y recursos tecnológicos, sin embargo, los trabajos académicos que proporcionan este tipo de información están más escasos, cuentan con tesis o tesinas que proporcionen un software que resuelvan numérica o analíticamente para este tipo de problemas.

1.2. Planteamiento del problema

Para resolver los circuitos, no siempre se pueden obtener una solución de forma analítica por funciones sencillas ya que en ocasiones se llegan a tener ecuaciones algebraicas o trascendentes integrales no elementales, etc. Por lo que no se cuenta con una solución exacta en las variables de interés. En esos casos se usan métodos numéricos para la solución aproximada óptima, pero se suele llevar mucho tiempo si se requiere realizar a mano, ya que al proponer valores y realizar las operaciones respectivas se toman grandes periodos de tiempo, por lo que si se quiere una mayor exactitud se requerirá un mayor número de aproximaciones bajo cierta tolerancia establecida para llegar al resultado, por lo tanto, mayor tiempo invertido. Sin embargo, existen hoy en día el uso de programas (softwares) que podrían facilitar la realización de dichos cálculos, esto reduce mucho los tiempos y además el usuario solo debe proporcionar los valores iniciales o parámetros. En la conversión CA a CD, se requiere para su diseño e implementación del cálculo de datos relevantes. Por ello es imperativo contar con la implementación de un software para facilitar y agilizar el cálculo de los parámetros requeridos de cada uno de los casos particulares.

1.3. Justificación

La realización de una serie de códigos correspondientes con rutinas y subrutinas que ejecuten las operaciones pertinentes para la solución de ciertos problemas específicos, los cuales tengan o no una solución exacta (la cual conlleva una labor de cálculo). Sea por la evaluación de una fórmula o debiendo realizarse mediante de métodos numéricos, los cuales son procedimientos iterativos, se busca poder resolver con precisión en modelos matemáticos asociados con las fuentes de rectificación, así como la optimización de los tiempos en la realización de los cálculos pertinentes y la facilitación de los usuarios de esta herramienta la cual actualmente no se encuentra algo semejante en foros académicos asociados. Este proyecto busca la solución en problemas relaciones en la utilización de la eficiencia energética, ya que se busca la relación del factor de potencia además de posibles aportaciones en el uso de generadores y motores para la generación de energías limpia y eficientes.

Esto puede ayudar con un mejor diseño y optimización de circuitos, un eficiente diagnóstico de problemas, así como asegurar que los circuitos funciones de manera adecuada, facilitaría el desarrollo de nuevas tecnologías y a la vez serviría como una nueva herramienta de educación esencial en la formación de nuevos ingenieros.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivos generales

Realizar un código por el cual permita al usuario realizar dichos cálculos de circuitos rectificadores monofásicos de media onda y onda completa, controlados y no controlados de manera sencilla con exactitud, por medio de un software externo.

1.4.2. Objetivo específicos

- Obtener cada uno de los modelos matemáticos para los circuitos rectificadores monofásicos de media onda y onda completa, controlados y no controlados de carga resistiva (R), resistiva-inductiva (RL) y resistiva-inductiva-generador (RL-Generador) en serie.
- Desarrollo de las funciones complejas en el software para la resolución de los circuitos

escritos en capítulos anteriores.

- Mediante el software de GNU Octave y Matlab desarrollar un lenguaje de programación con el cual el usuario pueda realizar cálculos específicos que podrían tomar horas en cuestión de segundos.
- Realizar una lista de los requisitos de cada uno de los circuitos en el ámbito didáctico/académicos.

Tabla 1.1: Circuitos a analizar

Circuito a Analizar	Media Onda	Onda Completa	Controlado por SCR	No Controlado	Tipo
Circuito Rectificador Monofásico de Carga Puramente Resistiva	X	X	X	X	Serie
Circuito Rectificador Monofásico de Carga Resistiva e Inductiva	X	X	X	X	Serie
Circuito Rectificador Monofásico de Carga Resistiva-Inductiva y Generador	X		X	X	Serie

1.5. Hipótesis

- Hipótesis uno: El código permitirá facilitar el diseño de circuitos rectificadores, ya que ayudará a calcularlos de forma más rápida lo que permitirá que se puedan optimizar los circuitos y reducir los gastos; El software tenga una interfaz intuitiva y fácil de usar para que colaboradores puedan interactuar con él sin dificultades.
- Hipótesis dos: La implementación de dicho programa ayudará a la eficiencia energética y dará un aporte en el ámbito académico.

1.6. Alcance y limitaciones

1.6.1. Alcance

Se considera un software de fórmulas matemáticas simbólicas, para solucionar los problemas y se espera poder hacer llegar a los resultados, mediante exposiciones académicas

en los campos adecuados.

Entre los principales alcances se busca crear un código que pueda solucionar problemas electrónicos en circuitos rectificadores. Se pretende usar este código para fines académicos o en los cálculos para la elaboración en la práctica de estos circuitos.

El software se puede ofrecer en dos presentaciones en Matlab y en GNU Octave ya que de esta manera su alcance sería mayor.

1.6.2. Limitaciones

Entre los límites que se considerarán este proyecto es para problemas particulares de todos los posibles, únicamente se analizarán los siguientes circuitos: Circuitos rectificadores monofásicos de media onda y onda completa, con los siguientes tipos de cargas, solamente resistiva, resistiva e inductiva y resistiva-inductiva y generador. Además, que estos mismos analizados de tipo no controlado y controlado por SCR.

Análisis de Circuitos: Se utilizarán técnicas de análisis de circuitos para obtener los modelos matemáticos necesarios para la simulación y modelado de los circuitos rectificadores. Esto incluye el uso de leyes y teoremas fundamentales de la teoría de circuitos.

El software tendrá las siguientes limitaciones:

No se podrán realizar combinaciones de cargas, no se podrán interconectar los diferentes circuitos, no se tendrá en cuenta ϵ de las máquinas, ni su desgaste con la temperatura. No tendrá pasos de integración adaptativos serán fijos para cada caso.

Sin embargo, se tendrán en cuenta las siguientes situaciones:

Los elementos son ideales, la tolerancia para ciertos cálculos como β serán variables el usuario podrá adaptarlo, la frecuencia será variable en las fuentes de CA según el caso, y los valores de cada carga serán introducidos por el usuario.

Marco teórico

Este capítulo muestra antecedentes teóricos de la rectificación de la corriente, así como algunas de sus posibles configuraciones o tipos de circuitos, las cuales dependen de su carga, del componente con el que hace la rectificación y del tipo de rectificación, si es media onda u onda completa. Además, una breve descripción de los softwares con los que se trabajarán en este proyecto

En la electrónica de potencia, existe el estudio de la conversión de corriente alterna a corriente continua o directa, en la cual el dispositivo encargado de dicha conversión se le conoce como rectificador. Los mismos cuentan con dos análisis matemáticos de los cuales corresponden a la rectificación de media onda y onda completa; siendo importante subrayar que cada uno de sus análisis matemáticos con llevan distintos desarrollos algebraicos [1][4]. A día de hoy, se conocen muchos distintos dispositivos y las ecuaciones para realizar el análisis de estos mismos los cuales no son de fácil acceso ni uso. Así mismo se cuenta con diversas tecnologías para poder realizar operaciones cíclicas que permitirán un análisis más eficiente, gracias al uso de programas o herramientas virtuales que ejecutarán una serie de códigos, para la resolución de ciertos problemas específicos, los cuales no tienen una solución exacta y se deben realizar por medio de aproximaciones.

2.1. Bases de funcionamiento del rectificador

En la mayoría de las aplicaciones de la electrónica de potencia, la entrada de la energía eléctrica es en una onda senoidal de voltaje C.A de 50 o 60 Hz la cual se convierte en un voltaje de CD, empleando dispositivos rectificadores semiconductores [1].

Un circuito rectificador es de manera sencilla, un circuito que tiene la capacidad de transformar o convertir una señal bipolar de C.A a una señal constante de C.D, es decir, de una señal bipolar se convierte en una señal mono polar, los cuales pueden tener la rectificación de ambas partes de la señal bipolar o solamente de una parte, y puede ser que se rectifique completa o parcialmente dicha señal; bajo esta premisa y lo anterior dicho existen cuatro tipos:

- Media onda controlada
- Media onda no controlada
- Onda completa controlada
- Onda completa no controlada

Cabe aclarar que además existen los rectificadores trifásicos, pero en esta investigación se hizo mención que solamente se abordarán los monofásicos.

2.2. Componentes controlados y no controlados

Entre los componentes para la realización de la rectificación se utilizan los diodos semiconductores rectificadores, y también se pueden usar los SCR's; estos funcionan como interruptores los cuales permiten el flujo de la corriente en una sola dirección.

2.2.1. Diodos semiconductores

Un diodo semiconductor es: un dispositivo semiconductor que actúa esencialmente como un interruptor unidireccional para la corriente, "Cuando el diodo está polarizado en directa, empieza a conducir con solo un pequeño voltaje a través de él en el orden de 1 voltio(V), cuando el diodo está polarizado de manera inversa, sólo una corriente de fuga muy insignificante fluye a través del dispositivo hasta que alcanza la tensión de ruptura inversa. En la operación principal el voltaje de polarización inversa no debe de alcanzar el punto de ruptura.

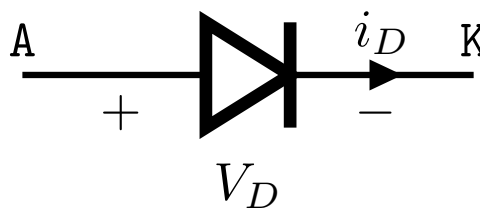


Figura 2.1: Diodo

En vista de una corriente de fuga muy pequeña en el estado de bloqueo (polarización inversa) y una pequeña tensión en el estado de conducción (polarización directa), en comparación con las tensiones y corrientes de operación en las que se usa el diodo, se puede idealizar la característica de i-v para el diodo, como se muestra en la Figura 2.1. Esta característica idealizada sirve para analizar la topología del convertidor, pero no se debe usar para el propio diseño del convertidor cuando se estiman, por ejemplo, los requisitos del disipador de calor para el dispositivo [5].

Al encenderlo, el diodo puede considerarse un interruptor ideal porque se enciende rápido la única desventaja es que su encendido funciona en el momento de que cumpla con el

voltaje en directo y a partir de ahí funciona como interruptor es decir no se puede controlar su encendido.

2.2.2. Rectificador de silicio controlado

El rectificador de silicio controlado (SCR, por sus siglas en inglés) es un tiristor el cual funciona como un diodo de silicio, pero con la peculiaridad de que puede uno controlar su tiempo de activación mediante lo que se suele conocer como ángulo de disparo este dispositivo formado por cuatro capas de material semiconductor con estructura PNPN.

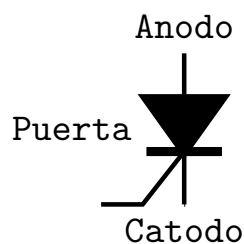


Figura 2.2: Terminales de un diodo SCR

Un SCR posee tres conexiones: ánodo, cátodo y gate (compuerta), tal y como se muestra en la Figura 2.2. La compuerta es la encargada de controlar el paso de corriente entre el ánodo y el cátodo. Funciona básicamente como un diodo rectificador controlado, permitiendo circular la corriente en un solo sentido. Mientras no se aplique ninguna corriente eléctrica en la compuerta del SCR no se inicia la conducción y en el instante en que se aplique dicha corriente, el tiristor comienza a conducir. Trabajando en corriente alterna el SCR se des-excita en cada alternancia o semi ciclo. Trabajando en corriente continua, se necesita un circuito de bloqueo forzado, o bien interrumpir el circuito.

2.3. Rectificadores Monofásicos Introducción

Un rectificador monofásico es el tipo más simple de rectificación, y de este su más sencilla presentación es de media onda con carga puramente resistiva, pero en el caso normal no se usa en aplicaciones industriales, sin embargo, es útil para comprender el principio del funcionamiento de los rectificadores. El rectificador es un procesador de potencia que debe producir un voltaje de salida de CD con un contenido mínimo de armónicos. Al mismo tiempo debe mantener la corriente de entrada tan sinusoidal como sea posible, y en fase con el voltaje de entrada, para que el factor de potencia sea cercano a la unidad.

La calidad de procesamiento de potencia de un rectificador requiere que tenga el mínimo contenido de armónicas de la corriente de entrada, el voltaje de salida y la corriente de salida.

Los rendimientos de un rectificador se evalúan, en el caso normal en función de los siguientes parámetros por mencionar solo algunos:

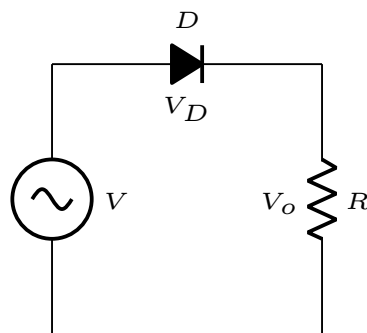
- El valor promedio del voltaje de salida o de la carga, V_{CD} , (V_o , V_o medio o V_o promedio).
- El valor promedio de la corriente de salida (o de la carga), I_{CD} (I_o , I_o medio o I_o promedio).
- El voltaje eficaz o (V_{rms}).
- La corriente eficaz (I_{rms}).
- La potencia de salida consumida por la carga o potencia activa (P).
- El valor de la potencia suministrada por la fuente o potencia aparente (S).
- El factor de potencia (F.P).

Además, dependiendo del circuito puede haber otros conceptos de interés como suelen ser:

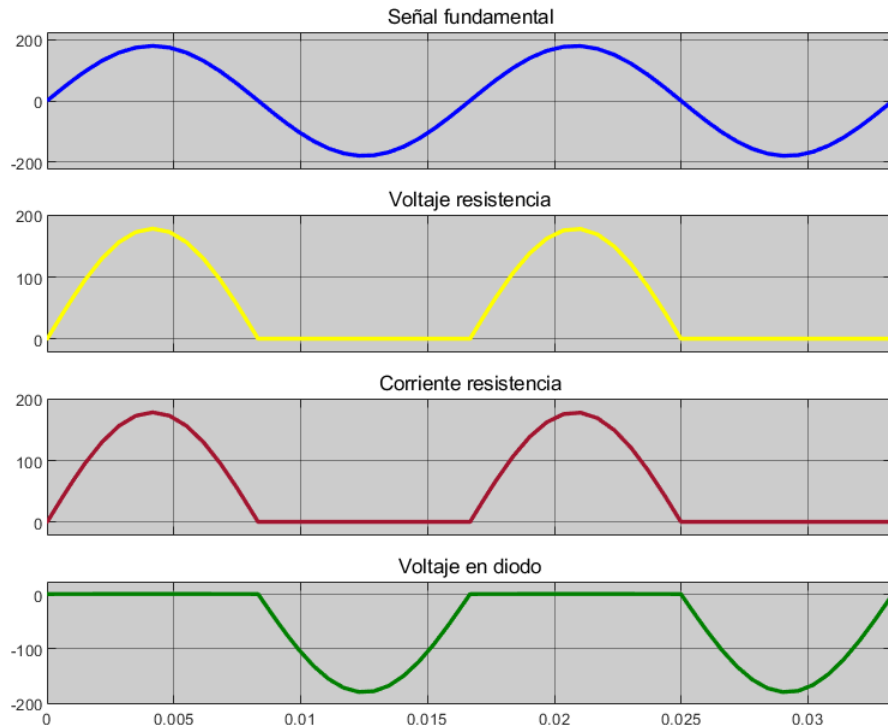
- El ángulo α al cual inicia la corriente.
- El ángulo β el cual es el ángulo donde la corriente se hace cero.
- El ángulo de activación del SCR.

2.4. Funcionamiento del rectificador media onda no controlado de carga R

El circuito rectificador más sencillo de realizar sería el circuito monofásico de media onda no controlada por un diodo, consiste en un diodo conectado en la alimentación como se ve en la Figura 2.3a esa fuente suele ser un transformador monofásico como se puede observar en la Figura 2.3b son los comportamientos en la carga, en la fuente y en el diodo. Y con eso podemos obtener las fórmulas del funcionamiento.



(a) Circuito de conexión



(b) Formas de onda de operación

Figura 2.3: Rectificador de media onda no controlado[6]

2.4.1. Fórmulas relacionadas al circuito rectificador de media onda carga R

Cada uno de los rectificadores obedecen a las ecuaciones de voltaje promedio (V_o) y eficaz (V_{rms}), así como la corriente promedio (I_o) y eficaz (I_{rms})[7].

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T F(\omega t) d\omega t \quad (2.1)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T F^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.2)$$

La $F(\omega t)$ corresponde a la ecuación matemática del voltaje (o corriente), $\omega = 2\pi f$ [rad/s] donde f es la frecuencia en Hz a la que se encuentra el circuito a analizar en C.A.

En el caso del voltaje promedio para el rectificador de media onda con carga resistiva; las ecuaciones 2.1 y 2.2 se convierten en las ecuaciones 2.3 y 2.4.

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_m \cdot \sin(\omega t) d\omega t \quad (2.3)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_m^2 \cdot \sin^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.4)$$

Mientras la corriente tiene la misma forma de onda que el voltaje en este circuito y debido a eso la corriente en la carga estará dada por las ecuaciones (2.5) y (2.6) [5]:

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin(\omega t) d\omega t \quad (2.5)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_m \sin(\omega t))^2 d\omega t} \quad (2.6)$$

Ahora para el cálculo de las potencias es importante analizar la potencia activa y lapotencia aparente para con la relación de estas obtener el factor de potencia. Cuyasecuaciones son la (2.8),(2.7) y (2.9) respectivamente [8].

$$S = V_{srms} \cdot I_{rms} \quad (2.7)$$

Para este caso particular la ecuación (2.7a) es como se calculará:

$$S = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\frac{V_m}{R}}{2} = \frac{V_m^2}{2\sqrt{2} \cdot R} \quad (2.7a)$$

Donde V_{srms} es el V_{rms} de la fuente que alimenta al circuito Rectificador.

$$P = V_{orms} \cdot I_{orms} \quad (2.8)$$

$$P = R \cdot (I_o)^2 \quad (2.8a)$$

Para este caso particular la ecuación (2.8b) es como se calcula:

$$P = \frac{V_m}{2} \cdot \frac{\frac{V_m}{R}}{2} = \frac{V_m^2}{4 \cdot R} \quad (2.8b)$$

Por lo tanto el factor de potencia podria calcularse como:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.9)$$

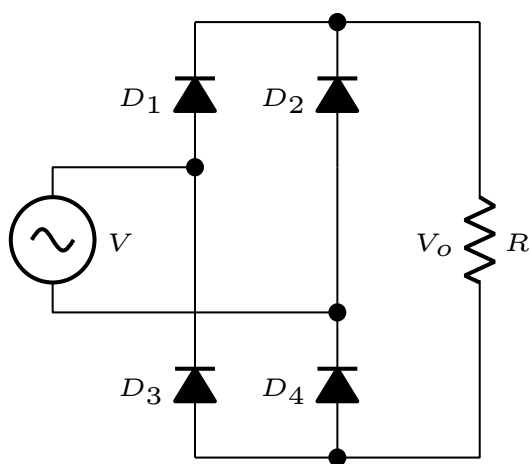
$$FP = \frac{V_{orms} \cdot I_{orms}}{V_{srms} \cdot I_{rms}} \quad (2.9a)$$

Para este caso la ecuación (2.9b) es como se calcula

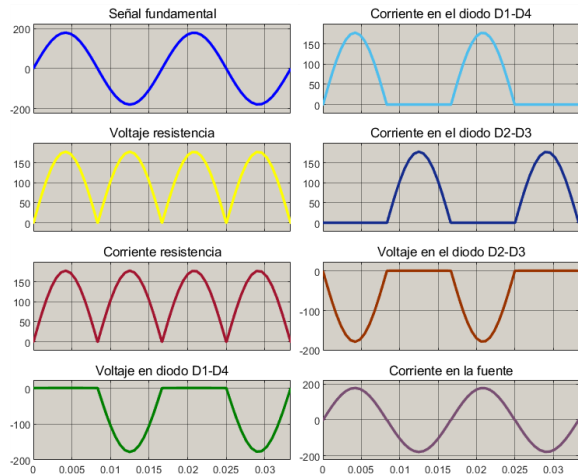
$$\frac{\frac{V_m^2}{4 \cdot R}}{\frac{V_m^2}{2\sqrt{2} \cdot R}} = \frac{V_m^2 \cdot 2\sqrt{2} \cdot R}{V_m^2 \cdot 4 \cdot R} \quad (2.9b)$$

2.5. Rectificación de onda completa Carga R

Como se puede observar en la Figura 2.4, la rectificación de onda completa con carga R es simplemente el doble de aprovechamiento por lo que las fórmulas quedarían de la manera descrita en el tema 2.5.1.



(a) Circuito de conexión.



(b) Formas de onda de operación.

Figura 2.4: Rectificador de onda completa con carga resistiva [9].

2.5.1. Fórmulas relacionadas al circuito rectificador de onda completa carga resistiva

Igual que en el subtema 2.4.1 primero se verán los valores del voltaje promedio y la corriente promedio, las cuales se ven en las ecuaciones (2.10) y (2.11) respectivamente [10].

$$V_o = \frac{2 \cdot V_m}{\pi} \quad (2.10)$$

$$V_o = 0.636V_m \quad (2.10a)$$

$$I_o = \frac{2 \cdot I_m}{\pi} \quad (2.11)$$

$$I_o = 0.636I_m \quad (2.11a)$$

Debido a que, el voltaje eficaz es la raíz cuadrada del promedio de números cuadrados, en un periodo senoidal de ambos ciclos positivos su V_{rms} en la carga es igual a la ecuación (2.12):

$$V_{orms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (2.12)$$

Mientras que la corriente tiene el mismo valor que en una senoidal de dos lados positivos. Y cabe aclarar que debido a como está representado el circuito, la corriente I_{orms} es igual a la corriente I_{srms} suministrada por la fuente vea entonces la ecuación (2.13)

$$I_{orms} = I_{srms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2.13)$$

Y la corriente en el diodo sería vea la ecuación(2.14):

$$I_D = \frac{I_m}{\pi} \quad (2.14)$$

O bien puede ser también representado como la ecuación (2.14a)

$$I_D = \frac{I_m}{2} \quad (2.14a)$$

Ahora para las potencias aparente y activa son las siguientes formulas vistas previamente en el subtema 2.4.1. entonces vamos a reescribirlas a continuación :

$$P = V_{orms} \cdot I_{orms} \quad (2.8)$$

$$S = V_{srms} \cdot I_{srms} \quad (2.7)$$

También al observar la corriente de la carga y de la fuente se puede notar que estas son iguales.

$$I_{orms} = I_{srms} \quad (2.15)$$

Por lo tanto, con respecto a la ecuacion (2.19) el factor de potencia quedara:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.9)$$

$$FP = \frac{V_{orms} \cdot I_{orms}}{V_{srms} \cdot I_{srms}} = 1 \quad (2.16)$$

Otra forma de representarlo es:

$$\cos(\theta) = \frac{P}{S} = \frac{V_m^2 \cdot 2R}{V_m^2 \cdot 2R} = 1 \quad (2.16a)$$

Por ende, este el mejor caso en cuanto a eficiencia energética se refiere pues lo que recibe es lo que entrega, esto quiere decir en un concepto ideal claro que este es el circuito más eficiente pues no hay perdidas en cuanto a energía concierne.

2.6. Funcionamiento de media onda con carga resistiva e inductiva (R-L)

Se considera que la carga sea un inductor en serie con una resistencia como se observa en las Figuras 2.5, 2.6 y 2.7 antes del $t = 0s$ el voltaje V_s es negativo y la corriente en el circuito es $0A$. Con posterioridad de $t = 0s$, el diodo se vuelve de polarización directa, y empieza a fluir una corriente, considerando que al diodo como ideal puede decirse que el diodo es una conexión directa como se ve en la Figura 2.7a el cual es el circuito equivalente.

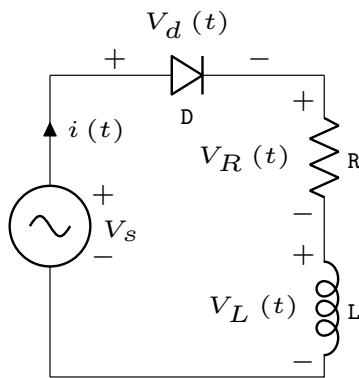


Figura 2.5: Circuito R-L rectificación a media onda.

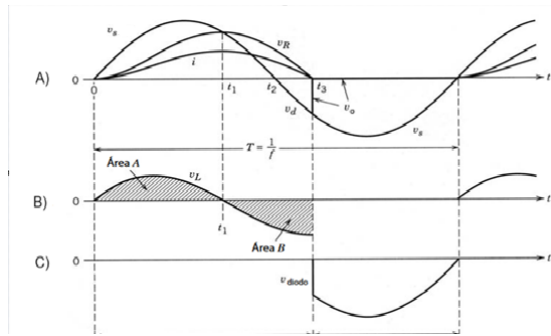
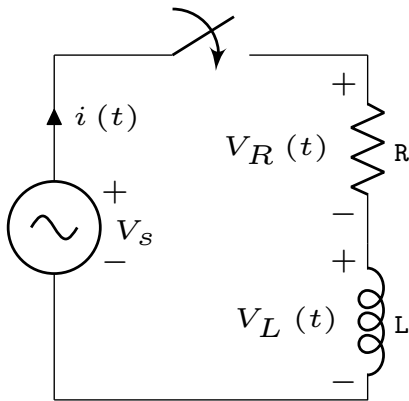
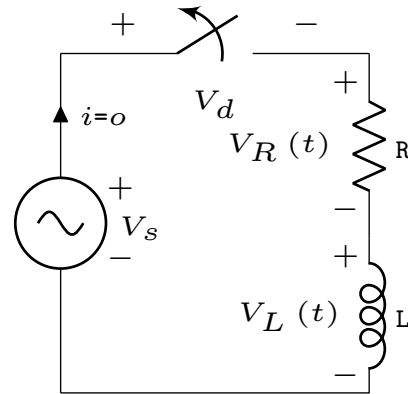


Figura 2.6: Graficas de onda del Circuito RL de media onda [1].



(a) Estado de activación.



(b) Estado de no conducción.

Figura 2.7: Circuito R-L [1].

La corriente en ese circuito se rige por la siguiente ecuación diferencial: [1]

$$V_s = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2.17)$$

Donde el voltaje a través de la bobina se rige por:

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.18)$$

Las tensiones y las corrientes resultantes se ilustran en la Figura 2.6 hasta que se cumpla: $t_1, V_s > V_r$. De ahí que:

$$V_L = V_s - V_r \quad (2.19)$$

Sea positivo, la corriente se acumula, y aumenta la energía almacenada por el inductor más allá de: t_1 , V_L se vuelve negativo, y la corriente empieza a disminuir. Después de t_2 , el voltaje de entrada V_s se vuelve negativo, pero la corriente es aún positiva y el diodo tiene que conducir debido a la energía almacenada en la bobina de inducción. Es hasta el instante de t_3 cuando la corriente se va a cero y el diodo deja de conducir, se obtiene como la ecuación de la bobina que es representada en la ecuación (2.18) [1]:

$$V_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.18)$$

Despejando di de la ecuación (2.18) da la siguiente ecuación (2.20):

$$\frac{1}{L} \cdot V_L \cdot dt = di \quad (2.20)$$

Al integrar la ecuación (2.20) e igualar ambas integrales queda la siguiente ecuación:

$$\frac{V_L}{L} \cdot \int_0^{t3} dt = \int_0^{t3} di \quad (2.21)$$

$$\frac{V_L}{L} \cdot \int_0^{t3} dt = i(t3) - i(0) = 0 \quad (2.21a)$$

$$\frac{V_L}{L} \cdot \int_0^{t3} dt = 0 \quad (2.21b)$$

De la ecuación (2.21b) se puede hacer interpretación gráfica de la ecuación (2.20) al relacionarla con la Figura 2.6b como:

$$V_L \int_0^{t1} dt + V_L \int_{t1}^{t3} dt \quad (2.22)$$

Lo que en términos de áreas de voltio-segundos de las secciones A y B en la Figura B:

$$\text{Área A} - \text{Área B} = 0 \quad (2.23)$$

Por tanto, la corriente se vuelve 0 en t_3 cuando el área $A = B$.

Más allá de T_3 , los voltajes tanto a través de R como de L son cero, y aparece un voltaje de polaridad inversa ($-V_s$) a través del diodo, como se muestra en la Figura 2.6c. Éstas formas de onda se repiten con un periodo por $T = 1/f$ [1].

2.6.1. Análisis para la obtención de las fórmulas

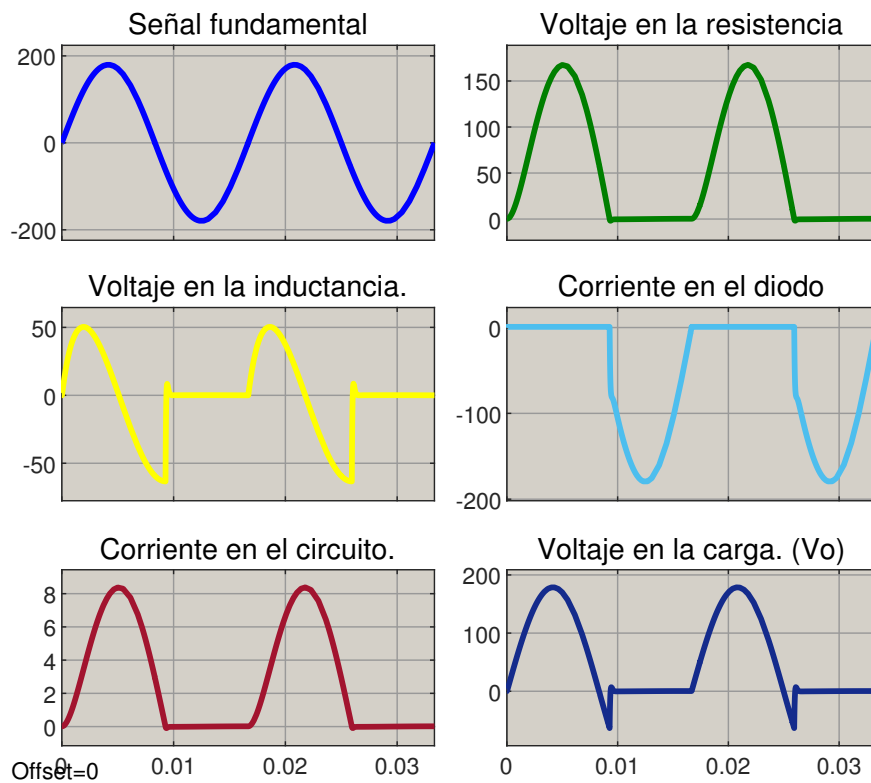


Figura 2.8: Formas de onda del circuito [11].

Para este análisis se considerará la frecuencia con ω siendo la letra que representará la frecuencia y transformando los periodos de t a ωt tras lo anterior se puede obtener la corriente con la siguiente relación, observe la ecuación (2.24)[5][12].

$$i(\omega t) = i_f(\omega t) + i_n(\omega t) \quad (2.24)$$

Siendo:

- i_f = función forzante
- i_n = función natural

Primero veremos la función forzante, esta se aprecia en la ecuación (2.25)

$$i_f(\omega t) = I_m \cdot \sin(\omega t - \theta) \quad (2.25)$$

Siendo:

- $i_f(\omega t)$ la corriente que habrá en estado estable, no existiendo el diodo
- I_m es la corriente máxima

Ahora bien, se tiene la incógnita I_m , cuya ecuación es la (2.26)

$$I_m = \frac{V_m}{Z} \quad (2.26)$$

Z es la impedancia y esta se obtiene de la ecuación (2.27):

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (2.27)$$

Mientras θ se obtiene de la ecuación (2.28):

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \quad (2.28)$$

La forma de la función natural $i_n(\omega t)$ tiene la siguiente solución, observe la ecuación (2.29):

$$i_n(\omega t) = A \cdot e^{\frac{-t}{\tau}} = A \cdot e^{\frac{-\omega t}{\omega \tau}} \quad (2.29)$$

Donde τ es la relación entre la inductancia y la resistencia, ecuación (2.30):

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.30)$$

Tomando las ecuaciones (2.25) y (2.29) en la ecuación (2.24), se obtendrá la ecuación (2.31):

$$i(\omega t) = I_m \cdot \sin(\omega t - \theta) + A \cdot e^{\frac{-\omega t}{\omega \tau}} \quad (2.31)$$

O también se puede sustituir la ecuación (2.26) en la ecuación (2.31), se obtendrá la ecuación (2.32):

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\omega t - \theta) + A \cdot e^{\frac{-\omega t}{\omega \tau}} \quad (2.32)$$

De ahí se puede obtener "A", de la condición inicial $i(0) = 0$, observe la ecuación (2.33):

$$A = -\frac{V_m}{Z} \cdot \sin(-\theta) = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\theta) \quad (2.33)$$

Se puede sustituir la ecuación (2.33) en la ecuación (2.32) dando la ecuación (2.34):

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\omega t - \theta) + \left(\frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\theta) \right) \cdot e^{\frac{-\omega t}{\omega \tau}} \quad (2.34)$$

Ahora bien $i(\omega t)$ pasara a ser nombrada como: $i_o(\omega t)$ la cual es una función de interés y esta permite obtener el valor de la corriente promedio en la carga es decir el valor de I_o y también I_{rms} , lo primero será la ecuación (2.35), " I_o ".

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\beta i_o(\omega t) d\omega t \quad (2.35)$$

Esto ya que es hasta beta (β) donde el diodo deja de rectificar la corriente como se puede observar en la Figura 2.8. Para obtener el valor de β se puede utilizar la ecuación (2.34) sustituyendo $(\omega t) = \beta$.

$$i(\beta) = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\beta - \theta) + \left(\frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\theta) \right) \cdot e^{-\beta/\omega \tau} = 0 \quad (2.36)$$

Al ver esa ecuación se puede observar que no se puede despejar β , debido a esto se tienen que hacer estimaciones para poder obtener el valor de β óptimo, se tiene que utilizar el apoyo de herramientas computacionales matemáticas, una vez obtenido β se puede seguir adelante. Los demás cálculos se obtienen usando las fórmulas del circuito rectificador monofásico, solo que cambiando a las ecuaciones obtenidas [5]:

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\beta i_o(\omega t) d\omega t \quad (2.35)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\int_0^\beta i_o^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.37)$$

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\beta V_m(\omega t) \cdot \sin(\omega t) d\omega t \quad (2.38)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\int_0^\beta V_m^2 \cdot \sin^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.39)$$

2.6.2. Fórmulas de la potencia

La potencia activa (P) y la potencia aparente (S):

$$P = R \cdot I_{rms}^2 \quad (2.8)$$

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (2.7)$$

Y el factor de potencia (FP) es la relación de la potencia activa conocida también como potencia útil y la potencia aparente tomando en cuenta la ecuación (2.9) y sustituyéndola, se obtiene la siguiente relación:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.9)$$

$$FP = \frac{R \cdot I_{rms}^2}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \quad (2.40)$$

2.7. Rectificador monofásico de onda completa con carga resistiva e inductiva (R-L)

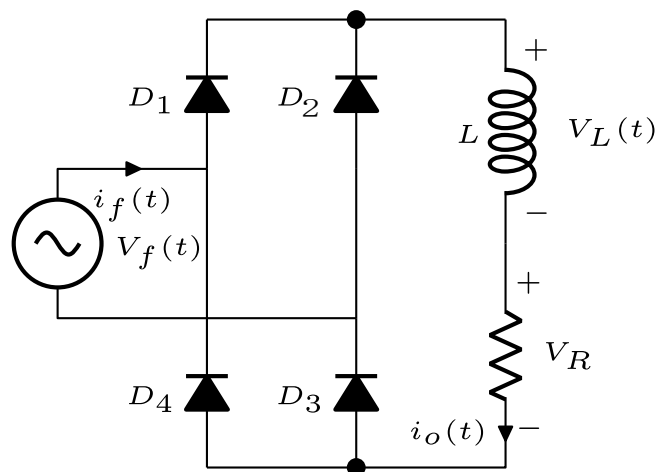


Figura 2.9: Circuito rectificador de onda completa carga RL.

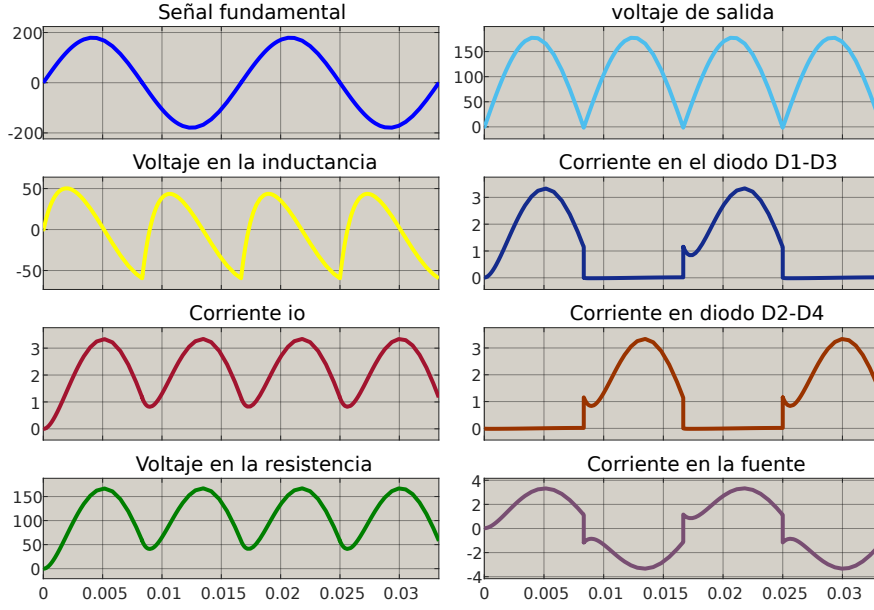


Figura 2.10: Formas de onda del circuito RL [13].

Este circuito cuenta la peculiaridad de que el comportamiento puede presentar voltajes residuales, al momento de observarlo V_o y para su análisis se suele usar las series de Fourier para encontrar su solución, por ello la relación de las fórmulas son las ecuación (2.41) a la ecuación (2.45)[14]:

$$v_0(\omega t) = V_0 + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} |V_n| \cos(n\omega t + \pi) \quad (2.41)$$

Se podría decir que el voltaje total es el voltaje promedio más el voltaje generado por los armónicos que se encuentran en el sistema.

Donde:

$$V_o = \frac{2V_m}{\pi} \quad (2.42)$$

$$V_n = \frac{2V_m}{\pi} \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n+1} \right) \quad (2.43)$$

$$V_{rms} = \frac{|V_n|}{\sqrt{2}} \quad (2.44)$$

Por lo que V_{orms} quedara de la siguiente manera, observe la ecuacion (2.45)

$$V_{rms} = \sqrt{V_0^2 + \left(\frac{V_2}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{V_4}{\sqrt{2}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (2.45)$$

Mientras, en los cálculos con relación de la corriente ocurre lo mismo, así que se tiene que considerar en los circuitos R-L la cantidad de armónicos que se encuentran. Para esta investigación solamente se consideran los primeros 3 armónicos pares. Entonces comencemos con las ecuaciones de corriente I_o .

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.46)$$

Ahora de la ecuación (2.47) ala (2.50) son ecuaciones relacionadas para la obtención de la corriente eficaz en la carga.

$$|I_n| = \frac{|V_n|}{|Z_n|} \quad (2.47)$$

$$|Z_n| = \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2} \quad (2.48)$$

$$I_{nrms} = \frac{|I_n|}{\sqrt{2}} \quad (2.49)$$

$$I_{srms} = \sqrt{I_o^2 + \left(\frac{I_2}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_4}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (2.50)$$

2.7.1. Cálculo de las Potencias en Circuito Rectificador Monofásico de RL de Onda Completa

Y el cálculo de las potencias se puede obtener de las siguientes fórmulas.

$$S = I_{srms} \cdot V_{srms} \quad (2.7)$$

$$P = R \cdot (I_{orms})^2 \quad (2.8)$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.9)$$

En la práctica es poco común encontrar un circuito con carga puramente resistiva, así mismo no hay muchas aplicaciones para un circuito R-L. Sin embargo, mayormente existen los circuitos para operar motores, el cual viene siendo una carga que posee una parte resistiva y una parte inductiva, pero cuando este llega a girar en un estado estable, este se comporta como un generador de energía de forma pasiva, pero ello se podría decir que un circuito rectificador con un motor en su carga es una carga RL-Generador, debido a que este es un circuito mayormente usado, se analizará su comportamiento y su implementación con diodos en la sección 2.8.

2.8. Rectificado monofásico de media onda con carga resistiva-inductiva y generador

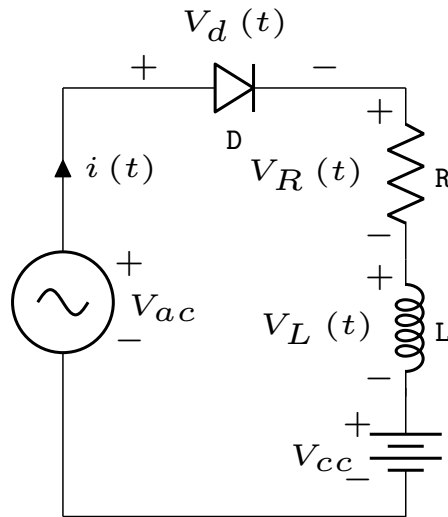


Figura 2.11: Circuito RL-Generador de media onda monofásico.

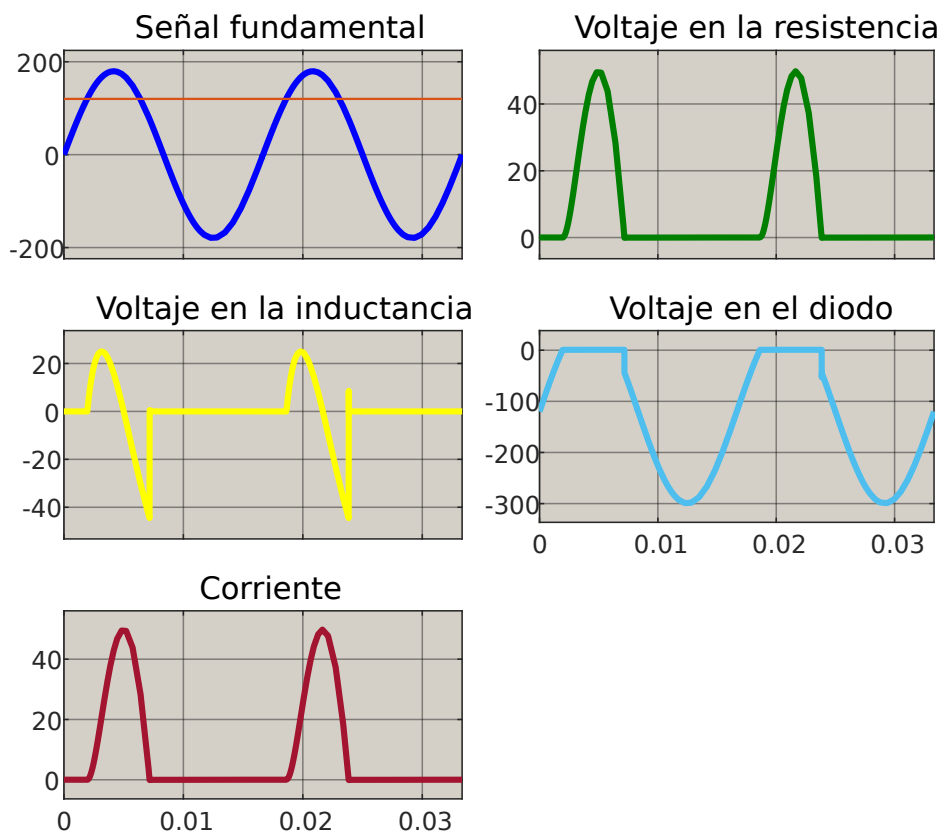


Figura 2.12: Formas de onda del circuito RL-Generador [15].

Cuando un motor es energizado al paso del tiempo si este motor no tiene ningún circuito o componente que haga lo contrario buscará llegar a su estado estable, cuando este llega a su estado estable en ese momento el motor se comportará como una carga RL-Generador.

Cuando se habla de un circuito rectificador monofásico de media onda con carga RL-Generador se hace el estudio del caso más típico para poder observar su comportamiento tal y como se muestra en la Figura 2.11 y Figura 2.12, aclarando que el diodo se idealiza y se considera que su caída de voltaje sobre este sea cero.

Cuando el motor se comporte como un generador en estado estable el diodo empezará a conducir, esto ocurre debido a que $V_s > V_{cc}$ y ocurre en el ángulo α , el cual puede determinarse de acuerdo con la ecuación (2.51) [16]:

$$V_{cc} = V_m(\sin(\alpha)) \quad (2.51)$$

Ahora para obtener $\sin(\alpha)$ es la relación del voltaje del generador en estado estable el diodo empezará a conducir, esto ocurre debido a que $V_s > V_{cc}$ y ocurre en el ángulo alfa, el cual puede determinarse de acuerdo con la ecuación (2.52):

$$\sin(\alpha) = \frac{V_{cc}}{V_m} \quad (2.52)$$

Ya que los valores pueden ser obtenidos por conocimiento de los materiales que se usan es decir son conocidos por el usuario, entonces se puede despejar la ecuación (2.52) y obtener el ángulo α que regirá al circuito:

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{V_{cc}}{V_m} \right) \quad (2.52a)$$

La fuente será llamada para este caso V_f , que es igual a $V(\omega t)$. De la Figura 2.12 se puede definir la (2.53):

$$V_f = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2.53)$$

Al igual que en el caso de carga RL en este caso particular RL-Generador la ecuación relacionada con la corriente está representada por la ecuación (2.24) en la cual se menciona que esta función está dada por una función natural y una función forzante, sin embargo para este circuito la función forzante es la suma de dos funciones gracias al "teorema de

superposiciónza que sería la causada por la fuente alterna y por el fenómeno de generación causado por el motor en estado estable, siendo la siguiente relación:

$$i(\omega t) = i_f(\omega t) + i_n(\omega t) \quad (2.28)$$

$$i_f(\omega t) = i_{f1} + i_{f2} \quad (2.54)$$

Para obtener el cálculo de i_{f1} y de i_{f2} se usa el principio de superposición, el cual funciona considerando las fuentes como fuentes únicas y cortocircuitando las otras, observando cómo afectan cada fuente a los componentes en el circuito y sumando al final todos los casos particulares para observar cómo es que afectan todas.

Entonces en el primer i_{f1} se considera el caso cuando la fuente de alimentación es la V_f y V_{cc} el cual es el motor de CD actuando como generador se considera en corto. Y en el caso i_{f2} , el cual es cuando la fuente V_f se considera en corto y la única fuente de alimentación es V_{cc} , teniendo las siguientes ecuaciones, (2.55) y (2.55a) :

$$i_{f1} = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \theta) \quad (2.55)$$

$$i_{f2} = \frac{-V_{cc}}{R} \quad (2.55a)$$

Para la obtención de theta (θ) se utilizará la ecuación (2.25) usada en el subtema 2.6:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad (2.28)$$

Mientras que Z se obtiene con la ecuación (2.27) usada en el subtema 2.6:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (2.27)$$

Ahora bien, para determinar la función natural se toman las ecuación (2.29):

$$i_n(\omega t) = A \cdot e^{\frac{-\omega t}{\omega \tau}} \quad (2.29)$$

Y τ se obtiene:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.30)$$

Retomando la ecuación (2.24), para este caso analizar la ecuación quedara de la siguiente manera, observar la ecuación (2.56):

$$i(\omega t) = i_{f1} + i_{f2} + i_n \quad (2.56)$$

Sustituyendo " i_{f1} ", " i_{f2} " e i_n con sus ecuaciones, resultará en la ecuación (2.57)

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \cdot \left(\sin(\omega t - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + A \cdot e^{-\frac{\omega t}{\omega \tau}} \right) \quad (2.57)$$

Para obtener en este caso el valor de A se hace $i(\alpha) = 0$ y resulta en la ecuación (2.58):

$$A = \left[-\frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\alpha - \theta) \right] \cdot e^{\frac{\alpha}{\omega \tau}} \quad (2.58)$$

Mencionando la ecuación (2.52a) se puede obtener el valor de alfa.

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{V_{cc}}{V_m} \right) \quad (2.52a)$$

Ahora sustituyendo la ecuación (2.58) en la ecuación (2.57), queda la ecuación (2.59):

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + \left(\left[-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} \right] e^{-\frac{(\omega t)}{\omega \tau}} \cdot e^{\frac{\alpha}{\omega \tau}} \right) \quad (2.59)$$

Y al simplificar el términos de Euler surge la ecuación (2.60):

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + \left(\left[-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} \right] e^{\frac{(\alpha - \omega t)}{\omega \tau}} \right) \quad (2.60)$$

Para el cálculo del ángulo de extinción β debemos tomar la ecuación (2.60) y evaluar $\omega \tau$ con respecto de β , cuando $i(\beta) = 0$ es cuando la corriente se vuelve cero. Pudiendo sustituirse entonces la función teniendo la siguiente ecuación:

$$i(\beta) = \frac{V_m}{Z} \sin(\beta - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + \left(\left[-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} \right] e^{\frac{(\alpha - \beta)}{\omega \tau}} \right) = 0 \quad (2.61)$$

En la ecuación (2.61) algebraica igualada a cero se puede observar que no se puede despejar el valor de β de manera analítica y nuevamente se deberá usar la implementación de una herramienta que pueda auxiliar en el proceso de obtener el valor más preciso para β que satisfaga a esta misma. Una vez obtenida, se podrán resolver las siguientes integrales relacionadas a los valores de interés tales como, I_o , I_{rms} y V_o para comodidad futura cabe

aclarar que $i(\omega\tau)$ pasara a ser llamada como $i_o(\omega\tau)$ únicamente por comodidad.

Comenzamos entonces con la ecuación que nos da la corriente (I_o), ecuación (2.62)

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_o(\omega t) d\omega t \quad (2.62)$$

Mientras que la corriente eficaz estará dada por la ecuación (2.63)

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_o^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.63)$$

Ahora en cuestión de los voltajes el voltaje promedio será dada por la ecuación (2.64).

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\beta}^{\alpha} V_m \cdot \sin(\omega t) d\omega t \quad (2.64)$$

Y por ultimo el voltaje eficaz será dado por la ecuación (2.65)

$$V_o = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_m^2 \cdot \sin^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.65)$$

2.8.1 Potencias en circuito RL-Generador

En este capítulo se definen las ecuaciones para la obtención de las potencias y obtener el cálculo del FP.

Comenzando, se menciona que este circuito cuenta con dos potencias activas las cuales son:

- Potencia absorbida por el generador
- Potencia absorbida por la carga RL

$$P = P_1 + P_2 \quad (2.66)$$

Donde P_1 es la potencia absorbida en el generador en la ecuación (2.67) y P_2 es la potencia absorbida en la carga RL en la ecuación (2.68).

$$P_1 = (V_{cc})(I_o) \quad (2.67)$$

$$P_2 = (R)(I_{rms})^2 \quad (2.68)$$

Por lo tanto, la potencia activa total del circuito es sustituyendo las ecuaciones (2.67) y (2.68) en la ecuación (2.66), nos da la ecuación (2.69):

$$P = (V_{cc})(I_o) + (R)(I_{rms})^2 \quad (2.69)$$

Mientras que la potencia entregada en la fuente es igual a:

$$S = (V_{rms})(I_{rms}) \quad (2.7)$$

$$S = \frac{V_m}{\sqrt{2}}(I_{rms}) \quad (2.70)$$

A lo que el factor de potencia en un circuito RL-Generador queda dada por la ecuación (2.71):

$$FP = \frac{(V_{cc}) \cdot (I_o) + (R)(I_{rms})^2}{\frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot I_{rms}} = \frac{\sqrt{2} [(V_{cc}) \cdot (I_o) + (R)(I_{rms})^2]}{V_m \cdot I_{rms}} \quad (2.71)$$

2.9. Rectificador monofásico de onda completa carga RL- Generador

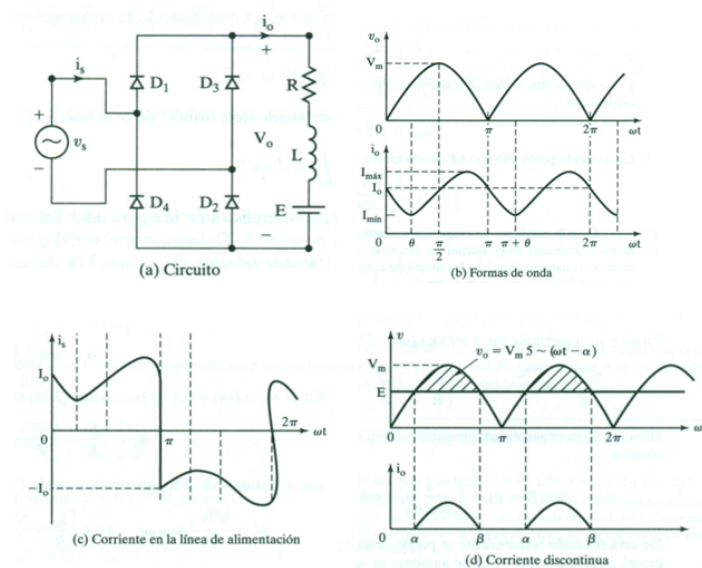


Figura 2.13: a) Circuito RL-Generador onda completa; b) Formas de onda del circuito RL-Generador Onda completa “caso continuo”; c) Corriente en la alimentación; d) Corriente discontinua [4].

Este circuito es muy similar al circuito RL de onda completa, es decir, que se deben utilizar las series de Fourier, pero además se debe de considerar que el circuito RL-generator cuenta con dos casos: el caso continuo y el caso discontinuo.

2.9.1. Comportamiento del circuito en el modo continuo

En estado estable las fórmulas son las ecuaciones (2.72) y (2.73): [17]

$$V'_o = \frac{2V_m}{\pi} - V_{cc} \quad (2.72)$$

$$I_o = \frac{V'_o}{R} = \frac{2V_m}{R\pi} - \frac{V_{cc}}{R} \quad (2.73)$$

Mientras las relaciones con respecto de la serie de Fourier como se vieron en las series se toman de las ecuaciones (2.41), (2.43) y (2.45) solamente que V_o se calcula diferente se convierte en V'_o : con esto se obtienen las ecuaciones (2.74) a la (2.76) mientras que la (2.76) es la ecuación con la que se calcula la corriente eficaz en la carga I_{orms} .

$$v_o(\omega t) = V'_o + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} |V_n| \cos(n\omega t + \pi) \quad (2.74)$$

$$V_n = \frac{2V_m}{\pi} \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n+1} \right) \quad (2.74a)$$

$$V_{orms} = \sqrt{V_o'^2 + \left(\frac{V_2}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{V_4}{\sqrt{2}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (2.75)$$

$$I_{orms} = \sqrt{I_o^2 + \left(\frac{I_2}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{I_4}{\sqrt{2}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (2.76)$$

Recordando que para el cálculo de $I_2, I_4, \dots, I_n$ se utilizan las (2.47), (2.48) y (2.49):

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} \quad (2.47)$$

$$Z_n = 2\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2} \quad (2.48)$$

$$I_{rms} = \frac{|I_n|}{\sqrt{2}} \quad (2.49)$$

2.9.2. Comportamiento del circuito en modo discontinuo

Para estos cálculos se debe observar la Figura 2.13 d), el modo discontinuo es el comportamiento habitual del rectificador de media onda. En la misma se puede observar que la corriente de la carga únicamente fluye durante el intervalo $\alpha < \omega t < \beta$, esto se debe al generador el cual hace que haya un retardo en la conducción de los diodos y por ello se considera que inicia a conducir en el ángulo α , este ángulo se calcula con la ecuación (2.52a). Dicho de otro modo, volveremos a retomar las mismas ecuaciones que el tema 2.8 rectificador controlado de media onda con carga resistiva-inductiva y generador" entonces recapitulando. [16]

$$\sin(\alpha) = \frac{V_{cc}}{V_m} \quad (2.52a)$$

La fuente será llamada V_f para este caso, que es igual a $V(\omega t)$. De esta misma se definió la siguiente relación:

$$V_f = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2.53)$$

$$i(\omega t) = i_f(\omega t) + i_n(\omega t) \quad (2.24)$$

$$i_f(\omega t) = i_{f1} + i_{f2} \quad (2.54)$$

Para obtener el cálculo de i_{f1} y de i_{f2} se usa el principio de superposición, el cual funciona considerando las fuentes como fuentes únicas y cortocircuitando las otras, observando cómo afectan cada fuente a los componentes en el circuito y sumando al final todos los casos particulares para observar cómo es que afectan todas.

Entonces en el primer i_{f1} se considera el caso cuando la fuente de alimentación es la V_f , también mencionada como V_s y V_{cc} el cual es el motor de CD actuando como generador y que se considera en corto. Y en el caso i_{f2} ; el cual es cuando la fuente V_f se considera en corto y la única fuente de alimentación es V_{cc} , teniendo las siguientes relaciones:

$$i_{f1} = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \theta) \quad (2.55)$$

$$i_{f2} = -\frac{V_{cc}}{R} \quad (2.55a)$$

Para la obtención de θ es obtenida por la ecuación (2.28):

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \quad (2.28)$$

Mientras que Z se obtiene con la ecuación (??):

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (2.27)$$

Ahora bien, para determinar la función natural se toma la del caso de media onda en la ecuación (2.25):

$$i_n(\omega t) = A * e^{-\frac{\omega t}{\tau}} \quad (2.29)$$

Y τ se obtiene de la ecuación (2.30):

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.30)$$

Retomando la ecuación (2.24), quedaría ahora de la siguiente forma:

$$i(\omega t) = i_{f1} + i_{f2} + i_n \quad (2.56)$$

Es decir:

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} * (\sin(\omega t - \theta)) - \frac{V_{cc}}{R} - A * e^{-\frac{\omega t}{\tau}} \quad (2.57)$$

Para obtener en este caso, el valor de A se hace $i(\alpha) = 0$, y entonces la ecuación resultante es la (2.58):

$$A = \left[-\frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\alpha - \theta) \right] \cdot e^{\frac{\alpha}{\omega \tau}} \quad (2.58)$$

Haciendo mención, de la ecuación (2.52a) se puede obtener el valor de α :

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{V_{cc}}{V_m} \right) \quad (2.52a)$$

Ahora sustituyendo la ecuación (2.58) en la ecuación (2.57), como se vio en el subtema 2.8:

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + \left[-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} \right] e^{\omega t} \cdot e^{-\omega t} \quad (2.59)$$

Y al agrupar el término de Euler, queda la ecuación (2.60):

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + \left[-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} \right] e^{\frac{\alpha - \omega t}{\omega \tau}} \quad (2.60)$$

Para encontrar β se observa que $i(\beta) = 0$. Pudiendo sustituirse entonces la ecuación (2.60) se obtiene, la ecuación (2.61):

$$i(\beta) = \frac{V_m}{Z} \sin(\beta - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + \left[-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} \right] e^{\frac{\alpha - \beta}{\omega \tau}} = 0 \quad (2.61)$$

Una ecuación que no tiene solución analítica y requiere de un método numérico. Al encontrar el valor de β , se pueden calcular los valores de V_o , I_o , I_{orms} y V_{orms} estos si cambian pues el periodo es hasta π y no hasta 2π .

Comenzamos entonces con la ecuación que nos da la corriente promedio (I_o), ecuación 2.77:

$$I_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_o(\omega t) d\omega t \quad (2.77)$$

Mientras que la corriente eficaz estará dada por la ecuación (2.78):

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_o^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.78)$$

Ahora en cuestión de los voltajes el voltaje promedio será dado por la ecuación (2.79):

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} v_m \sin(\omega t) d\omega t \quad (2.79)$$

Y por último el voltaje eficaz será dado por la ecuación (2.80):

$$V_{orms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} v_m^2 \sin^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.80)$$

2.9.3. Cálculo de las potencias

Para este caso el cálculo de las potencias es igual que su homónimo de media onda, se describen las ecuaciones para la obtención de las potencias y obtener el cálculo del FP del caso de media onda. Estos cálculos aplican tanto en el modo continuo, como en el modo discontinuo.

Recordemos que aquí la potencia activa, cuenta con dos potencias: la consumida por la carga R-L y la del generador.

- Potencia absorbida por el generador
- Potencia absorbida por la carga RL

$$P = P_1 + P_2 \quad (2.66)$$

Donde P_1 es la potencia absorbida en el generador en la ecuación (2.67) y P_2 es la potencia absorbida en la carga RL en la ecuación (2.68).

$$P_1 = (V_{cc})(I_o) \quad (2.67)$$

$$P_2 = (R)(I_{orms})^2 \quad (2.68)$$

Por lo tanto, la potencia activa total del circuito es sustituyendo las ecuaciones (2.67) y (2.68) en la ecuación (2.66), nos dará la ecuación ((2.69):

$$P = (V_{cc})(I_o) + (R)(I_{orms})^2 \quad (2.69)$$

Mientras que la potencia entregada en la fuente es igual a:

$$S = (V_{rms})(I_{rms}) \quad (2.7)$$

$$S = \frac{V_m}{\sqrt{2}}(I_{rms}) \quad (2.70)$$

A lo que el factor de potencia en un circuito RL-Generador queda dada por:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.9)$$

$$FP = \frac{(V_{cc}) \cdot (I_o) + (R)(I_{rms})^2}{\frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot I_{srms}} = \frac{(\sqrt{2})[(V_{cc}) \cdot (I_o) + (R)(I_{rms})^2]}{V_m \cdot I_{srms}} \quad (2.71)$$

2.10. Rectificador monofásico controlado por SCR media onda carga puramente resistiva

Igual que en el caso de los circuitos rectificadores no controlados el caso más sencillo para empezar a comprender un circuito de este tipo es visualizar uno con carga puramente resistiva y empezar a analizar su comportamiento, como el circuito mostrado en la Figura 2.14 el cual es el rectificador monofásico de media onda controlado por SCR.

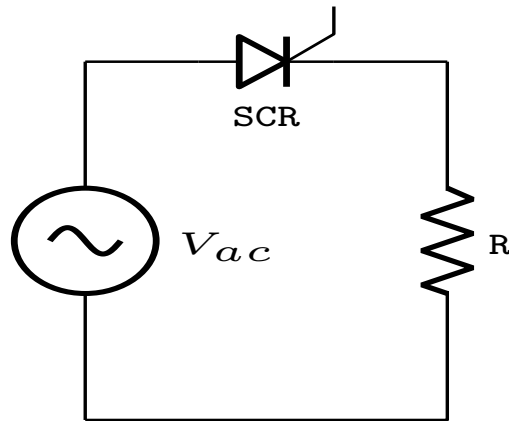


Figura 2.14: Circuito rectificador de media onda controlado por SCR carga R.

Este circuito tiene un tiristor de Silicio el cual se controla por un impulso de corriente por la compuerta, para que fluya corriente entre la compuerta y el cátodo ya que internamente la unión es como una unión PN, al aplicar el pequeño pulso el SCR, entra en conducción y se mantendrá hasta que la corriente que fluya por el tiristor sea menor a la corriente de mantenimiento[18].

Esto, además de rectificar, permite realizar un control de disparo que, gracias a ello, se logra aplicar a la carga una parte de la onda senoidal típicamente y esta rectificarla, al hacer esto podemos manipular el periodo en el que nuestra carga estará operando, la corriente de mantenimiento se pierde cuando la señal senoidal se aproxima a cero, esto visto de manera ideal.

2.10.1. Análisis del rectificador monofásico controlado por SCR de media ondacarga puramente resistiva

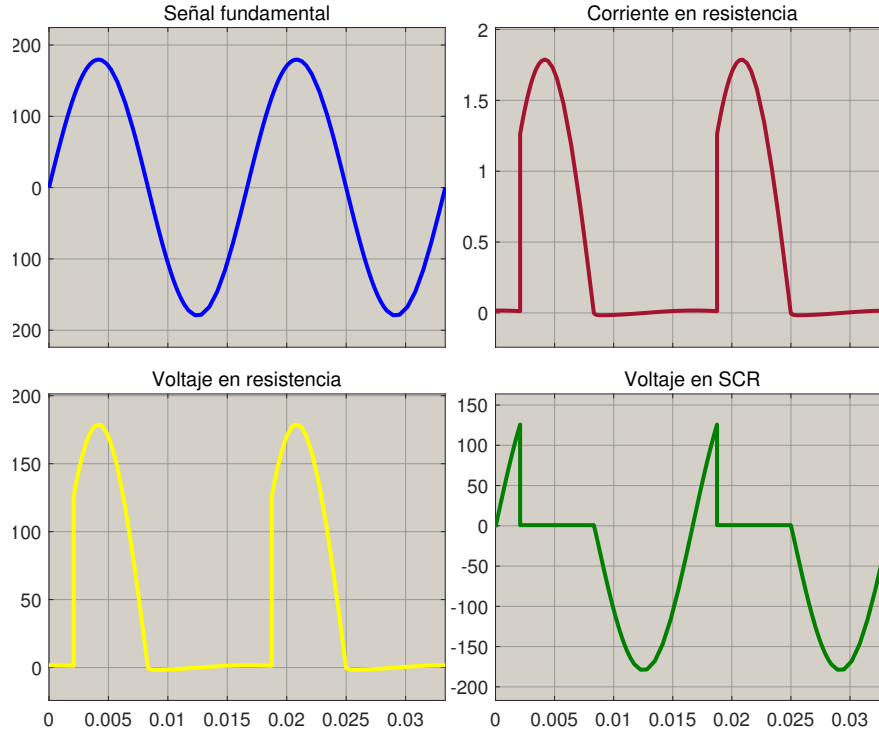


Figura 2.15: Rectificador Monofásico Controlado por SCR.

El análisis del Voltaje en la carga en este caso el voltaje en la resistencia sería el siguiente:

Se parte de analizar donde se activa el triodo SCR, ese momento donde se activa se le conoce como ángulo de disparo y suele ser representado como alfa (α) de modo que para este ejemplo de acuerdo con la gráfica en la Figura 2.15 se activa en $\pi/3$ entonces teniendo en cuenta la ecuación (2.81) [19]

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi} V_m \sin(\omega t) d\omega t \quad (2.81)$$

Para este caso particular la ecuación es la (2.81a):

$$V_o = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos(\alpha_{SCR})) \quad (2.81a)$$

Mientras que el voltaje eficaz de la carga sería dado por la ecuación (2.82)

$$V_{orms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{2\pi} V_0^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.82)$$

$$V_{orms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{2\pi} (V_m \sin(\omega t))^2 d\omega t} \quad (2.82a)$$

Para este caso en particular sería al partir de α hasta 2π como se ve en las ecuaciones (2.82) y (2.82a):

$$V_{orms} = \frac{V_m}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha_{SCR}}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha_{SCR})}{2\pi}} \quad (2.82b)$$

También podría obtenerse el valor de α_{SCR} (se debe recordar que es el alfa en el que se disparará el SCR) despejando la ecuación (2.81a), se obtendrá la ecuación (2.83).

$$\alpha_{SCR} = \cos^{-1} \left(\frac{V_o}{V_m} 2\pi - 1 \right) \quad (2.83)$$

Para estos casos es más practico obtener las corrientes con la relación de la ley de ohm.

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.46)$$

$$I_{orms} = \frac{V_{orms}}{R} \quad (2.84)$$

2.10.2. Potencias en el circuito rectificador monofásico de media onda controlado por un SCR con carga puramente resistiva

Las potencias y el factor de potencia serán los siguientes:

La potencia consumida por la carga es:

$$P = V_{orms} \cdot I_{orms} \quad (2.8)$$

La potencia dada por la fuente:

$$S = V_{srms} \cdot I_{orms} \quad (2.7)$$

El factor de potencia es:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.9)$$

$$FP = \frac{V_{orms} \cdot I_{orms}}{V_{srms} \cdot I_{rms}} \quad (2.9a)$$

2.11. Rectificador monofásico de onda completa controlado por un SCR con carga puramente resistiva

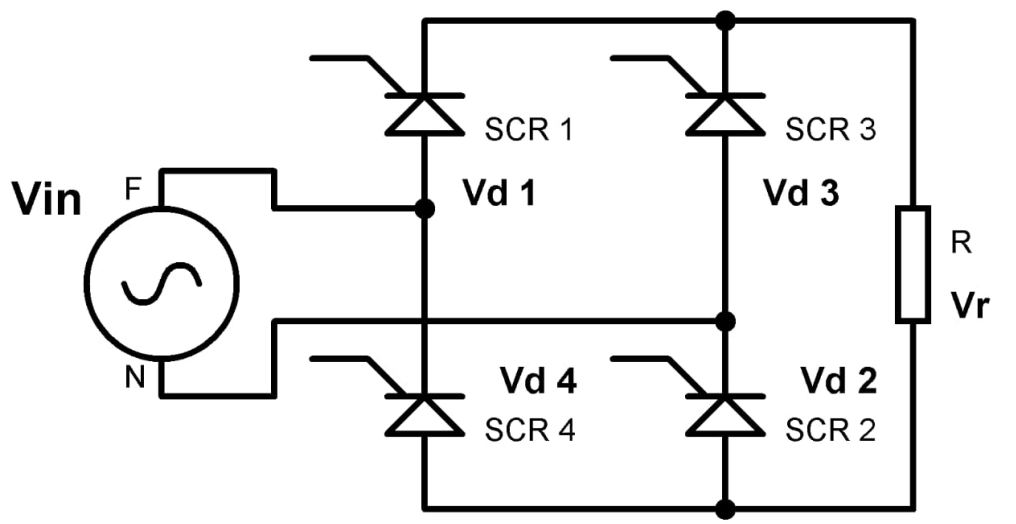


Figura 2.16: Rectificador Monofásico de Onda Completa Controlado por un Diodo SCR con Carga Puramente Resistiva

Después de observar el circuito de media onda ahora se procede a analizar el de onda completa, e igual que en el caso del no controlado se consideró que sean 4 tirístores SCR conectados tipo puente. Análisis del circuito.

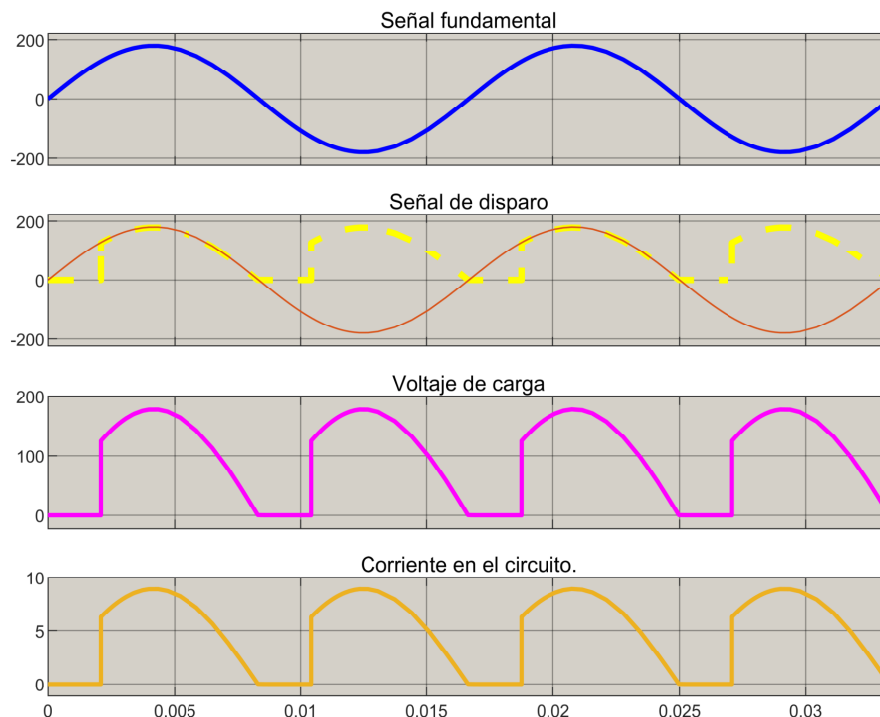


Figura 2.17: Formas de onda del circuito.

Las ecuaciones por utilizar y analizar son (2.85) y (2.85a)

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\pi + \alpha_{SCR}} V_m \sin(\omega t) d\omega t \quad (2.85)$$

$$V_o = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos(\alpha)) \quad (2.85a)$$

Mientras que la corriente es con la ecuación (2.46):

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.46)$$

Mientras que el voltaje eficaz de la carga sería dado por la formulas (2.86) y (2.86a):

$$V_{orms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\pi} (V_m \sin(\omega t))^2 d\omega t} \quad (2.86)$$

$$V_{orms} = V \frac{\sqrt{1}}{m} - \left(\frac{\alpha_{SCR}}{2\pi} \right) + \sin \frac{2\alpha_{SCR}}{4\pi} \quad (2.86a)$$

Y por tanto la corriente eficaz quedará como en la ecuación (??):

$$I_{srms} = I_{orms} = \frac{V_{orms}}{R} \quad (2.84)$$

2.11.1. Potencias en el circuito rectificador monofásico de onda completa controlado por SCR con carga puramente resistiva

La potencia consumida por la carga es:

$$P = V_{orms} \cdot I_{orms} \quad (2.8)$$

La potencia dada por la fuente:

$$S = V_{srms} \cdot I_{srms} \quad (2.7)$$

El factor de potencia es:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.9)$$

2.12. Rectificador monofásico de media onda controlado por SCR con carga RL

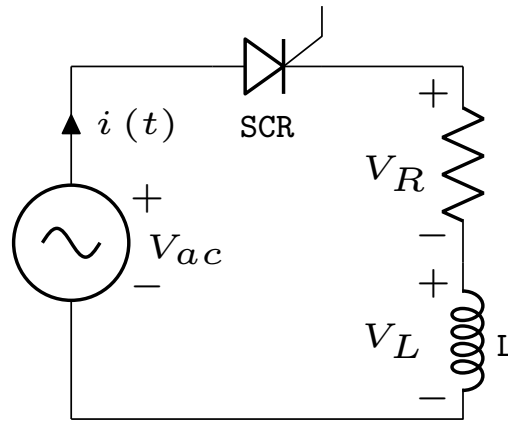


Figura 2.18: Diagrama general de rectificador de media onda.

En un rectificador controlado por media onda, el SCR se enciende en un ángulo de disparo α y se apaga en un ángulo de extinción β . La forma de onda del voltaje de salida es positiva solo durante la mitad positiva del ciclo de la fuente de alimentación. Y esta depende de cuando se dispara el SCR, y de donde se extingue la corriente gracias a su carga inductiva.

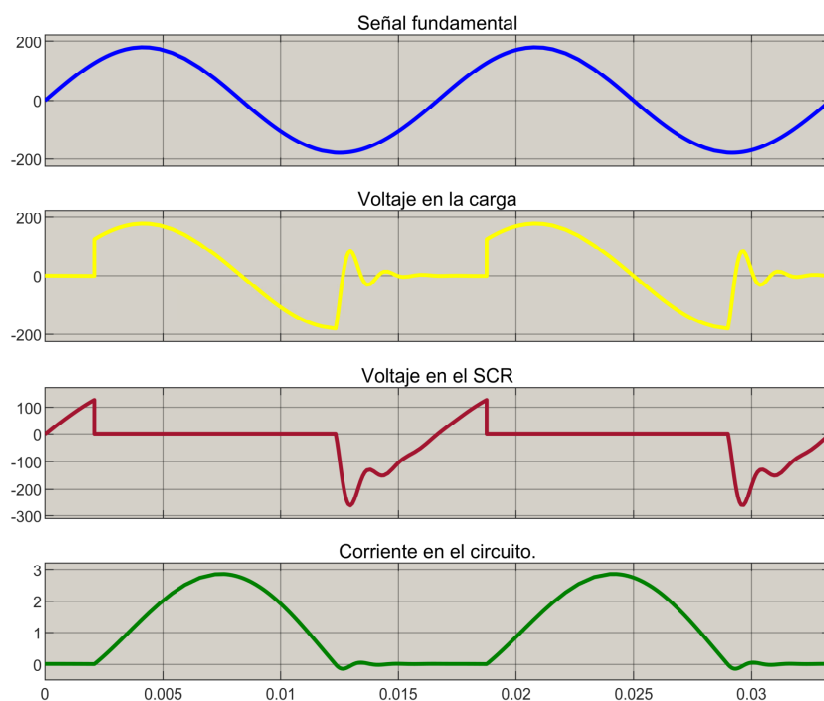


Figura 2.19: Formas de onda con respecto del voltaje en el rectificador RL media onda [5].

2.12.1. Fórmulas

Lo primero sería dejar en claro que el comportamiento de este circuito sería similar a su forma no controlada, cuya formula está dada por la ecuación (2.34): [20]

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\omega t - \theta) + \left(\frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\theta) \right) \cdot e^{\frac{-\omega t}{\omega \tau}} \quad (2.34)$$

Ya que viene de la ecuación (2.32)

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\omega t - \theta) + A \cdot e^{\frac{-\omega t}{\omega \tau}} \quad (2.32)$$

Recordemos que la ecuación viene del determinar "A", se determina de $i(\alpha) = 0$

$$A = -\frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\alpha_{SCR} - \theta) \cdot e^{\frac{\alpha_{SCR}}{\omega \tau}} \quad (2.33)$$

Entonces la corriente promedio en la carga queda como en la ecuación (2.87)

$$i_o(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\omega t - \theta) + \left(-\frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\alpha_{SCR} - \theta) \right) \cdot e^{\frac{\alpha_{SCR} - \omega t}{\omega \tau}} \quad (2.87)$$

Para todo ωt que $\alpha \leq \omega t \leq \beta$, pero entonces toca obtener el valor de β ; para calcular el ángulo de extinción beta se haría donde $i(\omega t) = 0, \omega t = \beta$:

$$0 = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\beta - \theta) - \left(\frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\alpha_{SCR} - \theta) \right) \cdot e^{\frac{\alpha_{SCR} - \beta}{\omega \tau}} \quad (2.88)$$

Como se puede observar de la ecuación (2.87) no es posible despejar beta y obtener una solución analítica, por lo que toca usar algún método numérico para poder obtener β .

Corriente eléctrica en la carga (I_o) será dada por la ecuación (2.89):

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} i_o(\omega t) d\omega t \quad (2.89)$$

Corriente eléctrica en la carga (I_{orms}) será dada por la ecuación (2.90):

$$I_{orms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} i_o^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.90)$$

Voltaje promedio en la Carga (V_o) será dada por la ecuación (2.91):

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} V_m \cdot \sin(\omega t) d\omega t \quad (2.91)$$

Y para este caso particular se puede utilizar la ecuación (2.91a)

$$V_o = \frac{V_m}{2\pi} (\cos(\alpha_{SCR}) - \cos(\beta)) \quad (2.91a)$$

Voltaje eficaz en la carga (V_{orms}) será dada por la ecuación (2.92):

$$V_{orms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} V_m \cdot \sin^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.92)$$

2.12.2. Fórmulas de potencia

$$P = R \cdot (I_{orms}^2) \quad (2.93)$$

$$S = V_{srms} \cdot I_{orms} \quad (2.7)$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.9)$$

2.12.3. Fórmulas del tríodo SCR

$$I_{SCR} = I_o \quad (2.94)$$

Con respecto del SCR normalmente el parámetro que te entrega el fabricante es el voltaje de pico directo, pero en este parámetro siempre se ha mencionado la magnitud, así que solo se hará mención que el parámetro aquí es también para el pico directo.

$$V_{PI} = |V_m| = V_{PD} \quad (2.95)$$

2.13. Circuito rectificador de onda completa controlado por SCR con carga RL

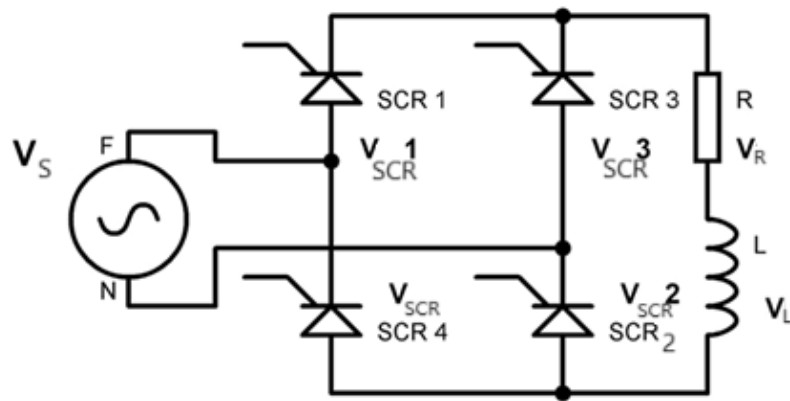


Figura 2.20: Circuito rectificador controlado por SCR con RL de onda completa.

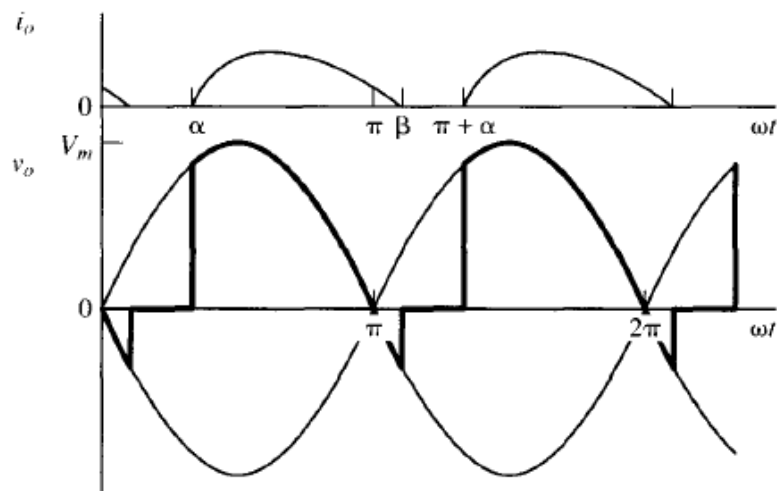


Figura 2.21: Comportamiento en corriente discontinua [5].

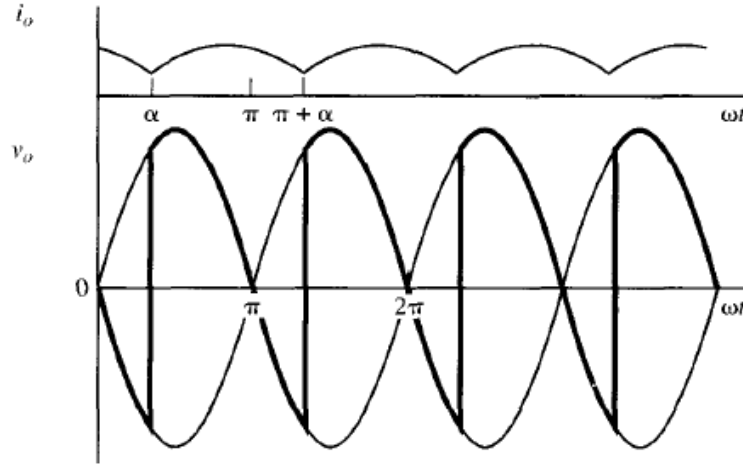


Figura 2.22: Comportamiento con corriente Continua [5].

Como se puede notar, este circuito cuenta dos modos de operación, el primer modo, es el modo discontinuo, este comportamiento seria el mismo modo que el caso anterior de media onda sin embargo lo que cambia es el periodo cambiando de 2π a π . Como ya se ha visto en casos anteriores.

Se puede demostrar que ,cuando el ángulo de disparo α es menor o igual al ángulo de fase θ , el circuito se comporta en modo continuo. En caso contrario, el comportamiento seria discontinuo, primero se verá el caso discontinuo. [21]

2.13.1. Fórmulas en circuito rectificador RL onda completa, caso discontinuo

Corriente eléctrica promedio en la carga (I_o) será dada por la ecuación (2.96):

$$I_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} i_o(\omega t) d\omega t \quad (2.96)$$

Corriente eléctrica eficaz en la carga (I_{orms}) será dada por la ecuación (2.97):

$$I_{orms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} i_o^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.97)$$

Voltaje Promedio en la Carga (V_o) será dada por la ecuación (2.98):

$$V_o = \frac{V_m}{\pi} (\cos(\alpha_{SCR}) - \cos(\beta)) \quad (2.98)$$

Voltaje eficaz en la carga (V_{orms}) será dada por la ecuación (2.99):

$$V_{orms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} V_o(\omega t) d\omega t} \quad (2.99)$$

2.13.2. Fórmulas en circuito RL onda completa caso continuo

Voltaje de salida promedio (V_o) será dada por la ecuación (2.100):

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\pi + \alpha_{SCR}} V_m \cdot \text{sen}(\omega t) d\omega t \quad (2.100)$$

$$2 \frac{V_m}{\pi} \cos(\alpha_{SCR}) \quad (2.100a)$$

Corriente de salida promedio (I_o) será dada por la ecuación (2.46):

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.46)$$

En cuanto se trata a los voltajes y corrientes eficaces, es un análisis más profundo, usando series de Fourier, a continuación, las fórmulas más relacionadas:

Voltaje de salida eficaz (V_{orms}):

$$v_o(\omega t) = V_o + \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} V_n \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (2.101)$$

$$V_{orms} = \sqrt{V_o^2 + \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_n}{2\sqrt{2}} \right)^2} \quad (2.101a)$$

Donde:

$$V_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.101b)$$

Donde :

$$a_n = 2 \frac{V_m}{\pi} \left[\frac{\cos(n+1)\alpha_{SCR}}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha_{SCR}}{n-1} \right] \quad (2.102)$$

$$b_n = 2 \frac{V_m}{\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha_{SCR}}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha_{SCR}}{n-1} \right] \quad (2.102a)$$

Corriente de salida eficaz (I_{rms}) será dada por la ecuación (2.103):

$$I_{orms} = \sqrt{I_o^2 + \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} \left(\frac{I_n}{2\sqrt{2}} \right)^2} \quad (2.103)$$

Donde:

$$I_n = \frac{V_n}{\sqrt{(R^2 - n\omega L^2)}} = \frac{V_n}{Z_n} \quad (2.104)$$

2.13.3. Fórmulas de potencia

$$P = R \cdot (I_{orms}^2) \quad (2.93)$$

$$S = V_{rms} \cdot I_{orms} \quad (2.7)$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.9)$$

2.13.4. Fórmulas del triodo SCR

$$I_{SCR} = \frac{I_o}{2} \quad (2.105)$$

$$|V_{PI}| = |V_m| = V_{PD} \quad (2.95)$$

2.14. Circuito rectificador media onda controlado SCR carga RLG

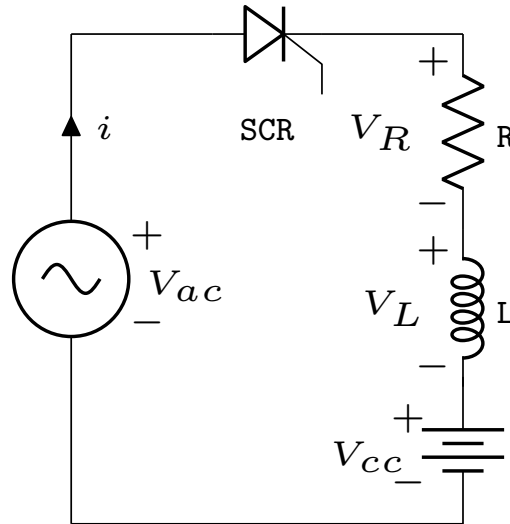


Figura 2.23: Circuito Rectificador carga RLG de media onda.

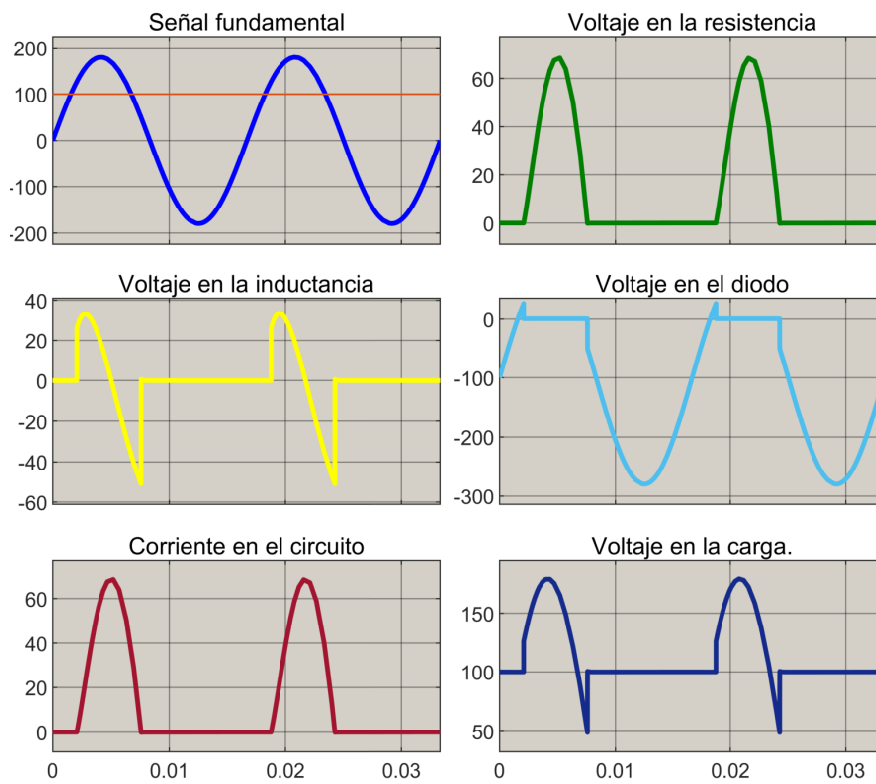


Figura 2.24: Graficas circuito RLG de media onda.

2.14.1. Fórmulas del circuito rectificador de media onda controlado por SCR carga RLG.

Corriente de Salida promedio (i_o) será dada por la ecuación (2.106): [22]

$$i_o(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + \left[-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha_{SCR} - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} \right] * e^{\left(\frac{\alpha_{SCR} - \omega t}{\omega \tau}\right)} \quad (2.106)$$

Donde:

$$\alpha_{SCR} = \text{es el angulo de disparo del SCR}$$

El cual debe ser superior a α_{SCR} mayor o igual a Cero $\alpha_{SCR} \geq 0$.

Corriente de salida promedio (I_o) será dada por la ecuación (2.107):

$$I_o = \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} i_o(\omega t) d\omega t \quad (2.107)$$

Mientras que el valor de β se obtiene de $i(\beta) = 0$ como se ve en la ecuación (2.108)

$$i(\beta) = \frac{V_m}{Z} \sin(\beta - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + \left[-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha_{SCR} - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} \right] e^{\frac{\alpha_{SCR} - \beta}{\omega \tau}} = 0 \quad (2.108)$$

Corriente de salida eficaz (I_{orms}) será dada por la ecuación (2.109):

$$I_{orms} = 2\sqrt{i_o^2(\omega t) d\omega t} \quad (2.109)$$

2.14.2. Fórmulas de Potencia

$$P = R \cdot I_{orms}^2 + V_{CC} \cdot I_o \quad (2.69)$$

$$S = V_{rms} \cdot I_{orms} \quad (2.7)$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.9)$$

2.14.3 Fórmulas del Trío SCR

$$I_{SCR} = I_o \quad (2.94)$$

$$|V_P| = |V_m| = V_{PD} \quad (2.95)$$

2.15. Lenguaje de programación para la herramienta

Para este proyecto se consideraron la posibilidad de realizarlo en un software de cálculos matemáticos el cual tuviera una extensión que permita realizar gráficas, y para ello se estudiaron los siguientes programas.

Software de análisis numérico: Un software de análisis numérico es un programa que simula procesos matemáticos complejos aplicados a procesos del mundo real.

Ejemplos de software matemáticos son:

- GeoGebra
- Scilllab
- Matlab
- GNU Octave
- Microsoft Mathematics

Sin embargo, de estos se rescatan dos Matlab y GNU Octave ambos cuentan con su propio lenguaje de programación.

GNU Octave es de uso libre mientras que Matlab requiere de una licencia lo cual es conveniente para investigaciones académicas. [21]

2.15.1. El programa OCTAVE

Octave o GNU Octave es un programa libre para realizar cálculos numéricos. Como indica su nombre es parte del proyecto GNU. Apoyado en una amplia comunidad de de-

sarrolladores y usuarios, Octave cuenta con herramientas para la resolución de problemas de cálculo numérico lineales y no lineales: álgebra lineal, aproximación de raíces de ecuaciones, integración numérica, integración de ecuaciones diferenciales, etc., así como para la representación de gráficos en dos y tres dimensiones. Es fácilmente extensible y adaptable mediante funciones definidas por el usuario, bien utilizando el propio lenguaje de Octave o bien mediante módulos escritos en C++, C, Fortran u otros lenguajes. [22]

El proyecto fue creado alrededor del año 1988 pero con la finalidad de ser utilizado en un curso de diseño de reactores químicos. Posteriormente en el año 1992 se decide extenderlo y comienza su desarrollo hasta nuestros días. Y sus aplicaciones son diversas en distintas ramas de la ciencia. Octave se utiliza normalmente a través de su interfaz de línea de comandos interactiva, pero también se puede utilizar para escribir programas no interactivos. El lenguaje de programación Octave es bastante similar a Matlab, por lo que la mayoría de los programas son reutilizables en este lenguaje.

GNU Octave

El proyecto GNU Octave es un proyecto de software libre (liberado bajo la licencia GPL) mediante el cual se describe e implementa un lenguaje de alto nivel dirigido principalmente a cálculos y computación numérica. El software de Octave puede descargarse para BSD, GNU/Linux, macOS y Microsoft Windows.

Octave proporciona una interfaz de línea de órdenes mediante a cuál se puede resolver de forma numérica problemas lineales y no lineales, así como realizar experimentos numéricos. También se pueden utilizar herramientas diversas que permiten resolver problemas de álgebra lineal, encontrar raíces de ecuación no lineales, integrar funciones comunes, manipular polinomios, etc.

El software es fácilmente extensible mediante paquetes y personalizable pudiendo implementar funciones en el propio lenguaje de Octave, que es mayoritariamente compatible con Matlab, o utilizando módulos escritas en otros lenguajes como pueden ser C/C++ o Fortran.

MathWorks es una multinacional especializada en el desarrollo de software de ingeniería. Fue fundada en 1984 por Jack Little y Cleve Moler, que identificaron la necesidad entre ingenieros y científicos de un entorno de computación más potente y productivo más allá de los proporcionados por lenguajes como Fortran y C. Combinaron su experiencia en matemáticas, ingeniería e informática para desarrollar MATLAB.

2.15.2. ¿Qué es MATLAB?

MATLAB® es una plataforma de programación diseñado específicamente para los ingenieros y científicos, para analizar y diseñar sistemas y productos que transforman nuestro mundo. MATLAB es un lenguaje basado en matrices que permite la expresión más natural de las matemáticas computacionales.

¿Qué se puede hacer con MATLAB?

- Analizar datos.
- Desarrollar algoritmos.
- Crear modelos y aplicaciones.

MATLAB permite llevar las ideas de la investigación a la producción mediante el despliegue en aplicaciones empresariales y dispositivos integrados, así como la integración con Simulink® y el diseño basado en modelos. [23]

Al poder desarrollar unos algoritmos y crear modelos y aplicaciones esto permite que pueda ser de utilidad para la elaboración del proyecto que se busca realizar para esta tesis.

2.15.3. Diferencias entre Octave y Matlab

La gente frecuentemente se pregunta si hay algo para tener en cuenta al ejecutar un código de Matlab en Octave, si al compartirlo habrá inconvenientes con el código, etc.

Entre Matlab y Octave existen algunas diferencias, sin embargo, estas mismas entre los dos se consideran errores. Octave podría considerar que el error está en Matlab y no hacer nada al respecto, pero en general la funcionalidad es casi idéntica. Si se encuentra una diferencia funcional importante entre el comportamiento de Octave y Matlab, se debe enviar

una descripción de esta diferencia (con un código que ilustre la diferencia de ser posible) Además, Octave agrega algunas extensiones sintácticas a Matlab que pueden causar algunos problemas al intercambiar archivos entre usuarios de Matlab y Octave. [21]

Como tanto Octave como Matlab están en constante desarrollo, la información de esta sección está sujeta a cambios. Actualmente los dos softwares tienen una mejor compatibilidad.

Diferencias en la sintaxis principal

Hay algunas sintaxis centrales de Matlab que Octave no acepta, siendo éstas:

- Algunas limitaciones en el uso de identificadores de funciones. La principal diferencia está relacionada con las reglas de alcance de funciones anidadas (como se indica arriba) y su uso con identificadores de funciones.
- Algunas limitaciones de las listas de argumentos variables en el LHS de una expresión, aunque se aceptan los tipos más comunes.
- La programación orientada a objetos Matlab `classdef` solo se admite parcialmente; consulte `classdef` para obtener más detalles.

Simulink

Octave en sí no incluye soporte para Simulink. Normalmente, los modelos de Simulink van por detrás de la investigación y son menos flexibles, por lo que no deberían utilizarse en un entorno de investigación. Sin embargo, algunos usuarios de Matlab que intentan utilizar Octave se quejan de esta falta.

2.15.4. Conclusiones en los softwares

Es conveniente realizar de ser posible el código o códigos para esta investigación particular en Matlab y trasminarlos o pasarlos al software GNU Octave ya que Octave cuenta con una interfaz más compleja y por ello puede asimilar mayor mente y sin errores los códigos hechos en Matlab y cuenta con una comunidad más activa ya que Octave es completamente software de uso libre mientras que Matlab es un software de paga con algunas ventajas

para estudiantes o investigadores. Así mismo Octave convendría más ya que al ser de uso libre llegaría a más personas. Sin embargo, si el software se decidiera dejar para su uso libre en foros de interés bastaría con que se programe de una manera sencilla sin usar funciones complejas que acorten el código.

Análisis de los circuitos y el software a programar

Introducción

En este capítulo se abordará un acercamiento del software GNU Octave para la solución de los circuitos que se buscan resolver en este proyecto, abordando el funcionamiento de los programas individuales y una versión de la herramienta computacional en este software. Debido a la escasez de manuales técnicos centrados en aplicaciones de rectificadores en Octave/MATLAB, se optó por desarrollar herramientas propias, guiadas por los conceptos teóricos previamente citados.

El circuito más sencillo es el circuito rectificador no controlado de media onda cargapuramente resistiva, este circuito es poco útil ya que es ineficiente pues tiene mucha pérdida al momento de rectificar, pero se considera este primer circuito para poder partir de lo que tiene en común con los demás circuitos. Visto como un problema para analizar con un programa, se hizo el siguiente análisis:

- Que elementos serán las variables de entrada.
- Que elementos serán las variables de salidas.
- Que procedimientos se harán en el interior del programa.

Entonces en este primer circuito, se ve que la carga y el voltaje de la fuente de alimentación de C.A., son dos variables de los que el usuario tendría conocimiento, las variables de salidas o elementos de salida, serían entonces todos los valores de interés a considerar: la corriente eficaz, el voltaje eficaz en la carga, la corriente media, el voltaje medio en la carga, la corriente en el elemento de rectificación y la potencia consumida en el circuito, también claro el factor de potencia con el cual se puede analizar qué tan eficaz es el circuito.

Teniendo esto en mente, lo primero fue usar un programa de fácil acceso, no uso, sino acceso, pues así podrían mayor número de personas acceder a él, en este caso se utilizará el programa GNU Octave y se analizará su funcionamiento.

3.1. Acercamiento al programa GNU Octave para la elaboración de la herramienta computacional.



Figura 3.1: Página de inicio de Octave, Ventana de comandos.

Cuando se abre el programa, este comienza en algo similar a lo mostrado en la Figura 3.1, en la ventana de comandos y las pestañas se encuentran en la parte inferior, ventana de comandos, documentación, editor de variables y editor.

Las más importantes son dos ventanas: la ventana de comandos, que será como el usuario puede interactuar con el programa una vez se esté corriendo; y el editor, el cual es donde el programador hace el código para que funcione el programa en cuestión.

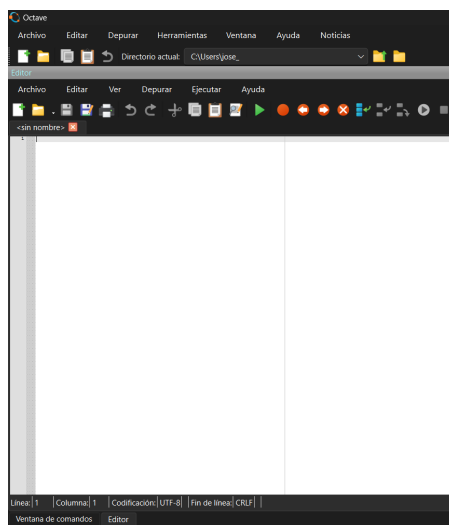


Figura 3.2: Página de inicio de Octave Editor.

3.1.1. Editor GNU

El editor es donde se comienza a programar, algo importante que mencionar del programa GNU, es que este cuenta con librerías preinstaladas, pero deben mandarse a llamar en cada programa, para reducir el peso del programa y ayudar a su funcionamiento en el consumo de recursos, Octave, maneja sus recursos como no activados por así mencionarlos, y para que el recurso se utilice, debe ser llamado previamente antes de usarse. A esto se le llama cargar paqueterías. Y suele usarse al comenzar el programa.

3.2. Circuito rectificador de media onda no controlado carga R, codificación en Octave

El circuito rectificador de media onda (como el de onda completa) con carga R no es difícil de calcular, sus fórmulas no son complejas, ya que éstas son operaciones aritméticas. Gracias a ello, se pueden corroborar fácilmente los resultados obtenidos por el programa, realizando las operaciones manualmente, sin que esto resulte laborioso.

El programa en el software Octave correspondiente al circuito rectificador de media onda con carga R, quedó como se muestra en la Figura 3.3 y Figura 3.4 . Para informar un poco más de información de este proyecto, se explicará la siguiente secuencia, la cual es la lógica de este programa.

3.2.1. Explicación de código

```
1 clc; clear all; close all;
2 format short
3 fprintf("CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE MEDIA ONDA CON CARGA R No controlado
   ↪ :\n ")
4 %circuito Rectificador de media onda con carga puramente resistiva
5 Vrms=input("introduce el valor del voltaje Eficaz o VRMS en Volts: ")
6 %poner un condicional para no aceptar valores diferentes de numero ni vm =0
7 R= input("introduce el valor de la carga resistiva en Ohms: ")
8 %poner un condicional para no aceptar valores diferentes de numero ni
9 %valores negativos ni R=0fprintf("el valor de vrms%12.4f/n",Vrms)
10 %valores de la fuente
11 fprintf("el valor del voltaje pico o voltaje maximo en volts es: ")
12 Vm=Vrms*sqrt(2);
13 fprintf("el valor de la corriente maxima en Ampers es: ")
```

Figura 3.3: Código Gnu Octave circuito Rect. NC media onda carga R parte 1.

```

14 Im=Vm/R;
15 fprintf("el valor de la corriente maxima en la carga en Ampers es: ")
16 Vs= Vm/(sqrt(2));
17 Vrms=Vs
18 %valores del diodo
19 fprintf("La corriente que fluye en el diodo en Ampers")
20 ID=Im/2
21 fprintf("el voltaje de pico inverso que circula por el diodo en volts es: ")
22 Vroptu=Vm*(1)
23 fprintf("se recomienda que el diodo soporte mas de %f",ID,"en Amperios\n\\n" )
24 fprintf("se recomienda que el diodo soporte mas de %f",Vroptu," en volts\\n" )
25 %valores de la carga
26 fprintf("\n el voltaje promedio en la carga: ")
27 Voprom=Vm/pi
28 fprintf("la corriente promedio en la carga: ")
29 Ioprom=Vm/(pi*R)
30 fprintf("el voltaje eficaz en la carga: ")
31 Vorms=Vm/2
32 Vrms=(Vm)/(sqrt(2));
33 fprintf("el valor de la corriente efectiva en amperios es: ")
34 Irms=(Im)/2
35 %potencias
36 fprintf("el valor de la potencia suministrada por la fuente es: ")
37 S=Vrms * Irms
38 fprintf("La potencia absorbida por la carga es: ")
39 P=Ioprom*Vorms
40 fprintf("el factor de potencia es: ")
41 Fp=P/S

```

Figura 3.4: Código Gnu Octave circuito Rect. NC media onda carga R parte 2.

Primero se limpia la ventana de comandos, toda variable utilizada con anterioridad y se cierra toda gráfica o ventana emergente abierta, esto para poder utilizar los recursos del equipo y no saturarlos. Lo segundo es que se le solicita al usuario los valores de las variables de entrada que se utilizarán para realizar los cálculos; para este caso, los valores solicitados son dos, el voltaje eficaz de la fuente en voltios como unidad base, y el valor de la carga en ohms como unidad base, no se incluye el dato de la frecuencia ya que en este tipo de circuito no influye, como en otros circuitos que se analizarán más adelante. Como este programa es idealizado, es decir, la caída de voltaje en el diodo es cero, este dato tampoco se solicita. Tras introducir dichos datos por el usuario, lo siguiente es programar lo que debe realizar, que son hacer los cálculos correspondientes de acuerdo con las fórmulas, mencionadas en el capítulo 2 Marco teórico, esto ya no lo ve el usuario, y por último se programa también el mostrar cada uno de los resultados de las variables de interés.

Esta es la lógica que se realizó para la elaboración de estos programas para GNU Octave véase la Figura 3.5.

Logica del proceso en el que los programas individuales trabajan.

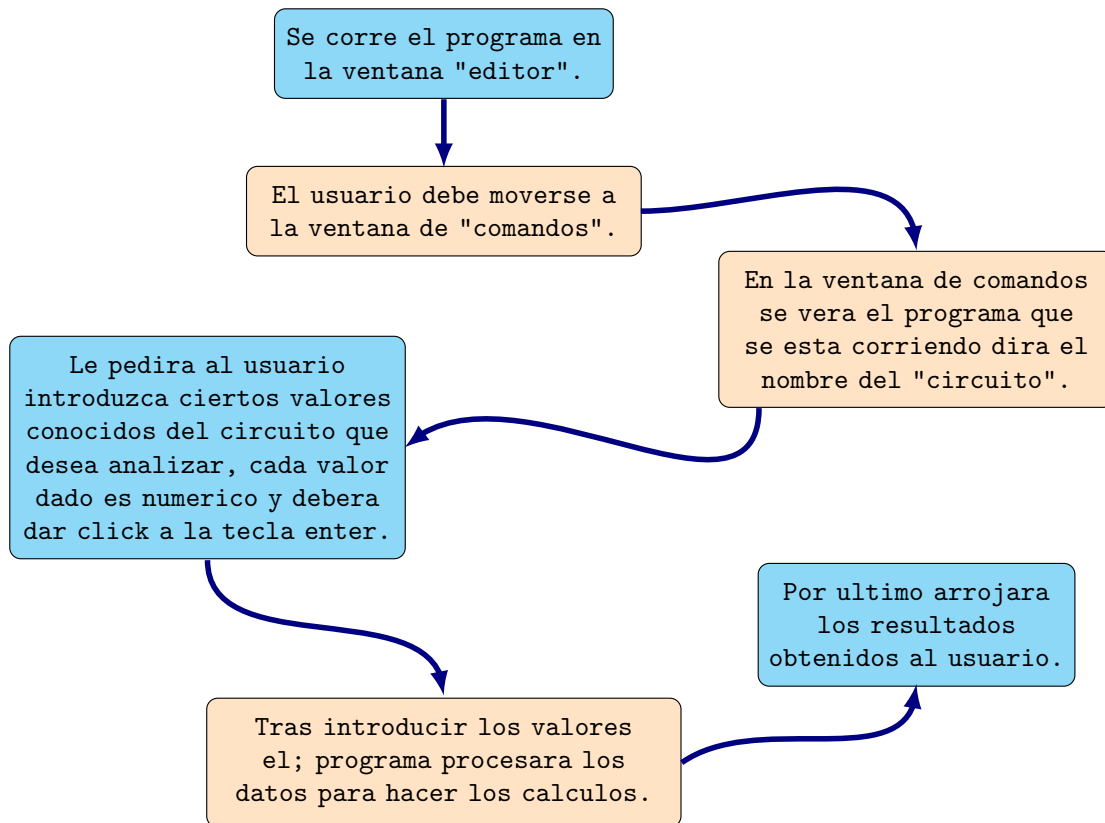


Figura 3.5: Diagrama de flujo para la lógica de la programación.

Una vez se corre el programa y se llena los datos se ven los resultados como se muestra en la Figura 3.6

```
Ventana de comandos
Introduce el valor del voltaje eficaz (VRMS) en Volts: 127
Introduce el valor de la carga resistiva en Ohms: 100
El valor de VRMS:      127.0000
El valor del voltaje pico (Vm) en Volts es: 179.605122
El valor de la corriente maxima en la carga en Amperes es: 1.796051
El valor de VRMS en la carga: 127.000000
La corriente que fluye en el diodo en Amperes: 0.898026
El voltaje de pico inverso en el diodo en Volts es: 179.605122
Se recomienda que el diodo soporte mas de 0.898026 A
Se recomienda que el diodo soporte mas de 179.605122 V

Voltaje promedio en la carga: 57.170086
Corriente promedio en la carga: 0.571701
Voltaje RMS en la carga: 89.802561
Corriente RMS en la carga: 0.898026
Potencia aparente suministrada por la fuente: 114.049253
Potencia absorbida por la carga: 80.645000
Factor de potencia: 0.707107
```

Figura 3.6: Muestra de resultados circuito Rectificador No controlado Carga R de media onda.

En el programa de octave la interfaz gráfica del usuario o GUI por sus siglas en ingles no cuenta con posibilidad de modificarlo mucho, pero para primeros alcances de esta investigación no se vio necesario modificarle nada obteniendo como resultado un recuadro con todos los resultados y brincando renglón de respuesta en respuesta.

3.3. Circuito rectificador de onda completa no controlado carga R, codificación en Octave

Semejante al caso de media onda, el caso de onda completa no requiere de instrucciones especiales ya que las operaciones son en esencia aritméticas.

```

CIRCUITO RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA CON CARGA PURAMENTE RESISTIVA
: introduce el valor VRMS en volts: 127
Vrms1 = 127
introduce el valor de la carga en ohms el circuito de onda completa: 100
R1 = 100
la corriente eficaz en amperios:Irms1 = 1.2700
el voltaje eficaz en Vm1 = 179.61
Im1 = 1.7961
el valor del voltaje promedio en la carga en Volts es: Voprom1 = 114.34
el valor de la corriente promedio en la carga en Ampers es: Ioprom1 = 1.1434
el valor de voltaje eficaz medido en la carga en Volts es: Vorms1 = 127.00
el valor de la corriente eficaz en la carga en Ampers es: Iorms1 = 1.2700
la potencia absorbida por la carga es: P1 = 161.29
la potencia admimistrada por la fuente es: S1 = 161.29
el factor de potencia es: Fp1 = 1
la corriente que fluye en el diodo es: ID1 = 0.8980
El voltaje de roptura en el diodo, el diodo debe poder soportar al menos este voltaje
Vroptu1 = 179.61

```

Figura 3.7: Resultados de Circuito rectificador no controlado onda completa carga R.

En la Figura 3.7 se muestran los resultados del programa en cuestión, es un ejemplo práctico. Ahora comenzaremos con la explicación del código.

3.3.1. Explicación del código

El programa correspondiente se muestra en la Figura 3.8, primero hace la limpieza de la ventana de comando, se limpian las variables y se cierran todas las ventanas. En este código se probó la carga de dos librerías una la de “symbolic” que permite la solución de integrales y de derivadas, que, aunque en este programa no es necesario se utilizó para probar esta función. La otra librería es la de “control”.

Después el programa solicita las variables de entrada, las cuales son voltaje eficaz de la fuente y el valor de la carga resistiva e igual que en el circuito de media onda empezara a

resolver los cálculos mediante las fórmulas mencionadas en el capítulo 2.

```
1 clc; clear all; close all;
2 pkg load symbolic;
3 pkg load control;
4 %circuito Rectificador de Onda completa con carga puramente resistiva
5 %valores para solicitar
6 fprintf("CIRCUITO RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA CON CARGA PURAMENTE RESISTIVA\n: ")
7 Vrms1=input("introduce el valor VRMS en volts: ")
8 R1= input("introduce el valor de la carga en ohms el circuito de onda completa: ")
9 fprintf("la corriente eficaz en amperios:")
10 Irms1=Vrms1/R1
11 fprintf("el voltaje eficaz en ")
12 Vm1= Vrms1*(sqrt(2))
13 Im1=Irms1*(sqrt(2))
14 %C D directa promedio
15 fprintf("el valor del voltaje promedio en la carga en Volts es: ")
16 Voprom1=2*(Vm1/(pi))
17 fprintf("el valor de la corriente promedio en la carga en Ampers es: ")
18 Ioprom1=2*((Im1/(pi)))
19 fprintf("el valor de voltaje eficaz medido en la carga en Volts es: ")
20 Vorms1=Vm1/(sqrt(2))
21 fprintf("el valor de la corriente eficaz en la carga en Ampers es: ")
22 Iorms1=Im1/(sqrt(2))
23 %En C.A
24 fprintf("la potencia absorbida por la carga es: ")
25 P1=Vorms1*Iorms1
26 fprintf("la potencia administrada por la fuente es: ")
27 S1=Irms1*Vrms1
28 fprintf("el factor de potencia es: ")
29 Fp1=P1/S1
30 fprintf("la corriente que fluye en el diodo es: ")
31 ID1=Im1/2
32 fprintf("El voltaje de roptura en el diodo, el diodo debe poder soportar al menos
    ↳ este voltaje\n")
33 Vroptu1=Vm1*(1)
```

Figura 3.8: Circuito Rectificador no controlado de onda completa carga R Código.

Para los demás programas el procedimiento fue el mismo ir corroborando las fórmulas agregar las paqueterías necesarias para poder realizar las operaciones pertinentes, según fueran requeridas.

3.4. Circuito rectificador no controlado de media onda con carga RL, codificación en Octave

Este circuito ya cuenta con el verdadero reto y razón de buscar realizar este proyecto, pues su Ecuación 2.40 para obtener la corriente es no lineal y compleja por lo que no se puede hallar una solución analítica y se tiene que recurrir a un método numérico, para obtener el valor de β . También, para el cálculo de las demás variables, se hace necesario resolver integrales muy laboriosas si se hicieran a mano, por lo que, el programa se encargará de realizarlas.

Cuando se requiere solucionar integrales en el software de Octave se debe de introducir la paquetería “symbolic”, pero cabe aclarar que aun con esa librería el resultado arrojaba expresiones matemáticas en vez de un número. Este programa tuvo, como algunos otros, varias versiones para poder obtener los resultados deseados, aquí se mostrarán solo dos versiones en el software de Octave.

Una donde el resultado se entrega como expresión matemática y otra donde el resultado se entrega solamente un número.

3.4.1. Programa en Octave análisis simbólico realizado

Este código se realizó de las primeras versiones, pero se observó que aunque arrojaba los resultados, las mostraba de forma no clara, siendo un poco incomprendidos para el usuario. Sin embargo, que arroje estos resultados, era mejor en cuanto al funcionamiento del programa, pues a diferencia del programa 3.4.2, este no arroja advertencias del programa.

```

1 clc;close all; clear all;
2 pkg load symbolic
3 pkg load control
4 %Calculo de circuito no controlado media onda R-L;
5 fprintf("CIRCUITO RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA CON CARGA R-L\n: ");
6 R=input("introduce el valor de la carga resistiva en Ohms: ");
7 L=input("introduce el valor de la bobina en Henrios: ");
8 Vrmss=input("introduce el valor del voltaje eficaz en Volts de la fuente: ");
9 Vm=Vrmss*sqrt(2);
10 f=input("introduce el valor de la frecuencia en hertz: ");
11 Waux=2*pi*f;
12 w=Waux;
13 theta= atan((w*L)/R);
14 thetad= theta*(180/pi);
15 tau=L/R;
16 wtau=w*tau;
17 Z=sqrt(R^2+(w*L)^2);
18 Sen=sin(theta);
19 send=sind(thetad);
20 k=Vm/Z;
21 % Ibeta=(Vm/Z)*((sin((wt)-teta)+sin(teta)*exp(1)^(-(wt/wtao))));
22 bn=input("introduce el valor al que quieres obtener el valor de beta (0.001 o
    ↪ inferior)");
23 for wt=pi:2*pi/1000:2*pi
24 Ib=sin((wt)-theta)+sin(theta)*(exp(1))^(-(wt/wtau))
25 if Ib<=bn
26 Beta=wt;
27 break
28 end
29 end
30 fprintf("el valor de beta es:")

```

Figura 3.9: Circuito rectificador media onda no controlado carga R-L código parte 1.

```

31 Beta
32 %Beta2= Beta*(180/pi)
33 %corriente media
34 Voi=Vm*(2/pi)
35 syms Iwt
36 Iwt=(Vm/Z)*(sin((Iwt)-theta)+sin(theta)*exp(1)^(-(Iwt/wtau)))
37 Imed=int(Iwt,0,Beta)*(1/(2*pi))
38 Io=double(Imed)
39 %corriente eficaz
40 Iwt2=(Iwt)*(Iwt)
41 Irmsaux=sqrt((int(Iwt2,0,Beta))*(1/(2*pi)))
42 Irms=double(Irmsaux)
43 Vrms=Vm/(sqrt(2))
44 syms wt
45 Vwt=Vm*sin(wt)
46 Vmint=int(Vwt,0,Beta)*(1/(2*pi))
47 Vo=double(Vmint)
48 Vwt2=Vwt*Vwt
49 Vormsaux=sqrt((int(Vwt2,0,Beta))*(1/(2*pi)))
50 Vorms=double(Vormsaux)
51 kr=sqrt(2)
52 Iwt2=(Iwt)*(Iwt)
53 Irmsaux2=sqrt((int(Iwt2,0,Beta))*(1/(2*pi)))
54 Iorms= sqrt(Io^2)
55 Irms2=double(Irmsaux2)
56 %potencias
57 P=(Irms2^2)*R
58 S=Vrms*Irms
59 Fp=P/S

```

Figura 3.10: Circuito rectificador media onda no controlado carga R-L código parte 2.

```

Ventana de comandos
\ 135125 /
461728443338028*pi
20040297019
----- + ----- + -----
131/2
890125000000*e 442479605506848000*pi + 192048439890125000000 442479605506848000*pi
2
-----
258045812228988000*pi 2 /489*pi\
8796875*pi *sin|-----| 45340837667
\ 1081 /
----- + ----- + -----
2
+ 192048439890125000000 442479605506848000*pi + 192048439890125000000 442479605506848000*
-----
3 131/2 2/67514*pi\ 131/2 2/67514*
9913312*pi *e *sin |-----| 196791830156212375000*pi*e *sin |-----|
\ 135125 / \ 13512 /
----- + -----
2 131/2 131/2 2 131/2
pi *e + 192048439890125000000*e 442479605506848000*pi *e + 192048439890125000
-----
pi\
--|
5 /
-----
131/2
000*e
-----

Irrms = 0.4476
Irrms2 = 0.6998
p = 48.975
s = 69.982
Fp = 0.6998

```

Figura 3.11: Resultados del programa.

Como se alcanza a apreciar estos resultados no son los deseados ni son prácticos para el usuario, es decir se busca que la herramienta solucione dudas arrojando resultados en forma de un valor numérico, por lo que la debido a ello se buscó modificar el código hasta obtener un resultado tan sencillo como la parte final que se muestra en la Figura 3.11.

3.4.2. Programa en Octave sin análisis simbólicos

Sin embargo, aunque se logró realizar un código que interpreta y entiende bien lo que se le solicita, este también menciona que hay algunas alertas a considerar, cabe aclarar que aunque son alertas estas no son determinantes es decir el programa recomienda modificar, pero funciona a pesar de tener esas advertencias o warnings, es importante recalcar que estos programas tampoco fueron los finales, pero fueron siendo avances importantes y por ello se registraron en este trabajo.

```
1 clc; clear all; close all;
2 pkg load symbolic;
3 pkg load control;
4 fprintf("CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE MEDIA ONDA CON CARGA RL No
   → controlado:\n ")
5 Vrms = input("introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente");
6 R = input("introduce el valor de la carga en ohms");
7 L = input("introduce el valor de la bobina en Henrios");
8 Freq=input("introduce la frecuencia en Herz");
9 TolBeta = input("introduce la tolerancia que quieres 0.00001 o menor");
10 %==CARGA RL NO CONTROLADO MEDIA ONDA==
11 Vm = Vrms*sqrt(2);
12 w = 2*pi*Freq;
13 theta = atan((w*L)/R);
14 tau = L/R;
15 Z = sqrt((R^2)+((w*L)^2));
16 %Fuente
17 Im = Vm/Z;
18 %Carga
19 for AuxBeta = pi:2*pi/1000:2*pi
20 Ib = sin((AuxBeta) - theta) + sin(theta)*(exp(-(AuxBeta/(w*tau)))));
21 if Ib <= TolBeta
22 Beta = AuxBeta;
23 break
24 end
25 end
26 syms VARwt1
27 IEQ = (Im)*((sin((VARwt1) - theta)) + sin(theta)*(exp(-(VARwt1/(w*tau)))));
28 Io = double(int(IEQ,0,Beta)*(1/(2*pi)));
29 Iorms = double(sqrt((int((IEQ^2),0,Beta))*(1/(2*pi))));
30 syms VARwt2
31 VEQ = Vm*sin(VARwt2);
32 Vo = double(int(VEQ,0,Beta)*(1/(2*pi)));
33 Vorms = double(sqrt((int((VEQ^2),0,Beta))*(1/(2*pi))));
34 Isrms = Iorms;
35 %Potencias
36 P = R*(Iorms^2);
37 S = Vrms*Iorms;
38 fp = P/S;
39 %Diodo
40 ID = Io;
41 VPI = Vm;
42 fprintf("el voltaje maximo es:\n")
43 Vm
44 fprintf("\n tu angulo Beta es:\n")
45 Beta
46 fprintf("\ntu voltaje promedio es:\n")
47 Vo
48 fprintf("\nla corriente promedio es:\n ")
49 Io
50 fprintf("\nLa corriente eficaz con las que se obtienen las potencias es:\n ")
51 Iorms
52 fprintf("\nla potencia activa ('P')es\n")
53 P
54 fprintf("la potencia Aparente suministrada por la fuente 'S' es: \n")
55 S
56 fprintf("el factor de potencia es: \n")
57 fp
58 fprintf("la corriente que pasa atravez del diodo es:\n")
59 ID
```

```

60 ID
61 fprintf("el voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en magnitud y su
    ↪ magnitud es:\n")
62 VPI

```

Figura 3.12: Circuito rectificador no controlado media onda carga R-L v3.

```

Ventana de comandos

tu angulo Beta es:
Beta = 3.7950

tu voltaje promedio es:
Vo = 40.379

la corriente promedio es:
Io = 2.0213

La corriente eficaz con las que se obtienen las potencias es:
Iorms = 3.0161

la potencia activa ('P')es
P = 181.93
la potencia Aparente suministrada por la fuente'S' es:
S = 301.61
el factor de potencia es:
fp = 0.6032
la corriente que pasa atravez del diodo es:
ID = 2.0213
el voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en magnitud y su magnitud es:
VPI = 141.42
>>

```

Figura 3.13: Resultados del programa MO RL v3

3.5. Circuito rectificador no controlado de onda completa carga RL codificación en Octave.

Cuando se habla de circuitos rectificadores de onda completa no controlados , estos suelen ser más fácil de calcular ya que los comportamientos de estos circuitos con respecto de su límites de operación son distintos, por ejemplo éste en particular es mucho más fácil de calcular que el circuito de media onda, para empezar, este circuito no cuenta con un periodo discontinuo, es decir el circuito de onda completa en ningún momento deja de conducir la corriente en la carga, una vez comienza a conducir lo hace de manera continua, como se ve en la Figura 3.14.

Las fórmulas correspondientes a este circuito se presentaron en el tema 2.7 “rectificador monofásico de onda completa carga resistiva e inductiva”.

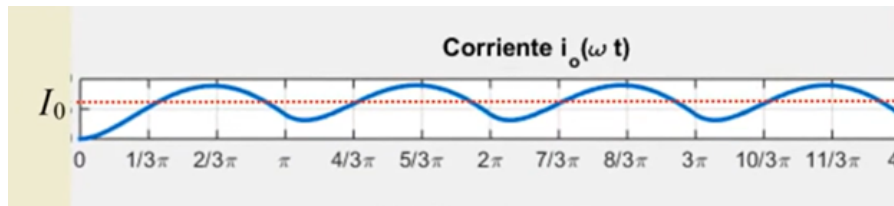


Figura 3.14: Conducción de la corriente en la carga[5].

Hay que resaltar que este circuito cuenta con la peculiaridad de no tener un ángulo de extinción como tal, es decir la ecuación para el cálculo de β no es necesaria en este circuito.

En cuanto a cómo interactúa el usuario con la programación es similar a los anteriores programas:

Primero el usuario vera el título del circuito que está corriendo, posteriormente se solicita al usuario, cual es el valor en RMS de la fuente, se le solicita también el valor de la carga resistiva y el valor de la carga inductiva en sus unidades base Ω y H respectivamente. Por último, solicita la frecuencia a la que se está sometiendo el circuito, normalmente a 60 Hz o 50 Hz dependiendo de si es frecuencia americana o europea. Al introducir esos datos enviará todos los resultados de interés como se ve en la Figura 3.15

```
Ventana de comandos
CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE ONDA COMPLETA CON CARGA RL No controlado:
introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente 120
introduce el valor de la carga en ohms 200
introduce el valor de la bobina en Henrios 0.04
introduce la frecuencia en Herz 60
el voltaje maximo es:
Vm = 169.71

tu voltaje promedio es:
Vo = 108.04

la corriente promedio es:
Io = 0.5402

La corriente eficaz con las que se obtienen las potencias es:
Iorms = 0.5980

la potencia activa ('P')es
P = 71.517
la potencia Aparente suministrada por la fuente'S' es:
S = 71.758
El factor de potencia es;
fp = 0.9966
la corriente que pasa atravez del diodo es:
ID = 0.2701
el voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en magnitud y su magnitud es:
VPI = 169.71
```

Figura 3.15: Ventana de resultados.

3.5.1. Explicación del código.

A continuación, en la Figura 3.16 se puede observar el código dentro de Octave que se utilizó como base, para la solución de este tipo de circuitos.

Primero es limpiar la ventana de comando, posteriormente se cierran todas las ventanas emergentes que pudieran estar abiertas. Segundo se cargan las librerías de “Symbolic” y “Control”; Tercero se solicita al usuario, cual es el valor en RMS de la fuente, se le solicita también el valor de la carga resistiva y el valor de la carga inductiva en sus unidades base Ω y H respectivamente. Por último, solicita la frecuencia a la que se está sometiendo el circuito, normalmente a 60 Hz o 50 Hz dependiendo de si es frecuencia americana o europea. Al introducir esos datos enviará todos los resultados de interés

```
1  clc; close all; clear all;
2  pkg load symbolic;
3  pkg load control;
4  %Circuito Rectificador de Onda Completa con Carga R-L
5  fprintf("CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE ONDA COMPLETA CON CARGA RL No
   ↳ controlado:\n ");
6  Vrms = input("introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente ");
7  R = input("introduce el valor de la carga en ohms ");
8  L = input("introduce el valor de la bobina en Henrios ");
9  Freq=input("introduce la frecuencia en Herz ");
10 %TolBeta = input("introduce la tolerancia que quieres 0.00001 o menor ");
11 Vm = Vrms*sqrt(2);
12 w = 2*pi*Freq;
13 theta = atan((w*L)/R);
14 tau = L/R;
15 Z = sqrt((R^2)+((w*L)^2));
16 %===CARGA RL NO CONTROLADO ONDA COMPLETA===
17 %Numero de Iteraciones este es el numero que va a evaluar con respectos de
   ↳ armonicos
18 nit = 2;
19 % se considero que evaluar hasta el 4 armonico con respecto de la formula
   ↳ seria el de mayor interes
20 % en caso de considerar mayores interacciones de armonicos seria cambiar este
   ↳ apartado
21 %Fuente
22 Im = Vm/Z;
23 %Carga
24 Vo = (2/pi)*Vm;
25 Io = Vo/R;
26 AUXVrms = Vo^2;
27 AUXIorms = Io^2;
28 for m = 1:nit
29   n = m*2;
30   Vn = Vo*((1/(n-1)) - (1/(n+1)));
31   In = Vn/sqrt((R^2) + ((n*w*L)^2));
32   Vnrms = Vn/sqrt(2);
33   Inrms = In/sqrt(2);
34   AUXVrms = AUXVrms + (Vnrms^2);
35   AUXIorms = AUXIorms + (Inrms^2);
36 end
37 Vrms = sqrt(AUXVrms);
38 Iorms = sqrt(AUXIorms);
39 Isrms = Iorms;
40 %Potencias
41 P = R*(Iorms^2);
42 S = Vrms*Iorms;
43 fp = P/S;
44 %Diodo
45 ID = Io/2;
46 VPI = Vm;
47 %fprintf("el valor del angulo beta es:\n");
48 %beta
49 fprintf("el voltaje maximo es:\n")
50 Vm
```

```

51 fprintf("\ntu voltaje promedio es:\n")
52 Vo
53 fprintf("\nla corriente promedio es:\n ")
54 Io
55 fprintf("\nla corriente eficaz con las que se obtienen las potencias es:\n ")
56 Iorms
57 fprintf("\nla potencia activa ('P')es\n")
58 P
59 fprintf("la potencia Aparente suministrada por la fuente 'S' es: \n")
60 S
61 fprintf("El factor de potencia es; \n");
62 fp
63 fprintf("la corriente que pasa atravez del diodo es:\n")
64 ID
65 fprintf("el voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en magnitud y su
    ↪ magnitud es:\n")
66 VPI

```

Figura 3.16: Programa para el circuito rectificador no controlado con carga RL.

3.6. Circuito rectificador no controlado de media onda carga RL-Generador, codificación en Octave.

Este circuito analiza el caso de que se tenga un generador; de acuerdo con el capítulo 2 las ecuaciones que influyen son las ecuaciones (2.74) y (2.75) relacionadas con la corriente y que se encuentran en el subtema 2.8 “rectificador monofásico de media onda con carga RL- generador”. El efecto del generador es que hasta que su voltaje sea menor al voltaje de la fuente entonces comienza a conducir corriente en la carga. A partir del momento, en que conduce el rectificador, al ángulo correspondiente se le conoce como α y conduce hasta el ángulo β . De acuerdo con las ecuaciones mencionadas anteriormente, así como la ecuación (2.62) se calculan los ángulos de inicio y final de la integral.

Estas fórmulas y algunas más que se encuentran en el subtema 2.8 y 2.8.1 se introducen con la misma lógica que en los anteriores programas, como se puede observar en la Figura 3.18, el cual ilustra el código de programación empleado.

Mientras en la Figura 3.17a y Figura 3.17b se puede ver la interacción del usuario debido a que utiliza la librería “symbolic” y que en este programa da a conocer más valores de interés se decidió separar la entrega de resultados en dos figuras ya mencionadas.

```

Ventana de comandos
CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE MEDIA ONDA CON CARGA RL-Generador No controlado:
introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente120
introduce el valor del Voltaje continuo del generador10
introduce el valor de la carga en ohms100
introduce el valor de la bobina en Henrios0.04
introduce la frecuencia en Herz60
introduce la tolerancia que quieres 0.00001 o menor0.0004

```

(a) Pantalla de interacción con el usuario.

```

el voltaje maximo es:
Vm = 169.71

tu angulo Beta es:
Beta = 3.2358

tu angulo Alfa es:
Alfa = 0.058960

tu voltaje promedio es:
Vo = 53.852

la corriente promedio es:
Io = 0.4881

La corriente eficaz con las que se obtienen las potencias es:
Iorms = 0.7767

la potencia activa ('P')es
P = 65.215
la potencia Aparente suministrada por la fuente'S' es:
S = 93.210
el factor de potencia es:
fp = 0.6997
la corriente que pasa atravez del diodo es:
ID = 0.4881
el voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en magnitud y su magnitud es:
VPI = 159.71

```

(b) Ventana de resultados.

Figura 3.17: Funcionalidad del código.

3.6.1. Explicación del código

A continuación, se explicará la lógica del código, como ya es costumbre, este código también requiere de librerías, así que lo primero, es limpiar la ventana de comandos, cerrar las ventanas emergentes y limpiar variables utilizadas, después de eso, se cargan las paqueterías, se le mostrará al usuario el nombre del circuito o caso que estará analizando. y comenzara a solicitarle los parámetros del circuito, el voltaje eficaz, el voltaje del generador, el valor de la carga R, el valor de la carga L, la frecuencia a la que está trabajando el circuito y el valor al que quiere calcular la tolerancia de beta.

Inmediatamente al enviar el ultimo parámetro, el programa comienza a calcular todas las variables de interés del circuito con sus respectivas formulas, al tener los resultados, los arroja en la ventana de comandos para que el usuario pueda visualizarlos.

```

1  clc; clear all;close all;
2  pkg load symbolic;
3  pkg load control;
4  fprintf("CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE MEDIA ONDA CON CARGA RL
    ↳ -Generador No controlado:\n ")
5  Vrms = input("introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente");
6  Vcc=input("introduce el valor del Voltaje continuo del generador");
7  R = input("introduce el valor de la carga en ohms");
8  L = input("introduce el valor de la bobina en Henrios");
9  Freq=input("introduce la frecuencia en Herz");
10 TolBeta = input("introduce la tolerancia que quieres 0.00001 o menor");
    ↳ ;
11 Vm = Vrms*sqrt(2);
12 w = 2*pi*Freq;

```

```

13 theta = atan((w*L)/R);
14 tau = L/R;
15 Z = sqrt((R^2)+(w*L)^2);
16 %===CARGA RL-GENERADOR NO CONTROLADO MEDIA ONDA===
17 %Fuente
18 Im = Vm/Z;
19 %Carga
20 Alfa = asin(Vcc/Vm);
21 for AuxBeta = pi:2*pi/1000:2*pi
22 Ib = (Im)*(sin((AuxBeta) - theta)) - (Vcc/R) + (((-Im)*sin(Alfa -
    → theta)) + (Vcc/R))*(exp((Alfa - AuxBeta)/(w*tau)));
23 if Ib <= TolBeta
24 Beta = AuxBeta;
25 break
26 end
27 end
28 syms VARwt1;
29 IEQ = (Im)*(sin((VARwt1) - theta)) - (Vcc/R) + (((-Im)*sin(Alfa -
    → theta)) + (Vcc/R))*(exp((Alfa - VARwt1)/(w*tau)));
30 Io = double(int(IEQ,Alfa,Beta)*(1/(2*pi)));
31 Iorms = double(sqrt(int((IEQ^2),Alfa,Beta))*(1/(2*pi))));
32 syms VARwt2;
33 VEQ = Vm*sin(VARwt2);
34 Vo = double(int(VEQ,Alfa,Beta)*(1/(2*pi)));
35 Vorms = double(sqrt(int((VEQ^2),Alfa,Beta))*(1/(2*pi))));
36 Isrms = Iorms;
37 %Potencias
38 P = (R*(Iorms^2)) + (Vcc*Io);
39 S = Vorms*Iorms;
40 fp = P/S;
41 %Diodo
42 ID = Io;
43 VPI = Vm - Vcc;
44 fprintf("el voltaje maximo es:\n")
45 Vm
46 fprintf("\n tu angulo Beta es:\n")
47 Beta
48 fprintf("\n tu angulo Alfa es:\n ")
49 Alfa
50 fprintf("\ntu voltaje promedio es:\n")
51 Vo
52 fprintf("\nla corriente promedio es:\n ")
53 Io
54 fprintf("\nla corriente eficaz con las que se obtienen las
    → potencias es:\n ")
55 Iorms
56 fprintf("\nla potencia activa ('P')es:\n")
57 P
58 fprintf("\nla potencia Aparente suministrada por la fuente'S' es:\n"
    → )
59 S
60 fprintf("el factor de potencia es: \n")
61 fp
62 fprintf("\nla corriente que pasa atravez del diodo es:\n")
63 ID
64 fprintf("\nel voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en
    → magnitud y su magnitud es:\n")
65 VPI

```

Figura 3.18: editor de código (“Código del programa rectificador no controlado media onda carga RL-Generador”).

3.7. Circuito rectificador no controlado de onda completa carga RL-Generador, codificación en Octave

El último de los circuitos que se analizará en este software, es el circuito rectificador de onda completa no controlado con carga RL-Generador. De los circuitos no controlados lo normal en cuanto a su funcionamiento es que estos operen en forma continua, sin embargo, pudiera caer en un estado de operación discontinuo. Con la ecuación (3.1) se podrá predecir si el circuito opera en el modo continuo o en el modo discontinuo.

$$\frac{V_m}{Z} (\sin(\pi - \theta) - \sin(\alpha - \theta)) e^{\frac{\alpha - \pi}{\omega\tau}} + \frac{V_{cc}}{R} e^{\frac{\alpha - \pi}{\omega\tau}} - 1 \geq 0 \quad (3.1)$$

Donde si el resultado del término del lado izquierdo de la ecuación es mayor o igual a cero, el circuito estará comportándose de manera continua. Los valores de alfa(α) y de theta(θ) se obtienen de las ecuaciones ya mencionadas 2.62 y 2.67 y tau(τ), de la ecuación

2.69. entonces en este programa lo primero es analizar la ecuación (3.1). Se mostrarán en la Figura 3.19, el código de este programa.

3.7.1. Explicación del código

Como se mencionó previamente este código cuenta con dos estados de operación , posteriormente se le llamara modo de operación o simplemente modo continuo o modo discontinuo, debido a tener estos modos , el programa emplea la función “if else” muy útil cuando se requiere de hacer una cosa u otra dependiendo de una condición y como se mencionó en la fórmula 3.1 tenemos la condición de operación, misma que se utilizó para separar las fórmulas que dependen de un modo u otro en el que se encuentre operando.

Ambos comparten la limpieza , la carga de la librería la presentación del título y la solicitud de los parámetros , inmediatamente después se calculan fórmulas que ambos comparten y que no se ven afectadas, y al ser la primera ocasión donde se veía esta situación de presentar dos modos de operación se calculó primero beta y posteriormente se introdujo la ecuación (3.1) la cual se evalúa y guarda el resultado en una variable auxiliar esta variable en este caso particular llamada “c” se compara con 0 si “c” es mayor o igual a 0 se comporta como continuo y se usaran las fórmulas representativas de ese comportamiento y en caso contrario para a “else” y se usan las fórmulas representativas del caso discontinuo. Al ser diferentes valores, en ambas secuencias “if “ o “else” se manda a mostrar a la ventana de comando los resultados obtenidos.

```

1  clc; clear all; close all;
2  pkg load symbolic;
3  fprintf('CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE ONDA COMPLETA CON CARGA
    ↪ RL-Generador No controlado:\n ')
4  Vrms = input('introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente');
5  Vcc=input('introduce el valor del Voltaje continuo del generador');
6  R = input('introduce el valor de la carga en ohms');
7  L = input('introduce el valor de la bobina en Henrios');
8  Freq=input('introduce la frecuencia en Herz');
9  TolBeta = input('introduce la tolerancia que quieres 0.00001 o menor')
    ↪ ;
10 Vm = Vrms*sqrt(2);
11 w = 2*pi*Freq;
12 theta = atan((w*L)/R);
13 tau = L/R;
14 Z = sqrt((R^2)+((w*L)^2));
15 %fuente
16 Im = Vm/Z;
17 %Carga
18 Alfa = asin(Vcc/Vm);
19 for AuxBeta = pi:2*pi/10000:2*pi
20 Ib = (Im)*(sin((AuxBeta) - theta)) - (Vcc/R) + (((-Im)*sin(Alfa -
    ↪ theta)) + (Vcc/R))*(exp((Alfa - AuxBeta)/(w*tau)));
21 if Ib <= TolBeta
22 Beta = AuxBeta;
23 break
24 end
25 end
26 c = (Vm/Z*(sin(pi-theta)-sin(Alfa-theta)*exp(Alfa - pi)/(w*tau)))+(Vcc/R
    ↪ *(exp(Alfa-pi)/(w*tau)-1));
27 if c>=0

```

```

28     Vo = ((2*Vm)/pi)-Vcc
29 Io = ((2*Vm)/R*pi)-(Vcc/R)
30 %Numero de Iteraciones este es el numero que va a evaluar con
    ↳ respectos de armonicos
31 nit = 2;
32 % se considero que evaluar hasta el 4 armonico con respecto de la
    ↳ formula seria el de mayor interes
33 % en caso de considerar mayores interacciones de armonicos seria
    ↳ cambiar este apartado
34 %Fuente
35 Im = Vm/Z;
36 %Carga
37 Vo = (2/pi)*Vm-Vcc;
38 Io = Vo/R;
39 AUXVrms = Vo^2;
40 AUXIorms = Io^2;
41 for m = 1:nit
42     n = m*2;
43     Vn = Vo*((1/(n-1)) - (1/(n+1)));
44     In = Vn/sqrt((R^2) + ((n*w*L)^2));
45     Vnrms = Vn/sqrt(2)+Vcc;
46     Inrms = In/sqrt(2);
47     AUXVrms = AUXVrms + (Vnrms^2);
48     AUXIorms = AUXIorms + (Inrms^2);
49 end
50 Vrms = sqrt(AUXVrms);
51 Iorms = sqrt(AUXIorms);
52 Isrms = Iorms;
53 %Potencias
54 P = R*(Iorms^2);
55 S = Vrms*Iorms;
56 fp = P/S;
57 %Diodo
58 ID = Io/2;
59 VPI = Vm;
60 fprintf("el valor de c es:\n")
61 c
62 fprintf("el circuito se comporta como continuo:\n")
63 fprintf("el voltaje maximo es:\n")
64 Vm
65 fprintf("\ntu voltaje promedio es:\n")
66 Vo
67 fprintf("\nla corriente promedio es:\n ")
68 Io
69 fprintf("\nLa corriente eficas con las que se obtienen las potencias
    ↳ es:\n ")
70 Iorms
71 fprintf("\nla potencia activa ('P')es\n")
72 P
73 fprintf("la potencia Aparente suministrada por la fuente'S' es: \n")
74 S
75 fprintf("la corriente que pasa atravez del diodo es:\n")
76 ID
77 fprintf("el voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en magnitud
    ↳ y su magnitud es:\n")
78 VPI
79 else
80     syms VARwt1
81     IEQ = (Im)*(sin((VARwt1) - theta)) - (Vcc/R) + (((-Im)*sin(Alfa -
    ↳ theta)) + (Vcc/R))*(exp((Alfa - VARwt1)/(w*tau))));
82     Io = double(int(IEQ,Alfa,Beta)*(1/(2*pi)));
83     Iorms = double(sqrt((int((IEQ^2),Alfa,Beta))*(1/(2*pi))));
84     syms VARwt2
85     VEQ = Vm*sin(VARwt2);
86     Vo = double(int(VEQ,Alfa,Beta)*(1/(2*pi)));
87     Vrms = double(sqrt((int((VEQ^2),Alfa,Beta))*(1/(2*pi))));
88     Isrms = Iorms;
89 %Potencias
90 P = (R*(Iorms^2)) + (Vcc*Iorms);
91 S = Vrms*Iorms;
92 fp = P/S;
93 %Diodo
94 ID = Io;
95 VPI = Vm - Vcc;
96 fprintf("el valor de c :\n")
97 c
98 fprintf("el circuito se comporta como discontinuo:\n")
99 fprintf("el voltaje maximo es:\n")
100 Vm
101 fprintf("\n tu angulo Beta es:\n")
102 Beta
103 fprintf("\n tu angulo Alfa es:\n ")
104 Alfa
105 fprintf("\ntu voltaje promedio es:\n")
106 Vo
107 fprintf("\nla corriente promedio es:\n ")
108 Io
109 fprintf("\nLa corriente eficas con las que se obtienen las potencias
    ↳ es:\n ")
110 Iorms
111 fprintf("\nla potencia activa ('P')es\n")
112 P
113 fprintf("la potencia Aparente suministrada por la fuente'S' es: \n")
114 S
115 fprintf("la corriente que pasa atravez del diodo es:\n")
116 ID
117 fprintf("el voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en magnitud
    ↳ y su magnitud es:\n")
118 VPI
119 end

```

Figura 3.19: Código de programa rectificador no controlado RL-Generador.

A continuación, en la Figura 3.20a y Figura 3.20b se muestra un ejemplo en el modo discontinuo. Y en la Figura 3.21 se muestra un ejemplo en el modo continuo.

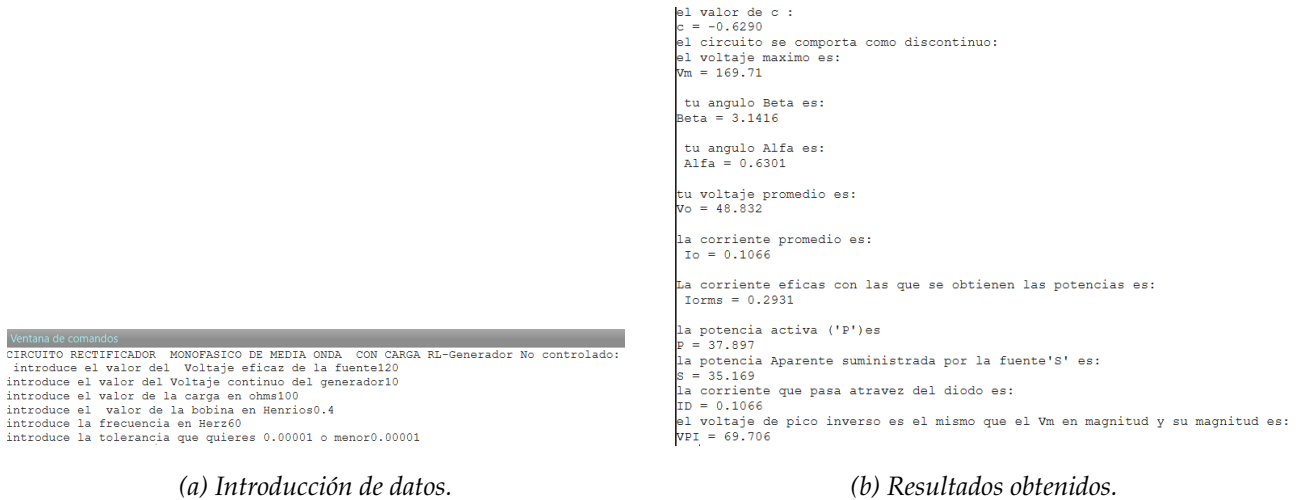


Figura 3.20: Funcionamiento del programa rectificador no controlado RL-Generador ejemplo discontinuo.

```

CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE ONDA COMPLETA CON CARGA RL-Generado
introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente120
introduce el valor del Voltaje continuo del generador10
introduce el valor de la carga en ohms20
introduce el valor de la bobina en Henrios0.04
introduce la frecuencia en Herz60
introduce la tolerancia que quieres 0.00001 o menor0.0001
Vo = 98.038
Io = 52.815
el valor de c es:
c = 3.8375
el circuito se comporta como continuo:
el voltaje maximo es:
Vm = 169.71

tu voltaje promedio es:
Vo = 98.038

la corriente promedio es:
Io = 4.9019

La corriente eficaz con las que se obtienen las potencias es:
Iorms = 5.0676

la potencia activa ('P')es
P = 513.61
la potencia Aparente suministrada por la fuente'S' es:
S = 608.11
la corriente que pasa atravez del diodo es:
ID = 2.4509
el voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en magnitud y su magnitud
VPI = 169.71

```

Figura 3.21: Funcionamiento del programa rectificador no controlado RL-Generador ejemplo continuo.

3.8. Integración de los programas individuales en uno, mediante Octave.

Una vez teniendo los programas que resolvían los circuitos individualmente, se realizó la implementación de todos los programas individuales, en un programa solo, este era el objetivo del proyecto realizar un programa que funcione como herramienta para la realización del análisis de estos circuitos.

Esta herramienta cuenta con un menú que selecciona el circuito que se desea analizar, en la Figura 3.22 se muestra el menú de esta aplicación.

```
Ventana de comandos
este es el primer modelo del programa completo de modo gratuito
este programa puede solucionar diversos circuitos rectificadores no controlados de carga R, RL y RL-Generador
a continuacion apareceran
los casos que puede resolver
1.- Circuito rectificador no controlado de media onda carga R
2.- Circuito rectificador no controlado de onda completa carga R
3.- Circuito rectificador no controlado de media onda carga RL
4.-Circuito rectificador no controlado de onda completa carga RL
5.- Circuito rectificador no controlado media onda carga RL-Generador
6.- Circuito rectificador no controlado onda completa carga RL-Generador
7.- Circuito rectificador controlado por SCR de media onda carga R
8.- Circuito rectificador controlado por SCR de onda completa carga R
9.- Circuito rectificador controlado por SCR de media onda carga RL
10.-Circuito rectificador controlado por SCR de onda completa carga RL
11.- Circuito rectificador controlado por SCR media onda carga RL-Generador
introduce el numero de la opcion que quieres correr
```

Figura 3.22: Menú de la herramienta computacional para el análisis de circuitos rectificadores en Octave.

Como se puede observar se deseaba buscar la solución de 11 diferentes circuitos, Se presentarán algunos ejemplos, para que se pueda mostrar la utilidad del programa

```
Ventana de comandos
este es el primer modelo del programa completo de modo gratuito
este programa puede solucionar diversos circuitos rectificadores no controlados de carga R, RL y RL-Generador
a continuacion apareceran
los casos que puede resolver
1.- Circuito rectificador no controlado de media onda carga R
2.- Circuito rectificador no controlado de onda completa carga R
3.- Circuito rectificador no controlado de media onda carga RL
4.-Circuito rectificador no controlado de onda completa carga RL
5.- Circuito rectificador no controlado media onda carga RL-Generador
6.- Circuito rectificador no controlado onda completa carga RL-Generador
7.- Circuito rectificador controlado por SCR de media onda carga R
8.- Circuito rectificador controlado por SCR de onda completa carga R
9.- Circuito rectificador controlado por SCR de media onda carga RL
10.-Circuito rectificador controlado por SCR de onda completa carga RL
11.- Circuito rectificador controlado por SCR media onda carga RL-Generador

introduce el numero de la opcion que quieres correr4
opcion = 4
CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE ONDA COMPLETA CON CARGA RL No controlado:
Introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente: 120
Introduce el valor de la carga en ohms: 100
Introduce el valor de la bobina en Henrios: 0.04
Introduce la frecuencia en Hertz: 60
El voltaje máximo es: 169.705627 V
Tu voltaje promedio es: 108.037958 V
La corriente promedio es: 1.080380 A
La corriente eficaz con las que se obtienen las potencias es: 1.188522,A
La potencia activa ('P') es: 141.258381 W
La potencia aparente suministrada por la fuente ('S') es: 142.622603 VA
El factor de potencia es: 0.990435
La corriente que pasa a través del diodo es: 0.540190 A
El voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en magnitud y su magnitud es: 169.705627 V
>>
```

Figura 3.23: Funcionamiento del circuito rectificador de onda completa con carga RL .

La Figura 3.23 es la demostración del circuito rectificador de onda completa no controla-

do carga RL el cual es el caso número 4. La Figura 3.24a y Figura 3.24b son la demostración del circuito rectificador no controlado de media onda con carga RL-generator el cual es el caso número 5.

```

Ventana de comandos
este es el primer modelo del programa completo de modo gratuito
este programa puede solucionar diversos circuitos rectificadores no controlados de carga R, RL y RL-Generador
a continuacion apareceran
los casos que puede resolver
1.- Circuito rectificador no controlado de media onda carga R
2.- Circuito rectificador no controlado de onda completa carga R
3.- Circuito rectificador no controlado de media onda carga RL
4.-Circuito rectificador no controlado de onda completa carga RL
5.- Circuito rectificador no controlado media onda carga RL-Generador
6.- Circuito rectificador no controlado onda completa carga RL-Generador
7.- Circuito rectificador controlado por SCR de media onda carga R
8.- Circuito rectificador controlado por SCR de onda completa carga R
9.- Circuito rectificador controlado por SCR de media onda carga RL
10.-Circuito rectificador controlado por SCR de onda completa carga RL
11.- Circuito rectificador controlado por SCR media onda carga RL-Generador
Introduce el numero de la opcion que quieres correr:
opcion = 5
CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE MEDIA ONDA CON CARGA RL-Generador No controlado:
Introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente: 120
Introduce el valor del Voltaje continuo del generador: 10
Introduce el valor de la carga en Ohms: 100
Introduce el valor de la bobina en Henrios: 0.04
Introduce la frecuencia en Hertz: 60
Introduce la tolerancia que quieras 0.0001 o menor: 0.0001

```

(a) Circuito rectificador de media onda con carga RL-Generador.

```

Ventana de comandos
El voltaje máximo es: 169.705627 V
Tu ángulo theta es:0.149669 rad
Tu ángulo Beta es: 3.235840 rad
Tu ángulo Alfa es: 0.058960 rad
Tu voltaje promedio es: 53.852178 V
La corriente promedio es: 0.488129 A
La corriente eficaz con las que se obtienen las potencias es: 0.776750 A
La potencia activa ("P") es: 65.215323 W
La potencia aparente suministrada por la fuente ("S") es: 93.209980 VA
El factor de potencia es: 0.699660
La corriente que pasa a través del diodo es: 0.488129 A
El voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en magnitud y su magnitud es: 159.705627 V

```

(b) Circuito rectificador de media onda con carga RL-Generador resultados.

Figura 3.24: Funcionalidad del programa.

Esta herramienta computacional tiene una lógica similar a la vista en la figura 3.4 con la peculiaridad de primero mostrar un menú en el que el usuario deberá escoger qué circuito desea analizar. Puede verse la Figura 3.25.

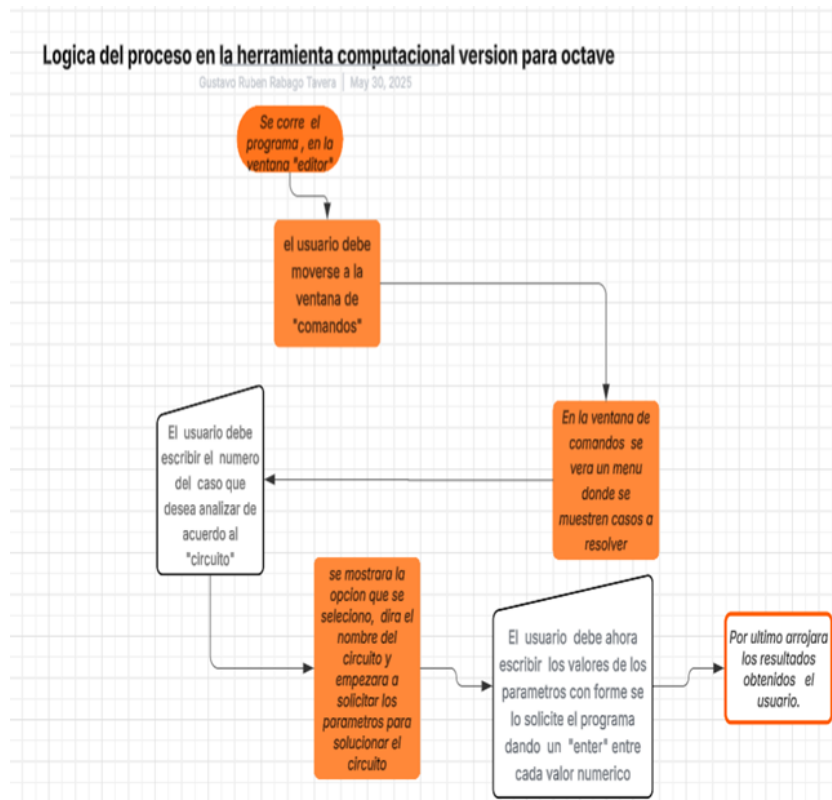


Figura 3.25: Lógica de programación de la herramienta computacional en GNU Octave.

3.8.1. Explicación del código

Este utiliza cada uno de los códigos ya mencionados en los anteriores subtemas del 3.2 al 3.7, solamente se mencionará que utiliza la instrucción “case” ya que como se muestra en la Figura 3.22 al escoger una opción en el menú, se guarda y se va al caso que representa dicha opción escogida. En cada caso se reescribió el código individual, que se menciona en el menú. En la **figura 3.22a y 3.22b** se mostrará el principio y el final del programa respectivamente.

```
1  clc; close all;
2  disp("este es el primer modelo del programa completo de modo gratuito")
3  pkg load symbolic
4  pkg load control
5  Voltaje1='V';
6  Amperaje1='A';
7  PotenciaP='W';
8  PotenciaS='VA';
9  Radianes1='rad';
10 Resistencia='Ohm';
11 disp("este programa puede solucionar diversos circuitos rectificadores no controlados
    ↳ de carga R, RL y RL-Generador \n a continuacion apareceran")
12 disp("los casos que puede resolver\n 1.- Circuito rectificador no controlado de media
    ↳ onda carga R\n 2.- Circuito rectificador no controlado de onda completa carga R
    ↳ \n")
13 disp("3.- Circuito rectificador no controlado de media onda carga RL\n 4.-Circuito
    ↳ rectificador no controlado de onda completa carga RL\n")
14 disp("5.- Circuito rectificador no controlado media onda carga RL-Generador \n 6.-
    ↳ Circuito rectificador no controlado onda completa carga RL-Generador\n")
15 disp("7.- Circuito rectificador controlado por SCR de media onda carga R\n 8.-
    ↳ Circuito rectificador controlado por SCR de onda completa carga R\n")
16 disp("9.- Circuito rectificador controlado por SCR de media onda carga RL\n 10.-
    ↳ Circuito rectificador controlado por SCR de onda completa carga RL\n")
17 disp("11.- Circuito rectificador controlado por SCR media onda carga RL-Generador \n")
18
19 opcion= input ("introduce el numero de la opcion que quieres correr");
20 switch opcion
21 case (1) %NC R MO
22 fprintf("CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE MEDIA ONDA CON CARGA R No controlado:\n "
    ↳ )
23 % Circuito Rectificador de media onda con carga puramente resistiva
24 Vrms = input("Introduce el valor del voltaje Eficaz o VRMS en Volts: ");
25 R = input("Introduce el valor de la carga resistiva en Ohms: ");
26 Vm = Vrms * sqrt(2);
27 Im = Vm / R;
28
29 % Valores adicionales
30 Vs = Vm / sqrt(2);
31 Vrms = Vs;
32 ID = Im / 2;
33 Vroptu = Vm;
34 Voprom = Vm / pi;
35 Ioprom = Vm / (pi * R);
36 Vorms = Vm / 2;
37 Irms = Im / 2;
38 S = Vrms * Irms;
39 P = Ioprom * Vorms;
40 Fp = P / S;
```

Figura 3.26: Código de programa rectificador no controlado RL-Generador.

Diseño de programas en Matlab

Introducción

En este capítulo se aborda la emigración de los programas individuales del software GNU Octave a Matlab, para posteriormente realizar la elaboración de una aplicación final que no solamente ayude en la solución de los circuitos, si no que al momento de ser usada resulte más atractiva. Debido a la escasez de manuales técnicos centrados en aplicaciones de rectificadores en Octave/MATLAB, se optó por desarrollar herramientas propias, guiadas por los conceptos teóricos previamente citados.

Tras seguir trabajando con Octave, se encontró con la limitación de la interface, el menú, no era tan llamativo, pues solo se logró realizar una lista como se vio en la figura 3.18. y además al momento de realizar una graficación, aunque se podía realizar, el mandar a llamar la gráfica, se abre como una segunda ventana emergente con algunas gráficas. Por ello es por lo que en Octave era a veces mucho más complicado a comparación con Matlab, el cual es un programa similar, una ventaja enorme que se consideró y se mencionó al principio de este proyecto, es que el lenguaje de Octave y Matlab es prácticamente el mismo ya que uno se deriva del otro.

De modo que emigrar los programas de un software a otro es relativamente sencillo pues las bases son las mismas, cambió solamente algunas instrucciones y el mandar a llamarlos paquetes en el caso de Matlab ya no es necesario, ya que, al momento de descargar el programa comprado, las librerías compradas vienen incluidas. Aunque esto puede ser una desventaja más que una ventaja, pues si no se compra una versión muy completa no se podrá usar de manera más conveniente. Aun así, Matlab cuenta con otras varias ventajas, como, por ejemplo, más funciones al momento de mandar a realizar gráficas.

Para no repetir, en este capítulo se mostrarán programas diferentes a los mostrados en el capítulo 3 que estaban siendo corridos por el programa GNU Octave, y se abordarán otros en Matlab.

4.1. Acercamiento al programa Matlab

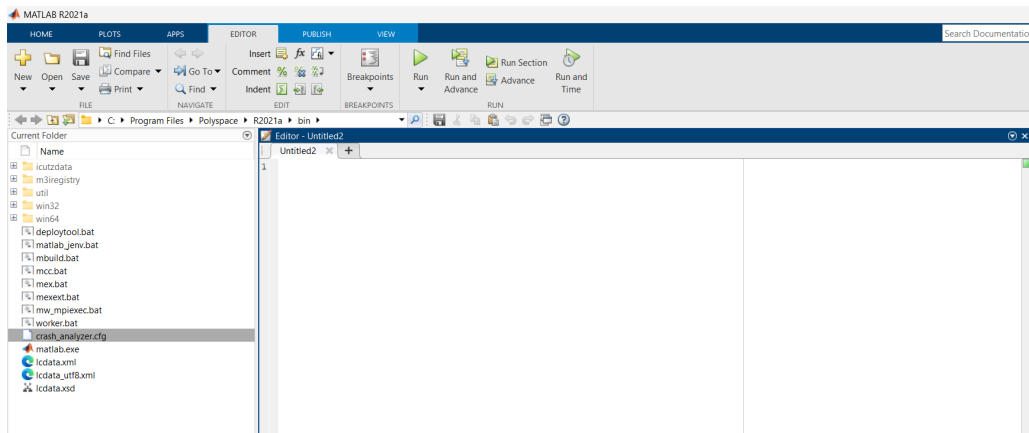


Figura 4.1: Acercamiento al software Matlab

La Figura 4.1 muestra la página inicial al momento de abrir Matlab. El programa de Matlab tiene un editor de programación similar al GNU Octave y también cuenta con una ventana de comandos, como se observa en la Figura 4.2

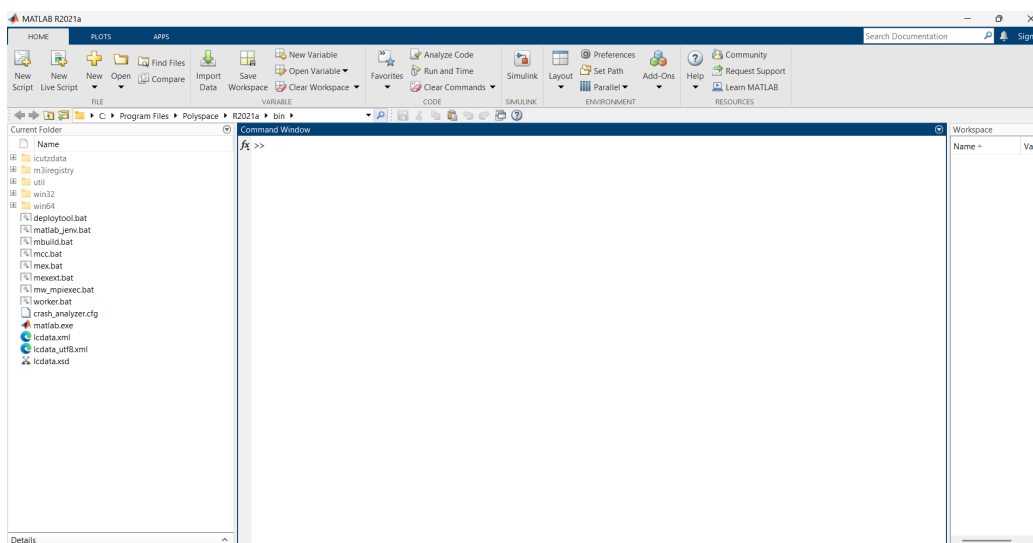


Figura 4.2: Ventana de comandos

Matlab es diferente visualmente en comparación con la distribución de las ventanas de Octave. Dicho lo anterior, el primer circuito que se abordará en Matlab será Circuito rectificador media onda controlado por SCR con carga resistiva.

4.2. Circuito rectificador media onda controlado por SCR con carga R

Este circuito es el primero de los cinco circuitos controlados que se buscaban resolver, del cual ya se mencionó su funcionamiento en el capítulo 2 en el subtema 2.10. A continuación se presenta en la Figura 4.3 un ejemplo de la operación del programa y más adelante se mostrará el código de este.

MATLAB Command Window

```
CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE MEDIA ONDA CON CARGA R CONTROLADO POR SCR:
Introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente: 120
Introduce el valor de la carga en ohms: 100
Introduce el valor del ángulo de disparo del SCR en grados: 45
El valor en radianes de tu ángulo de disparo SCR: 0.785398 Rad
El voltaje máximo es: 169.705627 V
Tu voltaje promedio es: 46.108083 V
La corriente promedio es: 0.461081 A
La corriente eficaz con las que se obtienen las potencias es: 0.809068 A
La potencia activa ('P') es: 65.459156 W
La potencia aparente suministrada por la fuente ('S') es: 97.088199 VA
El factor de potencia es: 0.674224
La corriente que pasa a través del diodo es: 0.540190 A
El voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en magnitud y su magnitud es: 169.705627 V
>>
```

Figura 4.3: Resultados del circuito rectificador controlado por SCR carga R

Como se puede observar en la Figura 4.3, se utiliza el mismo procedimiento que en los programas de Octave, primero se le solicita al usuario información referente al circuito, que en este caso serán:

- Voltaje rms de la fuente.
- Valor de la carga.
- En ángulo de disparo SCR.

Segundo, una vez enviada esta información, el programa la toma y utiliza todas las fórmulas puestas de acuerdo con el código, y después arroja los resultados. En cuanto a los resultados, son numéricos, pero también se abrirá una ventana emergente, mostrando la gráfica de la corriente en la carga como se ve en la Figura 4.4.

Una de las razones por la que se decidió emplear Matlab fue porque tiene la facilidad de graficar, octave también la tiene, pero requiere de una mayor precisión e instrucciones, lo que lo hace más difícil. La otra razón es una modalidad de poder hacer la herramienta como una aplicación; en capítulos futuros se habla más al respecto.

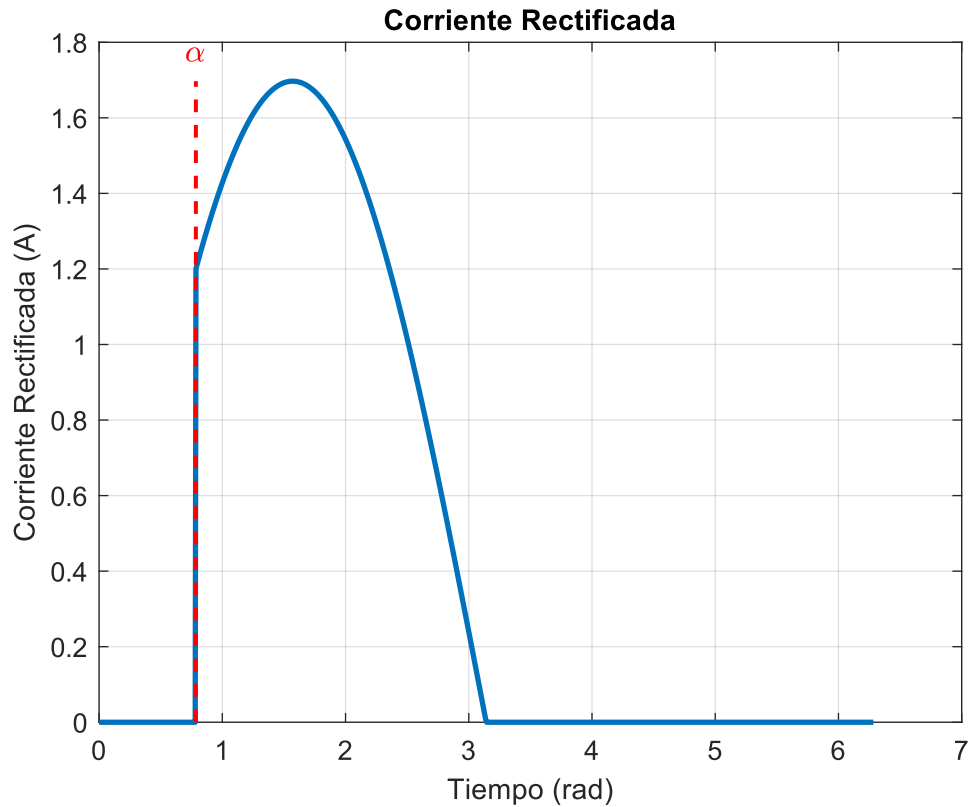


Figura 4.4: Gráfica del circuito rectificador media onda controlado por SCR carga R

4.2.1. Explicación del código de programación.

Lo siguiente (véase Figuras 4.5 y 4.6) será ver la parte del código, la dinámica fue la misma: limpiar la ventana de comando, limpiar variables y cerrar ventanas emergentes. Después se escribe el título del circuito que se va a evaluar. Posteriormente, se continúa la solicitud al usuario de los parámetros del circuito: el voltaje V_{rms} , el valor de la carga y el ángulo de disparo del SCR.

```

1 clc;
2 close all;
3 Voltaje1='V';
4 Amperaje1='A';
5 PotenciaP='W';
6 PotenciaS='VA';
7 Radianes1='rad';
8 Resistencia='Ohm';
9 fprintf("CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE MEDIA ONDA CON CARGA R CONTROLADO POR
    ↳ SCR:\n")
10 Vrms = input("Introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente: ");
11 R = input("Introduce el valor de la carga en ohms: ");
12 AlfaAux = input("Introduce el valor del angulo de disparo del SCR en grados: ");
13 Vm = Vrms * sqrt(2);
14 AlfaC = (AlfaAux * pi) / 180;
15 fprintf("El valor en radianes de tu angulo de disparo SCR: %f Rad\n", AlfaC);
16 %==CARGA R CON SCR MEDIA ONDA==
17 % Fuente
18 if AlfaC <= (pi / 2)
19 Im = Vm / R;
20 else
21 Im = (Vm * sin(AlfaC)) / R;
22 end
23 % Carga
24 Vo = (Vm / (2 * pi)) * (1 + cos(AlfaC));
25 Io = Vo / R;
26 Vorms = (Vm / 2) * sqrt(1 - (AlfaC / pi) + (sin(2 * AlfaC) / (2 * pi)));
27 Iorms = Vorms / R;
28 Isrms = Iorms;
29 % Potencias
30 P = R * (Iorms ^ 2);
31 S = Vrms * Iorms;
32 fp = P / S;
33 % Diodo
34 ID = Vm / (R * pi);
35 VPI = Vm;
36 fprintf("El voltaje maximo es: %f V\n", Vm);
37 fprintf("Tu voltaje promedio es: %f %c\n", Vo, Voltaje1);
38 fprintf("La corriente promedio es: %f %c\n", Io, Amperaje1);
39 fprintf("La corriente eficaz con las que se obtienen las potencias es: %f %c\n",
    ↳ Iorms, Amperaje1);
40 fprintf("La potencia activa ('P') es: %f %c\n", P, PotenciaP);
41 fprintf("La potencia aparente suministrada por la fuente ('S') es: %f %s\n", S,
    ↳ PotenciaS);
42 fprintf("El factor de potencia es: %f\n", fp);
43 fprintf("La corriente que pasa a traves del diodo es: %f %c\n", ID, Amperaje1);
44 fprintf("El voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en magnitud y su magnitud
    ↳ es: %f %c\n", VPI, Voltaje1);
45 % Graficar corriente rectificada vs tiempo
46 t = linspace(0, 2 * pi, 1000);
47 I_rectificada = (Vm * sin(t)) / R;
48 I_rectificada(t < AlfaC) = 0; % Corriente rectificada considerando el angulo alfa
49 I_rectificada(I_rectificada < 0) = 0;
50 figure;
51 plot(t, I_rectificada, 'LineWidth', 2); % Linea gruesa
52 hold on;
53 % --- Linea punteada en con etiqueta ---
54 line([AlfaC, AlfaC], [0, max(I_rectificada)], 'Color', 'red', 'LineStyle', '--', '
    ↳ LineWidth', 1.5);
55 text(AlfaC, max(I_rectificada)*1.05, '\alpha', 'Color', 'red', 'FontSize', 12, '
    ↳ HorizontalAlignment', 'center');
56 xlabel('\ohm rad');
57 ylabel('Corriente Rectificada (A)');
58 title('Corriente Rectificada vs \omega t');
59 grid on;
60 % Graficar voltaje sin rectificar y corriente rectificada vs tiempo
61 t = linspace(0, 2 * pi, 1000);

```

Figura 4.5: Código del circuito rectificador de media onda controlado por SCR con carga R parte 1

```

62 V_fuente = Vm * sin(t);
63 I_rectificada = (Vm * sin(t))/2;
64 I_rectificada(t < AlfaC) = 0; % Corriente rectificada considerando el angulo alfa
65 I_rectificada(t < AlfaC) = 0; % Corriente rectificada considerando el angulo alfa
66 I_rectificada(I_rectificada<0)=0; %rectificacion.
67 figure (2);
68 plot(t, V_fuente, 'b', 'DisplayName', 'Voltaje sin rectificar');
69 hold on;
70 plot(t, I_rectificada, 'r', 'DisplayName', 'Corriente rectificada');
71 %no es posible Marcar el angulo alfa
72 xlabel('Tiempo (rad)');
73 ylabel('Magnitud');
74 title('Voltaje sin rectificar y Corriente rectificada vs Tiempo');
75 legend('Voltaje','Corriente');
76 grid on;

```

Figura 4.6: Código del circuito rectificador de media onda controlado por SCR con carga R parte 2

4.3. Circuito rectificador controlado por SCR de onda completa con carga resistiva

Ahora se mostrará el caso del circuito rectificador controlado por SCR de onda completa con carga resistiva. Primeramente, se presenta un ejemplo de operación en la Figura 4.7.

MATLAB Command Window

```

CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE ONDA COMPLETA CON CARGA R CONTROLADO:
Introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente: 120
Introduce el valor de la carga en ohms: 100
Introduce el valor del ángulo de disparo del SCR en grados: 45
El valor en radianes de tu ángulo de disparo SCR: 0.785398 Rad
El voltaje máximo es: 169.705627 V
Tu voltaje promedio es: 92.216165 V
La corriente promedio es: 0.922162 A
La corriente eficaz con las que se obtienen las potencias es: 1.144195 A
La potencia activa ('P') es: 130.918312 W
La potencia aparente suministrada por la fuente ('S') es: 137.303448 VA
El factor de potencia es: 0.953496
La corriente que pasa a través del diodo es: 0.540190 A
El voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en magnitud y su magnitud es: 169.705627 V

```

Figura 4.7: Resultados del circuito rectificador de onda completa controlado por SCR con carga R

Los pasos de operación son los siguientes:

- Se solicitan los parámetros.
- El programa hace los cálculos arroja los resultados.
- Abre una ventana emergente con la gráfica de la corriente en la carga.

4.3.1. Explicación del código de programación.

A continuación, se mostrarán en las Figuras 4.8 y 4.9 el código del programa y se hará una descripción de este.

```
1 clc;
2 close all;
3 Voltaje1='V';
4 Amperaje1='A';
5 PotenciaP='W';
6 PotenciaS='VA';
7 Radianes1='rad';
8 Resistencia='Ohm';
9 fprintf("CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE ONDA COMPLETA CON CARGA R CONTROLADO:\n
    ↪ n")
10 Vrms = input("Introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente: ");
11 R = input("Introduce el valor de la carga en ohms: ");
12 AlfaAux = input("Introduce el valor del angulo de disparo del SCR en grados: ");
13 Vm = Vrms * sqrt(2);
14 AlfaC = (AlfaAux * pi) / 180;
15 fprintf("El valor en radianes de tu angulo de disparo SCR: %f Rad\n", AlfaC);
16 %CARGA R CON SCR ONDA COMPLETA
17 % Fuente
18 if AlfaC <= (pi / 2)
19 Im = Vm / R;
20 else
21 Im = (Vm * sin(AlfaC)) / R;
22 end
23 % Carga
24 Vo = (Vm / pi) * (1 + cos(AlfaC));
25 Io = Vo / R;
26 Vorms = Vm * sqrt((1 / 2) - (AlfaC / (2 * pi)) + (sin(2 * AlfaC) / (4 * pi)));
27 Iorms = Vorms / R;
28 Isrms = Iorms;
29 % Potencias
30 P = R * (Iorms ^ 2);
31 S = Vrms * Iorms;
32 fp = P / S;
33 % Diodo
34 ID = Vm / (R * pi);
35 VPI = Vm;
36 fprintf("El voltaje maximo es: %f V\n", Vm);
37 fprintf("Tu voltaje promedio es: %f V\n", Vo);
38 fprintf("La corriente promedio es: %f A\n", Io);
39 fprintf("La corriente eficaz con las que se obtienen las potencias es: %f A\n",
    ↪ Iorms);
40 fprintf("La potencia activa ('P') es: %f %c\n", P, PotenciaP);
41 fprintf("La potencia aparente suministrada por la fuente ('S') es: %f VA\n", S);
42 fprintf("El factor de potencia es: %f\n", fp);
43 fprintf("La corriente que pasa a traves del diodo es: %f A\n", ID);
44 fprintf("El voltaje de pico inverso es el mismo que el Vm en magnitud y su magnitud
    ↪ es: %f %c\n", VPI, Voltaje1);
45 % Graficar corriente rectificada vs tiempo
46 t = linspace(0, 2 * pi, 1000);
47 I_rectificada = (Vm * sin(t)) / R;
48 I_rectificada(t < AlfaC) = 0; % Corriente rectificada considerando el angulo alfa
49 I_rectificada(I_rectificada < 0) = -I_rectificada(I_rectificada < 0); %
    ↪ Rectificacion
50 figure;
51 plot(t, I_rectificada);
52 xlabel('Tiempo (rad)');
53 ylabel('Corriente Rectificada (A)');
54 title('Corriente Rectificada');
55 grid on;
```

Figura 4.8: Código circuito Rectificador Monofásico de Onda Completa carga R, controlado por SCR parte 1

```

56 % Graficar voltaje sin rectificar y corriente rectificada vs tiempo
57 V_fuente = Vm * sin(t);
58 I_rectificada = (Vm * abs(sin(t))) / 2;
59 I_rectificada(t < AlfaC) = 0; % Corriente rectificada considerando el angulo alfa
60 I_rectificada(I_rectificada < 0) = -I_rectificada(I_rectificada < 0); %
    ↳ Rectificacion
61 figure;
62 plot(t, V_fuente, 'b', 'DisplayName', 'Voltaje sin rectificar');
63 hold on;
64 plot(t, I_rectificada, 'r', 'DisplayName', 'Corriente rectificada equivalente(
    ↳ visual)');
65 xlabel('Tiempo (rad)');
66 ylabel('Magnitud');
67 title('Voltaje sin rectificar y Corriente rectificada vs Tiempo');
68 legend('show');
69 grid on;

```

Figura 4.9: Código circuito Rectificador Monofásico de Onda Completa carga R, controlado por SCR parte 2

La dinámica fue la siguiente: limpiar la ventana de comando, limpiar variables y cerrar ventanas emergentes. Después se escribe el título del circuito que se va a evaluar. Posteriormente, se continúa con la solicitud al usuario de los parámetros del circuito: el voltaje V_{rms} , el valor de la carga y el ángulo de disparo de los SCR's.

Luego se introducen las fórmulas que utiliza el programa para obtener las variables de interés. En seguida, se mandan a imprimir dichas variables para ser visualizadas por el usuario. Por último, se realiza la elaboración de la gráfica de la corriente en la carga.

4.4. circuito rectificador controlado por SCR de media onda carga R-L

Este programa, se basa en el análisis estudiado en el subtema 2.12. La corriente en este circuito no se extingue en π radianes (180°) como en los casos de carga puramente resistiva, sino en un ángulo más allá de π , conocido como ángulo de extinción β , además su ecuación es un tanto compleja, por lo que se requiere de hacer uso de un método numérico para encontrar el valor de β , con el cual se calcula las variables deseadas; esto se suele hacer con un “ciclo for”, en todos los circuitos que utilizan método numérico se decidió utilizar el método numérico por aproximaciones sucesivas.

En las Figuras (4.10) y (4.11) se muestra el código, correspondiente.

```

1 clc; close all; clear all;
2 fprintf("CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE MEDIA ONDA CON CARGA RL CONTROLADO POR
   ↳ SCR:\n");
3 % Entradas
4 Vrms = input("Introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente: ");
5 R = input("Introduce el valor de la carga en ohms: ");
6 L = input("Introduce el valor de la bobina en Henrios: ");
7 Freq = input("Introduce la frecuencia en Hertz a la que se alimenta el circuito: ")
   ↳ ;
8 TolBeta = input("Introduce la tolerancia que quieres (0.00001 o menor): ");
9 AlfaAux = input("Introduce el valor del angulo de disparo del SCR en grados: ");
10 % Calculos iniciales
11 Vm = Vrms * sqrt(2);
12 AlfaC = (AlfaAux * pi) / 180;
13 w = 2 * pi * Freq;
14 theta = atan((w * L) / R);
15 tau = L / R;
16 Z = sqrt(R^2 + (w * L)^2);
17 % Determinacion de corriente maxima
18 if AlfaC <= (pi / 2)
19 Im = Vm / Z;
20 else
21 Im = (Vm * sin(AlfaC)) / Z;
22 end
23 % Calculo del angulo de extincion Beta
24 for AuxBeta = pi:2 * pi / 1000:2 * pi
25 Ib = (Vm/Z) * sin(AuxBeta - theta) - ((Im * sin(AlfaC - theta)) * exp((AlfaC -
   ↳ AuxBeta) / (w * tau)));
26 if Ib <= TolBeta
27 Beta = AuxBeta;
28 break;
29 end
30 end
31 Beta1 = Beta * (180 / pi);
32 syms VARwt1
33 IEQ = (Vm/Z * sin(VARwt1 - theta)) + ((-Vm/Z * sin(AlfaC - theta)) * exp((AlfaC -
   ↳ VARwt1) / (w * tau)));
34 Io = double(int(IEQ, AlfaC, Beta) * (1 / (2 * pi)));
35 Iorms = double(sqrt(int(IEQ^2, AlfaC, Beta) * (1 / (2 * pi))));
36 syms VARwt2
37 VEQ = Vm * sin(VARwt2);
38 Vo = double(int(VEQ, AlfaC, Beta) * (1 / (2 * pi)));
39 Vorms = double(sqrt(int(VEQ^2, AlfaC, Beta) * (1 / (2 * pi))));
40 Isrms = Iorms;
41 % Potencias
42 P = R * (Iorms^2);
43 S = Vrms * Iorms;
44 fp = P / S;
45 % Diodo
46 ID = Io;
47 VPI = Vm;
48 fprintf("El valor del angulo de disparo es %f rad\n", AlfaC);
49 fprintf("El valor de Beta es %f rad\n", Beta);
50 fprintf("El valor de Beta es %f \n", Beta1);
51 fprintf("\nEl voltaje maximo es: %f V\n", Vm);
52 fprintf("\nTu voltaje promedio es: %f V\n", Vo);
53 fprintf("La corriente promedio es: %f A\n", Io);
54 fprintf("\nLa corriente eficaz en la carga es: %f A\n", Iorms);
55 fprintf("El Voltaje eficaz en la carga es: %f V\n", Vorms);
56 fprintf("\nLa potencia activa ('P') es: %f W\n", P);
57 fprintf("La potencia aparente suministrada por la fuente ('S') es: %f VA\n", S);
58 fprintf("El factor de potencia es: %f\n", fp);
59 fprintf("\nLa corriente que pasa a traves del diodo es: %f A\n", Io);
60 fprintf("El voltaje de pico inverso es: %f V\n", VPI);
61 % Generar vector de corriente con valores evaluados desde AlfaC hasta Beta

```

Figura 4.10: Código del programa circuito rectificador de media onda controlado por SCR carga R-L parte 1

```

62 syms VARwt1
63 IEQ = (Im * sin(VARwt1 - theta)) + ((-Im * sin(AlfaC - theta)) * exp((AlfaC -
    ↳ VARwt1) / (w * tau)));
64 t_values = linspace(AlfaC, Beta, 1000); % Generar puntos de tiempo dentro del
    ↳ intervalo
65 I_vector = double(subs(IEQ, VARwt1, t_values)); % Evaluar en los puntos generados
66 I_vector = abs(I_vector); % Tomar solo valores positivos
67 % Mostrar los valores de corriente calculados
68 % Graficar la corriente rectificada con los valores obtenidos
69 figure;
70 plot(t_values, I_vector, 'r', 'LineWidth', 2);
71 hold on;
72 % Marcar el angulo Alfa y Beta en la grafica
73 yLimits = [0, max(I_vector)];
74 line([AlfaC AlfaC], yLimits, 'color', 'g', 'linewidth', 2, 'linestyle', '--');
75 text(AlfaC, max(I_vector) * 0.9, 'Alfa', 'color', 'green');
76 line([Beta Beta], yLimits, 'color', 'r', 'linewidth', 2, 'linestyle', '--');
77 text(Beta, max(I_vector) * 0.9, 'Beta', 'color', 'red');
78 xlabel('Tiempo (rad)');
79 ylabel('Corriente Rectificada (A)');
80 title('Corriente Rectificada en Medio Ciclo (Valores calculados desde la integral)
    ↳ ');
81 grid on;

```

Figura 4.11: Código del programa circuito rectificador de media onda controlado por SCR carga R-L parte 2

4.4.1. Explicación del código de programación

Este código sigue la misma dinámica primero se limpia ventanas emergentes, después se mostrara el nombre del circuito que se está analizando, se le solicita al usuario que introduzca los parámetros del circuito: Para este caso se le solicita, el voltaje eficaz, el valor de la carga resistiva(R) y el valor de la carga inductiva(L) , la frecuencia a la que está trabajando el circuito, después se le solicita que indique un valor de tolerancia para obtener el valor de β , y por último se le solicita que indique en que ángulo se disparará el SCR.

Posterior a eso el programa realiza los cálculos pertinentes, y se muestran los resultados obtenidos al usuario. Al final se hace una gráfica como en los casos anteriores para que se pueda visualizar la corriente en la carga.

A continuación, en las Figuras (4.12) y (4.13)se visualiza un ejemplo del programa siendo operado.

MATLAB Command Window

```
CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA CON CARGA RL CONTROLADO POR SCR:
Introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente: 120
Introduce el valor de la carga en ohms: 20
Introduce el valor de la bobina en Henrios: 0.04
Introduce la frecuencia en Hertz a la que se alimenta el circuito: 60
Introduce la tolerancia que quieres (0.00001 o menor): 0.00001
Introduce el valor del ángulo de disparo del SCR en grados: 45
El valor del ángulo de disparo es 0.785398 rad
El valor de Beta es 3.788761 rad
El valor de Beta es 217.080000 °

El voltaje máximo es: 169.705627 V

Tu voltaje promedio es: 40.646614 V
La corriente promedio es: 2.035347 A

La corriente eficaz en la carga es: 3.262643 A
El Voltaje eficaz en la carga es: 83.226877 V

La potencia activa ('P') es: 212.896831 W
La potencia aparente suministrada por la fuente ('S') es: 391.517201 VA
El factor de potencia es: 0.543774

La corriente que pasa a través del diodo es: 2.035347 A
El voltaje de pico inverso es: 169.705627 V
```

Figura 4.12: Entrega de resultados del programa circuito rectificador de media onda controlado por SCR carga R-L

Corriente Rectificada en Medio Ciclo (Valores calculados desde la integral)

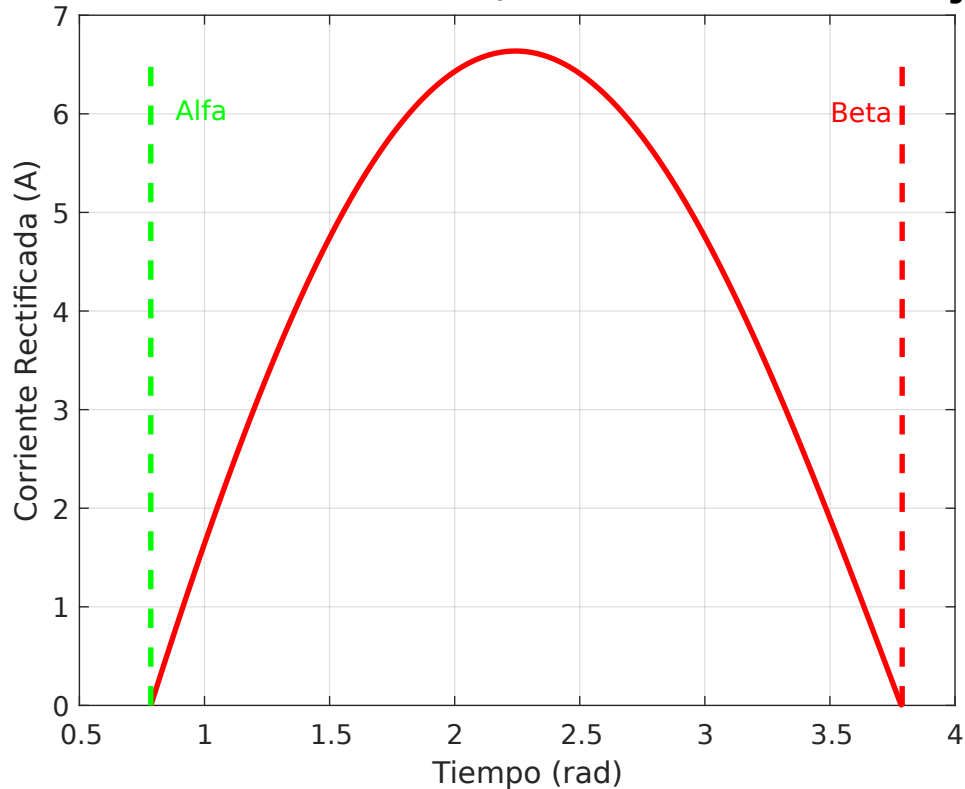


Figura 4.13: Grafica de la corriente rectificada

4.5. Circuito rectificador controlado por SCR's de onda completa con carga R-L

En este programa se analiza el caso de un circuito Rectificador de onda completa controlado por SCR's y con una carga R-L, este circuito tiene la peculiaridad de que cuenta con dos modos de operación según sea la corriente en la carga, el modo continuo y el modo discontinuo, y tiene una condición la cual permite poder predecir si el circuito se comportará de manera continua o de manera discontinua. Basta con analizar a θ y a α , si α es menor o igual a θ entonces estará operando en modo continuo, en caso contrario, operará en modo discontinuo.

Las ecuaciones relacionadas con este circuito se encuentran en el subtema 2.13 "Circuito Rectificador de Onda Completa Controlado SCR's con Carga RL". Dicho esto, lo primero será mostrar el código del programa y explicar brevemente cómo opera.

En la Figura 4.14 se muestra la primera parte del programa, en esta se le solicitan los parámetros del circuito a analizar. Y se resuelven unas fórmulas que tienen en común ambos modos de operación. En la Figura 4.15 muestran la sección del código que representa el modo continuo, la solución de fórmulas específicas, la sección donde muestran los resultados al usuario y la elaboración de una gráfica. Y en la Figura 4.16 se muestra la sección del código que representa el modo discontinuo.

```
1 clc; clear all; close all;
2 fprintf("CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE ONDA COMPLETA CON CARGA RL CONTROLADO
    ↳ POR SCR:\n");
3 % Entradas
4 Vrms = input("Introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente: ");
5 R = input("Introduce el valor de la carga en ohms: ");
6 L = input("Introduce el valor de la bobina en Henrios: ");
7 Freq = input("Introduce la frecuencia en Hertz a la que se alimenta el circuito: ")
    ↳ ;
8 TolBeta = input("Introduce la tolerancia que quieres (0.00001 o menor): ");
9 AlfaAux = input("Introduce el valor del angulo de disparo del SCR en grados: ");
10 % Calculos iniciales
11 Vm = Vrms * sqrt(2);
12 AlfaC = (AlfaAux * pi) / 180;
13 w = 2 * pi * Freq;
14 theta = atan((w * L) / R);
15 tau = L / R;
16 Z = sqrt(R^2 + (w * L)^2);
```

Figura 4.14: Programa de circuito rectificador controlado por SCR carga RL parte 1 introducción de variables.

```

17 % Determinacion de corriente maxima
18 if AlfaC <= (pi/2)
19 Im = Vm/Z;
20 else
21 Im = (Vm * sin(AlfaC))/Z;
22 end
23 % Calculo del angulo de extincion Beta con estabilidad mejorada
24 Beta = pi;
25 for AuxBeta = pi:2 * pi/1000:2 * pi
26 Ib = (Im * sin(AuxBeta - theta)) - ((Im * sin(AlfaC - theta)) * exp((AlfaC -
    ↪ AuxBeta) / (w * tau)));
27 if Ib <= TolBeta
28 Beta = AuxBeta;
29 break;
30 end
31 end
32 Beta1 = Beta * (180 / pi);
33 % Evaluacion del modo de operacion
34 if AlfaC <= theta
35 fprintf("Se comporta en modo continuo\n");
36 % Nmero de iteraciones para armonicos
37 nit = 2;
38 Vo = ((2 * Vm) / pi) * cos(AlfaC);
39 Io = Vo / R;
40 AUXVorms = Vo^2;
41 AUXIorms = Io^2;
42 for m = 1:nit
43 n = m * 2;
44 Vn = Vo * ((1 / (n - 1)) - (1 / (n + 1)));
45 In = Vn / sqrt(R^2 + (n * w * L)^2);
46 Vnrms = Vn / sqrt(2);
47 Inrms = In / sqrt(2);
48 AUXVorms = AUXVorms + (Vnrms^2);
49 AUXIorms = AUXIorms + (Inrms^2);
50 end
51 Vorms = sqrt(AUXVorms);
52 Iorms = sqrt(AUXIorms);
53 Isrms = Iorms;
54 % Potencias
55 P = R * (Iorms^2);
56 S = Vorms * Iorms;
57 fp = P / S;
58 % Diodo
59 ID = Io / 2;
60 VPI = Vm;
61 % Graficar corriente rectificada
62 t = linspace(0, 2 * pi, 1000);
63 I_rectificada = (Vm * abs(sin(t))) / R;
64 I_rectificada(t < AlfaC) = 0;
65 figure;
66 plot(t, I_rectificada, 'r', 'LineWidth', 2);
67 xlabel('Tiempo (rad)');
68 ylabel('Corriente Rectificada (A)');
69 title('Corriente Rectificada');
70 grid on;
71 hold on;
72 % Graficar voltaje sin rectificar y corriente rectificada
73 V_fuente = Vm * sin(t);
74 I_rectificada = (Vm * abs(sin(t))) / 2;
75 I_rectificada(t < AlfaC) = 0;
76 figure;
77 plot(t, V_fuente, 'b', 'DisplayName', 'Voltaje sin rectificar');
78 hold on;
79 plot(t, I_rectificada, 'r', 'DisplayName', 'Corriente rectificada');
80 xlabel('Tiempo (rad)');
81 ylabel('Magnitud');
82 title('Voltaje sin rectificar y Corriente rectificada vs Tiempo');
83 legend('show');
84 grid on;

```

Figura 4.15: Programa de circuito rectificador controlado por SCR carga RL parte 2 comportamiento continuo.

```

85 else
86 fprintf("Se comporta en modo discontinuo\n");
87 syms VARwt1
88 IEQ = (Im * sin(VARwt1 - theta)) + ((-Im * sin(AlfaC - theta)) * exp((AlfaC -
    ↪ VARwt1) / (w * tau)));
89 Io = vpa(int(IEQ, AlfaC, Beta) * (1 / pi));
90 Iorms = vpa(sqrt(int(IEQ^2, AlfaC, Beta) * (1 / pi)));
91 syms VARwt2
92 VEQ = Vm * sin(VARwt2);
93 Vo = vpa(int(VEQ, AlfaC, Beta) * (1 / pi));
94 Vorms = vpa(sqrt(int(VEQ^2, AlfaC, Beta) * (1 / pi)));
95 Isrms = Iorms;
96 % Potencias
97 P = R * (Iorms^2);
98 S = Vorms * Iorms;
99 fp = P / S;
100 % Diodo
101 ID = Io / 2;
102 VPI = Vm;
103 end
104 % Imprimir resultados
105 fprintf("\n El voltaje maximo es: %f V\n", Vm);
106 fprintf("Tu angulo Beta es: %f grados\n", Beta1);
107 fprintf("Tu voltaje promedio es: %f V\n", Vo);
108 fprintf("La corriente promedio es: %f A\n", Io);
109 fprintf("La corriente eficaz es: %f A\n", Iorms);
110 fprintf("La potencia activa ('P') es: %f W\n", P);
111 fprintf("La potencia aparente ('S') suministrada por la fuente es: %f VA\n", S);
112 fprintf("El factor de potencia es: %f\n", fp);
113 fprintf("La corriente que pasa a traves del diodo es: %f A\n", ID);
114 fprintf("El voltaje de pico inverso es: %f V\n", VPI);
115 % Graficar corriente rectificadora
116 t = linspace(0, 2 * pi, 1000);
117 I_rectificada = (Vm * abs(sin(t))) / R;
118 I_rectificada(t < AlfaC) = 0;
119 figure;
120 plot(t, I_rectificada, 'r', 'LineWidth', 2);
121 xlabel('Tiempo (rad)');
122 ylabel('Corriente Rectificada (A)');
123 title('Corriente Rectificada');
124 grid on;
125 hold on;
126 % Graficar voltaje sin rectificar y corriente rectificadora
127 V_fuente = Vm * sin(t);
128 I_rectificada = (Vm * abs(sin(t))) / 2;
129 I_rectificada(t < AlfaC) = 0;
130 figure;
131 plot(t, V_fuente, 'b', 'DisplayName', 'Voltaje sin rectificar');
132 hold on;
133 plot(t, I_rectificada, 'r', 'DisplayName', 'Corriente rectificadora');
134 xlabel('Tiempo (rad)');
135 ylabel('Magnitud');
136 title('Voltaje sin rectificar y Corriente rectificadora vs Tiempo');
137 legend('show');
138 grid on;

```

Figura 4.16: Programa de circuito rectificador controlado por SCR carga RL parte 3 modo discontinuo.

4.5.1. Explicación del código de programación

La lógica es la siguiente: al correr el programa, se limpian variables y ventanas emergentes, así como la ventana de comandos, después se presenta el título del circuito, se le solicitan al usuario los valores de la fuente, la carga resistiva, la carga inductiva, la frecuencia a la que se alimenta, la tolerancia para encontrar β , aunque solo usará el valor si cae en caso

discontinuo y el ángulo en grados al que se dispara el SCR.

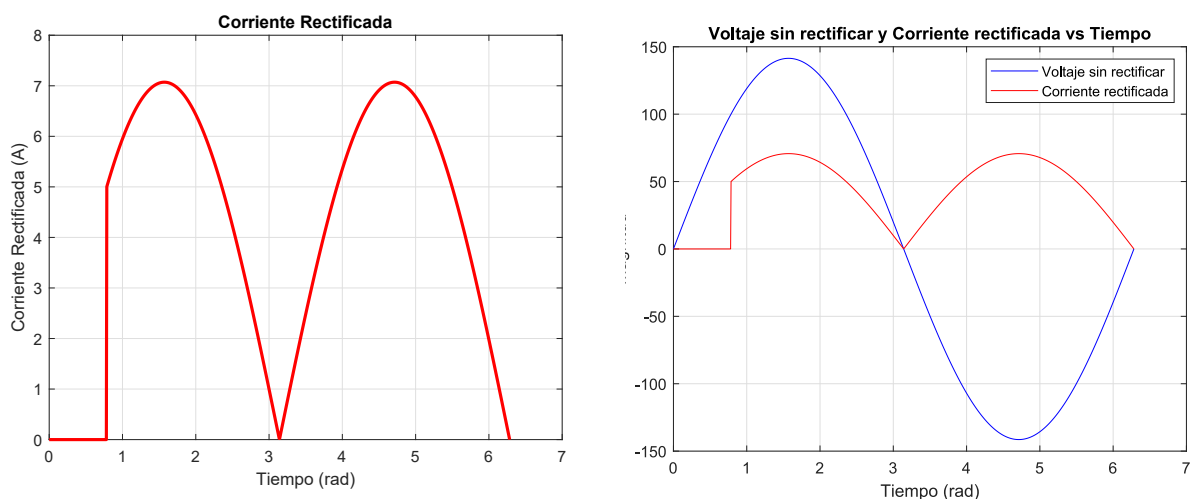
Después hace algunos cálculos preliminares como el cálculo θ , y el de α de grados a radianes. Luego compara el valor de α contra θ , para ver en qué modo cae, y mediante un “if” se evalúa el circuito con los valores introducidos, entonces continuará con las fórmulas pertinentes, y el cálculo de la gráfica para la forma de onda.

Ahora podrá observar dos ejemplos uno en las Figuras 4.17a y 4.17b los cuales serán un ejemplo en modo continuo y 4.14a y 4.14b los cuales serán un ejemplo en modo discontinuo.

```
MATLAB Command Window
CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA CON CARGA RL CONTROLADO POR SCR:
Introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente: 100
Introduce el valor de la carga en ohms: 20
Introduce el valor de la bobina en Henrios: 0.04
Introduce la frecuencia en Hertz a la que se alimenta el circuito: 60
Introduce la tolerancia que quieres (0.00001 o menor): 0.00001
Introduce el valor del ángulo de disparo del SCR en grados: 20
Se comporta en modo continuo

El voltaje máximo es: 141.421356 V
Tu ángulo Beta es: 217.440000 grados
Tu voltaje promedio es: 84.602060 V
La corriente promedio es: 4.230103 A
La corriente eficaz es: 4.373109 A
La potencia activa ('P') es: 382.481576 W
La potencia aparente ('S') suministrada por la fuente es: 437.310860 VA
El factor de potencia es: 0.874622
La corriente que pasa a través del diodo es: 2.115051 A
El voltaje de pico inverso es: 141.421356 V
```

(a) Resultados del circuito en modo continuo.



(b) Graficas del circuito en modo continuo.

Figura 4.17: Ejemplo de circuito en modo continuo.

MATLAB Command Window

CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE MEDIA ONDA CON CARGA RL CONTROLADO POR SCR:

Introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente: 100

Introduce el valor de la carga en ohms: 20

Introduce el valor de la bobina en Henrios: 0.04

Introduce la frecuencia en Herz a la que se alimenta el circuito: 60

Introduce la tolerancia que quieres (0.00001 o menor): 0.0001

Introduce el valor del angulo de disparo del SCR en grados: 45

Se comporta en modo discontinuo

El voltaje máximo es: 141.421356

Tu ángulo Beta es: 3.788761

Tu voltaje promedio es: 67.744356

La corriente promedio es: 3.392245

La corriente eficaz es: 3.845062

La potencia activa (P) es: 295.690043

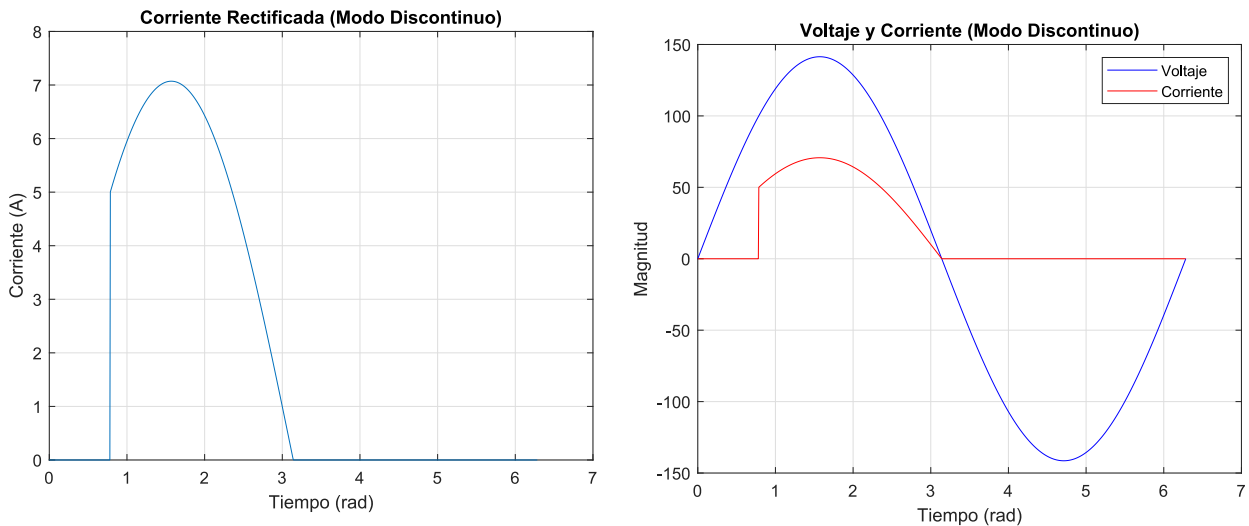
La potencia aparente (S) es: 384.506205

El factor de potencia es: 0.769012

La corriente en el diodo es: 1.696123

El voltaje de pico inverso es: 141.421356

(a) Resultados del circuito en modo discontinuo.



(b) Graficas del circuito en modo discontinuo.

Figura 4.18: Ejemplo de circuito en modo discontinuo.

4.6. Circuito rectificador controlado por SCR's de onda completa con carga R-L Generador

Este circuito es el último de los circuitos a analizar, este es en cierto modo similar en su forma de onda al circuito controlado por SCR de media onda Carga RL, pero sus fórmulas son diferentes, puede consultar sus fórmulas y el análisis del circuito en el capítulo 2.14 "circuito rectificador de media onda controlado por SCR carga RL-Generador".

```

1 clc; clear all; close all;
2 fprintf("CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFASICO DE MEDIA ONDA CON CARGA RL-GENERADOR
   ↳ CONTROLADO POR SCR:\n");
3 % Entradas
4 Vrms = input("Introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente: ");
5 Vcc = input("Introduce el valor del voltaje generador (Vcc): ");
6 R = input("Introduce el valor de la carga en ohms: ");
7 L = input("Introduce el valor de la bobina en Henrios: ");
8 Freq = input("Introduce la frecuencia en Hertz: ");
9 TolBeta = input("Introduce la tolerancia que quieres (0.00001 o menor): ");
10 AlfaAux = input("Introduce el valor del angulo de disparo del SCR en grados: ");
11 Vm = Vrms * sqrt(2);
12 AlfaC = (AlfaAux * pi) / 180;
13 w = 2 * pi * Freq;
14 theta = atan((w * L) / R);
15 tau = L / R;
16 alfamin = asin(Vcc / Vm);
17 Z = sqrt(R^2 + (w * L)^2);
18 k = Vm / Z;
19 a2 = (Vcc / R);
20 a = ((-Vm / Z) * sin(AlfaC - theta) + (Vcc / R)) * exp((AlfaC / (w * tau)));
21 if alfamin > AlfaC
22 dispara = alfamin * (180 / pi);
23 fprintf("El SCR no se puede disparar, el SCR se puede disparar despues de que el
   ↳ angulo de disparo sea mayor a %f grados\n", dispara);
24 else
25 if AlfaC <= (pi / 2)
26 Im = Vm / Z;
27 else
28 Im = (Vm * sin(AlfaC)) / Z;
29 end
30 % Calculo del angulo de extincion Beta
31 for AuxBeta = pi:2 * pi / 1000:2 * pi
32 Ib = (Vm/Z * sin(AuxBeta - theta)) - Vcc/R + ((-Vm/Z * sin(AlfaC - theta) + Vcc/R)
   ↳ * exp((AlfaC - AuxBeta) / (w * tau)));
33 if Ib <= TolBeta
34 Beta = AuxBeta;
35 break;
36 end
37 end
38 Beta1 = Beta * (180 / pi);
39 % Corriente media
40 syms Iwt
41 Iwt = (Vm / Z) * (sin(Iwt - theta)) - Vcc/R + a * exp(-((Iwt - AlfaC) / (w * tau)))
   ↳ ;
42 Imed = int(Iwt, AlfaC, Beta) * (1 / (2 * pi));
43 Io = vpa(Imed); % Usar vpa para evaluar de forma mas precisa la expresion
44 % Corriente eficaz
45 Iwt2 = Iwt^2;
46 Irmsaux = sqrt(int(Iwt2, AlfaC, Beta) * (1 / (2 * pi)));
47 Irms = vpa(Irmsaux);
48 Vrms = Vm / sqrt(2);
49 % Calculo de voltajes
50 syms wt
51 Vwt = Vm * sin(wt);
52 Vwtaux = int(Vwt, AlfaC, Beta) * (1 / (2 * pi));
53 Vo = double(Vwtaux);
54 Vwt2 = Vwt^2;
55 Vwt2aux = sqrt(int(Vwt2, AlfaC, Beta) * (1 / (2 * pi)));
56 Vorms=double(Vwt2aux);
57 % Potencias
58 P = (Irms^2) * R + Vcc * Io;
59 S = Vrms * Irms;
60 Fp = P / S;
61 fprintf("El voltaje maximo es: %f V\n", Vm);
62 fprintf("Tu angulo Beta es: %f rad\n", Beta);

```

Figura 4.19: Código del circuito rectificador controlado por SCR de media onda Carga R-L Generador. Parte 1.

```

63 fprintf("Tu voltaje promedio es: %f V\n", Vo);
64 fprintf("La corriente promedio es: %f A\n", Io);
65 fprintf("La corriente eficaz en la carga es: %f A\n", Irms);
66 fprintf("El voltaje eficaz en la carga es: %f V\n", Vorms);
67 fprintf("La potencia activa ('P') es: %f W\n", P);
68 fprintf("La potencia aparente suministrada por la fuente ('S') es: %f VA\n", S);
69 fprintf("El factor de potencia es: %f\n", Fp);
70 % Correccion de la grafica de corriente rectificadora
71 t_values_full = linspace(0, 2*pi, 1000); % Definir el rango completo de tiempo
72 I_vector_full = zeros(size(t_values_full)); % Inicializar el vector con ceros
73 for i = 1:length(t_values_full)
74     if t_values_full(i) >= AlfaC && t_values_full(i) <= Beta
75         I_vector_full(i) = (Vm / Z) * sin(t_values_full(i) - theta) - Vcc/R + a * exp(-(
            ↳ t_values_full(i) - AlfaC) / (w * tau));
76     else
77         I_vector_full(i) = 0; % Fuera del intervalo AlfaC-Beta, la corriente es cero
78     end
79 end
80 % Eliminar valores negativos
81 I_vector_full(I_vector_full < 0) = 0;
82 % Graficar corriente rectificadora corregida
83 figure;
84 plot(t_values_full, I_vector_full, 'r', 'LineWidth', 2);
85 xlabel('\omega t (rad)');
86 ylabel('Corriente Rectificada en la carga (A)');
87 title('Corriente Rectificada en la carga (A)');
88 grid on;
89 % Graficar voltaje sin rectificar y corriente rectificadora vs tiempo
90 V_fuente = Vm * sin(t_values_full);
91 figure;
92 plot(t_values_full, V_fuente, 'b', 'DisplayName', 'Voltaje sin rectificar');
93 hold on;
94 plot(t_values_full, I_vector_full, 'r', 'DisplayName', 'Corriente rectificadora');
95 xlabel('\omega t (rad)');
96 ylabel('Magnitud');
97 title('Voltaje sin rectificar y Corriente rectificadora vs \omega t');
98 legend('show');
99 grid on;
100 end

```

Figura 4.20: Código del circuito rectificador controlado por SCR de media onda Carga R-L Generador. Parte 2.

4.6.1. Explicación del código de programación.

En la Figura 4.19 y Figura 4.20 se observa el código de programación el mismo que se procederá a explicar brevemente como es que funciona: sigue la misma dinámica primero se limpia ventanas emergentes, después se mostrara el nombre del circuito que se está analizando, se le solicita al usuario que introduzca los parámetros del circuito: Para este caso se le solicita, el voltaje eficaz, el voltaje del generador, el valor de la carga R y el valor de la carga L , la frecuencia a la que está trabajando el circuito, después se le solicita que indique un valor de tolerancia para obtener el valor de Beta, y por último se le solicita que indique en que ángulo se disparará el SCR.

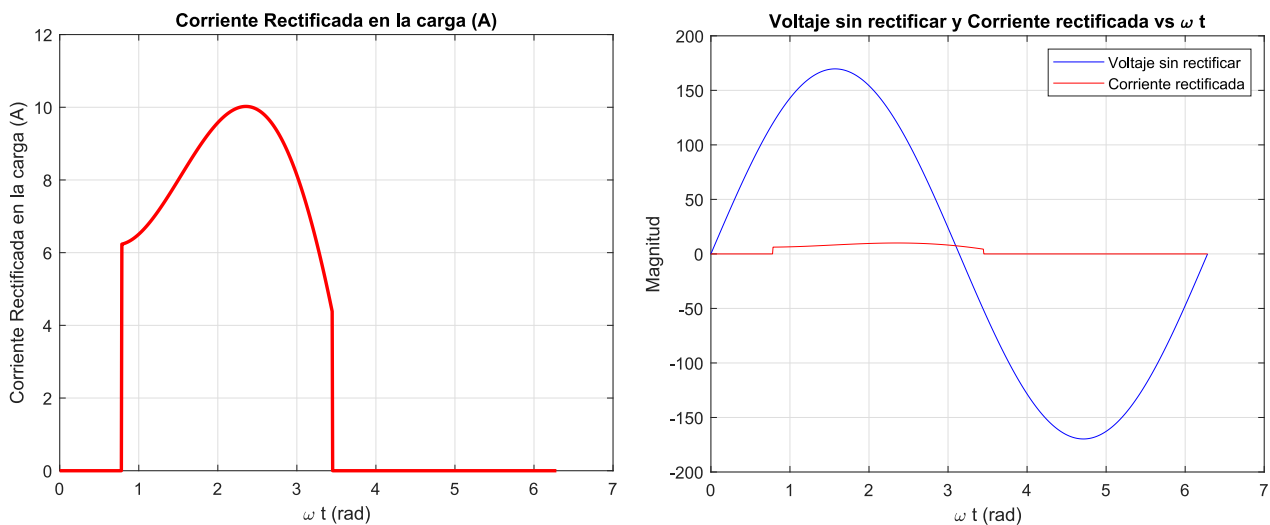
Posterior a eso el programa realiza los cálculos pertinentes, y se muestran los resultados para el usuario. Al final se hace una gráfica como en los casos anteriores para que pueda

visualizar la corriente en la carga.

Se mostrará un ejemplo en la Figura 4.21a y Figura 4.21b para visualizar como opera este programa.

```
MATLAB Command Window
CIRCUITO RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA CON CARGA RL-GENERADOR CONTROLADO POR SCR:
Introduce el valor del Voltaje eficaz de la fuente: 120
Introduce el valor del voltaje generador (Vcc): 100
Introduce el valor de la carga en ohms: 2
Introduce el valor de la bobina en Henrios: 0.04
Introduce la frecuencia en Hertz: 60
Introduce la tolerancia que quieres (0.00001 o menor): 0.0001
Introduce el valor del ángulo de disparo del SCR en grados: 45
El voltaje máximo es: 169.705627 V
Tu ángulo Beta es: 3.449469 rad
Tu voltaje promedio es: 44.838079 V
La corriente promedio es: 3.474476 A
La corriente eficaz en la carga es: 5.421334 A
El voltaje eficaz en la carga es: 81.176758 V
La potencia activa ('P') es: 406.229325 W
La potencia aparente suministrada por la fuente ('S') es: 650.560118 VA
El factor de potencia es: 0.624430
```

(a) Resultados del circuito rectificador controlado por SCR de media onda Carga R-L Generador.



(b) Graficas del circuito rectificador controlado por SCR de media onda Carga R-L Generador.

Figura 4.21: Ejemplo con resultados del circuito rectificador controlado por SCR de media onda Carga R-L Generador.

Diseño de la Interfaz en Matlab

Introducción

En este capítulo se abordará las decisiones tomadas para realizar la aplicación de la herramienta computacional en el software de Matlab, también se abordarán conceptos de funciones en el apartado de App Designer. Y por último se retomarán las fórmulas del capítulo 2 el “marco teórico”.

Para tener en cuenta el diseño, se debe de realizar un desglose de los circuitos que se incluirán en esta misma interfaz, para así poder hacer la interfaz de acuerdo con las necesidades de estos, ya sea por sus componentes o su configuración. Los circuitos que se tratarán en esta interfaz serán los siguientes:

- Rectificador no controlado de media onda con carga puramente resistiva
- Rectificador no controlado de onda completa con carga puramente resistiva
- Rectificador no controlado de media onda con carga resistiva e inductiva
- Rectificador no controlado de onda completa con carga resistiva e inductiva
- Rectificador no controlado de media onda con carga resistiva, inductiva y generador
- Rectificador no controlado de onda completa con carga resistiva, inductiva y generador
- Rectificador controlado por SCR de media onda con carga puramente resistiva
- Rectificador controlado por SCR's de onda completa con carga puramente resistiva
- Rectificador controlado por SCR de media onda con carga resistiva e inductiva
- Rectificador controlado por SCR's de onda completa con carga resistiva e inductiva
- Rectificador controlado por SCR de media onda con carga resistiva, inductiva y generador.

5.1. Definir las Opciones

Ya que se desglosaron los 11 circuitos, se deben separar las características comunes en varios de ellos. Para ello se establecen las opciones que tendrán, en común (véase la Figura 5.1). Empezando por el control del circuito se puede obtener una opción de:

- Controlado por SCR
- No controlado (Diodo Semiconductor Rectificador de Silicio)

Tipo	
☒	Controlado
☐	No Controlado

Figura 5.1: Definición de tipo.

Estas opciones se integrarán a la interfaz con botones de opción, uno por cada característica, de esta manera se separan los circuitos en seis controlados y cinco no controlados, los cuales siguen teniendo estas mismas características en común:

- Circuito de media onda con carga puramente resistiva
- Circuito de onda completa con carga puramente resistiva
- Circuito de media onda con carga resistiva e inductiva
- Circuito de onda completa con carga resistiva e inductiva
- Circuito de media onda con carga resistiva, inductiva y generador
- Circuito de onda completa con carga resistiva, inductiva y generador

Ahora se toma la siguiente característica que es la configuración de rectificadores (véase la Figura 5.2), y se separan en estas dos opciones:

- Media onda
- Onda Completa

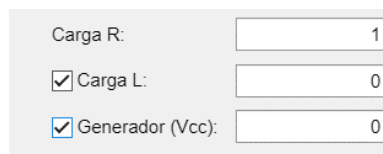
Configuración de rectific...	
☒	Media Onda
☐	Onda Completa

Figura 5.2: Configuración del rectificador

Estas opciones también se integrarán con botones, de esta manera quedarían tres circuitos de media onda en este apartado (que en total serían seis ya que se incluirían los controlados por el SCR) y otros tres circuitos de onda completa para este mismo, de los cuales quedarían las tres configuraciones siguientes:

- Carga puramente resistiva
- Carga resistiva e inductiva
- Carga resistiva, inductiva y generador

De estos tres circuitos solamente restaría el separarlos por los componentes que tengan, todos ellos tienen un componente resistivo, dos de ellos tienen componente inductivo, y solo uno de ellos tiene un componente generador. Para estos circuitos se deben incluir opciones que establezcan si estos presentan determinados componentes, ya que todos presentan componentes resistivos no es necesario colocar una opción para la carga R, en cambio con la carga L y la carga del generador se colocarán unas opciones para indicar que presenta carga inductiva y generador respectivamente, y se hará con una casilla de verificación en la cual al estar marcada con una “palomita” significa que presentan este componente. Como se observa en la Figura 5.3.



Carga R:	1
☒ Carga L:	0
☒ Generador (Vcc):	0

Figura 5.3: Cargas habilitadas

Ahora, para finalizar con los apartados de las opciones, la casilla de generador solamente deberá estar activa cuando esté seleccionada la casilla de la carga inductiva (o “Carga L” en la interfaz), ya que un generador siempre tendrá una carga inductiva de por medio.

5.2. Definir los Campos Modificables

Ya que se finalizaron con los apartados de opciones, se continuará con los apartados modificables, estos permitirán al usuario modificar los valores del componente que esté indicado por la interfaz (descrito por etiquetas), entre ellos y recabando todas las variables de los circuitos se tomaron en cuenta los siguientes:

- Voltaje RMS (con unidades en Voltios)
- Carga R (con unidades en Ohms)
- Carga L (con unidades en Henrios)

- Generador (con unidades en Voltios)
- Frecuencia (con unidades en Hertz)
- Tolerancia: Esta para mejorar la precisión en algunos circuitos
- Alfa: El ángulo de disparo del triodo SCR (con unidades en grados)
- Ciclos: Número de ciclos a mostrar en las gráficas

De estas opciones no todas estarán activas por defecto, ya que algunos circuitos no ocupan todos estos valores, los apartados desactivados serán los siguientes:

- Carga L: Solo se activará en cuanto la casilla de verificación junto a ella esté marcado con una “palomita”.
- Generador: El mismo caso que el apartado de la Carga L.
- Tolerancia: Solo se activará si está presente un elemento inductivo, ya que a la mayoría de estos circuitos se les calcula un ángulo de extinción (representado por beta).
- Alfa: Solo estará activo en los circuitos controlados por SCR's, ya que en los no controlados no existe un ángulo de disparo.

Como se puede observar en la Figura 5.4.

Voltaje RMS:	120	Frecuencia:	60	Beta = 3.1416 rads
Carga R:	20	Tolerancia:	1e-06	Theta = 0.64604 rads
☒ Carga L:	0.04	Alfa:	0	Alpha inicial = 0.63014 ..
☒ Generador (Vcc):	100	Ciclos	1 ▲ ▼	

Figura 5.4: Campos modificables.

En todos estos apartados modificables el usuario podrá interactuar con ellos para colocar sus valores, todos ellos están limitados a “solo datos numéricos”, y algunos de ellos tienen límites en las cantidades que se pueden introducir, esto con el objetivo de no ocasionar errores en los cálculos del programa. Estos límites son:

- Voltaje RMS: (mayor o igual a cero) si se coloca un 0 no habrá señal de entrada ni de salida, y si se coloca un valor negativo aparecerá una etiqueta de error.

Voltaje RMS: < Value must be between 0 and Infinity

- Carga R: (un valor positivo diferente de cero), esto con el fin de no obtener divisiones entre 0, ya que varias divisiones presentan la resistencia en su denominador, y si se pone un número menor o igual a cero mostrará una etiqueta de error.

Carga R: < Value must be between 1 and Infinity

- Carga L: (mayor o igual a cero), si se coloca un 0 actúa como un circuito puramente resistivo, y si se coloca un valor negativo aparecerá una etiqueta de error.

☒ Carga L: < Value must be between 0 and Infinity

- Generador: (mayor o igual a cero) si no se introduce un valor numérico aparece la siguiente leyenda.

☒ Generador (Vcc): < Value must be numeric

- Frecuencia: (normalmente los valores recomendados son 60 o 50.), se limita a 1 ya que de ser 0 sería un circuito de corriente directa. Al no poner valores positivos desde 1, aparecerá la siguiente leyenda.

Frecuencia: < Value must be between 1 and Infinity

- Tolerancia: se recomienda un valor de 0.000001 pero se puede cambiar la tolerancia a valores positivos normalmente menores de 1.

Tolerancia: < Value must be between 0.000001 and 0.1

- Alfa: (0,180), de ser 0 actúa como un circuito no controlado, y de ser 180 no habrá señal de salida.

- Ciclos: (1 a 10), este es el único apartado que solo acepta números enteros, de ingresarse un decimal este se redondea hacia el entero más cercano. Solamente es hasta 10 ya que esto minimiza el tiempo de cálculo del programa (para los datos a ingresar a las gráficas) y a su vez no se pierde calidad en las mismas. Al tratar de modificar con valores diferentes a los de su rango aparece la siguiente leyenda.

5.2.1. App. (Nombre del elemento). Value

Con ello se puede obtener en una variable el valor que ingresó el usuario, tomando en cuenta que dichas variables son de forma local, esto significa que la variable solo estará presente en la función a la que sea llamada.

Ya que MATLAB maneja todos los procesos de la aplicación como funciones (ya sea la creación de los elementos, el listado de estos mismos, las propiedades de ellos, etc.), se deberá usar una función para la acción de un botón o una casilla de verificación, y ya con esa misma función, elaborar el proceso que deberá realizar la aplicación con los valores que ésta tenga. Véase la Figura 5.4, en los recuadros blancos es donde se aplica dicha instrucción; en la Figura 5.5 se observan las líneas de instrucciones.

```

MATLAB App
175
176      Vrms = app.RMSField.Value;
177      R = app.RField.Value;
178      L = app.LField.Value;
179      Vcc = app.VccField.Value;
180      Freq = app.FreqField.Value;
181      TolBeta = app.TolField.Value;|
182      AlfaC = (app.AlfaField.Value*pi)/180; %Radianes
183

```

Figura 5.5: Campos de la aplicación.

5.2.2. Etiquetas

Estas son los indicadores para el usuario, podrán otorgar los resultados de acuerdo con el circuito que está seleccionado, indicado por el título. Empezando por este mismo, es una etiqueta que modifica su texto de acuerdo con las opciones seleccionadas por el usuario, esto con el fin de indicarle al mismo en que circuito se está trabajando.

Cada uno de los campos modificables presenta una etiqueta a su lado izquierdo que indica el componente al cual se le está modificando su valor, así como en la parte de abajo de los campos se incluye una etiqueta que indica el apartado del cual corresponden los cálculos, estas son: “Fuente”, “Rectificador”, “Carga” y “Potencias”.

Debajo de cada una de ellas se encuentran una serie de etiquetas las cuales modifican su valor inicial para indicar al usuario el nuevo valor del parámetro:

- Fuente:

V_{rms} : Voltaje eficaz.

I_m : Corriente máxima de la fuente.

I_{srms} : Corriente eficaz (comparte el valor con la de la carga).

- Rectificador:

$I_{Rectificador}$: Corriente máxima soportada por el diodo.

V_{PI} : Voltaje máximo soportado por el diodo (voltaje de pico inverso).

- Carga:

V_o : Voltaje promedio de la carga.

I_o : Corriente promedio de la carga.

V_{orms} : Voltaje eficaz de la carga.

I_{orms} : Corriente eficaz (comparte el valor con la de la fuente).

- Potencias:

P : Potencia activa en el circuito.

S : Potencia aparente del circuito.

$F.p$: Factor de potencia del circuito.

Puede observarse en la Figura 5.6 un ejemplo de lo antes mencionado.

Fuente	Rectificador	Carga	Potencias
Vm = 169.7056V	I_Rectificador = -2.4344A	Vo = 255.3902V	P = 474.1105W
Im = 6.7753A	VPI = 169.7056V	Io = -4.8688A	S = 1818.9719VA
Isrms = 15.1581A		Vorms = 43521.8219V	F.P. = 0.26065
		Iorms = 15.1581A	

Figura 5.6: Etiquetas y región de resultados.

También se encuentran 3 etiquetas más presentes para indicar parámetros que están presentes solo en algunos circuitos:

- Beta: Ángulo de extinción de algunos circuitos
- Theta: Ángulo de desfase en circuitos con inductancia presente.
- Alfa: Ángulo de inicio o de disparo del SCR.

5.2.3. Botones

Estos realizarán una función en cuanto sean accionados por el usuario.

- Botón “Calcular” : Llevará a cabo realizar las operaciones de acuerdo con el circuito solicitado y mostrará los valores correspondientes en las etiquetas antes descritas y en las gráficas de la aplicación.
- Botón “Limpiar” : Eliminará los valores de las etiquetas y reiniciará las gráficas dejándolas en blanco.
- Botón “Salir” : Cerrará la aplicación sin forzar la misma, descargando los datos de la memoria del ordenador.
- Botones del “Ciclos” : Modificarán las gráficas de acuerdo con los ciclos que desee ver el usuario, en un rango de 1 a 10, y se desactivarán el superior y el inferior en cuanto lleguen a sus respectivos límites.
- Gráficas : Estas se encargarán de mostrar las formas de onda de dos señales, siendo estas la corriente de la carga y el voltaje rectificado. Se comparan ambos con el voltaje de la fuente (representado por el color azul), el tiempo es representado en radianes, y el eje Y siendo las magnitudes en la carga como “V” y como “A”, representadas de color rojo.

5.3. Funciones

Se hablará de las funciones que es posible modificar por el que realiza el código, ya que en el apartado del código de la interfaz de aplicaciones de MATLAB se encuentran varias funciones que son creadas por el mismo motor y no son modificables para el creador de la aplicación, ya que alterar estas mismas puede modificar su comportamiento u obtener errores.

Estas funciones creadas por MATLAB principalmente incluyen el listado de componentes, la creación de estos, procesos de inicio y cierre de la aplicación, posiciones y tamaños de los componentes, etc. No se hablará de ellos ya que no es posible modificarlos y son creados por el propio motor de programación.

5.3.1. Función “Titulo”

Para comenzar se establece una función que modifique el título de acuerdo con el circuito que se esté calculando, para ello se extraen los estados de todas las casillas de verificación y botones de opción y se modifican de acuerdo con sus valores, por ejemplo, si está seleccionada la casilla de la carga inductiva se añadirá una letra “L” a la carga en el título. Para ello se utilizaron condicionales que verificarán el estado de cada uno de estos y en caso de estar activos se añadirá al título, de lo contrario no añadirán nada. La etiqueta de “TituloLabel” se verá modificada de acuerdo con las opciones seleccionadas, y esta misma actuará de acuerdo con la función “Titulo”. Cabe aclarar que se evita el uso de tildes ya que esto puede ocasionar errores en la estructura del código.

En consideración al tamaño total del título se tomó en cuenta el más extenso, el cuál es “Circuito Rectificador Controlado por SCR de Onda Completa con Carga RL-Generador”, teniendo en cuenta el tamaño de este título se ajustó a la interfaz para que no se eliminara ninguna palabra de este, y los otros no se verían afectados ya que su longitud es menor a la anterior.

5.3.2. Función “LOnOff”

Continuando con las funciones, se encuentra aquella que actúa en base al estado de la casilla de verificación de la carga inductiva, la cual al estar desactivada inhabilita el uso de la casilla de verificación del generador, así como su campo de modificación. Y también, en el caso de la tolerancia se desactiva.

Al activarse, esta habilitará la casilla del generador y el campo de la tolerancia. A su vez, al activarse esta función modificará el título de la aplicación ya que manda a llamar a la misma función de “Titulo” descrita anteriormente.

5.3.3. Función “VccOnOff”

Esta función actúa cuando se modifica el valor de la casilla de verificación del generador, esta únicamente habilitará y deshabilitará el campo de modificación del generador. Esta misma también llamará a la función “Titulo”.

5.3.4. Función “OndaElegirMO”

Esta solamente mandará a llamar a la función título de acuerdo con el botón seleccionado por el usuario, cabe aclarar que solamente uno se puede seleccionar a la vez, así que el valor de ambas opciones no puede ser 0 o 1 al mismo tiempo.

5.3.5. Función “TipoElegirNC”

Lo único que hará esta función además de modificar el título será habilitar o deshabilitar el módulo “Alfa”, ya que define si es un circuito controlado o no controlado.

5.3.6. Función “SalirButtonPushed”

Esta función está ligada a un botón de salir, así como la “x” que se usa para salir de los programas, lo que hará será salir de la aplicación descargando todos los datos de la memoria sin necesidad de forzar su cierre, para así salir de manera segura.

5.3.7. Función “LimpiarButtonPushed”

El proceso de esta función es eliminar los datos presentes en las etiquetas de la aplicación y dejarlas en blanco, así como eliminar las señales de las gráficas presentes, pero manteniendo la configuración del circuito que estaba presente antes de llamar a esta función y conservando los datos modificables.

5.3.8. Función “PeriodosSpinValueChanged”

Esta es llamada cuando se cambia el valor de los ciclos, lo cual extrae el número presente en ese campo y el de la frecuencia, y limita el eje X de la gráfica para mostrar el número de ciclos indicado.

5.3.9. Función “Calcular”

Esta es la más extensa ya que incluye todos los procesos de cálculo de cada uno de los circuitos, así como la visualización de las señales en las gráficas correspondientes.

Primero, este botón determina que código (caso) se va a calcular y se guardará en la variable “CODIGO”, esta variable tendrá 4 dígitos y cada uno de ellos determinará de que tipo de circuito se trata, variando sus valores entre el 1 y el 2.

Ahora, empezando por el primer dígito de izquierda a derecha, este determinará si el circuito es controlado por un SCR (si es 1) o no controlado (si es 2), el segundo dígito determinará si es de media onda o de onda completa, el tercero dirá si tiene un componente inductivo, y el cuarto dígito si tiene un componente generador. Estos valores determinarán como se identifica cada circuito que se incluyen en este programa, siendo los siguientes valores para cada uno de ellos:

- 2111: Rectificador no controlado de media onda con carga puramente resistiva
- 2211: Rectificador no controlado de onda completa con carga puramente resistiva
- 2121: Rectificador no controlado de media onda con carga resistiva e inductiva
- 2221: Rectificador no controlado de onda completa con carga resistiva e inductiva

- 2122: Rectificador no controlado de media onda con carga resistiva, inductiva y generador
- 2222: Rectificador no controlado de onda completa con carga resistiva, inductiva y generador
- 1111: Rectificador controlado por SCR de media onda con carga puramente resistiva
- 1211: Rectificador controlado por SCR de onda completa con carga puramente resistiva
- 1121: Rectificador controlado por SCR de media onda con carga resistiva e inductiva
- 1221: Rectificador controlado por SCR de onda completa con carga resistiva e inductiva
- 1122: Rectificador controlado por SCR de media onda con carga resistiva, inductiva y generador
- 1222: Rectificador controlado por SCR de onda completa con carga resistiva, inductiva y generador

Estos códigos se analizarán por un comando “switch” y determinarán que órdenes se le darán al programa para calcular de acuerdo con el circuito requerido.

5.4. Variables Compartidas y Cálculos Compartidos Previos

Antes de determinar los valores de las variables de interés del circuito a tratar, se extraerán los datos introducidos por el usuario en los campos modificables. En el único caso de Alfa este será convertido a radianes (ya que el usuario introduce su valor en grados) con la fórmula (5.1):

$$\alpha_{RAD} = \frac{\alpha_{DEG} \cdot \pi}{180} \quad (5.1)$$

Siendo:

- α_{DEG} : El valor de Alfa representado en grados.
- α_{RAD} : El valor de Alfa representado en radianes

Previo a los circuitos, se pueden realizar algunos cálculos que serán comunes de usar en varios de ellos, dichos cálculos se dan por las fórmulas del (5.2) al (5.6):

- Voltaje eficaz de la fuente

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (5.2)$$

- Frecuencia en $\frac{Rad}{s}$

$$\omega = 2\pi f \quad (5.3)$$

- Ángulo de desfaseamiento

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \quad (5.4)$$

- Constante de tiempo τ

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (5.5)$$

- Impedancia total

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (5.6)$$

Y por último se le dan instrucciones al programa para crear los vectores de tiempo y el voltaje de la fuente para posteriormente usarlos en la visualización y comparación de señales en las gráficas de la interfaz.

Se generarán datos de acuerdo con el límite superior de los máximos periodos a visualizar (en este caso siendo 10), serán 10,000 datos y se generarán desde 0 hasta 1/6 de segundo (para $f = 60\text{Hz}$).

Y para el caso del voltaje de la fuente, ya que este se mantiene igual en todos los componentes, se utilizará la fórmula (5.7):

$$v(\omega t) = V_m \sin(\omega t) \quad (5.7)$$

5.5. Análisis de los programas acorde a los circuitos

Ahora sí, se repasarán cada uno de los códigos usados para cada uno de los circuitos; cabe aclarar que muchos de ellos compartirán fórmulas o procesos por su similitud con

otros, pero estos no se pueden incluir en las operaciones comunes ya que aumentarían el tiempo de cálculo del programa (tal como el proceso de obtención del ángulo de extinción).

5.5.1. Rectificador Controlado por SCR de Media Onda con Carga Puramente Resistiva

Carga

El voltaje promedio en la carga es dado por la ecuación (5.8):

$$V_o = \frac{V_m}{2\pi}(1 + \cos \alpha_{SCR}) \quad (5.8)$$

La corriente promedio en la carga es dada por la ecuación (5.9):

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (5.9)$$

El voltaje eficaz en la carga es dado por la ecuación (5.10):

$$V_{orms} = \frac{V_m}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha_{SCR}}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha_{SCR}}{2\pi}} \quad (5.10)$$

*nótese que α_{SCR} debe estar en radianes para esta ecuación.

La corriente eficaz en la carga es dada por la ecuación (5.11):

$$I_{orms} = \frac{V_{orms}}{R} \quad (5.11)$$

Potencia Activa

La potencia activa estará dada por la ecuación (5.12):

$$P = R \cdot I_{orms}^2 \quad (5.12)$$

SCR

La corriente promedio que circula por el SCR será dada por la ecuación (5.13):

$$I_{SCR} = I_o \quad (5.13)$$

Y para el SCR el valor importante es el voltaje pico directo (es decir positivo), pero solo importa la magnitud pues el concepto de negativo o positivo solamente indica la dirección,

entonces basta con usar la ecuación (5.14), para los demás casos, se mencionará nada más el concepto de el voltaje de pico directo y voltaje de pico inverso:

$$|V_{PI}| = |V_m| = V_{PD} \quad (5.14)$$

Componentes Beta, Theta y Alfa

Ya que no hay componente inductivo ni generador, estas variables no mostrarán ningún resultado y en su lugar su texto será reemplazado por “N/A”.

Vector de Voltaje Rectificado y la Corriente.

Para el vector del voltaje rectificado se eliminaron los valores menores al ángulo de disparo del SCR y se tomaron como 0 y a su vez ocurrió lo mismo con los valores menores a 0. Para la corriente solo se dividió el vector del voltaje rectificado con la resistencia.

5.5.2. Rectificador Controlado por SCR de Onda Completa con Carga Puramente Resistiva

Carga

El voltaje promedio en la carga es dado por la ecuación (5.15):

$$V_o = \frac{V_m}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha_{SCR}) \quad (5.15)$$

La corriente promedio en la carga será la misma que la ecuación (5.9):

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (5.9)$$

El voltaje eficaz en la carga es dado por la ecuación (5.16):

$$V_{orms} = V_m \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha_{SCR}}{2\pi} + \frac{\sin 2\alpha_{SCR}}{4\pi}} \quad (5.16)$$

La corriente eficaz en la carga estará dada por la ecuación (5.11):

$$I_{orms} = \frac{V_{orms}}{R} \quad (5.11)$$

Potencia Activa

La potencia activa estará dada por la ecuación (5.12):

$$P = R \cdot I_{orms}^2 \quad (5.12)$$

Diodo

La corriente promedio a soportar del SCR será dada por la siguiente ecuación:

$$I_{SCR} = \frac{I_o}{2} \quad (5.17)$$

Y el voltaje pico inverso y directo será el mismo que la ecuación (5.14):

$$|V_{PI}| = |V_m| = V_{PD} \quad (5.14)$$

Componentes Beta, Theta y Alfa

Ya que no hay componente inductivo ni generador, estas variables no mostrarán ningún resultado y en su lugar su texto será reemplazado por "N/A".

Vector de Voltaje Rectificado y la Corriente

Para el vector del voltaje rectificado se utilizó el valor absoluto del vector del voltaje en la fuente y los valores menores al ángulo de disparo del diodo SCR y se tomaron como cero y a su vez ocurrió lo mismo con los valores menores a cero. Para la corriente solo se dividió el vector del voltaje rectificado con la resistencia.

5.5.3. Rectificador controlado por SCR de Media Onda con carga Resistiva e Inductiva

Fuente

La corriente máxima en este circuito no tiene de una ecuación definida, para calcularla se tendría que obtener la primera derivada de la ecuación (2.87) igualada a cero y por un método numérico o proceso repetitivo encontrar el valor de ωt y con este valor, sustituyéndolo en la ecuación (2.87) se obtendría el valor de la corriente máxima. En virtud de la complejidad de este cálculo, y que no es relevante encontrarlo, se optó por omitirlo en el software.

Carga

Para obtener los valores en la carga, primero se debe calcular el ángulo de extinción β a partir de la ecuación (5.18), involucrando el valor del ángulo de disparo del SCR:

$$0 = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\beta - \theta) - \left(\frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\alpha_{SCR} - \theta) \right) \cdot e^{\frac{\alpha_{SCR} - \beta}{\omega t}} \quad (5.18)$$

Utilizando MATLAB se puede obtener el ángulo β al aproximar el valor de la corriente evaluada en beta, a cero. Y teniendo en cuenta el ángulo beta se pueden obtener los siguientes valores:

El voltaje promedio en la carga es dado por la ecuación (5.19):

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} V_m \cdot \sin(\omega t) d\omega t \quad (5.19)$$

La corriente promedio de la carga será dada por la ecuación (5.20):

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} i_o(\omega t) d\omega t \quad (5.20)$$

Donde $i_o(\omega t)$ está definida por la ecuación (2.87):

$$i_o(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\omega t - \theta) + \left(-\frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\alpha_{SCR} - \theta) \right) \cdot e^{\frac{\alpha_{SCR} - \omega t}{\omega t}} \quad (2.87)$$

El voltaje eficaz de la carga será dado por la ecuación (5.21):

$$V_{orms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} V_m^2 \cdot \sin^2(\omega t) d\omega t} \quad (5.21)$$

La corriente eficaz de la carga será dada por la ecuación (5.22):

$$I_{orms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} i_o^2(\omega t) d\omega t} \quad (5.22)$$

Potencia Activa

La potencia activa para este circuito se debe calcular con la ecuación (5.12)

$$P = R \cdot I_{orms}^2 \quad (5.12)$$

SCR

La corriente promedio a soportar del SCR es dada por la ecuación (5.13):

$$I_{SCR} = I_o \quad (5.13)$$

*nótese que cuando los circuitos son de media onda la ecuación para la corriente en el SCR es la (5.13) mientras que la ecuación (5.17) sirve para los circuitos de onda completa.

el voltaje pico inverso o de pico directo está dado por la ecuación (5.14):

$$|V_{PI}| = |V_m| = V_{PD} \quad (5.14)$$

Componentes Beta, Theta y Alfa

Ya que se calculó el ángulo beta, se mostrarán los ángulos beta y theta en la interfaz. Alfa (ángulo mínimo posible de disparo) no se mostrará ya que no hay componente generador.

Vector de Voltaje Rectificado y la Corriente

Para el vector de voltaje se hacen cero los datos que estuvieran antes de ángulo de disparo α_{SCR} y los que estén después de β y antes del fin del periodo, es decir 2π .

Para el vector de la corriente se utilizará la fórmula (2.87).

$$i_o(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\omega t - \theta) + \left(-\frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\alpha_{SCR} - \theta) \right) \cdot e^{\frac{\alpha_{SCR} - \omega t}{\omega \tau}} \quad (2.87)$$

5.5.4. Rectificador Controlado por SCR de Onda Completa con Carga Resistiva e Inductiva

Carga

Para este circuito existen 2 cálculos, uno en el caso que el ángulo α sea menor al ángulo de desfase θ , y el otro que el ángulo α sea mayor al ángulo de desfase θ .

En el caso de $\alpha \leq \theta$ modo continuo:

El voltaje promedio en la carga será dado por la ecuación (5.23):

$$V_o = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha_{SCR} \quad (5.23)$$

La corriente promedio en la carga será dada por la ecuación (5.9):

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (5.9)$$

El voltaje eficaz en la carga será dado por la ecuación (5.24):

$$V_{orms} = \sqrt{V_o^2 + \left(\frac{V_2}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{V_4}{\sqrt{2}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (5.24)$$

Recordando que $V_2, V_4, etc.$, se obtienen por las ecuaciones (2.101b), (2.102) y (2.102a)

La corriente eficaz de la carga es dada por la ecuación (5.25):

$$I_{orms} = \sqrt{I_o^2 + \left(\frac{I_2}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_4}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (5.25)$$

Recordando que $I_2, I_4, etc.$, se obtienen de la ecuación (2.104)

$$I_n = \frac{V_n}{\sqrt{(R^2 - n\omega L^2)}} = \frac{V_n}{Z_n} \quad (2.104)$$

En el caso de $\alpha > \theta$: modo discontinuo:

Para obtener los valores de la carga, primero se debe calcular el ángulo de extinción, involucrando el valor del ángulo de disparo del SCR como se ve en la ecuación (5.26):

$$0 = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\beta - \theta) + \left(\frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\alpha_{SCR} - \theta)\right) \cdot e^{\frac{\alpha_{SCR} - \beta}{\omega t}} \quad (5.26)$$

Utilizando Matlab se puede obtener el ángulo β al aproximar el valor de la corriente evaluada en beta, a cero. Y teniendo en cuenta el ángulo beta se pueden obtener los siguientes valores:

El voltaje promedio de la carga es dado por la ecuación (5.27):

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} V_m \cdot \sin(\omega t) d\omega t \quad (5.27)$$

La corriente promedio de la carga es dada por la ecuación (5.28):

$$I_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} I_o(\omega t) d\omega t \quad (5.28)$$

El voltaje eficaz de la carga es dado por la ecuación (5.29):

$$V_{orms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} V_m^2 \cdot \sin^2(\omega t) d\omega t} \quad (5.29)$$

La corriente eficaz de la carga es dada por la ecuación (5.30):

$$I_{orms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} i_o^2(\omega t) d\omega t} \quad (5.30)$$

Potencia Activa

La potencia activa será dada por la ecuación (5.12):

$$P = R \cdot I_{orms}^2 \quad (5.12)$$

SCR

La corriente promedio a soportar por el SCR será dada por la ecuación (5.17):

$$I_{SCR} = \frac{I_o}{2} \quad (5.17)$$

Y el voltaje pico inverso y pico directo será dada por la ecuación (5.14) :

$$V_{PI} = V_m \quad (5.14)$$

Componentes Beta, Theta y Alfa

Así como en el cálculo de la carga, estos también tienen dos condiciones:

- En el caso de $\alpha \leq \theta$ modo continuo:
Beta no se mostrará, el cálculo en este caso no ocupa un ángulo de desfaseamiento ya que no se encontrará en modo discontinuo.
- En el caso de $\alpha > \theta$ modo discontinuo:
Beta se mostrará ya que se calcula el ángulo de desfaseamiento.

5.5.5. Rectificador Controlado por SCR de Media Onda con Carga Resistiva, Inductiva y Generador

Fuente

La corriente máxima en este circuito no tiene de una ecuación definida, para calcularla se tendría que obtener la primera derivada de la ecuación (2.106) igualada a cero y por un método numérico o proceso repetitivo encontrar el valor de ωt y con este valor, sustituyéndolo en la ecuación (2.106) se obtendría el valor de la corriente máxima. En virtud de la complejidad de este cálculo, y que no es relevante encontrarlo, se optó por omitirlo en software.

Carga

El Alfa mínima de disparo, se calcula de la ecuación (5.31), que es el ángulo en el cual el voltaje de línea es igual al voltaje del generador, en la formula relacionada con alfa solamente se utiliza el alfa de disparo llamada en este trabajo como α_{SCR} , sin embargo, esta no puede ser menor al alfa mínima.

$$\alpha_{min} = \sin^{-1} \left(\frac{V_{cc}}{V_m} \right) \quad (5.31)$$

Y para la implementación de la ecuación para la corriente (2.106) se usan en el código de la programación dos variables auxiliares las cuales son (5.32) y (5.32a):

$$a = -\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha_{SCR} - \theta) + \left(\frac{V_{cc}}{R} \right) \cdot e^{\frac{\alpha_{SCR}}{\omega t}} \quad (5.32)$$

$$a_2 = \left(\frac{V_{cc}}{R} \right) \quad (5.32a)$$

Para obtener los valores en la carga, primero se debe calcular el ángulo de extinción, sustituyendo en la ecuación (2.106) a ωt por β e igualando a cero, observe la ecuación (5.33).

$$i(\beta) = \frac{V_m}{Z} \sin(\beta - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + \left[-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha_{SCR} - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} \right] e^{\frac{\alpha_{SCR} - \beta}{\omega t}} = 0 \quad (5.33)$$

Utilizando Matlab se puede obtener el ángulo β al aproximar el valor de la corriente evaluada en beta a 0. Y teniendo en cuenta el ángulo beta se pueden obtener los siguientes valores:

El voltaje promedio de la carga es dado por la ecuación (5.34):

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} V_m \cdot \sin(\omega t) d\omega t \quad (5.34)$$

La corriente promedio de la carga es dada por la ecuación (5.35):

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} i_o(\omega t) d\omega t \quad (5.35)$$

Recordando que $i_o(\omega t)$ se obtiene de la ecuación (2.106)

$$i_o(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + \left[-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha_{SCR} - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} \right] \cdot e^{\left(\frac{\alpha_{SCR} - \omega t}{\omega t} \right)} \quad (2.106)$$

El voltaje eficaz de la carga es dado por la ecuación (5.36):

$$V_{orms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} V_m^2 \cdot \sin^2(\omega t) d\omega t} \quad (5.36)$$

La corriente eficaz de la carga es dada por la ecuación (5.37):

$$I_{orms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{SCR}}^{\beta} i_o^2(\omega t) d\omega t} \quad (5.37)$$

Potencia Activa

La potencia activa será dada por la ecuación (5.38):

$$P = R \cdot I_{orms}^2 + V_{cc} \cdot I_o \quad (5.38)$$

SCR

La corriente promedio que soportará el SCR será dada por la ecuación (5.13):

$$I_{SCR} = I_o \quad (5.13)$$

Y el voltaje pico inverso y voltaje de pico directo será dada por la ecuación (5.39):

$$|V_{PI}| = |V_m + V_{cc}| = V_{PD} \quad (5.39)$$

Componentes Beta, Theta y Alfa

Están presentes estas tres variables y se mostrarán, ya que existe un ángulo de desfaseamiento, un ángulo de extinción y un ángulo mínimo de disparo debido al elemento generador.

5.5.6. Rectificador no Controlado de Media Onda con Carga Puramente Resistiva

Carga

El voltaje promedio de la carga es dado por la ecuación (5.40):

$$V_o = \frac{V_m}{\pi} \quad (5.40)$$

La corriente promedio de la carga es dada por la ecuación (5.9):

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (5.9)$$

El voltaje eficaz de la carga es dado por la ecuación (5.41):

$$V_{orms} = \frac{V_m}{2} \quad (5.41)$$

La corriente eficaz de la carga es dada por la ecuación (5.11):

$$I_{orms} = \frac{V_{orms}}{R} \quad (5.11)$$

Potencia Activa

La potencia activa será dada por la ecuación (5.12):

$$P = R * I_{orms}^2 \quad (5.12)$$

Diodo

La corriente promedio que soportar por el diodo será dada por la ecuación (5.42):

$$I_D = I_o \quad (5.42)$$

Y para el diodo el valor importante es el voltaje pico inverso, pero solo importa la magnitud pues el concepto de negativo o positivo solamente indica la dirección, entonces basta con usar la ecuación (5.14):

$$|V_{PI}| = |V_{m1}| = V_{PD} \quad (5.14)$$

Componentes Beta, Theta y Alfa

Ya que no hay componente inductivo ni generador, estas variables no mostrarán ningún resultado y en su lugar su texto será reemplazado por "N/A".

Vector de Voltaje Rectificado y la Corriente

Para el vector de voltaje rectificado, todos los valores del voltaje de la fuente menores a cero, se volvían cero, y para la corriente solamente se dividía el voltaje rectificado entre la resistencia.

5.5.7. Rectificador no Controlado de Onda Completa con Carga Puramente Resistiva

Carga

El voltaje promedio de la carga es dado por la ecuación (5.43):

$$V_o = \frac{2V_m}{\pi} \quad (5.43)$$

La corriente promedio de la carga es dada por la ecuación (5.9):

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (5.9)$$

El voltaje eficaz de la carga es dado por la ecuación (5.44):

$$V_{orms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (5.44)$$

La corriente eficaz de la carga es dada por la ecuación (5.11):

$$I_{orms} = \frac{V_{orms}}{R} \quad (5.11)$$

Potencia Activa

La potencia activa será dada por la ecuación (5.12):

$$P = R * I_{orms}^2 \quad (5.12)$$

Diodo

La corriente promedio a soportar por el diodo será dada por la ecuación (5.45) :

$$I_D = \frac{I_o}{2} \quad (5.45)$$

Nótese que similar al caso de los circuitos controlados, en los circuitos no controlados, ocurre igual si el circuito es de onda completa por puente de diodos o de controladores de silicios que son los casos que se estudian en este proyecto. La ecuación que indica la corriente promedio que fluye por estos dispositivos funciona para cada circuito sin importar la carga. Y de mismo modo para la ecuación en los casos de media onda.

Entonces para los casos de onda completa no controlados la ecuación será la (5.45) y para los casos de media onda no controlados será la ecuación (5.42). Y el voltaje pico inverso será dada por la ecuación (5.14) :

$$|V_{PI}| = |V_m| = V_{PD} \quad (5.14)$$

Componentes Beta, Theta y Alfa

Ya que no hay componente inductivo ni generador, estas variables no mostrarán ningún resultado y en su lugar su texto será reemplazado por "N/A".

Vector de Voltaje Rectificado y la Corriente

Para el vector del voltaje rectificado se calcularon los valores absolutos del vector del voltaje de la fuente, y para la corriente solo se dividió el voltaje rectificado entre la resistencia.

5.5.8. Rectificador no Controlado de Media Onda con Carga Resistiva e Inductiva

Fuente

La corriente máxima en este circuito no tiene de una ecuación definida, para calcularla se tendría que obtener la primera derivada de la ecuación (2.34) igualada a cero y por un método numérico o proceso repetitivo encontrar el valor de ωt y con este valor, sustituyéndolo en la ecuación (2.34) se obtendría el valor de la corriente máxima. En virtud de la complejidad de este cálculo, y que no es relevante encontrarlo, se optó por omitirlo en el software.

Carga

Para obtener los valores de la carga, primero se debe calcular el ángulo de extinción β , a partir de la ecuación (5.46)

$$0 = \frac{V_m}{Z} * \sin(\beta - \theta) + \left(\frac{V_m}{Z} * \sin(\theta) \right) * e^{-\beta/\omega t} \quad (5.46)$$

Utilizando MATLAB se puede obtener el ángulo β al aproximar el valor de la corriente evaluada en beta, a cero. Y teniendo en cuenta el ángulo beta se pueden obtener los siguientes valores:

El voltaje promedio de la carga es dado por la ecuación (5.47):

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\beta V_m * \sin(\omega t) d\omega t \quad (5.47)$$

La corriente promedio de la carga es dada por la ecuación (5.48):

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\beta i_o(\omega t) d\omega t \quad (5.48)$$

Recordando que $i_o(\omega t)$ está dada por la ecuación (2.34)

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} * \sin(\omega t - \theta) + \left(\frac{V_m}{Z} * \sin(\theta) \right) * e^{-\omega t/\omega t} \quad (2.34)$$

El voltaje eficaz de la carga es dado por la ecuación (5.49):

$$V_{orms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\beta V_m^2 * \sin^2(\omega t) d\omega t} \quad (5.49)$$

La corriente eficaz de la carga es dada por la ecuación (5.50):

$$I_{orms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\beta I_o^2(\omega t) d\omega t} \quad (5.50)$$

Potencia Activa

La potencia activa será dada por la ecuación (5.12):

$$P = R * I_{orms}^2 \quad (5.12)$$

Diodo

La corriente promedio a soportar por el diodo será dada por la ecuación(5.42):

$$I_D = I_o \quad (5.42)$$

Y el voltaje pico inverso será dada por la ecuación (5.14):

$$|V_{PI}| = |V_m| = V_{PD} \quad (5.14)$$

Componentes Beta, Theta y Alfa

Ya que se calculó el ángulo beta, se mostrarán los ángulos beta y theta en la interfaz. Alfa no se mostrará ya que no hay componente generador.

Vector de Voltaje Rectificado y la Corriente

Para el vector de voltaje se hicieron cero todos los valores que estén después de beta, hasta el fin del periodo. Para el vector de la corriente se utilizará la ecuación (2.34), sustituyendo el tiempo con el vector de tiempo calculado por el programa:

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} * \sin(\omega t - \theta) + \left(\frac{V_m}{Z} * \sin(\theta) \right) * e^{-\omega t} \quad (2.34)$$

5.5.9. Rectificador no Controlado de Onda Completa con Carga Resistiva e Inductiva

Carga

El voltaje promedio de la carga es dado por la ecuación (5.51):

$$V_o = \frac{2V_m}{\pi} \quad (5.51)$$

La corriente promedio de la carga es dada por la ecuación (5.9):

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (5.9)$$

El voltaje eficaz de la carga es dado por la ecuación (5.52):

$$V_{orms} = \sqrt{V_o^2 + \left(\frac{V_2}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{V_4}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (5.52)$$

Donde $V_2, V_4, \dots, V_n$ se obtienen de la ecuación (2.43):

$$V_n = \frac{2V_m}{\pi} \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n+1} \right) \quad (2.43)$$

La corriente eficaz de la carga es dada por la ecuación (5.53):

$$I_{orms} = \sqrt{I_o^2 + \left(\frac{I_2}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_4}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (5.53)$$

Donde $I_2, I_4, \dots, I_n$ se obtienen de la ecuación (2.47):

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} \quad (2.47)$$

Mientras Z_n se obtiene de la ecuación (2.48):

$$Z_n = \sqrt[3]{R^2 + (n\omega L)^2} \quad (2.48)$$

Potencia Activa

La potencia activa será dada por la ecuación (5.12):

$$P = R \cdot I_{orms}^2 \quad (5.12)$$

Diodo

La corriente promedio a soportar por el diodo será dada por la ecuación (5.45):

$$I_D = \frac{I_o}{2} \quad (5.45)$$

Y el voltaje pico inverso será dada por la ecuación (5.14):

$$|V_{PI}| = |V_m| = V_{PD} \quad (5.14)$$

Componentes Beta, Theta y Alfa

Beta no se mostrará ya que no habrá un ángulo de extinción, siempre se encontrará en modo continuo, alfa no se mostrará ya que no existe un elemento generador.

5.5.10. Rectificador no Controlado de Media Onda con Carga Resistiva, Inductiva y Generador

Fuente

La corriente máxima en este circuito no tiene de una ecuación definida, para calcularla se tendría que obtener la primera derivada de la ecuación (2.60) igualada a cero y por un método numérico o proceso repetitivo encontrar el valor de ωt y con este valor, sustituyéndolo en la ecuación (2.60) se obtendría el valor de la corriente máxima. En virtud de la complejidad de este cálculo, y que no es relevante encontrarlo, se optó por omitirlo en software.

Carga

Alfa, se calcula con la ecuación (5.54):

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{V_{cc}}{V_m} \right) \quad (5.54)$$

Para obtener los valores en la carga, primero se debe calcular el ángulo de extinción β , involucrando el valor del ángulo α , el ángulo β se obtendrá usando la ecuación (5.55)

$$0 = \frac{V_m}{Z} \sin(\beta - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + \left(-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} \right) e^{\frac{\alpha - \beta}{\omega \tau}} \quad (5.55)$$

Utilizando MATLAB se puede obtener el ángulo β al aproximar el valor de la corriente evaluada en β a cero. Y teniendo en cuenta el ángulo beta se pueden obtener los siguientes valores:

El voltaje promedio de la carga es dado por la ecuación (5.56):

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_m * \sin(\omega t) d\omega t \quad (5.56)$$

La corriente promedio de la carga es dada por la ecuación (5.57):

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_o(\omega t) d\omega t \quad (5.57)$$

Recordando que $i_o(\omega t)$ está dada por la ecuación (2.60)

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + \left[-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} \right] e^{\frac{\alpha - \omega t}{\omega \tau}} \quad (2.60)$$

El voltaje eficaz de la carga es dado por la ecuación (5.58):

$$V_{orms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_m^2 * \sin^2(\omega t) d\omega t} \quad (5.58)$$

La corriente eficaz de la carga es dada por la ecuación (5.59):

$$I_{orms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_o^2(\omega t) d\omega t} \quad (5.59)$$

Potencia Activa

La potencia activa será dada por la ecuación (5.38):

$$P = R * I_{orms}^2 + V_{cc} * I_o \quad (5.38)$$

Diodo

La corriente promedio que pasa a través del diodo será dada por la ecuación (5.42):

$$I_D = I_o \quad (5.42)$$

Y el voltaje pico inverso en el diodo será dada por la ecuación (5.39):

$$|V_{PI}| = |V_m + V_{cc}| = V_{PD} \quad (5.39)$$

Componentes Beta, Theta y Alfa

Están presentes estas 3 variables y se mostrarán, ya que existe un ángulo de desfaseamiento, un ángulo de extinción y un ángulo de inicio por el elemento generador.

5.5.11. Rectificador no Controlado de Onda Completa con Carga Resistiva, Inductiva y Generador

Carga

En este caso existen 2 modos posibles de operación, el modo continuo y el modo discontinuo, el cual se verá definido por el cálculo de la variable p :

$$p = \frac{V_m}{Z} \sin(\pi - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} (e^{\frac{\alpha - \pi}{\omega t}} - 1) + \left[-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \theta) \right] e^{\frac{\alpha - \pi}{\omega t}} \quad (5.60)$$

En el caso de α se calcula de la siguiente manera como en la ecuación (5.54):

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{V_{cc}}{V_m} \right) \quad (5.54)$$

Ahora se verán el modo continuo y el modo discontinuo respectivamente, definidos por p .

En el caso de $p \geq 0$ (modo continuo):

El voltaje promedio de la carga es dado por la ecuación (5.61):

$$V_o = \frac{2V_m}{\pi} - V_{cc} \quad (5.61)$$

La corriente promedio de la carga es dada por la ecuación (5.9):

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (5.9)$$

El voltaje eficaz de la carga es dado por la ecuación (5.62):

$$V_{rms} = \sqrt{V_o^2 + \left(\frac{V_2}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{V_4}{\sqrt{2}} \right)^2 + \cdots + \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (5.62)$$

Donde los $V_2, V_4, \dots, V_n$ se calculan, con la ecuación (5.84)

La corriente eficaz de la carga es dada por la ecuación (5.63):

$$I_{orms} = \sqrt{I_o^2 + \left(\frac{I_2}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_4}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (5.63)$$

Donde las $I_2, I_4, \dots, I_n$ se calculan con la ecuación (2.47)

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} \quad (2.47)$$

Y Z_n se obtiene con la ecuación (2.48).

$$Z_n = \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2} \quad (2.48)$$

En el caso de $p < 0$ (modo discontinuo):

Para obtener los valores de la carga, primero se debe calcular el ángulo de extinción, involucrando el valor del ángulo de disparo del diodo SCR:

$$0 = \frac{V_m}{Z} \sin(\beta - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + \left[-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} \right] e^{\frac{\alpha - \beta}{\omega\tau}} \quad (5.64)$$

Utilizando MatLAB se puede obtener el ángulo β al aproximar el valor de la corriente evaluada en beta a 0. Y teniendo en cuenta el ángulo beta se pueden obtener los siguientes valores:

El voltaje promedio de la carga es dado por la ecuación (5.65):

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_m * \sin(\omega t) d\omega t \quad (5.65)$$

La corriente promedio de la carga es dada por la ecuación (5.66):

$$I_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_o(\omega t) d\omega t \quad (5.66)$$

Recordando que $i_o(\omega t)$ está dada por la ecuación (2.60)

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \theta) - \frac{V_{cc}}{R} + \left[-\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \theta) + \frac{V_{cc}}{R} \right] e^{\frac{\alpha - \omega t}{\omega\tau}} \quad (2.60)$$

El voltaje eficaz de la carga es dado por la ecuación (5.67):

$$V_{orms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_m^2 * \sin^2(\omega t) d\omega t} \quad (5.67)$$

La corriente eficaz de la carga es dada por la ecuación (5.68):

$$I_{orms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_0^2(\omega t) d\omega t} \quad (5.68)$$

Potencia Activa

La potencia activa será dada por la siguiente ecuación (5.38), para ambos modos de conducción:

$$P = R * I_{orms}^2 + V_{cc} * I_0 \quad (5.38)$$

Diodo

La corriente promedio que pasará a través los diodos será dada por la ecuación (5.45), para ambos modos de conducción:

$$I_D = \frac{I_0}{2} \quad (5.45)$$

Y el voltaje pico inverso se calcula con la ecuación (5.39) para ambos modos de conducción:

$$|V_{PI}| = |V_m + V_{cc}| = V_{PD} \quad (5.39)$$

Componentes Beta, Theta y Alfa

En el caso de las variables alfa y theta, ya que hay elementos de inductivos y generador estarán presentes sin importar el modo en el que se encuentre el circuito. En el caso de beta solo estará en el modo discontinuo ya que si existirá un ángulo de extinción.

5.5.12. Cálculos Posteriores Compartidos, Visualización en la Interfaz y Gráficas

Hay 2 cálculos que se mantienen iguales a lo largo de todos los circuitos, y están dados por las siguientes fórmulas:

Potencia Aparente

$$S = V_{rms} * I_{srms} \quad (5.69)$$

Factor de Potencia

$$fp = \frac{P}{S} \quad (5.70)$$

Y ya que se tienen todos los resultados esperados del circuito elegido, se pueden visualizar modificando el valor de cada una de las etiquetas descritas anteriormente, añadiendo las unidades correspondientes, al mismo tiempo haciéndolas visibles en caso de estar ocultas.

Ya para finalizar el capítulo de la interfaz, se muestran las gráficas las cuales visualizan la forma de onda del circuito en cuestión, la primera gráfica siendo del voltaje de la fuente siendo comparada por la corriente de la carga y la segunda gráfica siendo el mismo voltaje de la fuente comparado con el voltaje de la carga. Estas gráficas muestran inicialmente un periodo, pero puede ser modificado el número de periodos mostrados de acuerdo con los botones del apartado "Periodo" descritos previamente.

Herramienta Computacional como app dentro de Matlab

En este capítulo se verán los resultados de la herramienta computacional, en su presentación de aplicación de Matlab, así como el funcionamiento de esta. También se harán menciones de objetivos a futuro del proyecto.

6.1. Explicación de operación de la herramienta computacional

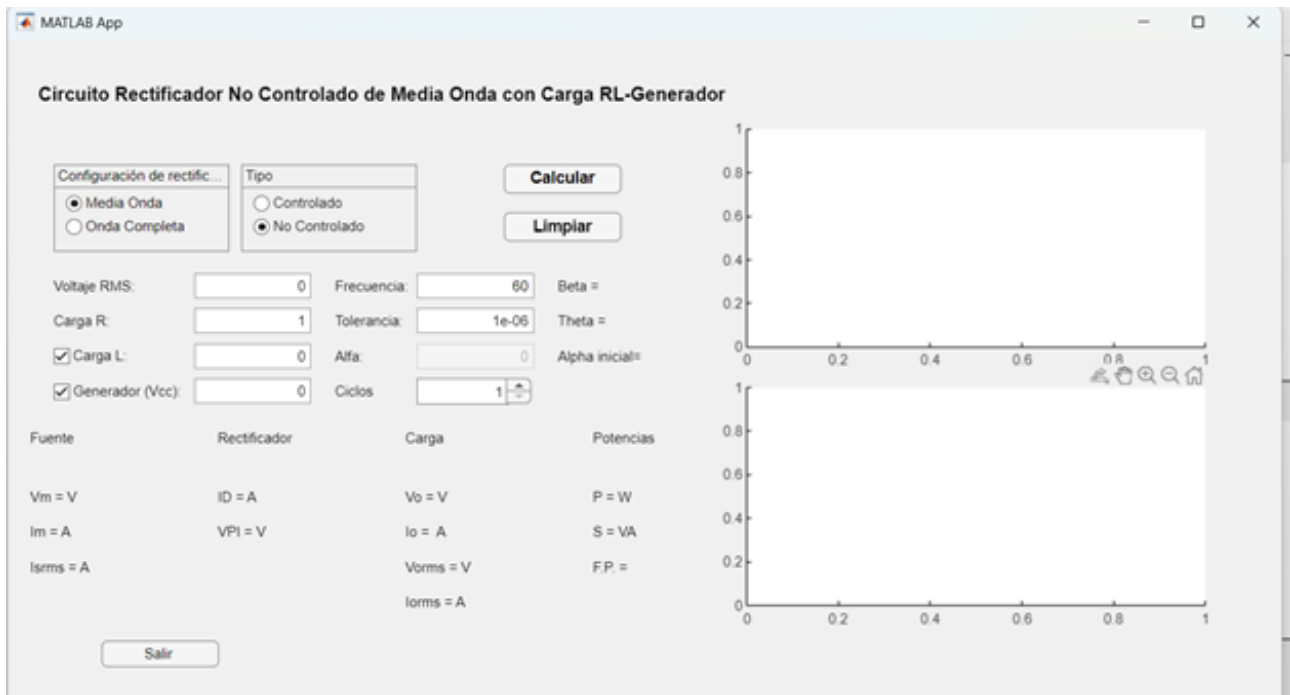


Figura 6.1: Herramienta computacional prototipo final.

Como se mencionó en el capítulo 5, desde el subtema 5.1 al 5.3, se habla de cómo se puede interactuar con la herramienta computacional, sin embargo, se utilizará este subtema, para mostrar cómo se opera la misma. La Figura 6.1, es la forma como se muestra la aplicación una vez que se inicia el programa. Pero primero se hará una mención de cómo llegar a ese punto. Partiendo desde la ejecución del programa, existen dos formas.

6.1.1. Ejecución del programa directamente desde el archivo

La manera sencilla es dirigirse al archivo:

“Herramienta_Computacional_analisis_circuitos_rectificadores”

Luego darle doble clic para ejecutarlo, para este ejemplo se guardó la herramienta en el escritorio. Al darle el clic, primero se abrirá Matlab, e inmediatamente tan pronto como le sea posible el programa también abrirá una ventana emergente la cual es la aplicación. Como se muestra en las Figura 6.2 y Figura 6.3.



Figura 6.2: Ejecutar el programa herramienta computacional.

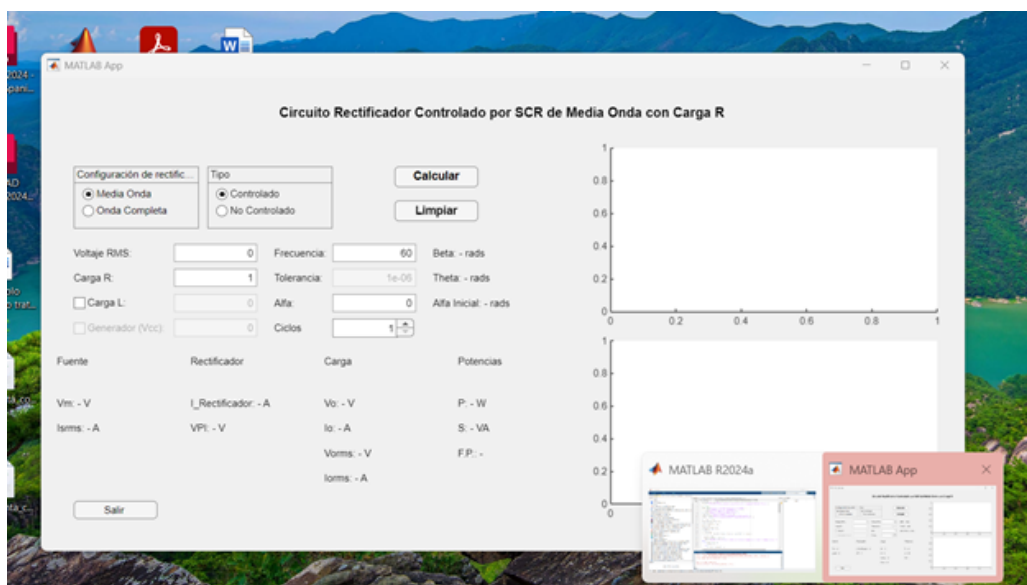


Figura 6.3: Apertura de la app

Ahora, el programa ya esta listo para su uso.

6.1.2. Ejecución del programa desde Matlab

El otro modo de ejecución del programa es la siguiente: al abrir la aplicación de Matlab, de dirige al apartado de “APPS” el subapartado de “Design App”, dándole clic para que abra la ventana app designer como se ve en la Figura 6.4.

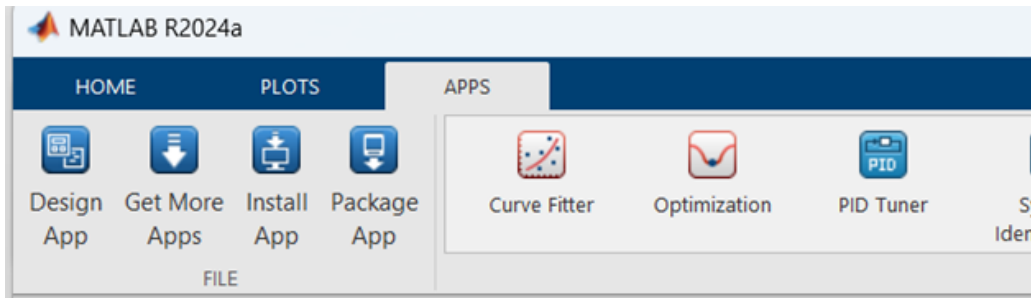


Figura 6.4: Ejecución de la aplicación desde Matlab.

Después, buscar el archivo con el nombre ya mencionado en el subtema 6.1.1, desde archivos recientes si se abrió con anterioridad, o bien desde la carpeta “open”. Observe la Figura 6.5.

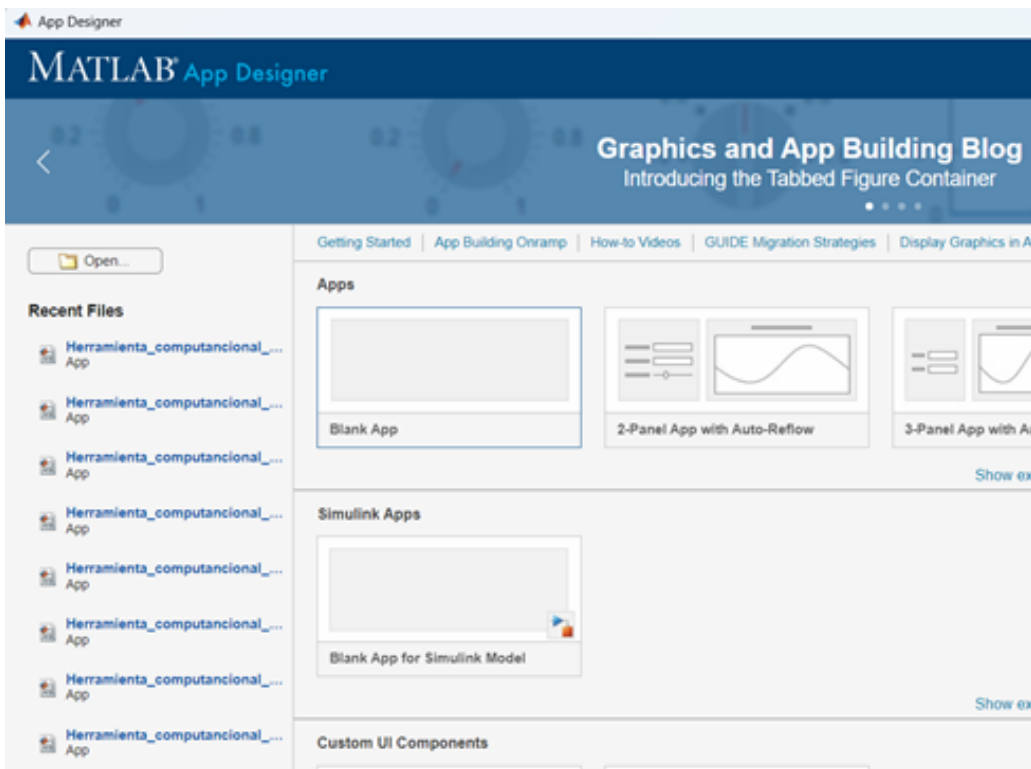


Figura 6.5: Abrir la herramienta desde Matlab.

Deberá buscar el archivo donde lo guardo y ejecutarlo: al hacerlo se observará como en la Figura 6.6, esto da ventajas de corrección de código o reestructurar la manera en como se muestra la aplicación, si se desearan realizar modificaciones observe la Figura 6.7.

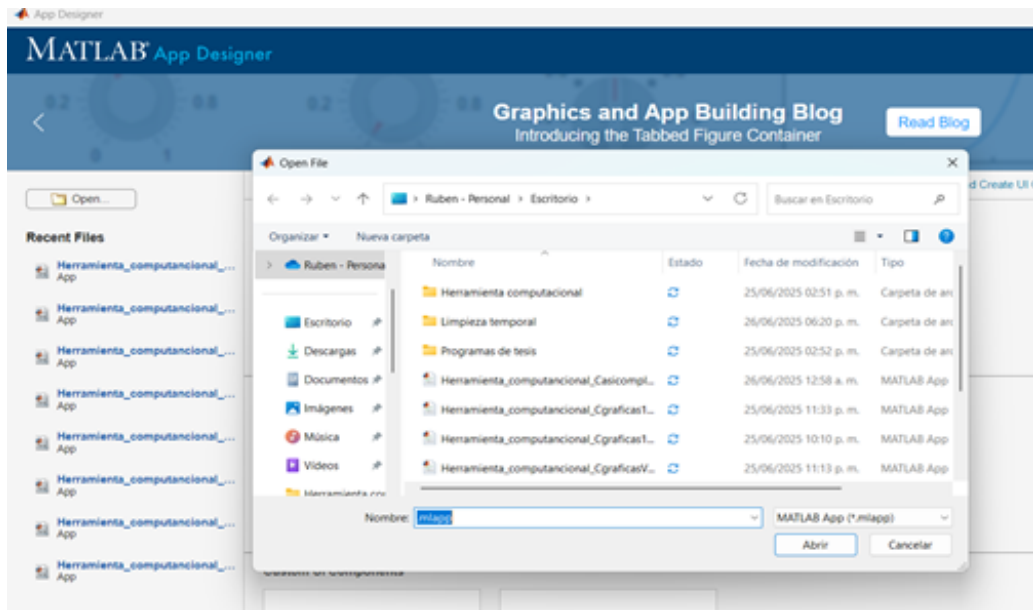


Figura 6.6: Búsqueda del archivo

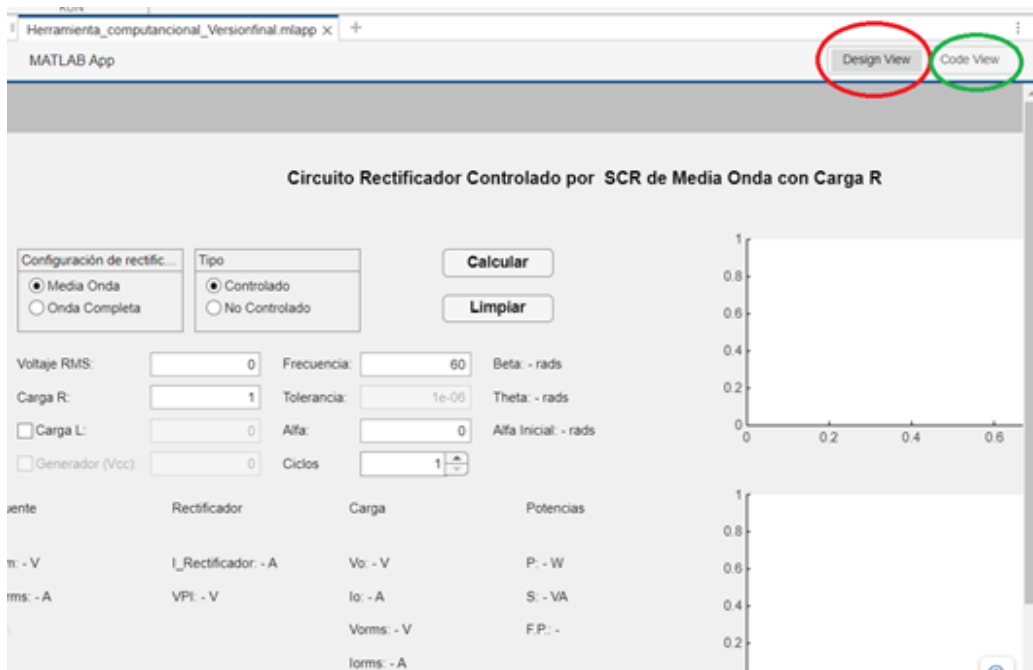


Figura 6.7: Design View y Code View

En la Figura 6.7 se tienen dos pestañas, la primera “Design View” podría ser traducido como vista del esquema, o vista del diseño, en esa pestaña se modifica el diseño de cómo se verá la aplicación: mientras que en la pestaña “Code view”, podría ser traducido como vista del código, es donde el programador modifica el código. Una vez en esta parte de la aplicación Matlab, basta con que el usuario de clic en el programa y se verá como en la Figura 6.1. Ahora con fin de demostrar la efectividad de la aplicación.

6.1.3. Introducción de los valores de los componentes

En la Figura 6.8, los recuadros en café, los cuales están enumerados del 1 al 3 por sus utilidades, se explicarán a continuación tratando de ser breves pues se explicaron detalladamente en los subtemas 5.1 al 5.3.

1. El recuadro uno contiene los apartados de control para que el programa tenga entendido que tipo de circuito va a resolver, es decir, si es un caso de media onda u onda completa y si este es controlado por SCR o no controlado con diodos.
2. El recuadro dos contiene los apartados para llenar los parámetros del circuito que se va a analizar. Cada uno de estos elementos solamente acepta números, no letras.
3. Por ultimo los dos recuadros con el número tres son los botones, se pudiera decir que los más importantes son “Calcular” y “Limpiar”, una vez llenado los parámetros del recuadro dos el usuario deberá dar clic en el botón de calcular, y si terminó de evaluar los resultados y requiere hacer otro cálculo de otro circuito o inclusive del mismo, se recomienda que primero de clic al botón de limpiar para evitar confusiones. El otro botón es “Salir”, este sirve para cerrar el programa.

Fuente	Rectificador	Carga	Potencias
Vm: - V	I_Rectificador: - A	Vo: - V	P: - W
Isrcms: - A	VPI: - V	Io: - A	S: - VA
		Vorms: - V	F.P: -
		Iorms: - A	

Figura 6.8: Apartado de los parámetros a controlar por el usuario.

Mientras que en la Figura 6.9 en los recuadros en verdes, los cuales están enumerados del 1 al 6 por sus utilidades, se explicarán a continuación tratando de ser breves pues se explicaron con más detalle en los apartados 5.1 al 5.3.

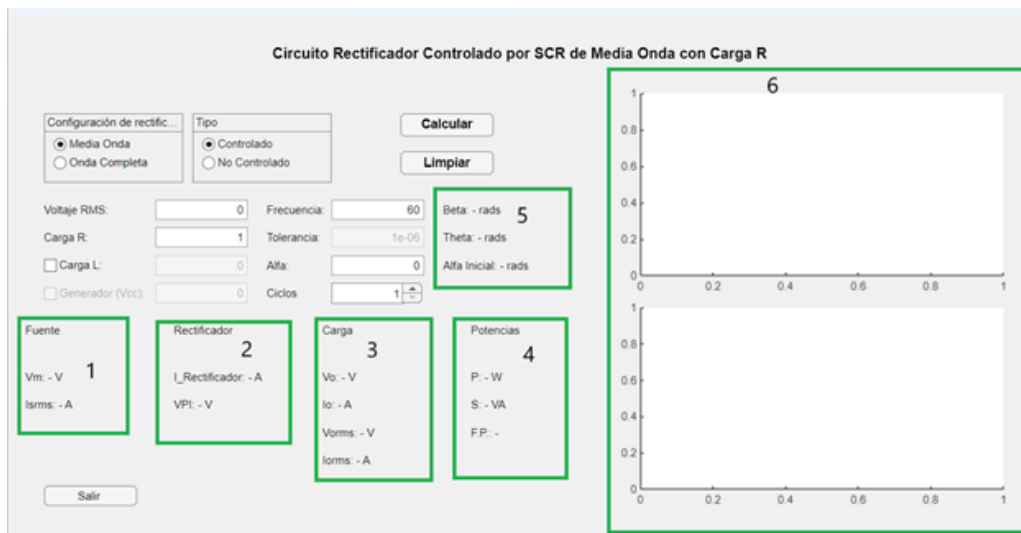


Figura 6.9: Apartado para los resultados

Estos recuadros en verde enumerados del uno a seis no son otra cosa que los lugares donde aparecerán los resultados de interés, siendo:

1. Apartado de la fuente, donde muestran los valores de V_m y I_{rms} .
2. Apartado del rectificador, donde se muestran los valores que pudieran ser de interés para el usuario: la corriente promedio en el rectificador y el voltaje máximo que deberá soportar sin conducir (voltaje de pico inverso o voltaje de pico directo).
3. Este apartado es el de mayor interés pues son los valores que aparecen en la carga: corriente promedio y eficaz, así como el voltaje promedio y eficaz.
4. En el cuarto son las potencias y el factor de potencia.
5. Cuando sea el caso, en este apartado aparecen los siguientes ángulos en radianes: β ángulo de extinción; θ ángulo de desfase de la solución forzada; y α ángulo mínimo de conducción en presencia de generador.
6. El sexto apartado es donde aparecen las gráficas, en la superior aparece la corriente instantánea en la carga y en la inferior aparece el voltaje instantáneo en la carga y el voltaje instantáneo de la fuente.

6.1.4. Presentación final de la pantalla inicial de la aplicación

Se agregó, las unidades que introduce el usuario, y algunas imágenes adicionales, esta es la forma final de la aplicación, vista en la Figura 6.10.

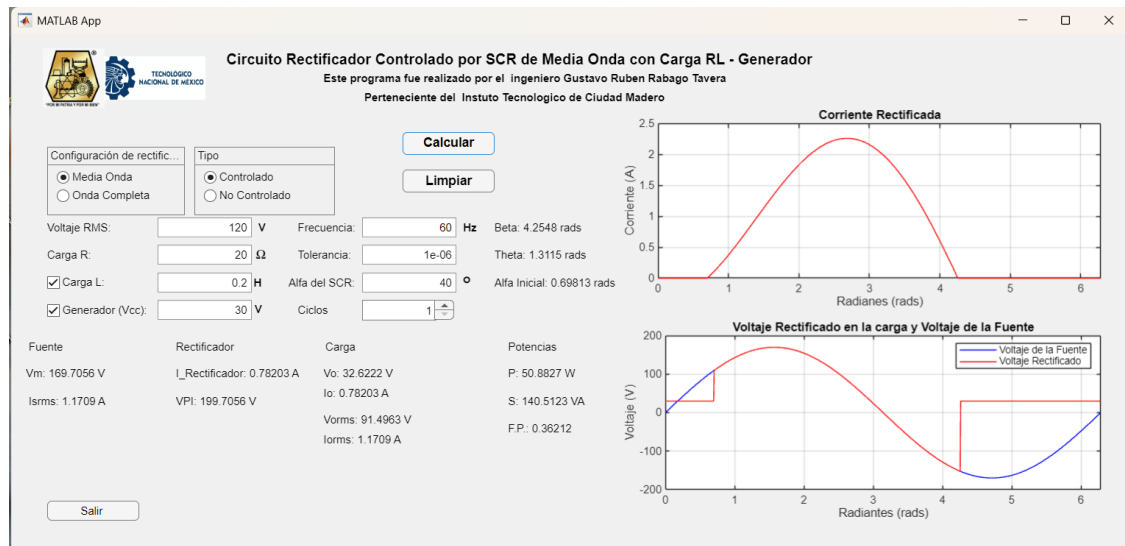


Figura 6.10: Pantalla inicial edición final

6.2. Ejemplos de operación de la herramienta computacional

6.2.1. Ejemplo circuito rectificador monofásico onda completa controlado por SCR carga R

El primer problema fue tomado de un documento técnico de la universidad (UNAM) es el siguiente: El circuito es un circuito rectificador controlado de onda completa tipo puente, tiene una carga de R de 5Ω y $\alpha = 35^\circ$. Si la fuente de alimentación es de 220Vrms 50Hz, calcule[9]:

- Voltaje Vdc en la carga
- Corriente eficaz en la carga
- Factor de potencia del sistema

Los resultados del documento técnico se observan en la Figura 6.11 mientras que en la Figura 6.11 muestra los resultados de la herramienta computacional. En la aplicación Vo es el voltaje en la carga. Mientras que la corriente en la carga es Iorms.

El voltaje medio de la carga se calcula:

$$V_{dc} = \frac{220\sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos 35)$$

$$V_{dc} = 180.159(\text{v})$$

a) La corriente efectiva se calculará con la expresión de voltaje rms en la carga:

$$\alpha = 35^\circ$$

$$\alpha = 0.61086 \text{ _rad}$$

$$I_{rms} = \frac{220\sqrt{2}}{5\sqrt{2}} \sqrt{\left(1 - \frac{0.61086}{\pi} + \frac{\text{Sen}(2 * 0.61086)}{2\pi}\right)}$$

$$I_{rms} = 43(\text{A})$$

b) Para el sistema, el factor de potencia se calcula con la potencia real en la carga y la potencia aparente de la fuente de alimentación:

$$P = 43^2 * 5$$

$$P = 9245(\text{w})$$

$$S = 220 * 43$$

$$S = 9460(\text{VA})$$

$$FP = \frac{9245}{9460} = 0.977$$

Figura 6.11: Resultados del ejemplo rectificador monofásico onda completa controlado por SCR con carga R.

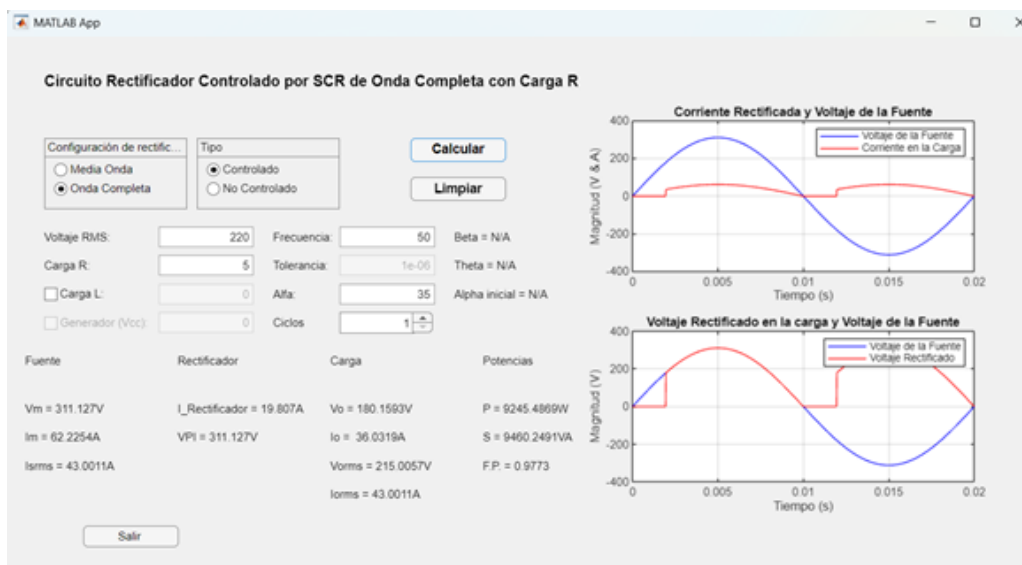


Figura 6.12: Resultados del ejemplo rectificador monofásico onda completa controlado por SCR con carga R en la herramienta computacional.

En la Figura 6.11 se pueden ver los resultados del documento donde se extrajo el ejemplo, mientras que en la Figura 6.12 se observan los resultados de la herramienta computacional. Como se puede observar los resultados son los mismos, pero además arroja más resultados de interés.

6.2.2. Ejemplo Circuito rectificador de media onda no controlado con carga RL

El siguiente ejemplo es tomado del libro Electrónica de potencia Daniel W. Hart [5] de la página 71 “Rectificador de media onda: Fundamentos básicos de análisis” el ejemplo dice lo siguiente: Rectificador de media onda con carga R-L. Con los valores: $R = 100 \Omega$, $L = 0,1 \text{ H}$, $\omega = 377 \text{ rad/s}$ (60Hz) y $V_m = 100 \text{ V}$ (70.71Vrms) para el rectificador de media onda de la Figura 3.2a, determine: (a) una expresión para la corriente de este circuito, (b) la corriente media, (c) la corriente eficaz, (d) la potencia absorbida por la carga R-L y (e) el factor de potencia.

De acuerdo con el libro cuyos resultados están en las páginas 71y 72. Se tienen los siguientes: resultados. $\beta = 3.50 \text{ rad}$, $I_o = 0.308 \text{ A}$ $I_{rms} = 0.474 \text{ A}$ $p = 22.4 \text{ W}$ y el factor de potencia $F.p = 0.67$.

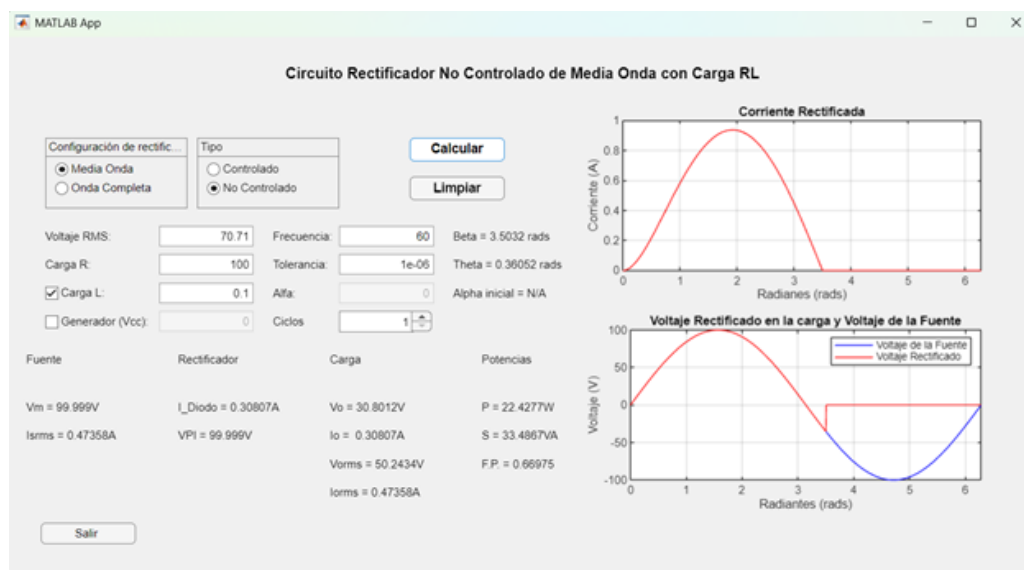


Figura 6.13: Resultados el circuito rectificador no controlado con carga RL

Como se puede observar en la Figura 6.13 se puede apreciar que los resultados obtenidos en la herramienta, del ejemplo 6.2.2, si se comparan los resultados son los mismos solo con diferencia de milésimas.

6.2.3. Ejemplo circuito rectificador de media onda no controlado carga RL-Generador

Problema de circuito rectificador media onda no controlado RL- Generador. página 78 del libro. Rectificador de media onda con carga RL-generador.

En el circuito se cuenta con los siguientes parámetros $R = 2\Omega$, $L = 20\text{ mH}$ y $V_{cc} = 100\text{ V}$. El generador de alterna es de 120 Vrms a 60 Hz . (a) Determine una expresión para la corriente del circuito, (b) Determine la potencia absorbida por la resistencia, (c) Determine la potencia absorbida por el generador de continua. (d) Determine la potencia entregada por el generador de alterna y el factor de potencia del circuito. Los resultados están en las páginas 78 y 79.

Beta (β) = 3.37 rad , $I_{rms} = 3.98\text{ A}$, $I_o = 2.25\text{ A}$ $P_{activa} = 256\text{ W}$ y el factor de potencia ($F.p$) = 0.54 .

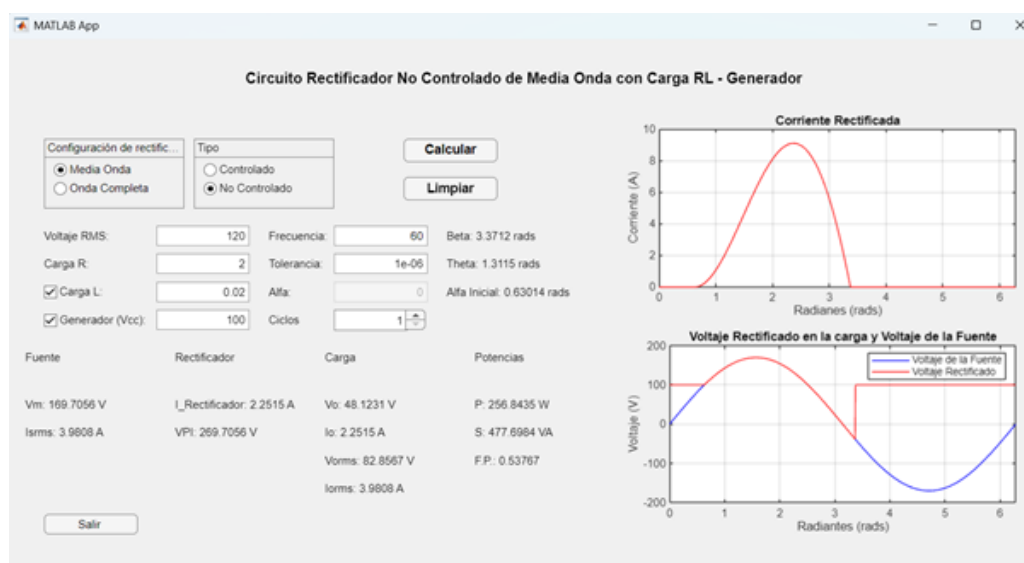


Figura 6.14: Resultados

En la Figura 6.14 se pueden ver los resultados de acuerdo con la herramienta del ejemplo obtenido de la página 78 del libro [10].

6.2.4. Ejemplo circuito rectificador de media onda controlado por SCR con carga RL

Problema de circuito controlado SCR media onda Carga RL encontrado en la página 99, resultados en las páginas 99 y 100.

Ejemplo 3.11. Rectificador controlado de media onda con carga R-L. Para el circuito de la Figura 3.14a (del libro de Daniel W. Hart), el generador es de 120 Vrms a 60 Hz, $R = 20 \Omega$, $L = 0,04 \text{ H}$ y el ángulo de disparo es 45° . Determine: (a) una expresión para $i(\omega t)$, (b) la corriente media, (c) la potencia absorbida por la carga y (d) el factor de potencia.

De acuerdo con el libro los resultados son los siguientes en el libro mencionan el ángulo de conducción este dato podríamos considerarlo como que no es más que la resta de alfa (α) el ángulo en el que se dispara el SCR y beta el ángulo de extinción estos valores son: $\beta = 3.79 \text{ rad}$ y $\alpha = 0.785$. Y la resta $\gamma = \beta - \alpha = 3.01 \text{ rad}$.

b) $I_o = 2.19 \text{ A}$, $I_{rms} = 3.26 \text{ A}$, $P = 213 \text{ W}$ F. $p = 0.54$.

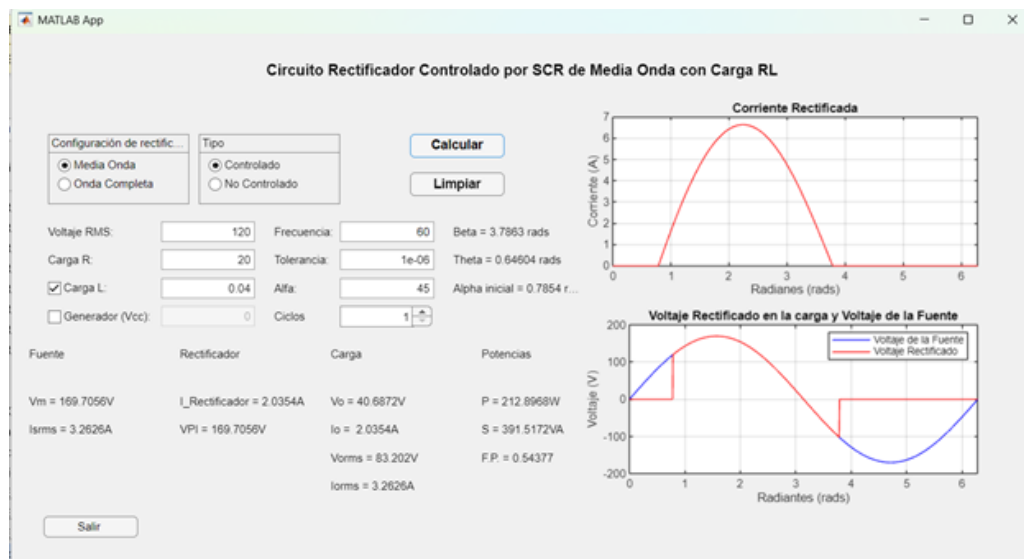


Figura 6.15: Resultados de la aplicación

En la Figura 6.15 se observan los resultados del ejemplo en la página 99 del mismo libro Daniel W. Hart.

6.3. Conclusiones y objetivos a futuro

En el planteamiento del problema y sus objetivos, no se propuso el realizar las gráficas de voltaje en la carga y corriente en la carga, sino solamente el cálculo de sus valores numéricos, tanto el valor eficaz como el valor promedio. Sin embargo, como un ejercicio adicional al propósito de esta tesis, se decidió incluir en la programación de algunos casos (no todos), la integración de las mencionadas graficas.

Tras realizar muchas mejoras, y cambiar algunos conceptos, se decidió que este sería el prototipo final de la investigación pudiendo resolver un total de 11 circuitos rectificadores siendo los mencionados en esta investigación cumpliendo con los alcances de esta.

Se espera que el proyecto no termine aquí y se sigan realizando mejoras, como la integración de nuevos casos de estudios, pudiendo ser, otro tipo de esquemas , o que tengan otras cargas.

Bibliografía

- [1] Ned Mohan, WILLIAMS ROBBINS, and TORE UNDELAND. *Electrónica de potencia*. Mc Graw Hill, 2009.
- [2] Calculatoratoz.com. Average output voltage of single phase half wave diode rectifier with resistive and inductive load calculator, 2023.
- [3] Calculatoratoz.com. Calculadora de voltaje promedio para rectificador de onda completa. <https://www.calculatoratoz.com/en/average-voltage-for-full-wave-rectifier-calculator/Calc-8262>, 2024.
- [4] Muhammad H Rashid. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación, 2004.
- [5] Daniel W Hart and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, 2001. p.437.
- [6] Electrónica Fácil. Cómo funcionan los transistores mosfet - explicación definitiva. YouTube, jun 2022. [Último acceso: 30 marzo 2024]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Hz9nKDQknWE>.
- [7] Daniel W Hart and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, 2001. p.66.
- [8] Daniel W Hart and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, 2001. p.56-p.57.
- [9] JL Mendoza Soto. Rectificador monofásico de onda completa carga r: En puente completo y con transformador. YouTube, 2020. Publicado el 8 de diciembre de 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=kDwBaACpSNs>.
- [10] Daniel W Hart and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, 2001. p.119.
- [11] JL Mendoza Soto. Rectificador de media onda con carga rl. YouTube, 2020. Publicado el 18 de noviembre de 2020. URL: https://www.youtube.com/watch?v=rNPnxjm4_zI.
- [12] Daniel W Hart and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, 2001. p.67 - p.71.
- [13] JL Mendoza Soto. Rectificador de media onda con carga rl. YouTube, 2020. Publicado el 18 de noviembre de 2020. URL: https://www.youtube.com/watch?v=rNPnxjm4_zI.
- [14] Daniel W Hart and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, 2001. p.120 - p.121.
- [15] JL Mendoza Soto. Rectificador de onda completa con transformador. YouTube, 2020. Publicado el 18 de noviembre de 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=riBtTHRAI3E>.

- [16] Daniel W Hart and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, 2001. p.76- p.79.
- [17] Daniel W Hart and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, 2001. p.126- p.127.
- [18] Facultad de Ingeniería - UBA. Rectificadores controlados. Curso virtual de Electrónica de Potencia, 2022. URL: https://aulavirtual.fio.unam.edu.ar/pluginfile.php/168809/mod_resource/content/1/Rectificadores_controlados.pdf.
- [19] Daniel W Hart and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, 2001. p.96- p.97.
- [20] Daniel W Hart and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, 2001. p.97- p.99.
- [21] Daniel W Hart and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, 2001. p.140- p.144.
- [22] Daniel W Hart and Andrés Barrado Bautista. *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, 2001. p.100- p.101.
- [23] iArtificial. Matlab vs octave: Entornos de programación para cálculo numérico, 2023. URL: <https://iartificial.blog/desarrollo/matlab-vs-octave-entornos-de-programacion-para-calculo-numerico/>.