

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Sistemas basados en convertidores multicelda con conexión en serie/paralelo

Esteban Andrés Concha Valverde

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:

Dr. Ricardo A. Lizana F.

Profesores Guía:

Dr. Eduardo E. Espinoza N.

Dr. Samuel A. Vergara R.

Concepción, diciembre de 2022

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Lizana F.

Sistemas basados en convertidores multicelda con conexión en serie/paralelo

Esteban Andrés Concha Valverde

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Diciembre 2022

Resumen

En el presente documento, se expone la simulación y análisis de un sistema basado en convertidores multinivel con conexión en serie y paralelo. Este circuito busca generar una gran inyección de corriente hacia una carga. Se describen en este estudio sus diferentes características, así como también se estudian los parámetros que afectan al comportamiento de este sistema se evalúan en este documento. El circuito que se presenta se realizó a través del software MATLAB Simulink, en diferentes etapas, pasando desde un nivel micro del sistema a un nivel macro.

Este sistema está basado en módulos de doble puente H compuestos por semiconductores IGBT, cada módulo contiene un condensador que se carga y descarga al valor promedio establecido a través de las conmutaciones en serie y paralelo que puede generar el convertidor MMSPC. Cada fase de este convertidor se compone de dos fases internas, lo que genera una mayor inyección de corriente en el sistema, que es lo que se busca al implementar este tipo de conexión.

A través de este trabajo, se logra apreciar las ventajas y desventajas que presenta el sistema MMSPC al utilizarlo para generar una gran corriente en su salida, evaluando qué parámetros son los que mayormente afectan su estabilidad y qué elementos pueden ser alterados, con el fin de mejorar la eficiencia y/o estabilidad del convertidor sin perjudicar la alta salida de corriente.

Nada en la vida es para ser temido, es sólo para ser comprendido. Ahora es el momento de entender más, de modo que podamos temer menos.
—Marie Curie

A todas las personas que les sea de utilidad, a quienes les genere curiosidad o entusiasmo y a los alumnos del pasado, presente y futuro de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la U.C.S.C.

Agradecimientos

En primer lugar, a mi familia que me apoyaron en diferentes momentos de mi carrera, en especial a mi padre, abuela y pareja, quienes siempre estuvieron para mí en los momentos más difíciles para brindarme palabras de apoyo.

También, quiero agradecer a mi profesor guía Ricardo A. Lizana F. Doctor en ingeniería electrónica, quien con sus conocimientos me guio en esta etapa para obtener los resultados buscados. Por último, quiero agradecer a la U.C.S.C, que con sus instalaciones y docentes he podido adquirir conocimientos para llegar hasta donde hoy estoy.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
ABREVIACIONES	XV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2. TRABAJOS PREVIOS.....	1
1.2.1 <i>Module Implementation and Modulation Strategy for Sensorless Balancing in Modular Multilevel Converters</i>	1
1.2.2 <i>Modeling of cross-circulating currents in a MMC with parallel connected submodules in Solid State Transformers</i>	2
1.2.3 <i>A Review of Multilevel Converters with Parallel Connectivity</i>	2
1.2.4 <i>Control of Solid State Transformer based on Modular Multilevel Converters with Interconnecting Dual Active Bridges</i>	2
1.2.5 <i>An Integrated Inductor for Parallel Interleaved VSCs and PWM Schemes for Flux Minimization</i>	3
1.2.6 <i>Discusión</i>	3
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	3
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	4
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	4
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA.....	4
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE UNA RAMA DEL MMSPC	5
2.1. INTRODUCCIÓN.....	5
2.2. ANÁLISIS DEL SUBMÓDULO UTILIZADO	5
2.3. ESTRUCTURA, PARÁMETROS, SISTEMA DE CONTROL Y RESULTADOS OBTENIDOS DE LA RAMA DEL MMSPC	7
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE UNA FASE DEL MMSPC.....	12
3.1. INTRODUCCIÓN.....	12
ETAPA I.....	14
<i>Parte 1</i> 14	
<i>Parte 2</i> 17	
<i>Parte 3</i> 20	
<i>Parte 4</i> 23	
ETAPA II.....	27
<i>Parte 1</i> 27	
<i>Parte 2</i> 30	
<i>Parte 3</i> 33	
<i>Parte 4</i> 36	
ETAPA III	40
<i>Parte 1</i> 40	
<i>Parte 2</i> 43	
<i>Parte 3</i> 46	
<i>Parte 4</i> 49	
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE UN MMSPC	53
4.1. INTRODUCCIÓN.....	53
4.2. CIRCUITO Y CONTROL.....	53
4.3. ANÁLISIS DE IMPACTO DE CARGA	54
4.4. ANÁLISIS DE CASOS	61

4.4.1	Caso 1: Variación de frecuencia	62
A)	4.5 kHz.....	62
B)	1 [kHz].....	65
C)	0.5 [kHz].....	68
4.4.2	Caso 2: Variación de inductancia	72
A)	$L1 = 2 * L2 = 5 [mH]$	72
B)	$L1 = 2 * L2 = 10 [mH]$	75
C)	$L1 = 2 * L2 = 15 [mH]$	79
D)	$L1 = 10 * L2 = 15 [mH]$	82
E)	$L1 = 100 * L2 = 15 [mH]$	86
4.4.3	Caso 3: Variación de la resistencia	90
A)	$R1 = 2 * R2 = 10 [\Omega]$	90
B)	$R1 = 2 * R2 = 15 [\Omega]$	93
C)	$R1 = 2 * R2 = 20 [\Omega]$	97
D)	$R1 = 10 * R2 = 20 [\Omega]$	100
E)	$R1 = 20 * R2 = 20 [\Omega]$	104
F)	$R1 = 100 * R2 = 20 [\Omega]$	107
4.5.	APLICACIÓN DE INDUCTORES ACOPLADOS EN EL SISTEMA MMSPC	111
4.5.1	Resultados.....	112
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....		125
5.1.	SUMARIO.....	125
5.2.	CONCLUSIONES	125
5.3.	TRABAJO FUTURO	127
BIBLIOGRAFÍA.....		128
ANEXO A. LEYES IMPORTANTES		129
A.1.	CÁLCULO DE CORRIENTE DEL CIRCUITO	129
A.2.	CONTROLADOR PI.....	129

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Pulsos de disparo para los diferentes estados de conmutación.....	8
Tabla 3.1. Valores de los elementos presentes en el circuito.	13
Tabla 3.2. Resumen calidad de las señales.....	52
Tabla 4.4. Valores de los Elementos Presentes en el Circuito.	112

Lista de Figuras

Figura 2.1 Submódulos de doble puente H de convertidores multinivel con conectividad paralela.....	5
Figura 2.2. Estado de operación serie positivo del módulo de doble puente H.....	6
Figura 2.3. Estado de operación serie negativo del módulo de doble puente H.....	6
Figura 2.4. Estado I de operación paralela del módulo de doble puente H.	6
Figura 2.5. Estado II de operación paralela del módulo de doble puente H.....	6
Figura 2.6. Estado I de operación Bypass del módulo de doble puente H.	7
Figura 2.7. Estado II de operación Bypass del módulo de doble puente H.....	7
Figura 2.8. Rama de MMSPC y sus interconexiones.....	8
Figura 2.9. Control de la interconexión I.	9
Figura 2.10. Voltaje de salida del convertidor.	10
Figura 2.11. Voltaje en los capacitores y fuente DC de los submódulos.	11
Figura 3.1. Circuito MMSPC con una fase.	12
Figura 3. 2. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	15
Figura 3. 3. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.....	15
Figura 3. 4. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	16
Figura 3. 5. Corriente en las fases 1 y 2.	16
Figura 3. 6. Corriente en la carga.	17
Figura 3. 7. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	18
Figura 3. 8. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.....	18
Figura 3. 9. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	19
Figura 3. 10. Corriente en las fases 1 y 2.	19
Figura 3. 11. Corriente en la carga.	20
Figura 3. 12. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	21
Figura 3. 13. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.....	21
Figura 3. 14. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	22
Figura 3. 15. Corriente en las fases 1 y 2.	22
Figura 3. 16. Corriente en la carga 1.	23
Figura 3. 17. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	24
Figura 3. 18. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.....	24
Figura 3. 19. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	25
Figura 3. 20. Corriente en las fases 1 y 2.	25
Figura 3. 21. Corriente en la carga 1.	26
Figura 3. 22. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	27
Figura 3. 23. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.....	28
Figura 3. 24. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	28
Figura 3. 25. Corriente en las fases 1 y 2.	29
Figura 3. 26. Corriente en la carga 1.	29
Figura 3. 27. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	30
Figura 3. 28. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.....	31
Figura 3. 29. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	31
Figura 3. 30. Corriente en las fases 1 y 2.	32
Figura 3. 31. Corriente en la carga 1.	32
Figura 3. 32. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	33
Figura 3. 33. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.....	34
Figura 3. 34. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	34

Figura 3. 35. Fuente: Matlab Simulink.....	35
Figura 3. 36. Corriente en la carga 1.	35
Figura 3. 37. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	37
Figura 3. 38. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.....	37
Figura 3. 39. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	38
Figura 3. 40. Corriente en las fases 1 y 2.	38
Figura 3. 41. Corriente en la carga 1.	39
Figura 3. 42. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	40
Figura 3. 43. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.....	41
Figura 3. 44. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	41
Figura 3. 45. Corriente en las fases 1 y 2.	42
Figura 3. 46. Corriente en la carga 1.	42
Figura 3. 47. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	43
Figura 3. 48. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.....	44
Figura 3. 49. Voltaje en los capacitores de la rama positiva y negativa de las fases 1 y 2.....	44
Figura 3. 50. Corriente en las fases 1 y 2.	45
Figura 3. 51. Corriente en la carga 1.	45
Figura 3. 52. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	46
Figura 3. 53. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.....	47
Figura 3. 54. Voltaje en los capacitores de la rama positiva y negativa de las fases 1 y 2.....	47
Figura 3. 55. Corriente en las fases 1 y 2.	48
Figura 3. 56. Corriente en la carga 1.	48
Figura 3. 57. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.	49
Figura 3. 58. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.....	50
Figura 3. 59. Voltaje en los capacitores de la rama positiva y negativa de las fases 1 y 2.....	50
Figura 3. 60. Corriente en las fases 1 y 2.	51
Figura 3. 61. Corriente en la carga 1.	51
Figura 4.1. Circuito MMSPC con tres fases.....	53
Figura 4.2. Corrientes de salida de las fases A, B y C presentes en la carga.	55
Figura 4.3. Corrientes de salida de las fases A, B y C presentes en la carga.	55
Figura 4.4. Corrientes de fase A1, A2 y de carga en la fase A.....	56
Figura 4.5. Voltaje de ramas positiva y negativas de las fases A1 y A2.....	57
Figura 4.6. Voltaje de ramas positiva y negativas de las fases A1 y A2.....	57
Figura 4.7. Voltaje de ramas positiva y negativas de las fases A1 y A2.....	58
Figura 4.8. Voltaje en los condensadores de las ramas positivas de las fases A1 y A2.	58
Figura 4.9. Voltaje en los condensadores de las ramas negativas de las fases A1 y A2.	59
Figura 4.10. Corriente Id y su referencia.....	59
Figura 4.11. Corriente Iq y su referencia.....	60
Figura 4.12. Modulaci3n.	60
Figura 4.13. Circuito MMSPC con tres fases.....	61
Figura 4.14. Voltaje de la fase A1.....	63
Figura 4.15. Voltaje de la fase A2.....	63
Figura 4.16. Voltaje de la fase A1 – fase A2.....	63
Figura 4.17. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.	64
Figura 4.18. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.	64
Figura 4.19. Modulaci3n.	65
Figura 4.20. Voltaje de la fase A1.....	66

Figura 4.21. Voltaje de la fase A2.....	66
Figura 4.22. Voltaje de la fase A1 – fase A2.....	67
Figura 4.23. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.	67
Figura 4.24. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.	68
Figura 4.25. Modulaci3n.	68
Figura 4.26. Voltaje de la fase A1.....	69
Figura 4.27. Voltaje de la fase A2.....	70
Figura 4.28. Voltaje de la fase A1 – fase A2.....	70
Figura 4.29. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.	71
Figura 4.30. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.	71
Figura 4.31. Modulaci3n.	72
Figura 4.32. Voltaje de la fase A1.....	73
Figura 4.33. Voltaje de la fase A2.....	73
Figura 4.34. Voltaje de la fase A1 – fase A2.....	74
Figura 4.35. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.	74
Figura 4.36. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.	75
Figura 4.37. Modulaci3n.	75
Figura 4.38. Voltaje de la fase A1.....	76
Figura 4.39. Voltaje de la fase A2.....	76
Figura 4.40. Voltaje de la fase A1 – fase A2.....	77
Figura 4.41. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.	77
Figura 4.42. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.	78
Figura 4.43. Modulaci3n.	78
Figura 4.44. Voltaje de la fase A1.....	79
Figura 4.45. Voltaje de la fase A2.....	80
Figura 4.46. Voltaje de la fase A1 – fase A2.....	80
Figura 4.47. Diferencias de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.....	81
Figura 4.48. Diferencias de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.....	81
Figura 4.49. Modulaci3n.	82
Figura 4.50. Voltaje de la fase A1.....	83
Figura 4.51. Voltaje de la fase A2.....	83
Figura 4.52. Voltaje de la fase A1 – fase A2.....	84
Figura 4.53. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.	84
Figura 4.54. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.	85
Figura 4.55. Modulaci3n.	85
Figura 4.56. Voltaje de la fase A1.....	86
Figura 4.57. Voltaje de la fase A2.....	87
Figura 4.58. Voltaje de la fase A1 – fase A2.....	87
Figura 4.59. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.	88
Figura 4.60. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.	88
Figura 4.61. Modulaci3n.	89
Figura 4.62. Voltaje de la fase A1.....	90
Figura 4.63. Voltaje de la fase A2.....	91
Figura 4.64. Voltaje de la fase A1 – fase A2.....	91
Figura 4.65. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.	92
Figura 4.66. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.	92
Figura 4.67. Modulaci3n.	93
Figura 4.68. Voltaje de la fase A1.....	94

Figura 4.69. Voltaje de la fase A2.....	94
Figura 4.70. Voltaje de la fase A1 – fase A2.....	95
Figura 4.71. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.	95
Figura 4.72. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.	96
Figura 4.73. Modulaci3n.	96
Figura 4.74. Voltaje de la fase A1.....	97
Figura 4.75. Voltaje de la fase A2.....	98
Figura 4.76. Voltaje de la fase A1 – fase A2.....	98
Figura 4.77. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.	99
Figura 4.78. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.	99
Figura 4.79. Modulaci3n.	100
Figura 4.80. Voltaje de la fase A1.....	101
Figura 4.81. Voltaje de la fase A2.....	101
Figura 4.82. Voltaje de la fase A1 – fase A2.....	102
Figura 4.83. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.	102
Figura 4.84. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.	103
Figura 4.85. Modulaci3n.	103
Figura 4.86. Voltaje de la fase A1.....	104
Figura 4.87. Voltaje de la fase A2.....	105
Figura 4.88. Voltaje de la fase A1 – fase A2.....	105
Figura 4.89. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.	106
Figura 4.90. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.	106
Figura 4.91. Modulaci3n.	107
Figura 4.92. Voltaje de la fase A1.....	108
Figura 4.93. Voltaje de la fase A2.....	108
Figura 4.94. Voltaje de la fase A1 – fase A2.....	109
Figura 4.95. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.	109
Figura 4.96. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.	110
Figura 4.97. Modulaci3n.	110
Figura 4.98. Circuito MMSPC con tres fases.....	112
Figura 4.99. Medici3n de corriente circulante en los inductores acoplados.....	113
Figura 4.100. Corriente circulante en los inductores acoplados.....	114
Figura 4.101. Medici3n de la diferencia de corriente entre las fases internas A1 y A2 con inductores acoplados.....	114
Figura 4.102. Diferencia de corriente entre las fases internas A1 y A2 con inductores acoplados.....	115
Figura 4.103. Diferencia de corriente entre las fases internas A1 y A2 con inductores separados.....	115
Figura 4.104. Medici3n de voltaje en los condensadores de las ramas positivas A1 y A2 con inductores acoplados.....	116
Figura 4.105. Medici3n de voltaje en los condensadores de las ramas positivas A1 y A2 con inductores acoplados.....	116
Figura 4.106. Medici3n de voltaje en los condensadores de las ramas positivas A1 y A2 con inductores acoplados.....	117
Figura 4.107. Voltaje en los condensadores de las ramas positivas A1 y A2 con inductores acoplados.	117
Figura 4.108. Voltaje en los condensadores de las ramas positivas A1 y A2 con inductores separados.	118
Figura 4.109. Voltaje en los condensadores de las ramas negativas A1 y A2 con inductores acoplados.	118
Figura 4.110. Voltaje en los condensadores de las ramas negativas A1 y A2 con inductores separados.	119
Figura 4.111. Medici3n de corrientes de fase y carga con inductores acoplados.....	119
Figura 4.112. Medici3n de corrientes de fase y carga con inductores acoplados.....	119

Figura 4.113. Corrientes de fase y carga con inductores acoplados.....	120
Figura 4.114. Corrientes de fase y carga con inductores separados.....	120
Figura 4.115. Corrientes de fase y carga con inductores acoplados.....	121
Figura 4.116. Corrientes de fase y carga con inductores separados.....	121
Figura 4.117. Diferencia de voltaje entre los condensadores de las ramas positivas A1 y A2 con inductores acoplados.....	122
Figura 4.118. Diferencia de voltaje entre los condensadores de las ramas positivas A1 y A2 con inductores separados.....	122
Figura 4.119. Diferencia de voltaje entre los condensadores de las ramas negativas A1 y A2 con inductores acoplados.....	123
Figura 4.120. Diferencia de voltaje entre los condensadores de las ramas negativas A1 y A2 con inductores separados.....	123
Figura A.2.1. Traspaso de coordenadas ABC a dq.....	129
Figura A.2.2. Controlador PI para corrientes I_d e I_q	130
Figura A.2.3. Traspaso de coordenadas dq a ABC.....	131

Abreviaciones

Mayúsculas

U.C.S.C	: Universidad Católica de la Santísima Concepción.
AC	: Corriente alterna en inglés.
DC	: Corriente continua en inglés.
MMC	: Convertidor multinivel modular.
MMSPC	: Convertidor multinivel serie/paralelo.
PWM	: Modulación por Ancho de Pulsos.
ERNC	: Energías Renovables No Convencionales.
IGBT	: Transistor Bipolar de Puerta Aislada.
R	: Resistencia.
L	: Inductor.
C	: Capacitor.

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

En la actualidad diversos equipos generadores y almacenadores de energía funcionan en DC, por ello los convertidores que se focalizan en transformar esta energía DC en AC son auge de estudios. Sin embargo, muchos de estos convertidores requieren lazos de control complejos, y una mayor complejidad deriva en un mayor costo de implementación. Un tipo de topología de estos convertidores resalta por su simplicidad en lo que a lazos de control se refiere [1], este es el convertidor modular multinivel con conexión en serie y paralelo (MMSPC). El énfasis en el presente trabajo es utilizar este tipo de convertidor para generar mayores inyecciones de corriente hacia la carga a través de la paralelización de sus fases internas [2], [3]. A la vez se espera que el sistema se mantenga balanceado sin utilizar lazos de control para mantener su estabilidad interna [1].

En este primer capítulo introductorio se analizan los trabajos previos, hipótesis y objetivos que tiene este trabajo. En el segundo capítulo se hace el primer acercamiento al circuito propuesto, presentando el modelado de una rama del MMSPC y su funcionamiento. En el tercer capítulo se modela una de las fases del MMSPC generando variaciones en sus parámetros, para observar cómo es el funcionamiento del convertidor y su estabilidad. En la cuarta parte de este trabajo se presenta el modelo final del MMSPC que se constituye de sus tres fases, en este capítulo se realizan diferentes pruebas variando parámetros y elementos que pudiesen afectar la estabilidad del sistema o mejorarla. En el capítulo cinco se presentan las conclusiones y trabajos futuros de la investigación. Finalmente se presenta la bibliografía y los anexos del trabajo.

1.2. Trabajos Previos

1.2.1 Module Implementation and Modulation Strategy for Sensorless Balancing in Modular Multilevel Converters

- ♣ Li, Z., Lizana, R., Sha, S., Yu, Z., Peterchev, A. v., & Goetz, S. M. (2019). Module implementation and modulation strategy for sensorless balancing in modular multilevel converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(9), 8405–8416.

En este trabajo se presentan nuevos modos de operación para los MMC, mostrando las ventajas que presenta una conexión serie/paralelo entre módulos como, por ejemplo, el no necesitar sensores

para mantener el equilibrio de un módulo y, en consecuencia, reducir costos y pérdidas por conducción. También, se presentan nuevas estrategias de modulación, los estados y principios de operación, así como resultados experimentales [1].

1.2.2 Modeling of cross-circulating currents in a MMC with parallel connected submodules in Solid State Transformers

- ♣ 1.1.1 Allende, F. R., Perez, M. A., Flores-Bahamonde, F., & Malinowski, M. (2021). Modeling of cross-circulating currents in a MMC with parallel connected submodules in Solid State Transformers. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2021-June.

El presente documento se centra en el modelado de las Corrientes circulantes que se generan en la paralelización de los submódulos de una MMC, considerando el cómo afectan a estas corrientes los diferentes valores de resistencias, inductancias y velocidades de conmutación. También, se hace análisis del modo paralelo de conexión en los convertidores multinivel que se utilizan en el lado de LV y el modelo, junto a la definición de corriente circulante cruzada [2].

1.2.3 A Review of Multilevel Converters with Parallel Connectivity

- ♣ Fang, J., Blaabjerg, F., Liu, S., & Goetz, S. (2021). A Review of Multilevel Converters with Parallel Connectivity. In IEEE Transactions on Power Electronics (Vol. 36, Issue 11, pp. 12468–12489). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

En este trabajo se revisan los convertidores multinivel de última generación que presentan conectividad en paralelo, viendo sus ventajas y presentando distintas topologías a nivel macro, esquemas de control y optimización. Se revisan temas que van desde la topología básica en la que se puede basar un submódulo de un MMC y sus diferentes interconexiones, hasta la combinación de estas topologías para la construcción de una estructura macro en base a estos submódulos [3].

1.2.4 Control of Solid State Transformer based on Modular Multilevel Converters with Interconnecting Dual Active Bridges

- ♣ IEEE Industrial Electronics Society, & Institute of Electrical and Electronics Engineers. (n.d.). 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics: proceedings: Pinnacle Hotel Harbourfront, Vancouver, BC, Canada, 12-14 June, 2019.

En este trabajo se aborda el tema de los transformadores de estado sólido, en específico sobre

un modelo que se basa en convertidores multinivel, donde se analiza la topología propuesta y el diseño de un controlador adecuado. En esta topología se presenta el transformador separado por puentes activos duales con una entrada en serie y salida en paralelo (ISOP) o entrada y salida serie (ISOS), así como su sistema de control [4].

1.2.5 An Integrated Inductor for Parallel Interleaved VSCs and PWM Schemes for Flux Minimization

- ♣ G. Gohil, L. Bede, R. Teodorescu, T. Kerekes, y F. Blaabjerg, «An Integrated Inductor for Parallel Interleaved VSCs and PWM Schemes for Flux Minimization», IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, n.o 12, pp. 7534-7546, dic. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2455059.

En este documento se muestran las diferencias entre utilizar inductores acoplados, de modo común y un inductor integrado. El análisis de este trabajo se centra en las ventajas de utilizar el inductor acoplado en el circuito junto a diferentes tipos de control PWM [5].

1.2.6 Discusión

Como se constató en la literatura revisada, los convertidores multinivel tienen diversos tipos de estructuras, que pueden adoptar los submódulos que componen el convertidor con conexión serie/paralelo, estos convertidores poseen diferentes ventajas a la hora de balancear el sistema de forma interna sin la necesidad de utilizar grandes lazos de control, lo que implica un ahorro en la implementación de estos sistemas, dado que se reduce la cantidad de sensores. Sin embargo, en la literatura revisada no se analiza la posibilidad de una interconexión entre fases internas del convertidor para aumentar la corriente en la salida en el convertidor, lo que es el enfoque de este trabajo

Dadas las diversas ventajas que presenta un sistema basado en convertidores multinivel con conexión en serie / paralelo, se espera que esta tecnología que está en auge comience a tener mayor atención debido a sus posibles aplicaciones en cuanto a ERNC, vehículos eléctricos, entre otros, sobre todo con la investigación presente, que incorpora una ventaja que no ha sido establecida en otros trabajos.

1.3. Hipótesis de Trabajo

- Es posible la interconexión en paralelo de las fases de los convertidores multinivel, de forma de aumentar las corrientes de salida, sin afectar los balances internos de los módulos del convertidor.

- El MMSPC dada su conexión en paralelo ayuda a que el sistema se encuentre balanceado sin necesidad de grandes lazos de control.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Simular un convertidor multinivel capaz de operar con fases en paralelo para aumentar la corriente de salida.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Definir los parámetros base del circuito a diseñar, así como resistencias, inductores, capacitancias y frecuencia de conmutación a utilizar.
- Generar diferentes escenarios para observar cómo es el funcionamiento y comportamiento del circuito.
- Crear un MMSPC estable que no tenga la necesidad de un sistema de control para los voltajes en los condensadores.

1.5. Alcances y Limitaciones

Este trabajo tiene como fin la creación de un circuito que simule un sistema basado en convertidores multinivel con conexión serie / paralelo, se analizan las ramas, fases y el sistema completo, realizando impactos de carga y variaciones en los diferentes parámetros con el fin de ver el comportamiento del sistema. También, se realiza un cambio de componentes inductivos con el fin de mejorar el funcionamiento. Una de las limitaciones, es que hay variables que quedaron fuera de análisis como, por ejemplo, los valores mínimos de operación de los componentes pasivos del sistema.

1.6. Temario y Metodología

En el primer capítulo se hace un primer acercamiento al trabajo incursionando en el estado del arte relacionado a los MMSPC. En el segundo se presentará la estructura interna de un MMSPC y su funcionamiento, posteriormente, en el capítulo 3 se muestra la construcción de una de las fases del circuito en base a lo visto en el capítulo anterior. Luego en el capítulo 4 donde se implementa el modelo final del sistema y se hacen pruebas de diseño. En el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo.

Capítulo 2. Análisis de una rama del MMSPC

2.1. Introducción

En esta parte del presente trabajo se construirá una parte de un sistema basado en convertidores multinivel, este tipo de convertidores se constituye de diferentes submódulos, que presentan distintas topologías, los tres submódulos base son los siguientes: Puente H, medio puente H simétrico y medio puente H asimétrico [3]. De estas tres “familias” nacen las diferentes posibilidades para hacer la interconexión paralela entre submódulos. Este trabajo se centrará en la aplicación de submódulos con conexión en doble puente H que es una variante del puente H que nos permite realizar conexión en serie y paralelo, así como un estado de bypass. Este tipo de conexión se muestra en la figura 2.1.

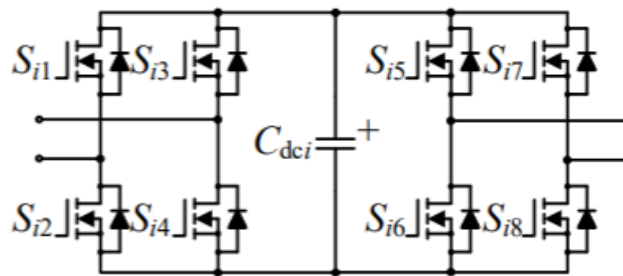


Figura 2.1 Submódulos de doble puente H de convertidores multinivel con conectividad paralela.

Fuente: [3]

2.2. Análisis del submódulo utilizado

Para la construcción de este sistema se utilizaron semiconductores IGBT con un diodo en antiparalelo. Estos en conjunto poseen la particularidad de poder conducir en ambas direcciones, generando de esta forma un flujo bidireccional de la energía eléctrica presente en el sistema. Se trabajó en cuatro tipos de conexión, serie positiva, serie negativa, paralelo y bypass. Estas cuatro composiciones se presentan en las siguientes figuras.

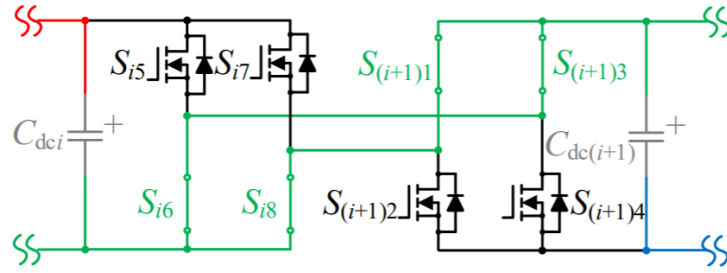


Figura 2.2. Estado de operación serie positivo del módulo de doble puente H.

Fuente: [3]

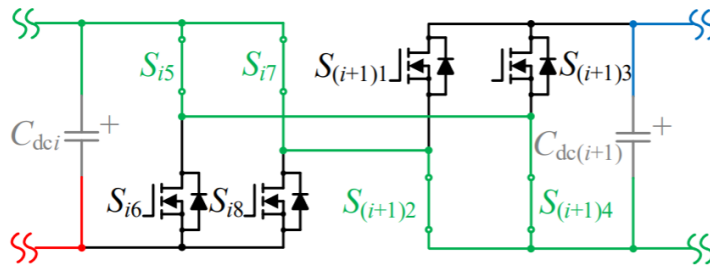


Figura 2.3. Estado de operación serie negativo del módulo de doble puente H.

Fuente: [3]

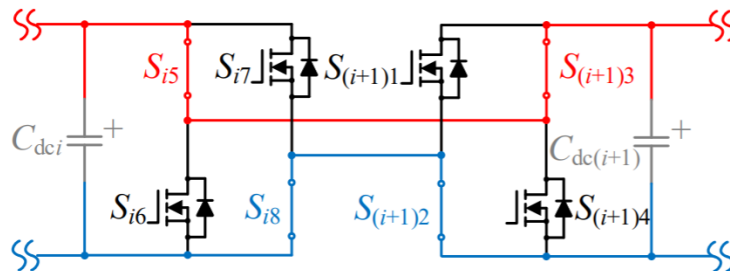


Figura 2.4. Estado I de operación paralela del módulo de doble puente H.

Fuente: [3]

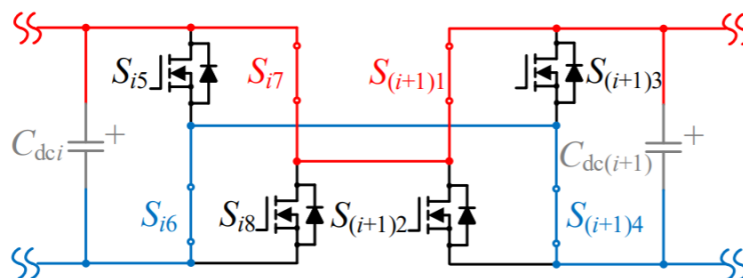


Figura 2.5. Estado II de operación paralela del módulo de doble puente H.

Fuente: [3]

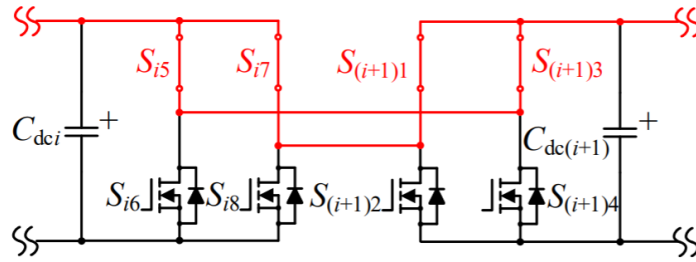


Figura 2.6. Estado I de operación Bypass del módulo de doble puente H.

Fuente: [3]

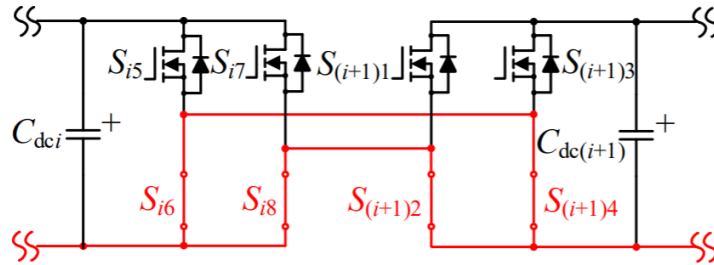


Figura 2.7. Estado II de operación Bypass del módulo de doble puente H.

Fuente: [3]

Para los estados paralelo y bypass solo se utiliza uno de los estados, para la simulación implementada se escogió el estado paralelo 1 y el estado de bypass 1.

2.3. Estructura, parámetros, sistema de control y resultados obtenidos de la rama del MMSPC

A continuación, se muestra la estructura del circuito y los resultados obtenidos al simular una de las ramas de un MMSPC. Se logra hacer una conexión serie y paralelo entre los distintos módulos, dónde en dos de ellos hay condensadores y, en el otro, una fuente DC que ayuda a que los condensadores estabilicen su voltaje en un valor fijo.

Para lograr los distintos tipos de conexiones se trabajó a través de interconexiones, para una mejor comprensión en la figura 2.8 se muestran las diferentes interconexiones con los respectivos nombres de cada conjunto de semiconductores y, en la tabla 2.1 se muestran los valores que toma cada semiconductor en los diferentes estados de conexión, siendo 1 un estado de conmutación cerrado, 0 abierto y X no corresponde.

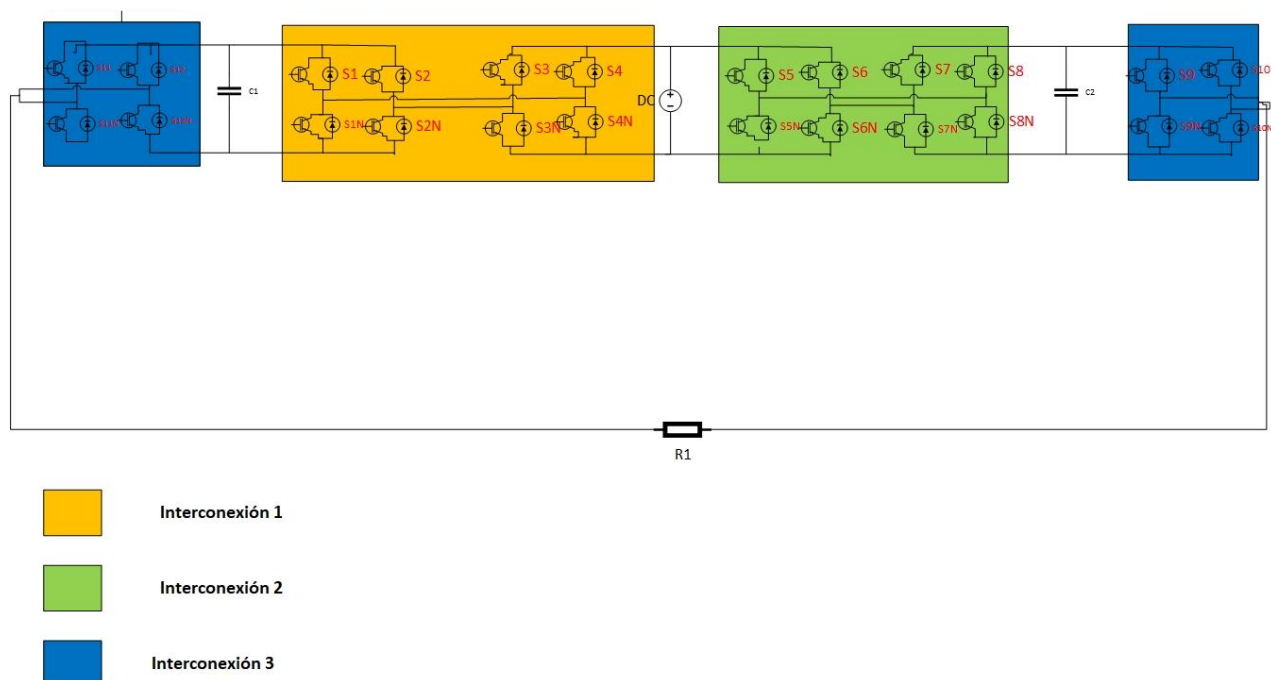


Figura 2.8. Rama de MMSPC y sus interconexiones.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2.1. Pulsos de disparo para los diferentes estados de conmutación.

Switch	Serie +	Serie -	Paralelo	Bypass
S1	0	1	1	x
S2	0	1	0	x
S3	1	0	0	x
S4	1	0	1	x
S5	0	1	1	x
S6	0	1	0	x
S7	1	0	0	x
S8	1	0	1	x
S9	1	0	x	1
S10	1	0	x	1
S11	0	1	x	1
S12	0	1	x	1

Fuente: elaboración propia.

Para realizar las diferentes interconexiones es necesario tener la señal moduladora y portadora, a partir de ellas se generan los distintos pulsos de disparo para los estados de conmutación.

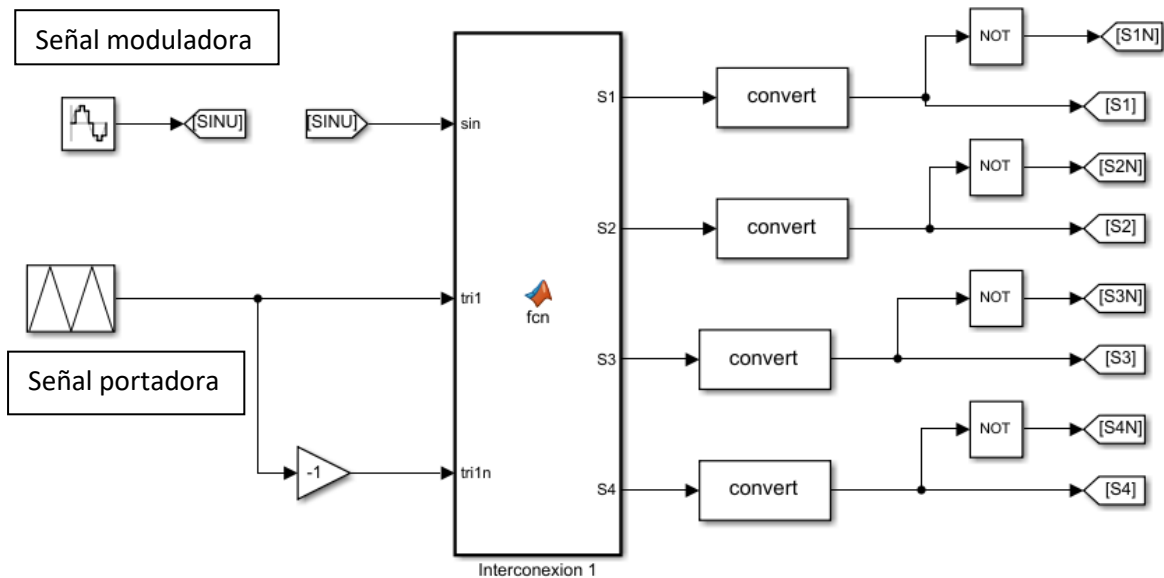


Figura 2.9. Control de la interconexión I.

Fuente: Matlab Simulink.

Como se observa en la figura 2.9 el sistema de control de los estados de conmutación se compone de una señal moduladora y una portadora, junto a su negación como parámetros de entrada. En el bloque de “Interconexión 1” se especifican las condiciones para los diferentes estados deseados. Aquí se indica que, si la señal moduladora es mayor a ambas portadoras, se tendrá un estado de serie positivo, si esta es menor a ambas, entonces se tendrá un estado negativo y si la señal moduladora no es mayor ni menor a ambas señales se tendrá un estado paralelo. Lo mismo ocurre en la segunda interconexión, con la diferencia que las portadoras están desfasadas en $\frac{2*\pi}{N}$ [1].

Para la tercera interconexión los primeros dos estados (serie + y serie -) son iguales a los casos anteriores, pero cuando la señal moduladora no es mayor ni menor a ambas ocurre un estado de bypass, que se presenta en la figura 2.6.

El circuito que se propone es una de las ramas de un MMSPC. Este se compone, como se observa en la figura 2.1, de tres submódulos de doble puente H, donde en el submódulo 1 y 3 existe un capacitor como elemento almacenador de energía y, en el segundo submódulo, hay una fuente DC, esta fuente ayuda a que los capacitores de los otros submódulos se estabilicen de forma más fácil. Los tres submódulos se interconectan entre sí para crear una salida AC que va a una resistencia de 100 [Ω].

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos a través de la simulación mediante SIMULINK, se observarán los voltajes presentes en los capacitores y el voltaje de salida.

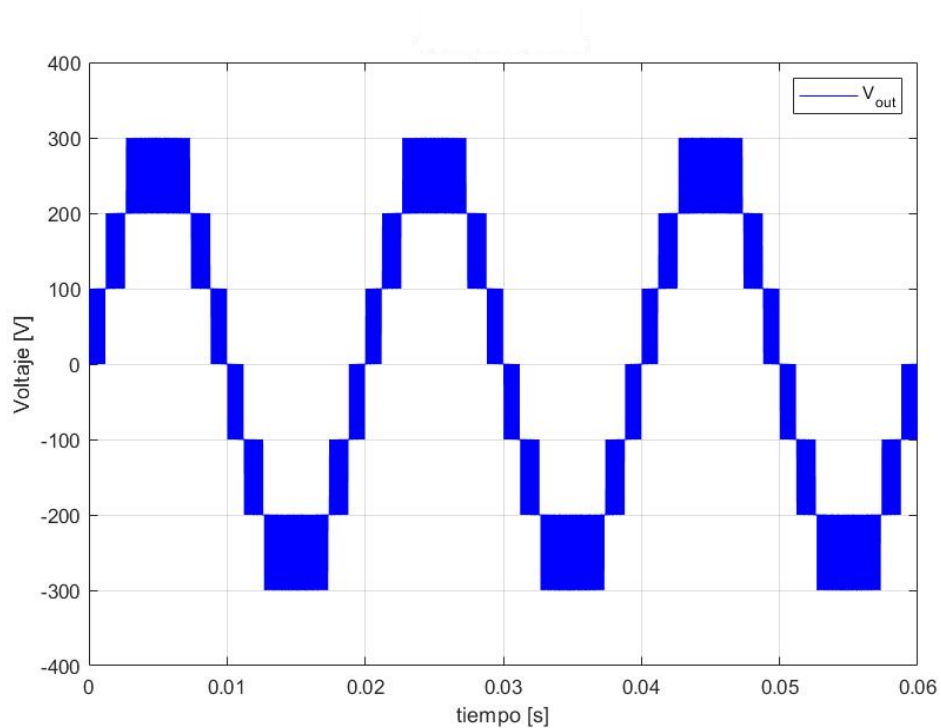


Figura 2.10. Voltaje de salida del convertidor.

Fuente: Matlab Simulink.

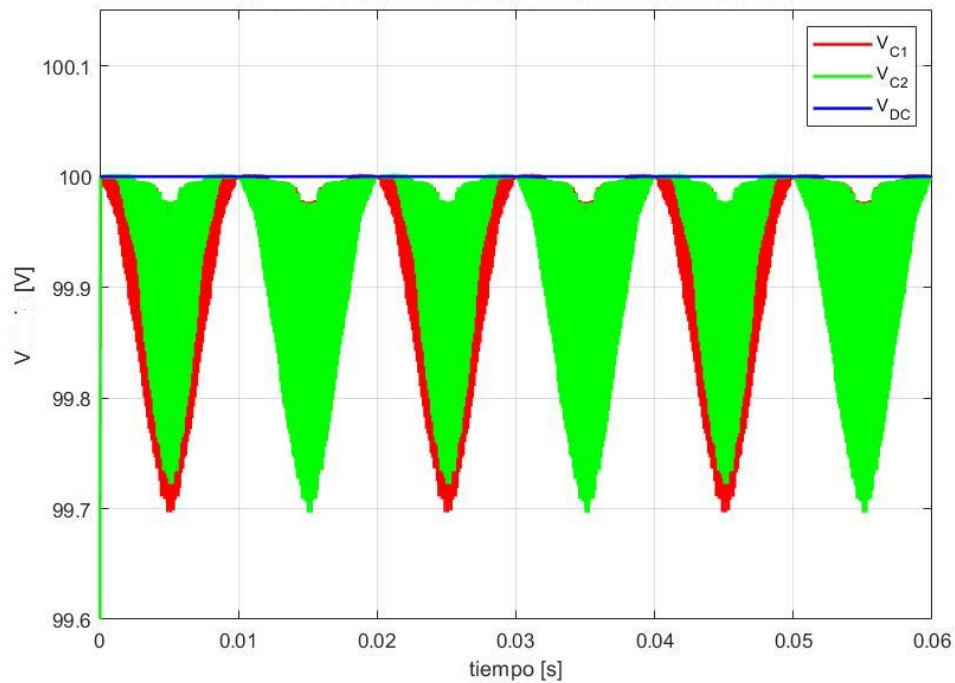


Figura 2.11. Voltaje en los capacitores y fuente DC de los submódulos.

Fuente: Matlab Simulink.

Por un lado, como se observa en la figura 2.10, se logra obtener un voltaje con 7 niveles de forma clara a la salida del convertidor, lo que se debe a la cantidad de submódulos utilizados, por lo que si se quisiera que el voltaje a la salida tuviese una mayor cantidad de niveles sería necesario agregar más submódulos al sistema. Por otra parte, en la figura 2.11, se observa que ambos capacitores se logran balancear correctamente gracias a la fuente DC incorporada en uno de los submódulos y su voltaje solo desciende en 0.3 [V] aproximadamente.

Capítulo 3. Análisis de una fase del MMSPC

3.1. Introducción

En el capítulo anterior se implementó una de las ramas de un MMPSC, de ella se obtuvo el voltaje de salida y se comprobó cómo se estabilizaban los condensadores al tener una conexión en paralelo en las ramas del circuito. Ahora con la base de esa rama implementada, se generarán dos fases cada una con rama positiva y negativa conectadas a una fuente DC y a una carga que se encuentra en paralelo a dos condensadores, como se muestra en la figura 3.1.

Con esta conexión se busca que, al paralelizar las fases, se genere un mayor flujo de corriente hacia la carga. De esta forma, se tendrían dos tipos de conexiones en paralelo, la que se encuentra dentro de las ramas que tiene como fin estabilizar los condensadores presentes en los módulos del sistema y la paralelización de fases que busca entregar una mayor corriente a la salida.

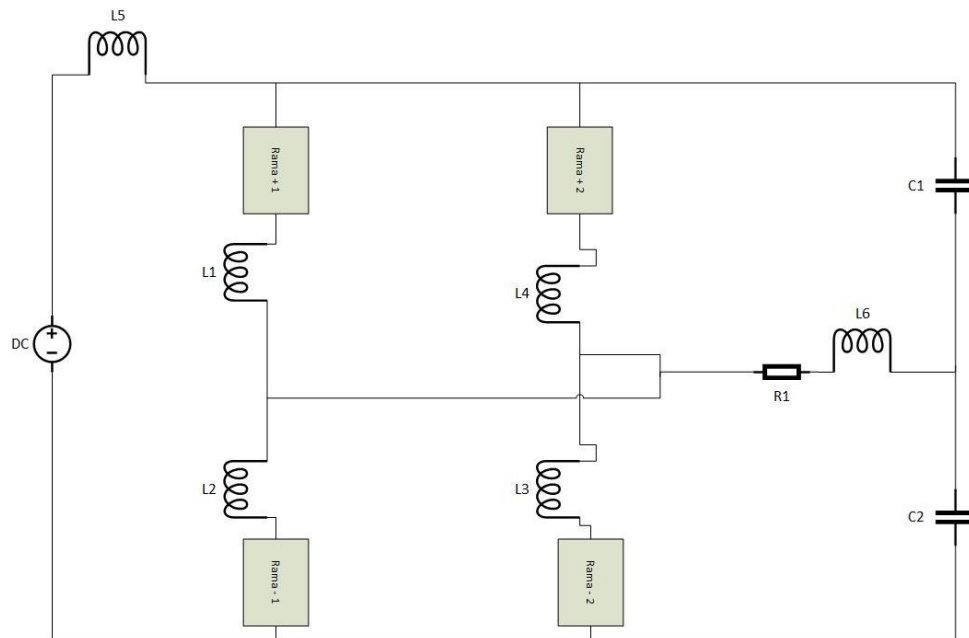


Figura 3.1. Circuito MMSPC con una fase.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 3.1, cada rama corresponde al circuito mostrado en la figura 2.8 con la variación que en este caso en el submódulo de en medio ya no existe una fuente DC, sino que en su lugar hay un condensador al igual que en los otros submódulos, en base a esta estructura de rama se trabajara de aquí en adelante.

Ambas fases y sus elementos son idénticas entre sí, pero la rama positiva y negativa de cada fase poseen una sutil diferencia en su sistema de control. Para la rama positiva se tiene de entrada la suma de una señal sinusoidal con una señal continua, y en la rama negativa se tiene la resta de una señal continua menos una señal sinusoidal como se observa en las ecuaciones 3.1 y 3.2 respectivamente.

$$M_{rp} = M_{AC} + M_{DC} \quad \text{Ecc 3. 1}$$

$$M_{rn} = -M_{AC} + M_{DC} \quad \text{Ecc 3. 2.}$$

Donde “ M_{AC} ” es la señal sinusoidal que corresponde a la componente alterna y “ M_{DC} ” es la señal continua.

Se debe considerar que los valores de los diferentes elementos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Valores de los elementos presentes en el circuito.

Elemento	Valor
L_1, L_2, L_3, L_4 y L_5	5 [mH]
C_1, C_2 y C_c	1000 [μF]
R	100 [Ω]
L_6	15 [mH]
Fuente DC	800 [V]

Fuente: elaboración propia.

Donde C_c Corresponde a los capacitores internos de las ramas.

Se tienen diferentes aristas a abordar para hacer comparaciones en los distintos escenarios posibles, en este caso se optó por dividirlo en tres etapas que se diferencian según la frecuencia que posee la portadora, que varía entre los valores 4.5 [kHz], 2.5[kHz] y 0.5 [kHz], y en cada etapa se hicieron subdivisiones donde se evaluó el comportamiento del sistema al ir variando la capacitancia (1000 [μF], 500 [μF], 50 [μF] y 2 [μF]) de todos los capacitores presentes en el MMSPC.

Etapa I

En esta primera etapa se trabajará con una frecuencia de 4.5 [kHz] y se analizará cómo es la variación de los diferentes parámetros del sistema al utilizar diferentes valores de capacitancia.

$$f_{port} = 4.5 \text{ [kHz]}$$

Parte 1

Para esta primera parte se utilizará una capacitancia de $C = 1000[\mu\text{F}]$.

Por un lado, se observa en la figura 3.2 que el voltaje presente en las ramas positivas y negativas de ambas fases se comportan de la misma manera, por lo que no hay problemas con la conexión en paralelo generada en el circuito. Por otro lado, en la figura 3.3 las corrientes presentes en las ramas poseen una clara distorsión, esto puede deberse a que los elementos inductivos no tienen una resistencia por lo que en este caso quizá se debería agregar una condición inicial en los inductores de las ramas.

Se logra apreciar en la figura 3.4 que los voltajes de los condensadores, tanto de las ramas positivas como negativas, de ambas fases, no presentan oscilación entre sus ramas respectivas, y su valor oscila en torno a los 267 [V] en promedio, teniendo una variación mínima en sus voltajes.

En la figura 3.5 se aprecian las corrientes de salida que poseen ambas fases, como es de esperar se tiene una salida sinusoidal que va desde los -2 a 2 [A]. Ahora, observando la figura 3.6 se aprecia la corriente presente en la carga RL del circuito, es la resultante entre la suma de la corriente presente en la fase 1 y la que se encuentra en la fase 2, que se muestran en la figura 3.5.

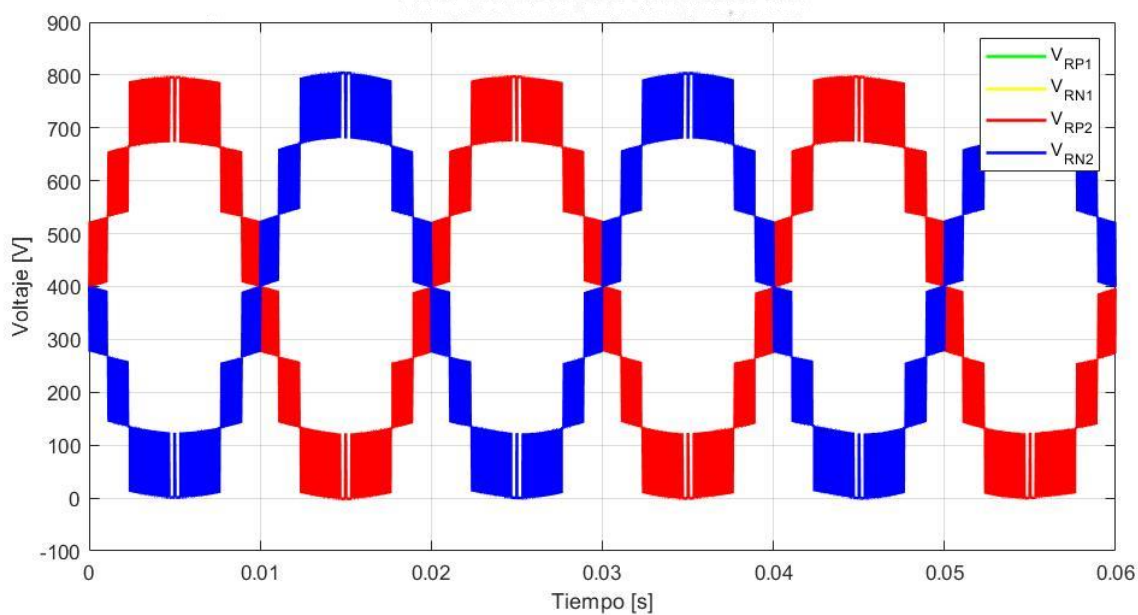


Figura 3. 2. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

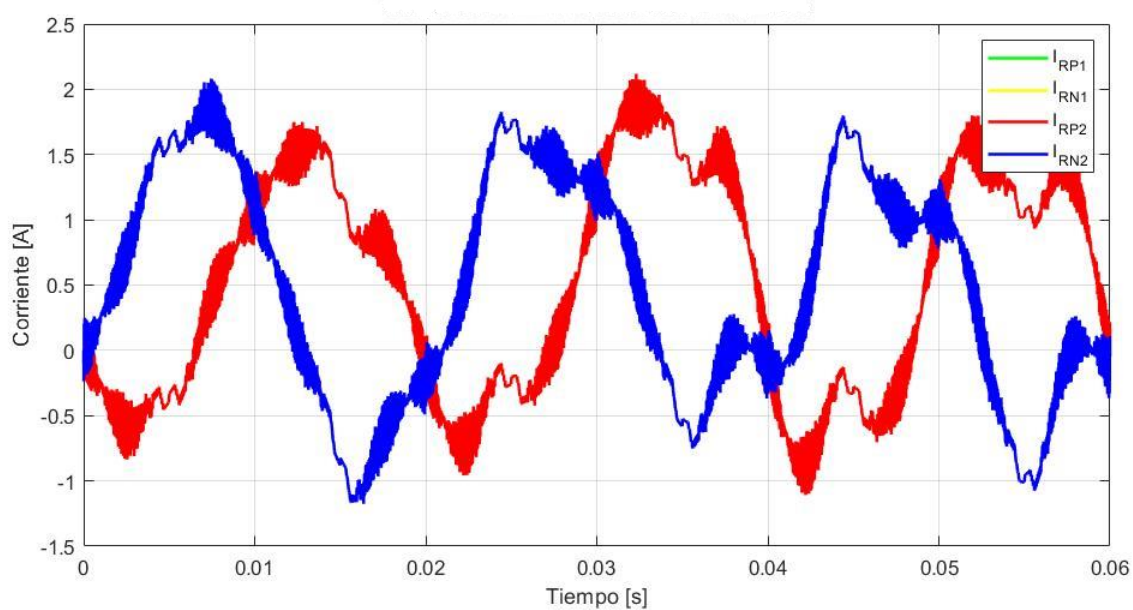


Figura 3. 3. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

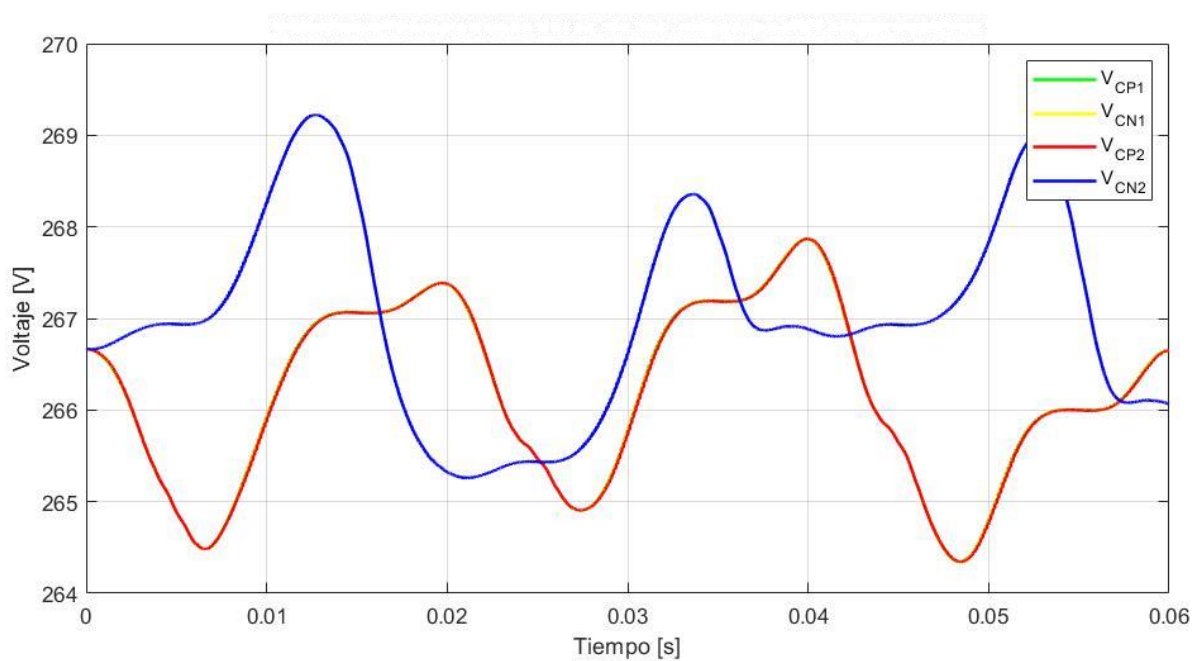


Figura 3. 4. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

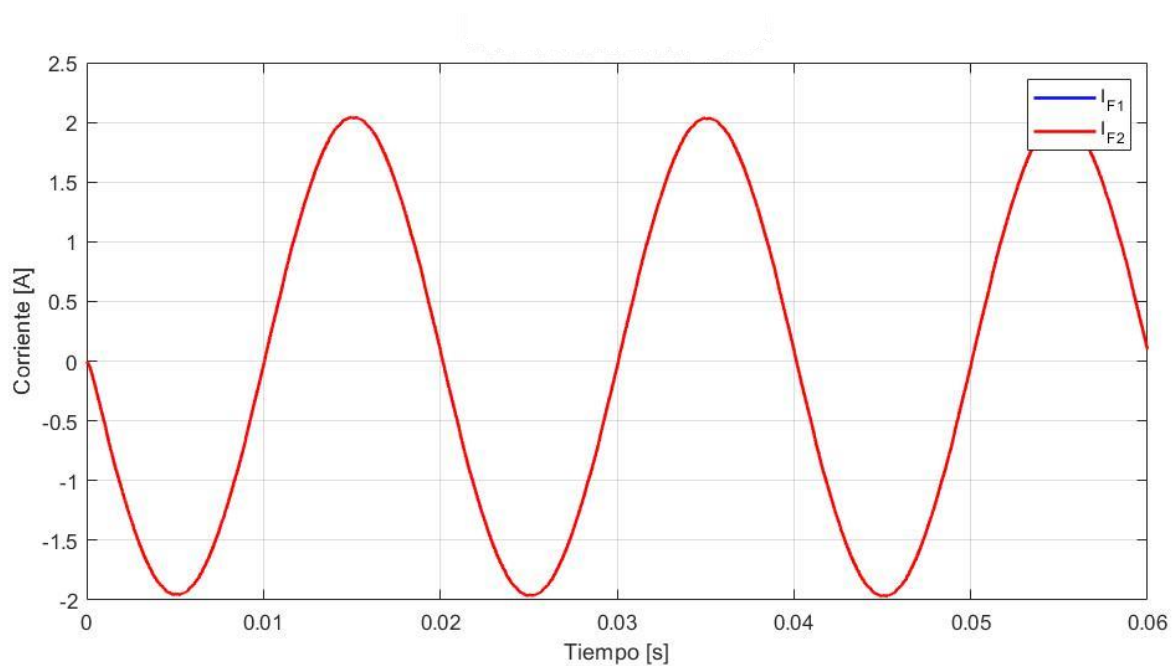


Figura 3. 5. Corriente en las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

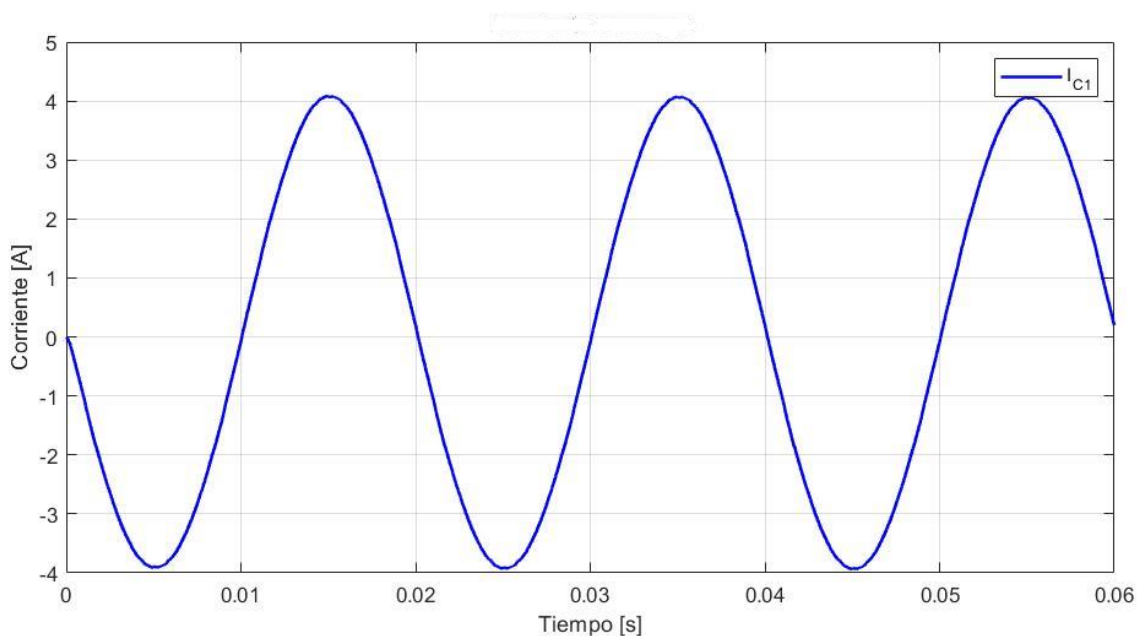


Figura 3. 6. Corriente en la carga.

Fuente: Matlab Simulink.

Parte 2

Para esta segunda parte se utilizará una capacitancia de $C = 500[\mu\text{F}]$.

Se observa en la figura 3.7 que al disminuir la capacitancia al 50%, esta no genera grandes cambios en los voltajes de las ramas positiva y negativa, más que una pequeña disminución en los valores peak que presentan las ramas. En la figura 3.8 se aprecia que, al variar la capacitancia, la corriente presente en las ramas presenta una mayor distorsión que el caso anterior.

En la figura 3.9 se aprecia que los voltajes en los capacitores, tanto de las ramas positivas como negativas, poseen una mayor variación con respecto al voltaje promedio. Por ello se presume que mientras más baja sea la capacitancia, mayor será la variación de los condensadores, con respecto al valor promedio de estos.

En los casos presentes en la figura 3.10 y 3.11 se observa que no hay mayores cambios en estos al disminuir la capacitancia del sistema.

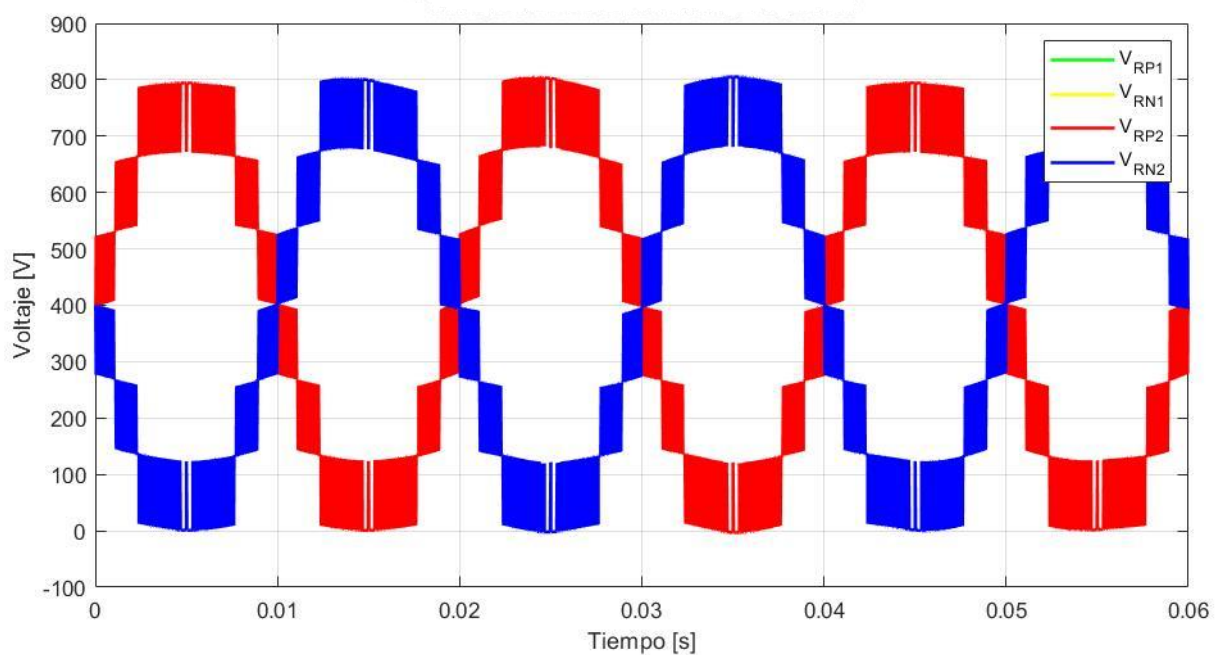


Figura 3. 7. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

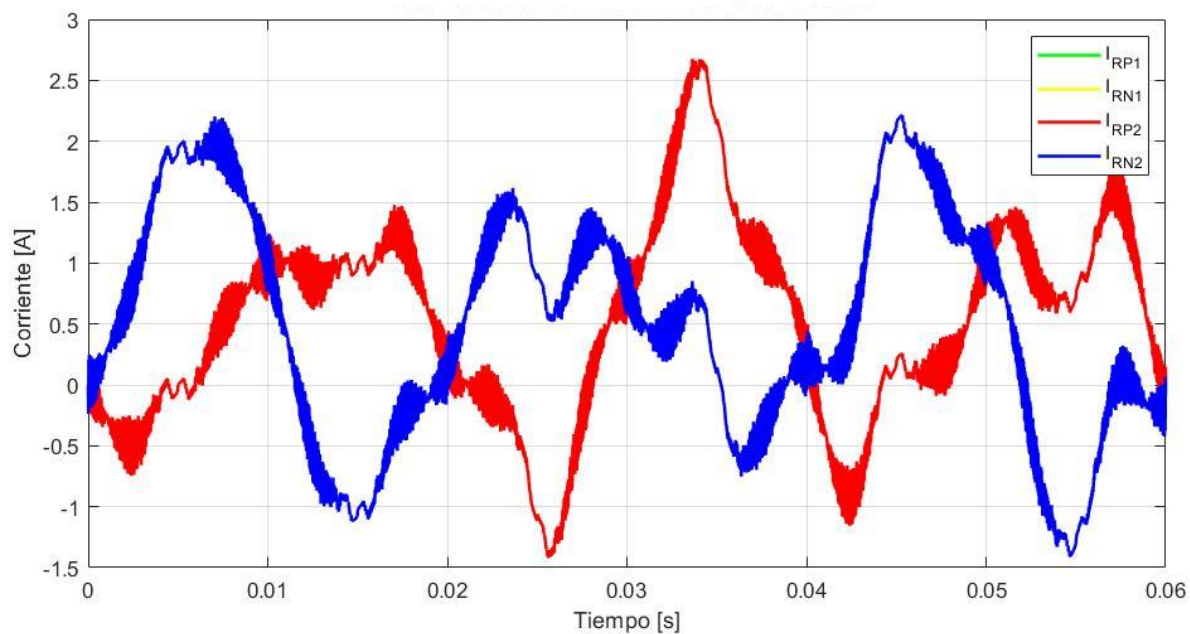


Figura 3. 8. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

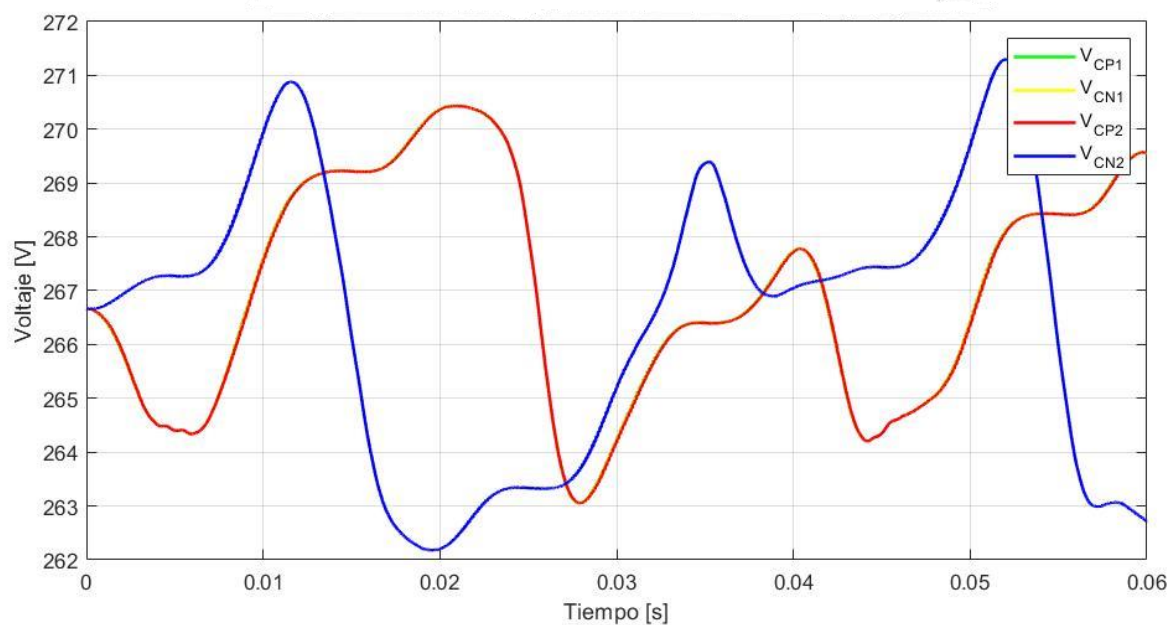


Figura 3. 9. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

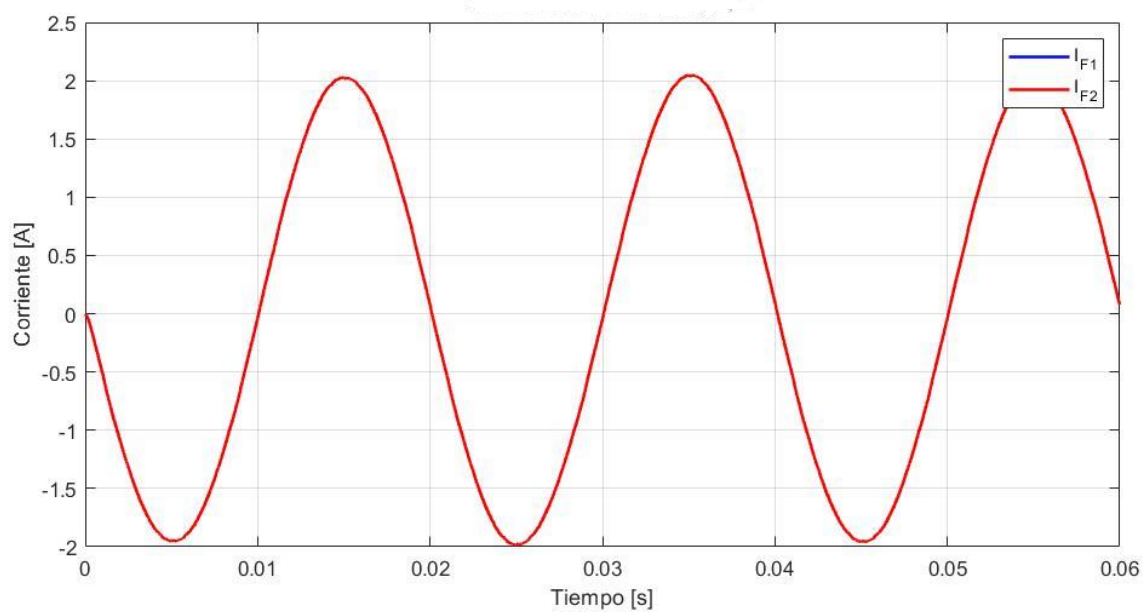


Figura 3. 10. Corriente en las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

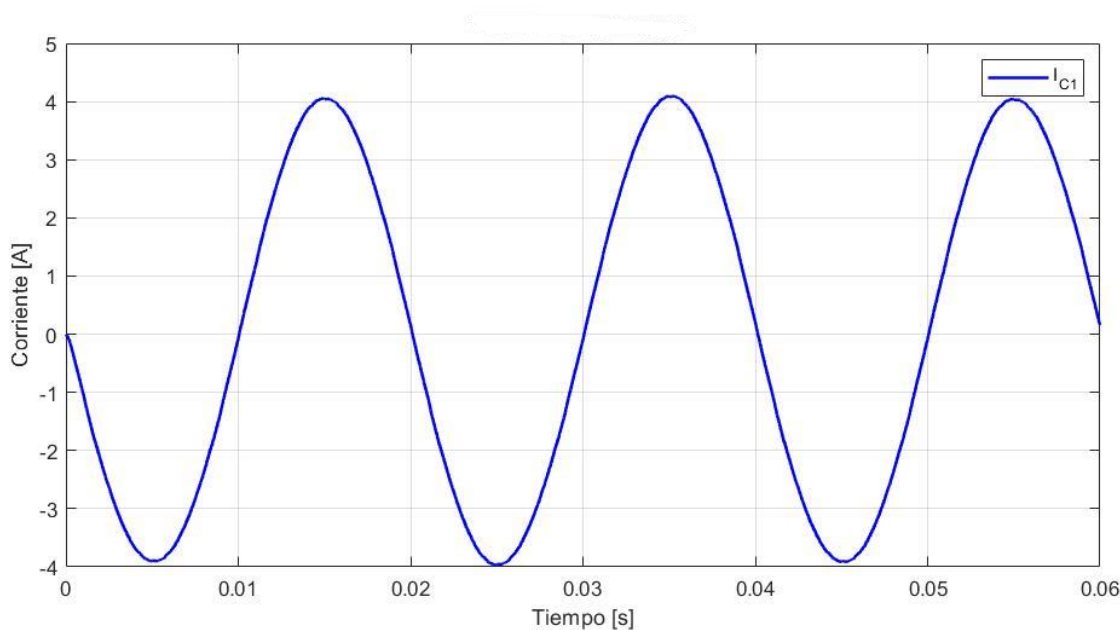


Figura 3. 11. Corriente en la carga.

Fuente: Matlab Simulink.

Parte 3

Para esta tercera parte se utilizará una capacitancia de $C = 50[\mu\text{F}]$.

En la figura 3.12 se observa que los voltajes en las ramas positivas y negativas no difieren entre fases, a pesar de la disminución de la capacitancia, pero sí presentan una mayor oscilación en sus valores. En cuanto a la corriente de las ramas que se presenta en la figura 3.13 se puede constatar que es aún más distorsionada que el caso anterior, debido a la baja capacitancia que se utiliza en este caso.

En la figura 3.14 se nota que, al disminuir la capacitancia del sistema, la variación en el voltaje de los capacitores de las ramas aumenta, esto es consecuencia del tiempo de carga y descarga de los capacitores que disminuye a medida que se reduce la capacitancia.

En las figuras 3.15 y 3.16 se observa que la corriente de salida de las fases y, en consecuencia, la de carga se ven afectadas por esta disminución en la capacitancia, generando que la forma de onda de salida para la corriente no sea perfectamente sinusoidal.

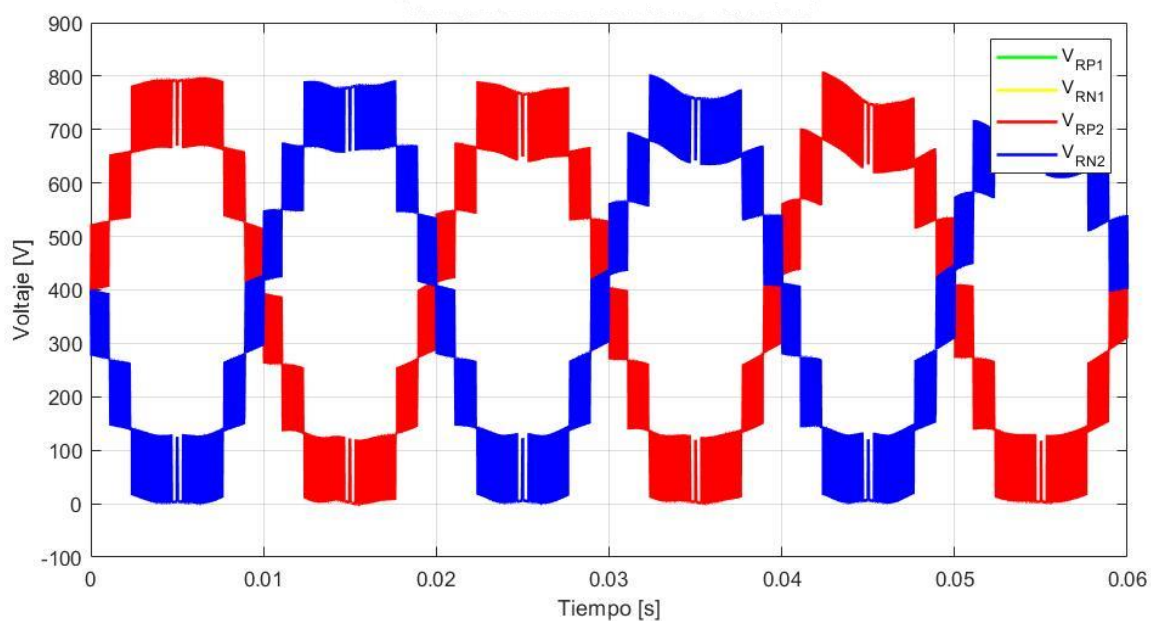


Figura 3. 12. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

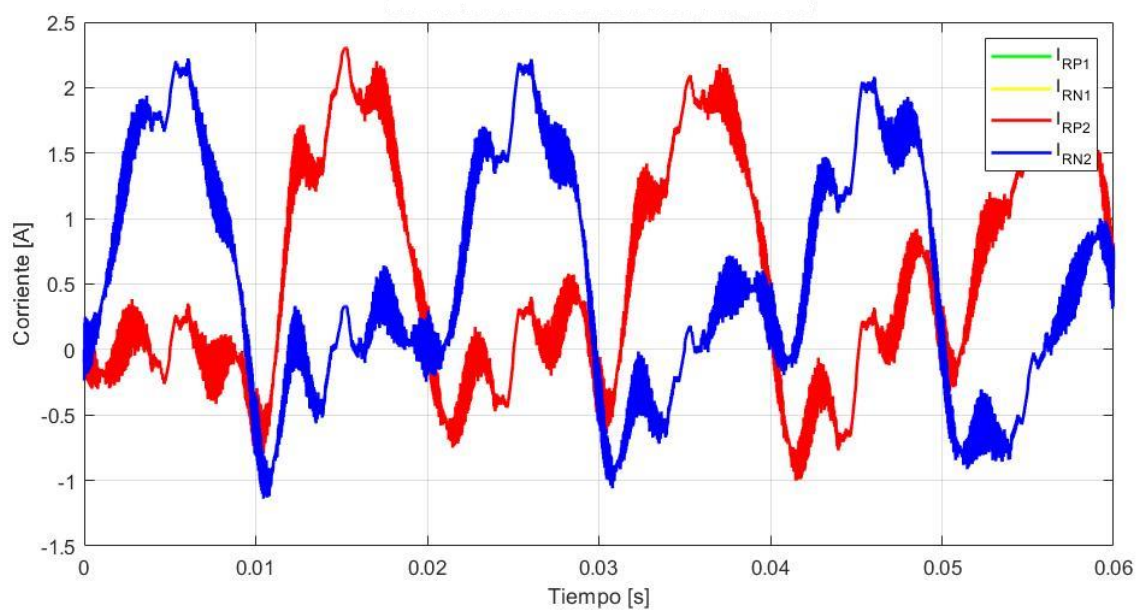


Figura 3. 13. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

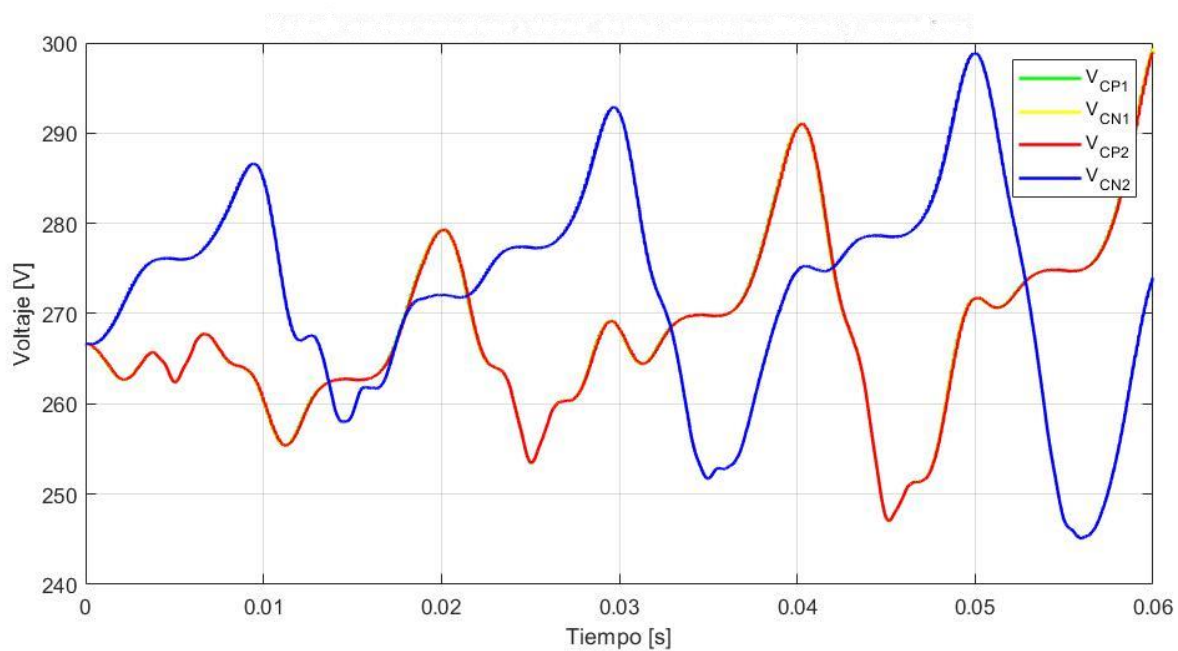


Figura 3. 14. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

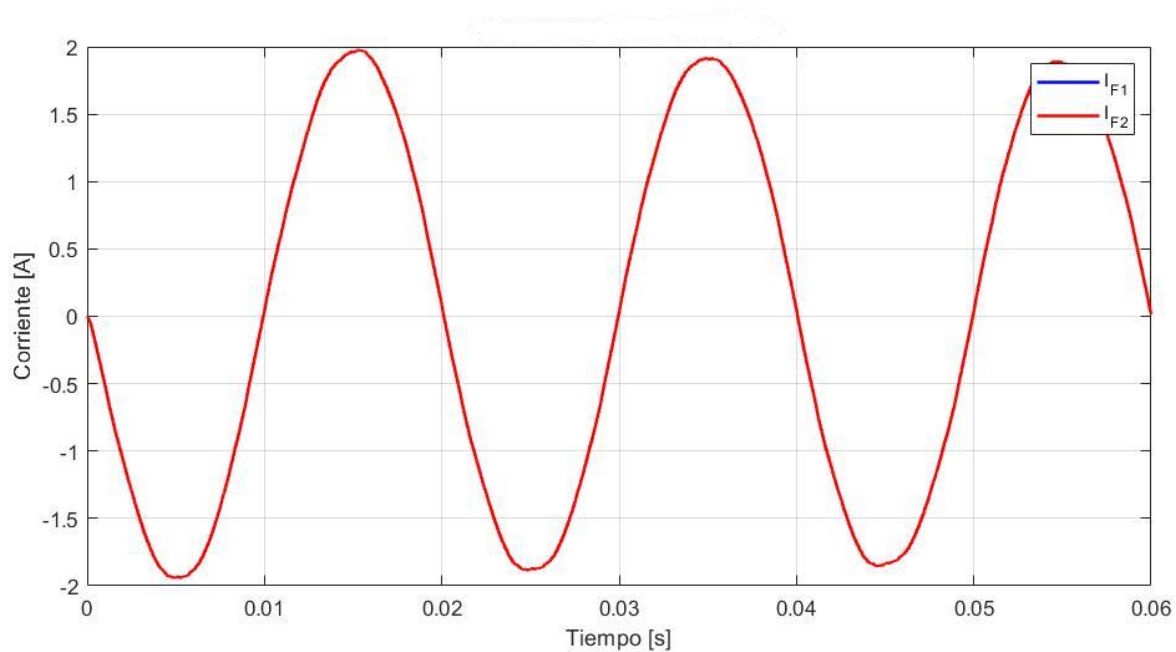


Figura 3. 15. Corriente en las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

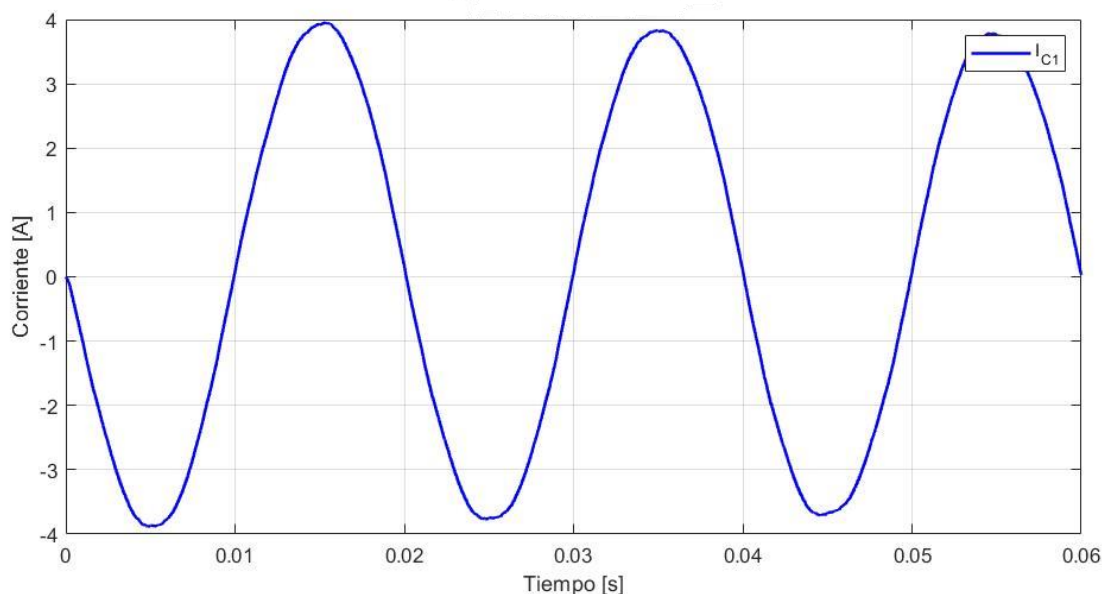


Figura 3. 16. Corriente en la carga 1.

Fuente: Matlab Simulink.

Parte 4

Para esta cuarta parte se utilizará una capacitancia de $C = 2 \text{ } [\mu\text{F}]$.

En la figura 3.17 se observa que el voltaje presente en las ramas, a pesar de disminuir drásticamente la capacitancia, no difiere entre ramas paralelas, pero sí genera una mayor distorsión en su forma de onda.

En la figura 3.18 se puede constatar una notoria distorsión y disminución de la corriente presente en las ramas positiva y negativa de ambas fases. En la figura 3.19 se aprecia que, el voltaje en los condensadores se eleva más que en los casos anteriores, y aún más en las ramas positivas de ambas fases. También se aprecia una mínima distorsión que se genera entre los condensadores de cada rama.

En las figuras 3.20 y 3.21 se puede apreciar cómo la corriente de las fases y, en consecuencia, la de la carga, disminuyen drásticamente con respecto a los casos observados en las partes 1, 2 y 3, también se observa una clara distorsión en su forma de onda.

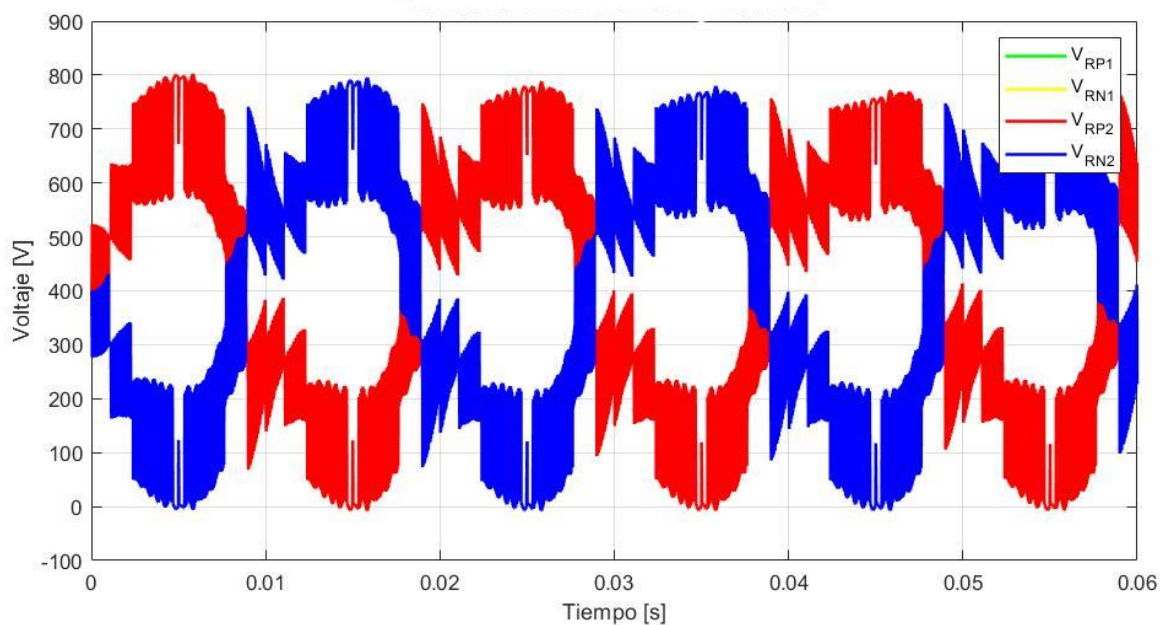


Figura 3. 17. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

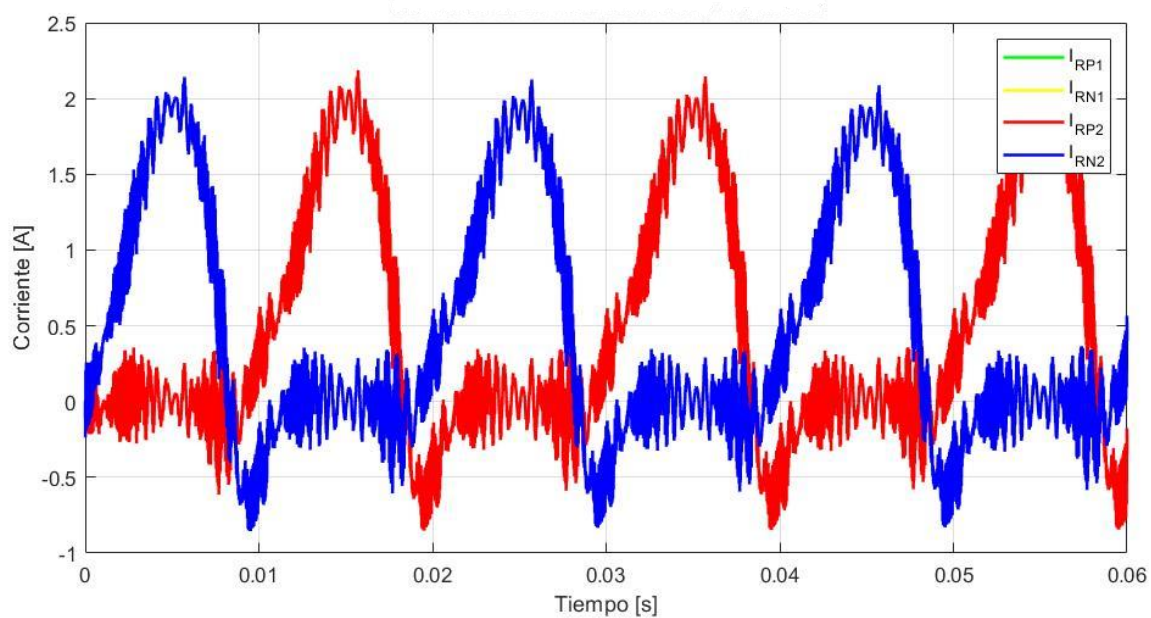


Figura 3. 18. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

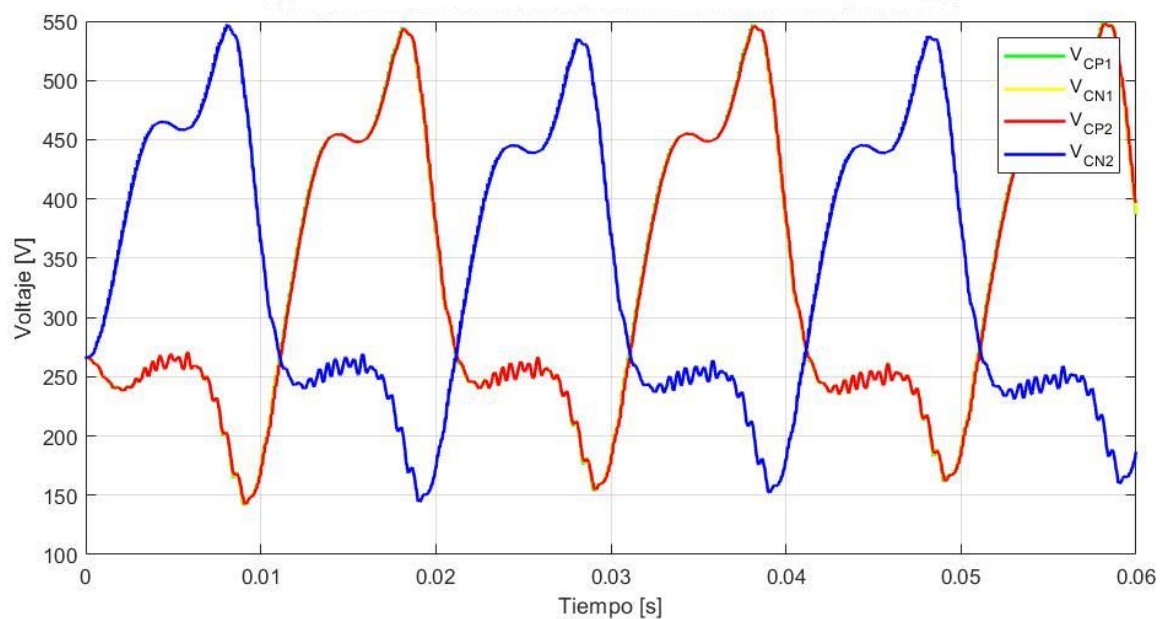


Figura 3. 19. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

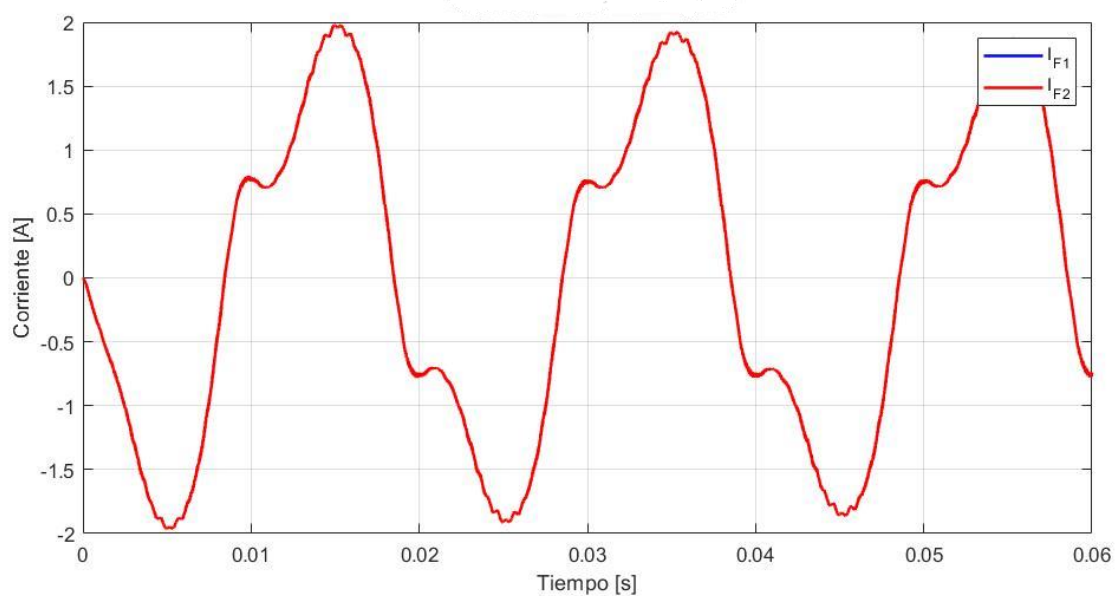


Figura 3. 20. Corriente en las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

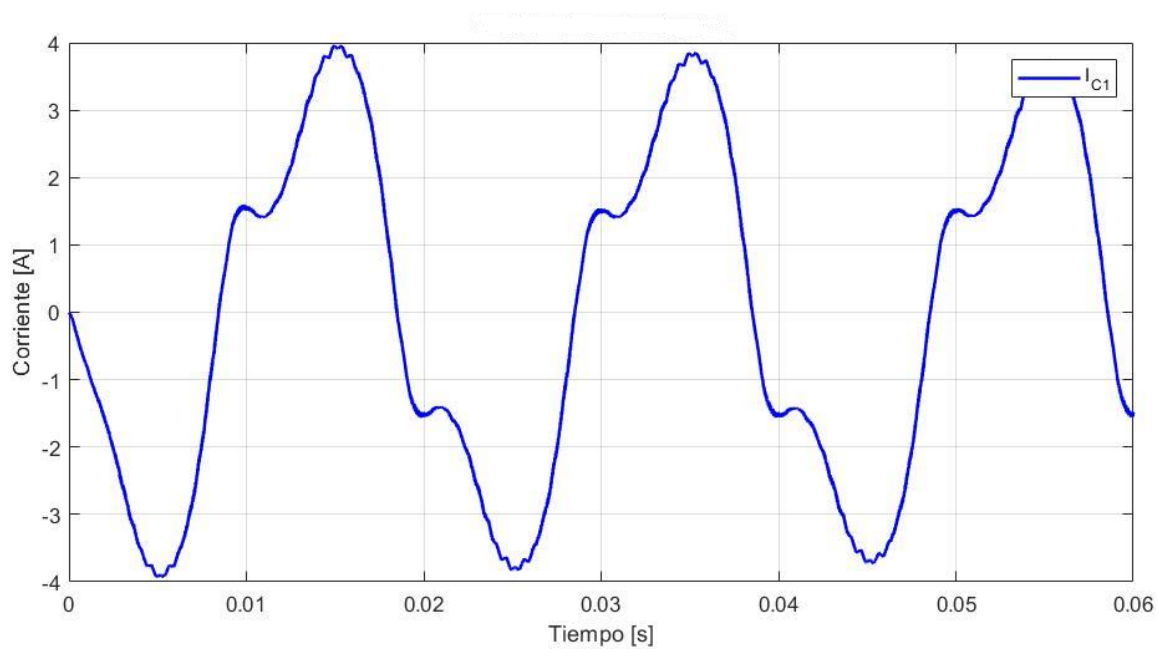


Figura 3. 21. Corriente en la carga 1.

Fuente: Matlab Simulink.

Etapa II

En esta segunda etapa se trabajará con una frecuencia de 2.5 [kHz] y se analizará cómo es la variación de los diferentes parámetros del sistema al variar la capacitancia de este.

$$f_{port} = 2.5 \text{ [kHz]}$$

Parte 1

Para esta primera parte se utilizará una capacitancia de $C = 1000[\mu\text{F}]$.

En cuanto al voltaje en las ramas, al observar la figura 3.22, no se aprecian cambios notorios al disminuir la frecuencia de la portadora, pero si en la corriente, si se comparan las figuras 3.23 y 3.3 se observan peaks que se deben a la disminución de la frecuencia. Ahora, si se aprecia el voltaje que se obtiene en los capacitores de las ramas, contrastando las figuras 3.24 y 3.4, se observa que aunque es sutil la diferencia, en el caso de la figura 3.24 los peaks de voltaje son mayores. Sin embargo, para la corriente de salida, si se comparan las figuras 3.25 y 3.26 con 3.5 y 3.6, no se observan cambios notorios.

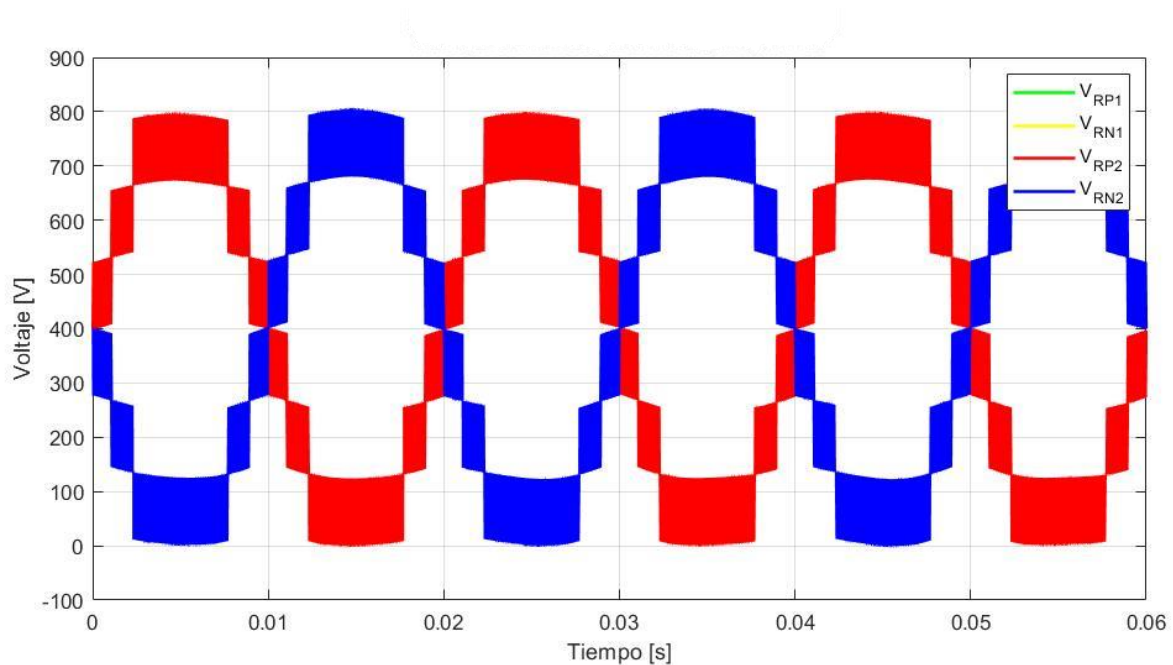


Figura 3. 22. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

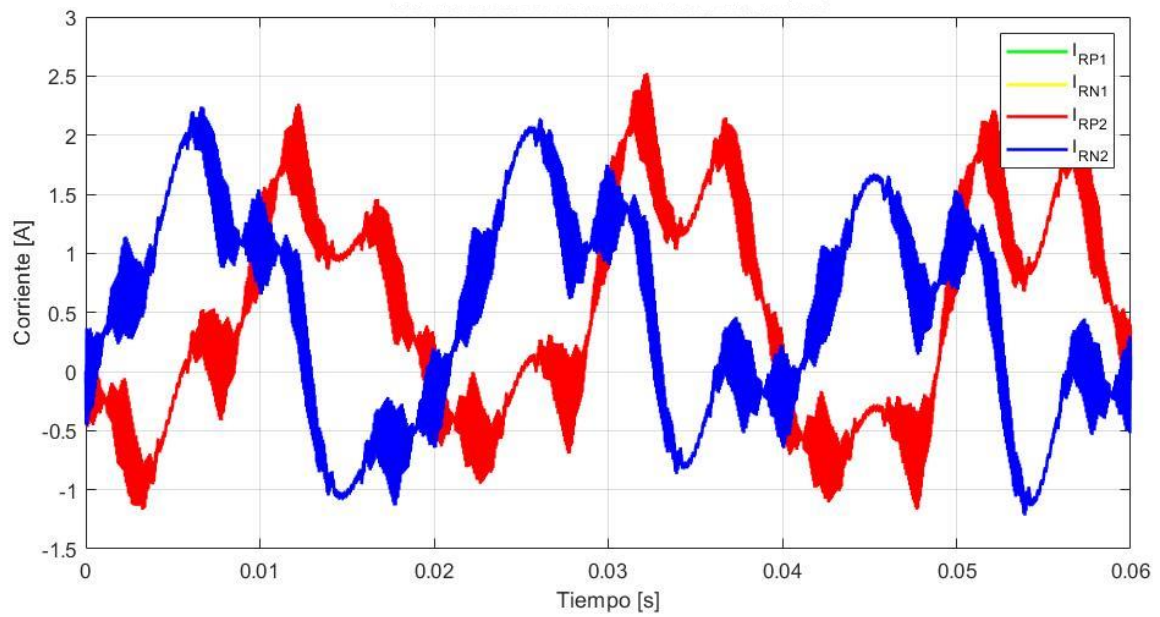


Figura 3. 23. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

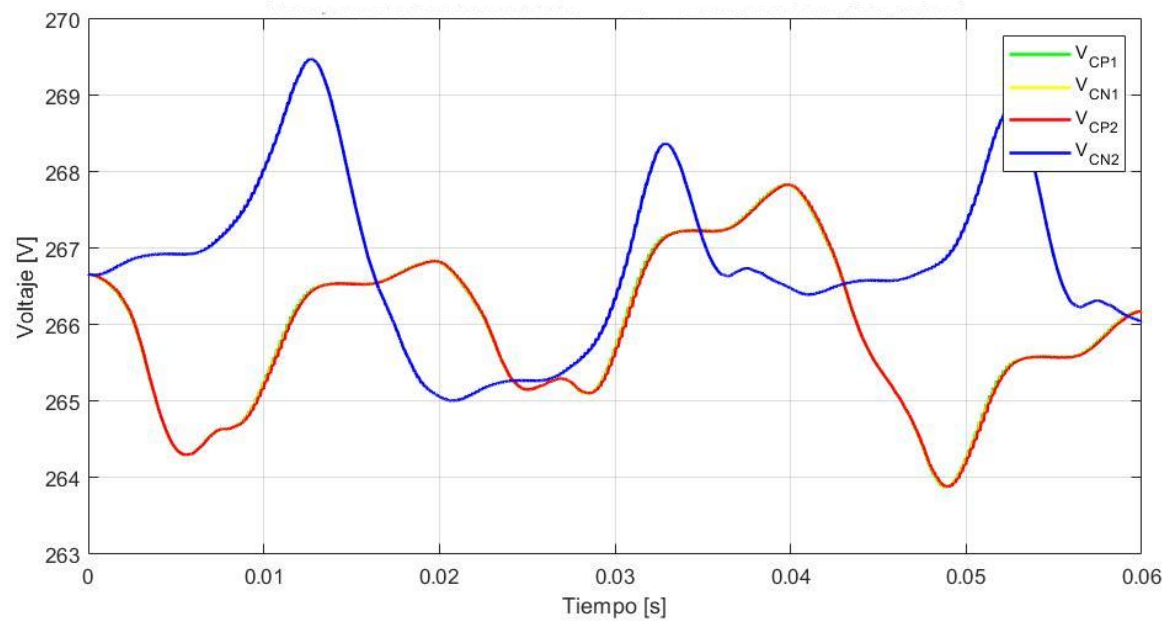


Figura 3. 24. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

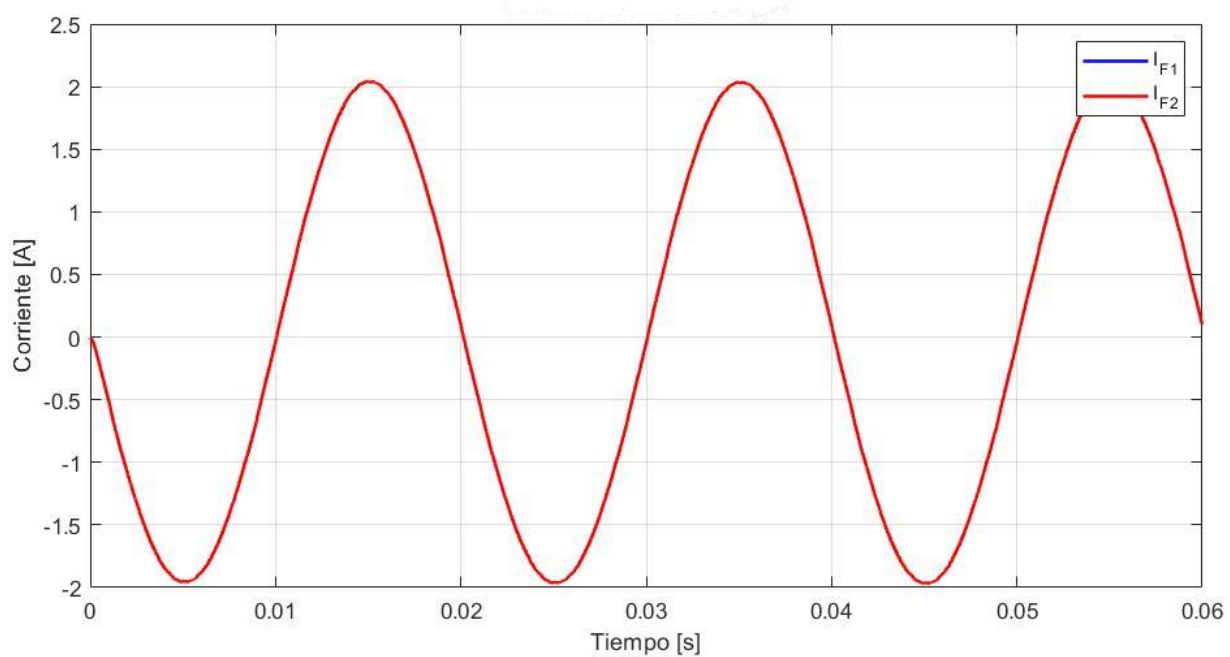


Figura 3. 25. Corriente en las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

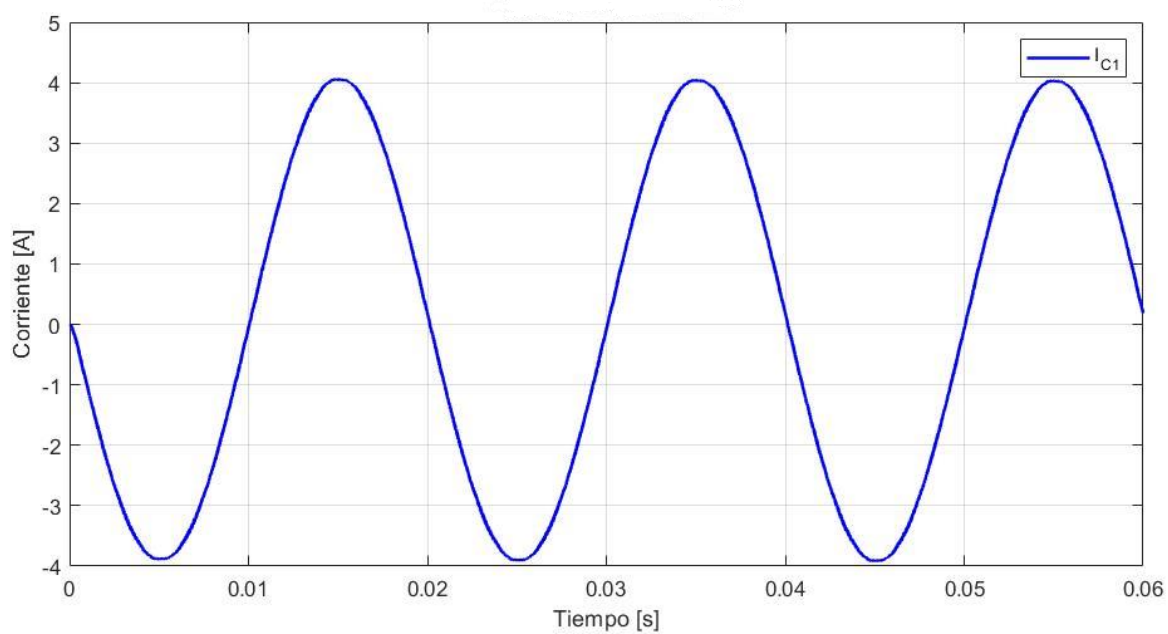


Figura 3. 26. Corriente en la carga 1.

Fuente: Matlab Simulink.

Parte 2

Para esta segunda parte se utilizará una capacitancia de $C = 500 \text{ } [\mu\text{F}]$.

Por un lado, se observa en la figura 3.27 que el voltaje presente en las ramas tiene una variación, respecto al caso mostrado en la parte 1 de esta etapa, en donde la capacitancia era mayor, pero contrastando la figura 3.27 con la figura 3.7 se nota que en el caso de una mayor frecuencia de la portadora la representación de la forma de onda es mucho mejor. Por otra parte, la corriente presente en las ramas que se observa en la figura 3.28 posee una mayor distorsión, comparada con el caso de mayor capacitancia, y comparando con la figura 3.8 se percibe que las formas de onda difieren debido a la frecuencia de la portadora.

Ahora, si se analizan los voltajes presentes en los capacitores de las ramas, tanto positivas como negativas de cada fase que se presentan en la figura 3.29, estos poseen un incremento en su carga como en su descarga, debido a la disminución de la capacitancia. También se observa una mayor distorsión en los valores, que se hacen presentes en forma de ruido alrededor de la señal. Estas distorsiones son las variaciones que existen entre los capacitores de cada rama, aunque no es mucho, este es el efecto que genera el bajar la frecuencia de la portadora para este caso.

Para el caso de la corriente en las fases y de carga, que se presentan en las figuras 3.30 y 3.31, respectivamente, la variación es casi imperceptible.

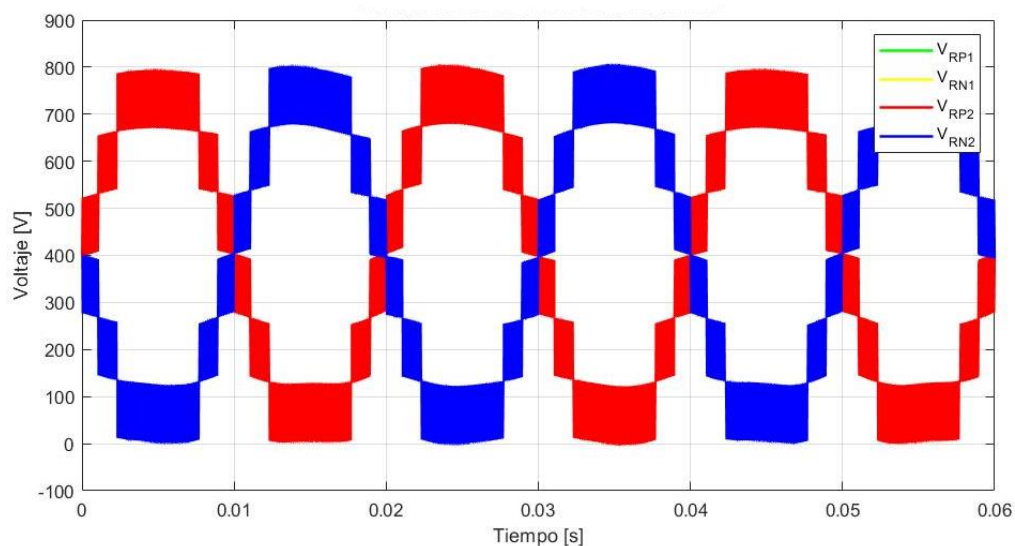


Figura 3. 27. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

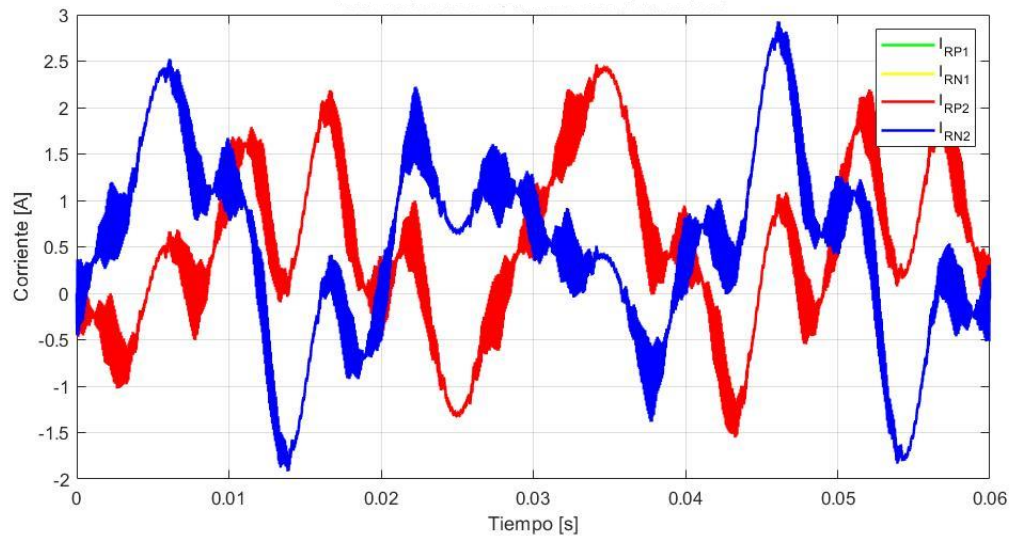


Figura 3. 28. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

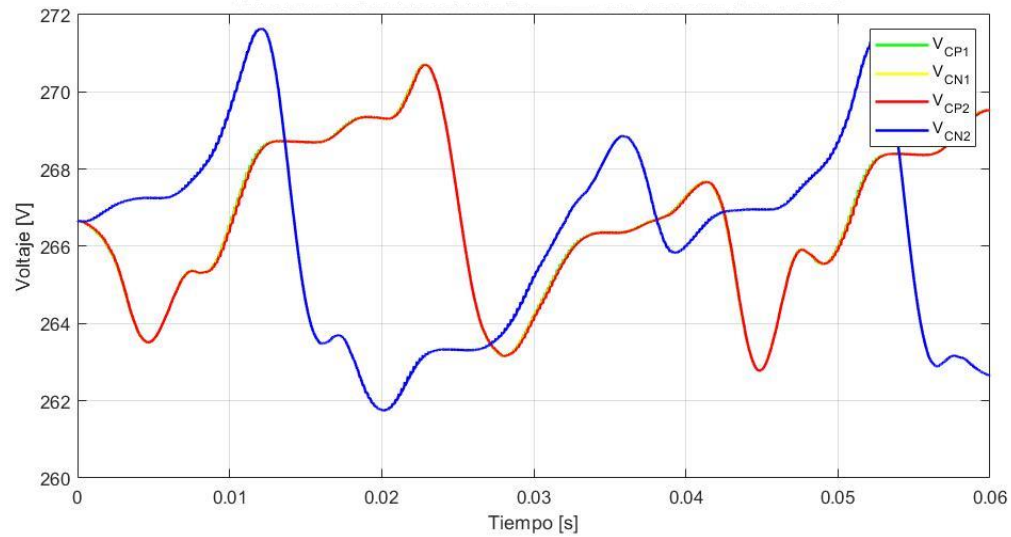


Figura 3. 29. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

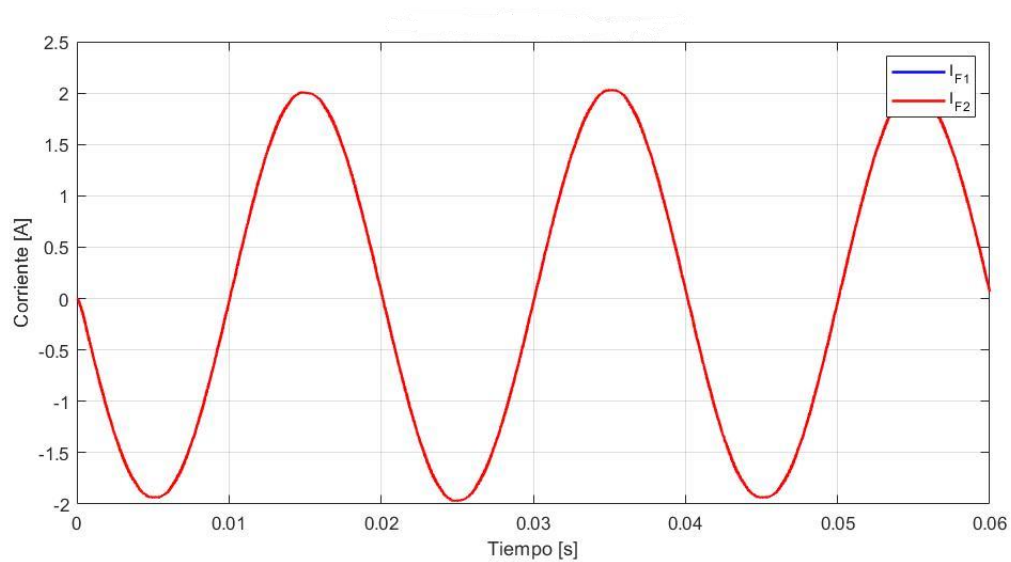


Figura 3. 30. Corriente en las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

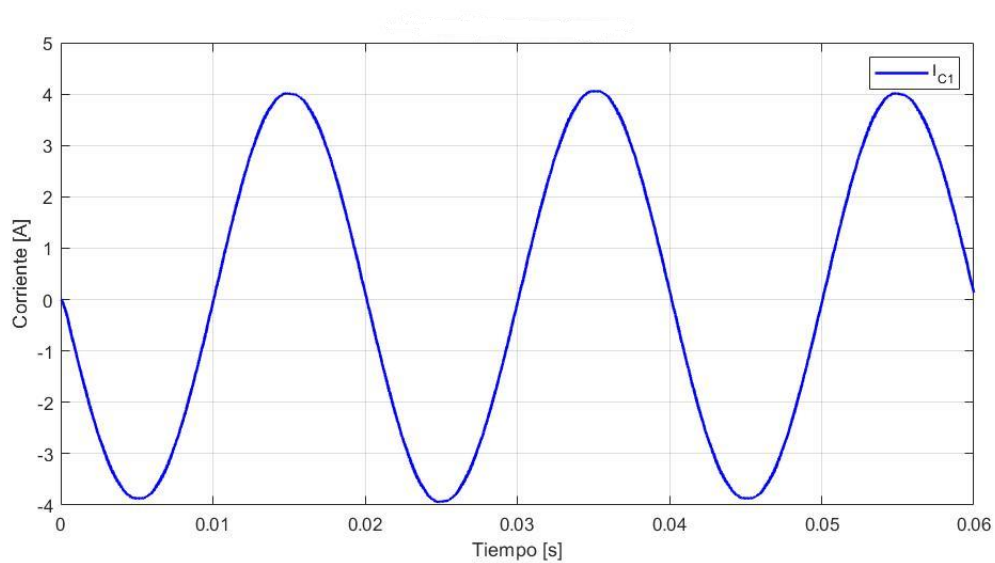


Figura 3. 31. Corriente en la carga 1.

Fuente: Matlab Simulink.

Parte 3

Para esta tercera parte se utilizará una capacitancia de $C = 50 \text{ } [\mu\text{F}]$.

Debido a la disminución en la capacitancia, la señal que se observa en la figura 3.32, que corresponde a los voltajes de ramas en ambas fases, presenta una mayor distorsión, y la reducción en la frecuencia genera que la representación de la onda sea de menor calidad que en la Etapa I. En cuanto a la corriente que se presenta en las ramas, se observa que, al igual que en la etapa I, al disminuir la capacitancia la distorsión aumenta, pero si se comparan las figuras 3.33 y 3.13 se nota que la representación de la forma de onda es menor, pero no de baja calidad, teniendo a pesar de la disminución de la frecuencia una buena representación de señal.

En la figura 3.34 se observan los voltajes de los condensadores de las ramas, se puede percibir que como en el caso anterior al disminuir la capacitancia, la variabilidad en el voltaje almacenado de estos aumenta, y debido a la reducción en la frecuencia de la portadora se aprecian mayores variaciones en los voltajes de las ramas paralelas.

Para el caso de la corriente en las figuras 3.35 y 3.36, se observa que no existe gran diferencia en comparación con las figuras 3.15 y 3.16, por lo que para este caso el haber disminuido la frecuencia no repercute de manera negativa.

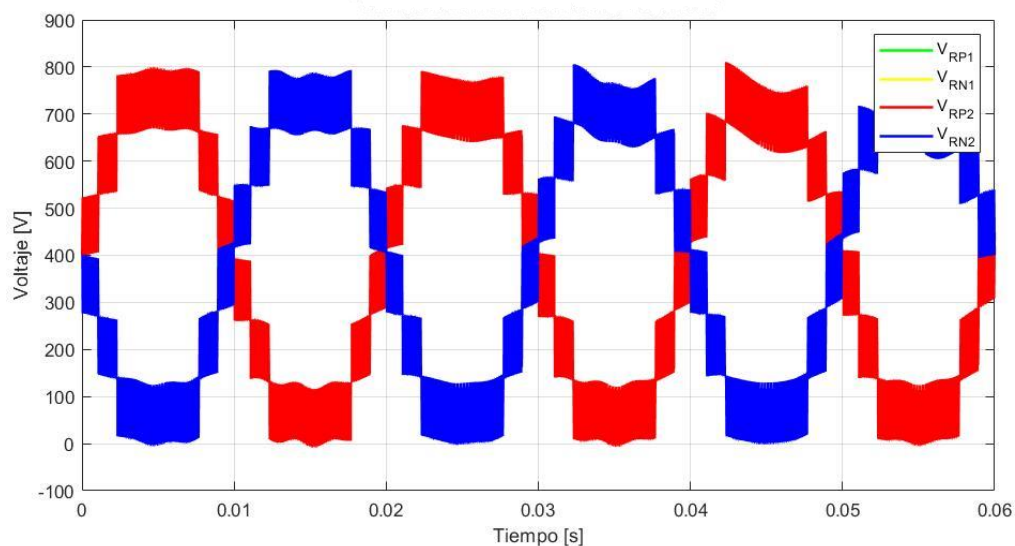


Figura 3. 32. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

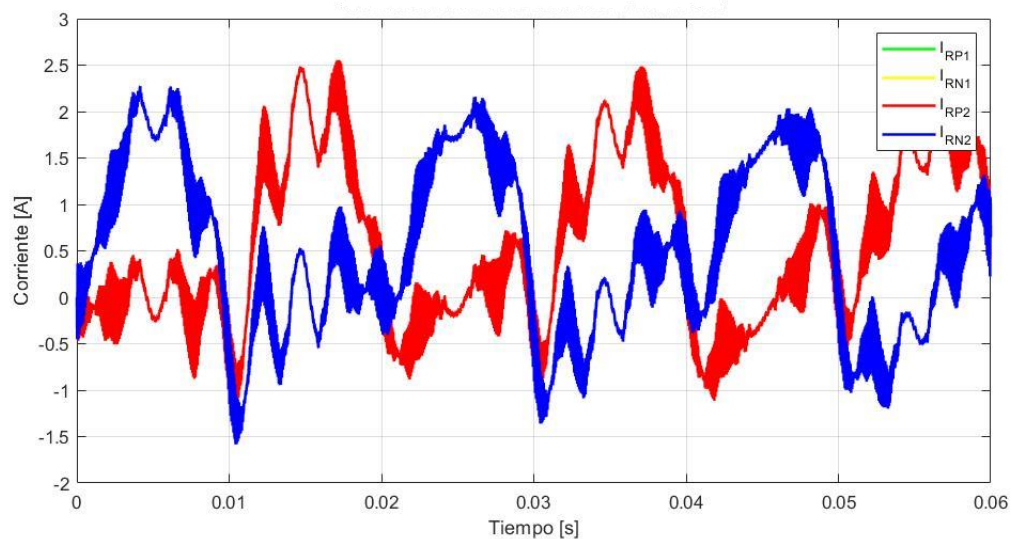


Figura 3. 33. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

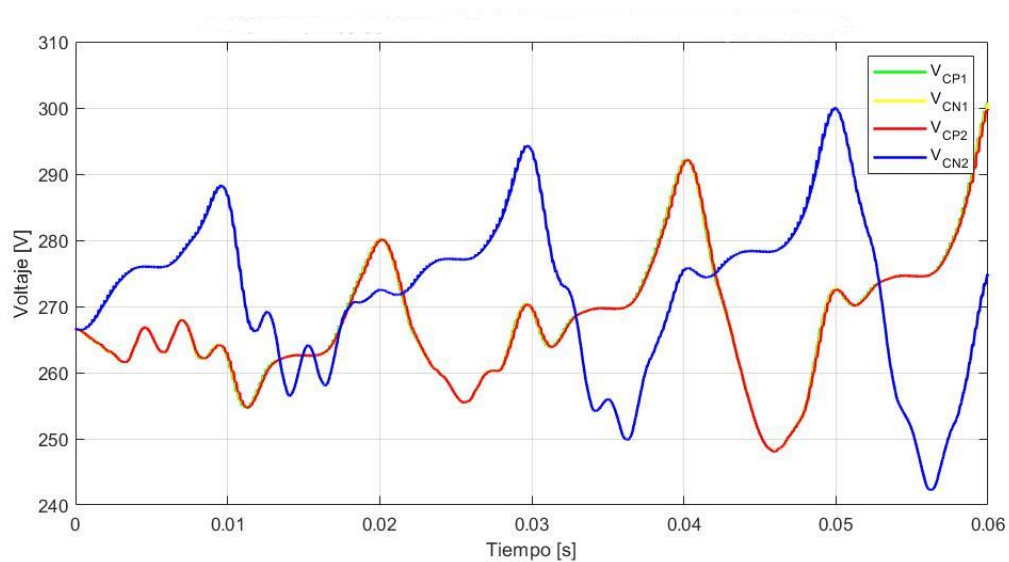


Figura 3. 34. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

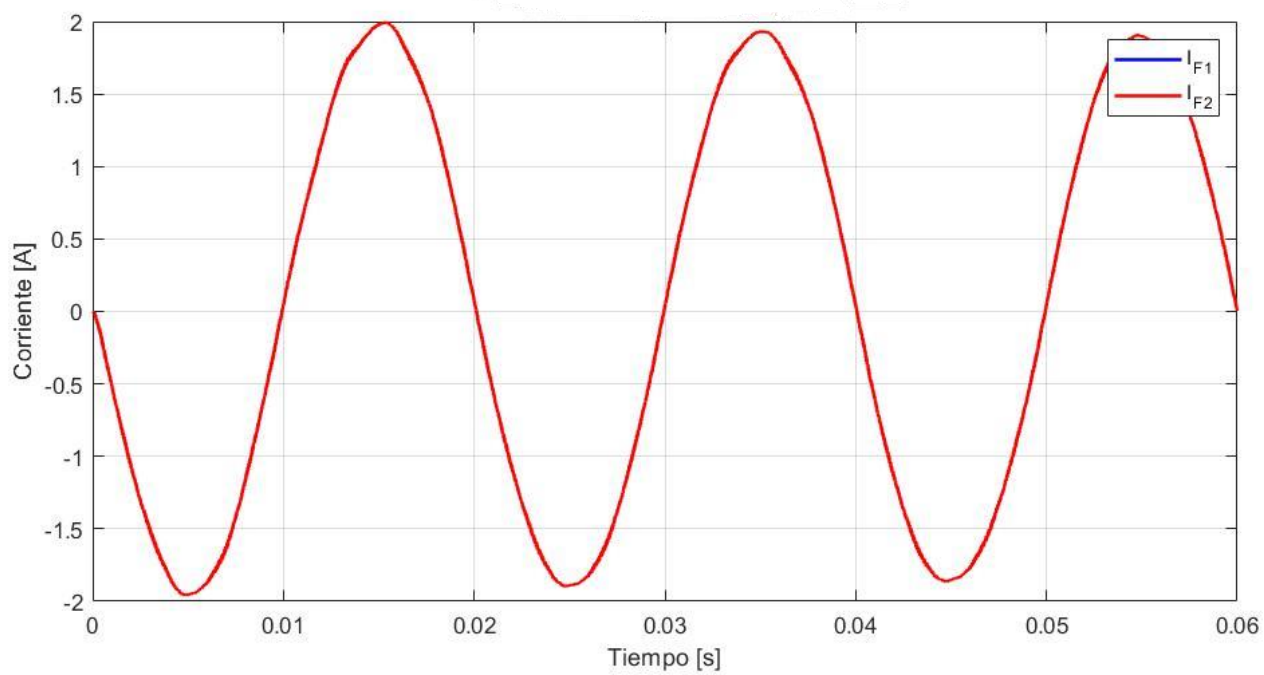


Figura 3. 35. Fuente: Matlab Simulink.

Fuente: Matlab Simulink.

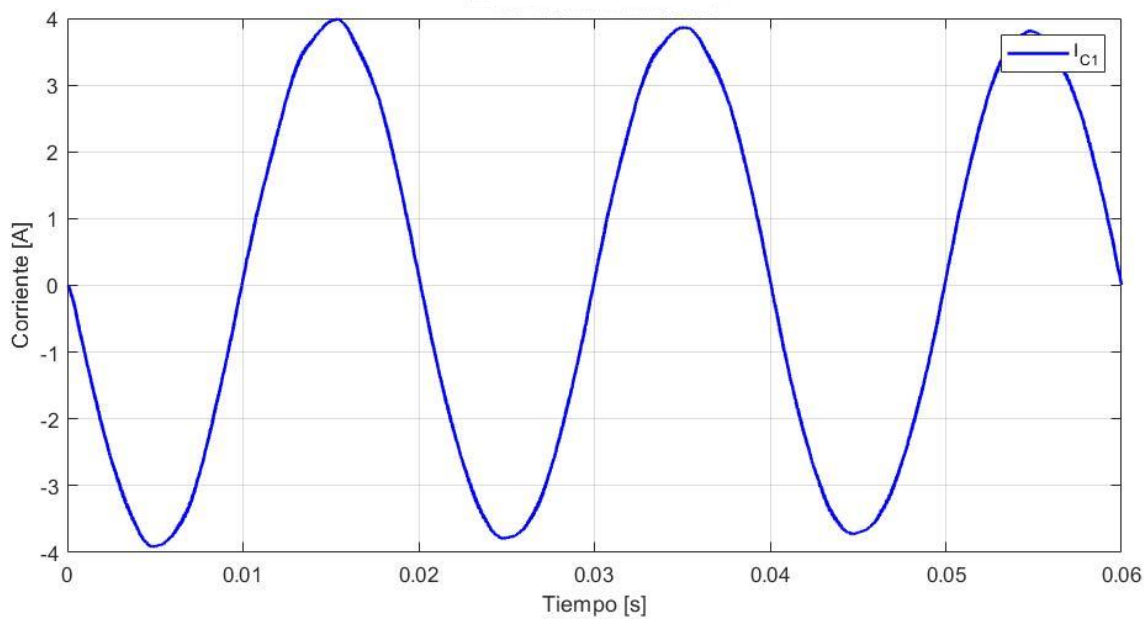


Figura 3. 36. Corriente en la carga 1.

Fuente: Matlab Simulink.

Parte 4

Para esta cuarta parte se utilizará una capacitancia de $C = 2 \text{ } [\mu\text{F}]$.

Para este caso se observa en la figura 3.37 que la disminución de la capacitancia junto a la reducción de la frecuencia de la portadora genera cambios notorios en la forma de onda, teniendo en consecuencia una mayor distorsión en ella. En el caso de la corriente, la variación que se genera es aún mayor, como se ve en la figura 3.38, esto se debe a la disminución de la capacitancia, pero en mayor medida a la reducción en la frecuencia de la triangular, debido a que no es capaz de obtener una correcta representación de la forma de onda, en este caso como ocurre en la Etapa I.

Por un lado, en la figura 3.39 se observan los voltajes presentes en los capacitores, se nota que como en la Etapa I, disminuyendo la capacitancia la variación de voltaje aumenta considerablemente, pero se compara con la figura 3.19, este caso es mucho más crítico que el anterior, esto es consecuencia de la frecuencia de la portadora, debido a que su disminución afecta la estabilización que se genera en el estado paralelo, donde los valores de los voltajes en los capacitores se tienden a estabilizar entre sí, y como hay menor frecuencia, hay menos estados de conmutación, lo que genera que los capacitores se balanceen menos veces, generando inestabilidad en sus voltajes.

Por otra parte, la corriente de salida de las fases que se presenta en la figura 3.40 y la corriente presente en la carga que se observa en la figura 3.41, aparte de tener una clara distorsión, también presentan una disminución de aproximadamente el 75% de la señal original, concluyendo de esta manera que este escenario no sería viable.

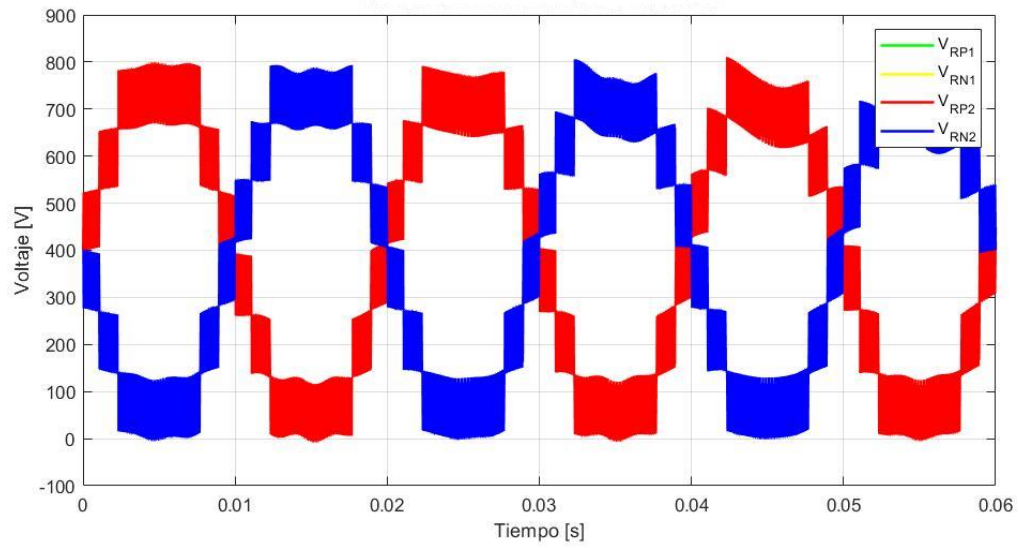


Figura 3. 37. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

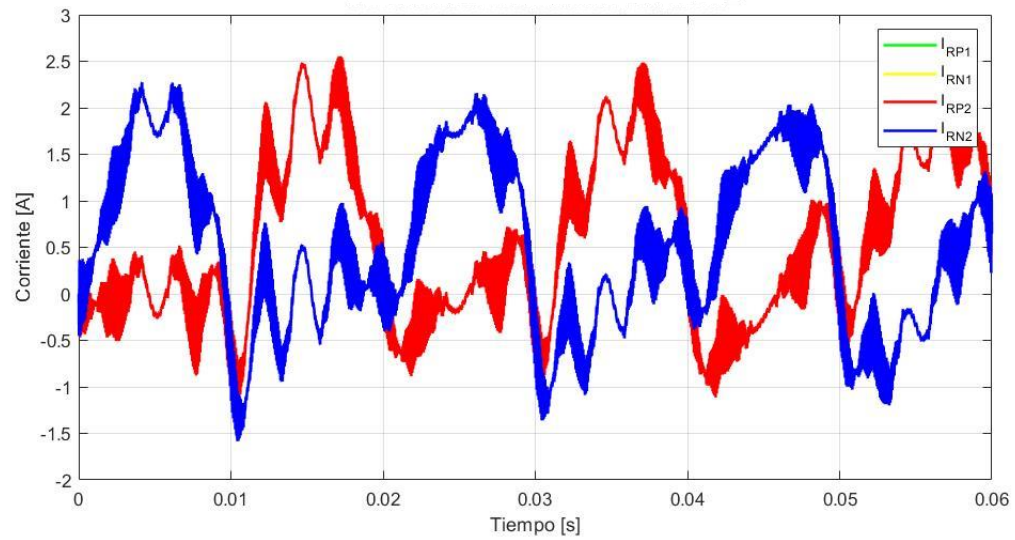


Figura 3. 38. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

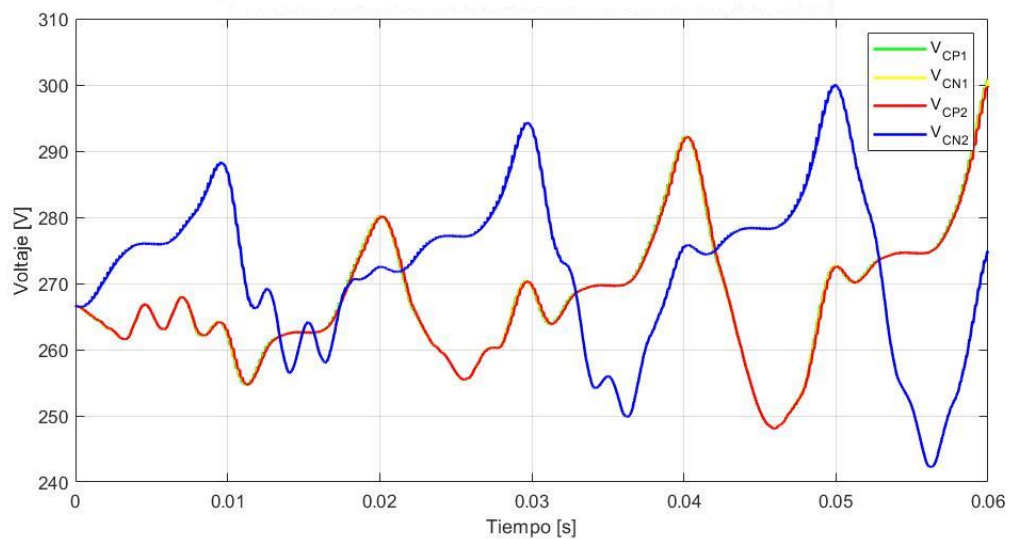


Figura 3. 39. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

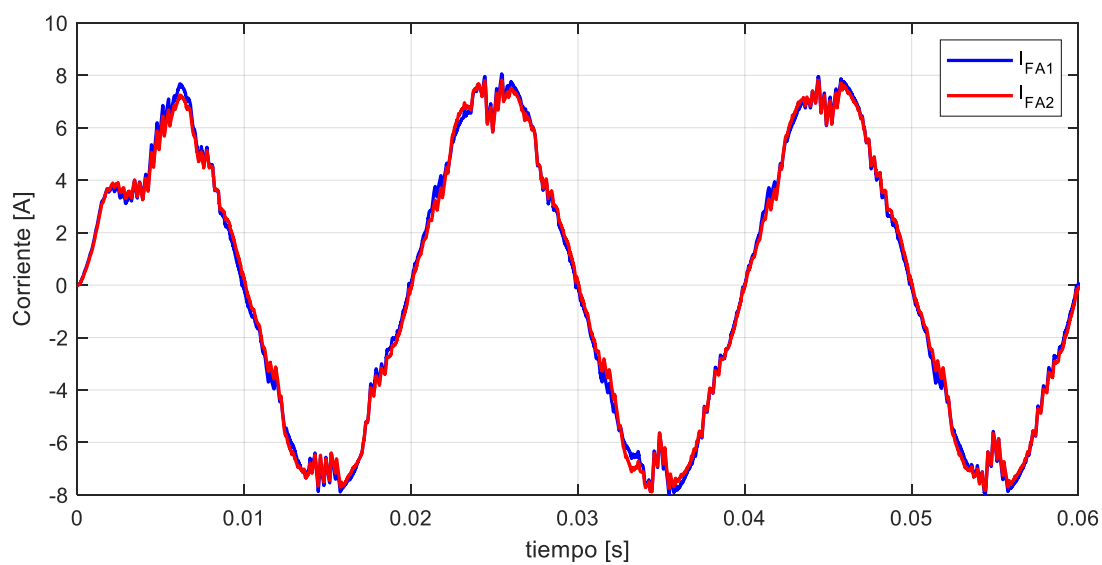


Figura 3. 40. Corriente en las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

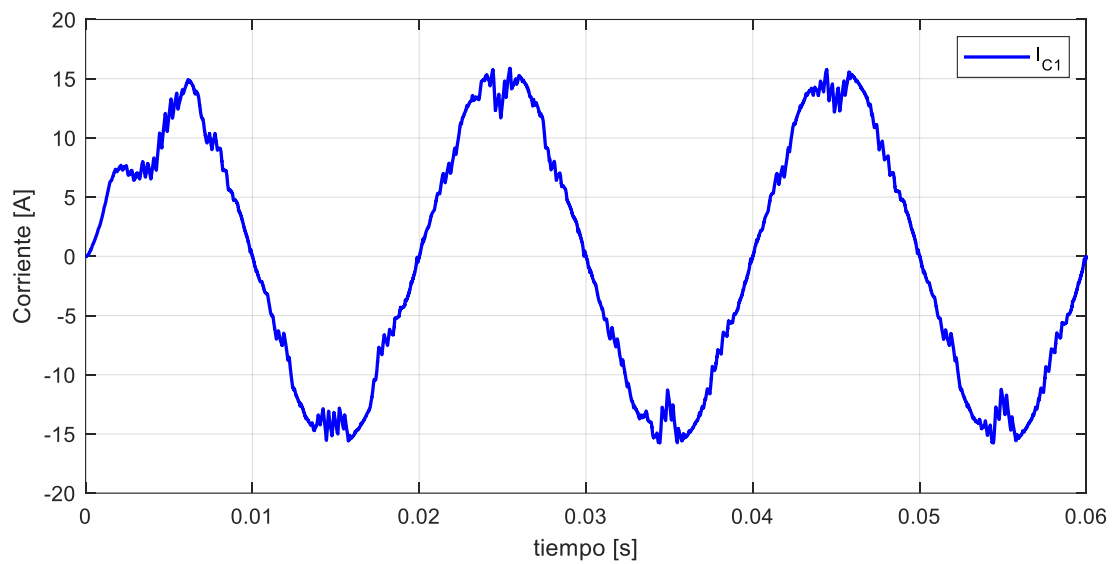


Figura 3. 41. Corriente en la carga 1.

Fuente: Matlab Simulink.

Etapa III

En esta tercera etapa se trabajará con una frecuencia de 0.5 [kHz] y se analizará como es la variación de los diferentes parámetros del sistema al variar la capacitancia de este.

$$f_{port} = 0.5 \text{ [kHz]}$$

Parte 1

Esta primera parte utilizará una capacitancia de $C = 1000[\mu\text{F}]$.

Por un lado, se observa que el voltaje de las ramas positivas y negativas de ambas fases que se presenta en la figura 3.42, es una buena representación a pesar de la baja frecuencia de la señal portadora, sin embargo, para el caso de las corrientes de las ramas que se ven en la figura 3.43, se percibe una imagen distorsionada, esto es consecuencia de la baja frecuencia de la señal portadora. Por otra parte, el voltaje presente en los capacitores de las ramas que se analiza en la figura 3.44 se mantiene dentro de rangos aceptables, pero se observa una mayor diferencia entre los voltajes de los capacitores presentes en cada rama.

Para la corriente de salida de las fases que se ve en la figura 3.45 y la presente en la carga que se observa en la figura 3.46, se aprecia que su forma sinusoidal se mantiene, pero con pequeñas oscilaciones en forma de aleta, esto se debe a la menor conmutación que existe en este escenario.

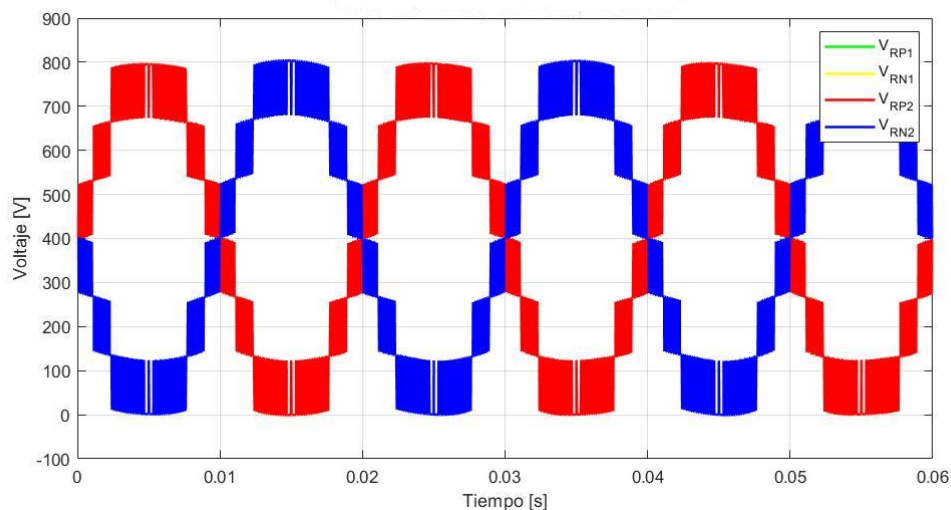


Figura 3. 42. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

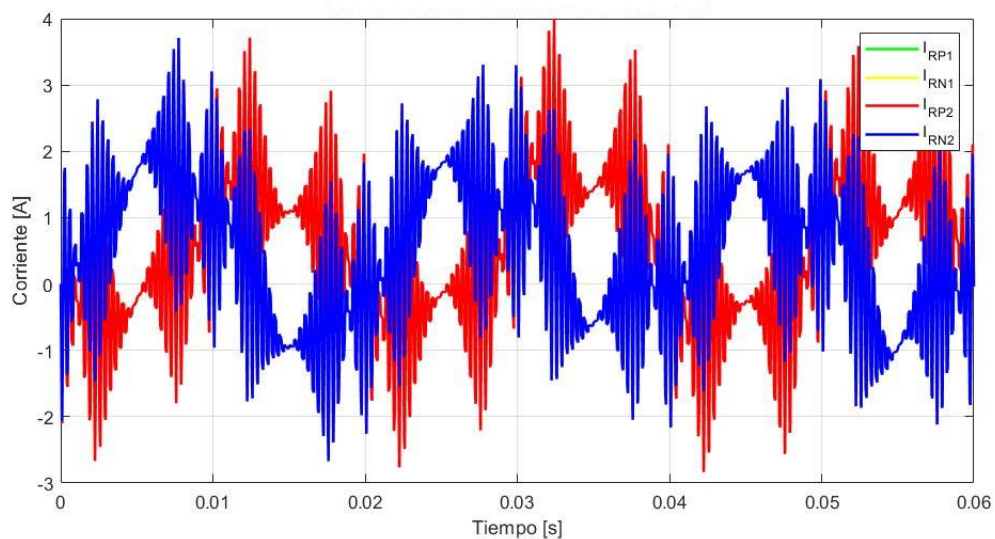


Figura 3. 43. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

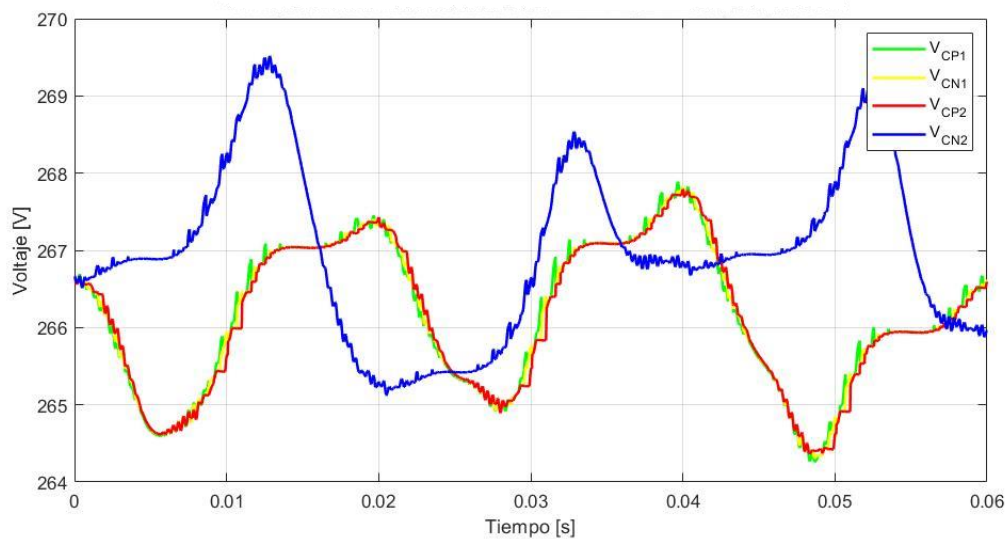


Figura 3. 44. Voltaje en los capacitores de las ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

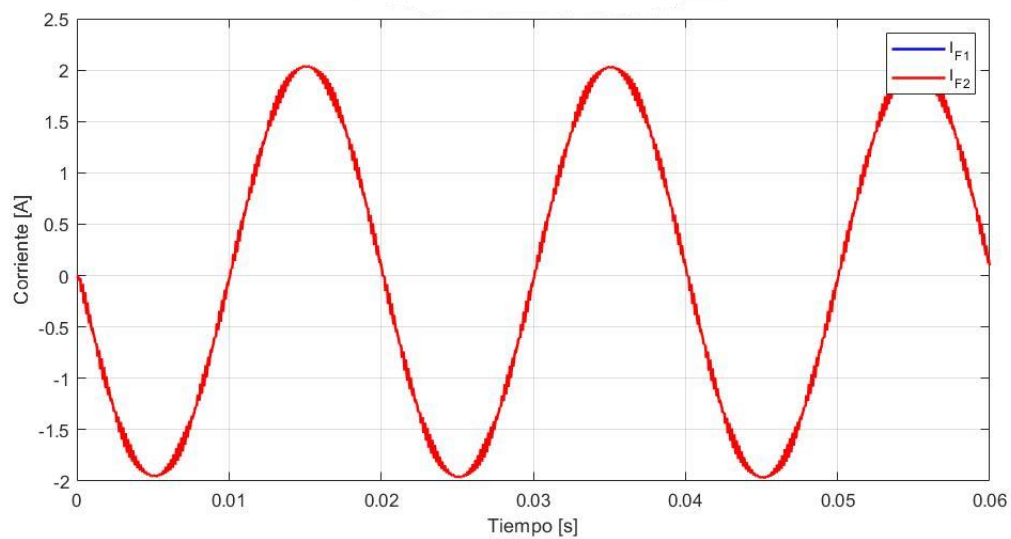


Figura 3. 45. Corriente en las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

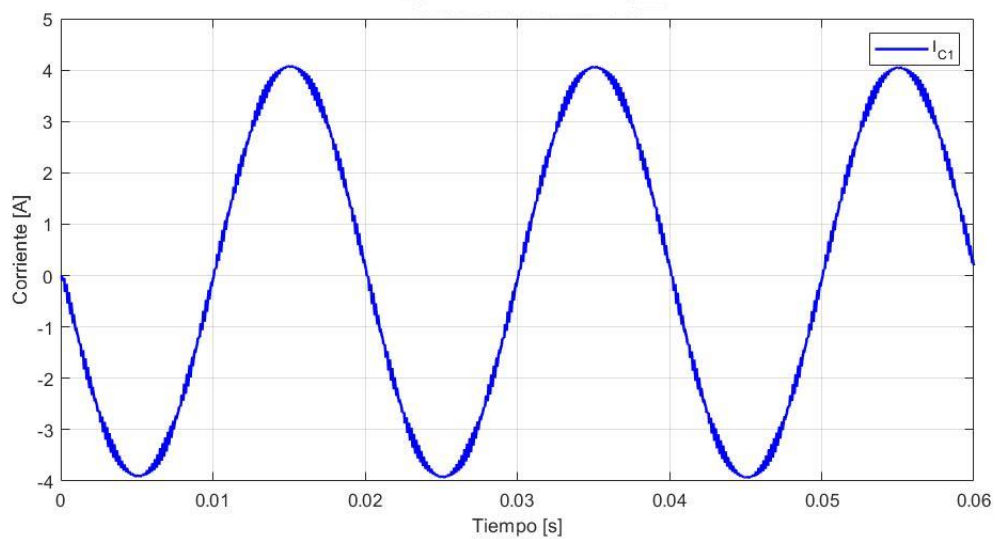


Figura 3. 46. Corriente en la carga 1.

Fuente: Matlab Simulink.

Parte 2

Esta segunda parte utilizará una capacitancia de $C = 500[\mu\text{F}]$.

Al disminuir la capacitancia se observa en la figura 3.47 que el voltaje de las ramas presenta una leve variación con respecto al caso anterior. En cuanto a la corriente de ramas presente en la figura 3.48 se observa que esta se ve totalmente distorsionada, debido a la baja frecuencia de la portadora utilizada.

Ahora, si se observa la figura 3.49 se aprecian los voltajes presentes en los capacitores de las ramas. Estos presentan una mayor variación en sus niveles de voltajes respecto del caso anterior donde la capacitancia era mayor, pero si se compara con el mismo escenario de capacitancia, pero una frecuencia mayor en la portadora como en la figura 3.9 se observa que los niveles de voltaje son similares, sin embargo, hay una mayor variación entre los voltajes de los capacitores de las mismas ramas.

En cuanto a la corriente de salida que se presenta en las figuras 3.50 y 3.51, se puede observar que no hay mayor diferencia con los casos que se presentan en la etapa I más allá de la distorsión ya mencionada en la parte 1 de esta segunda etapa.

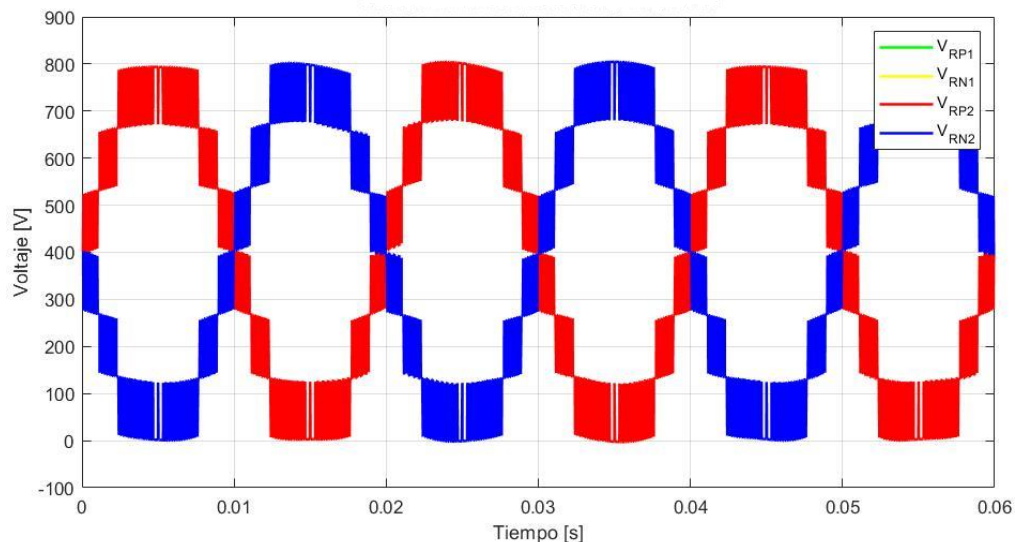


Figura 3. 47. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

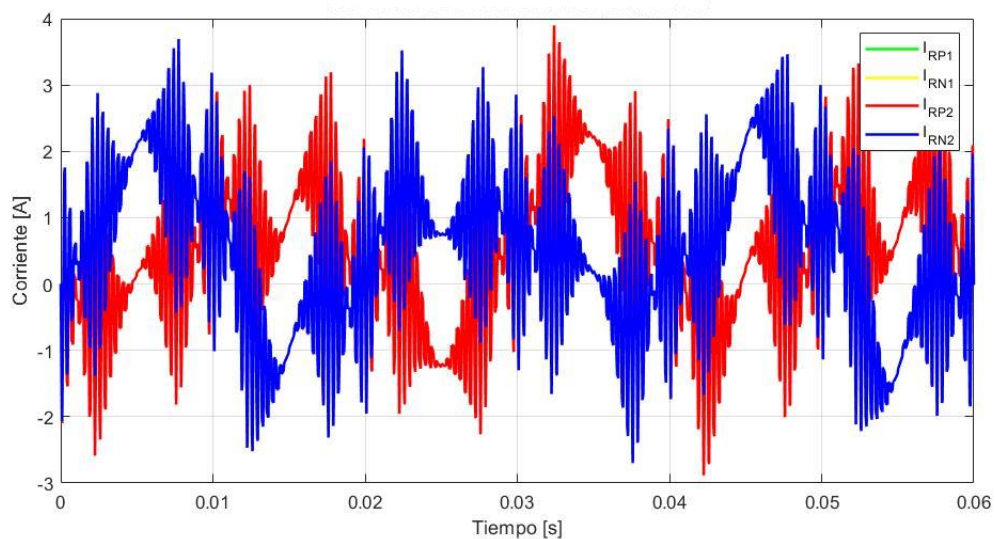


Figura 3. 48. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

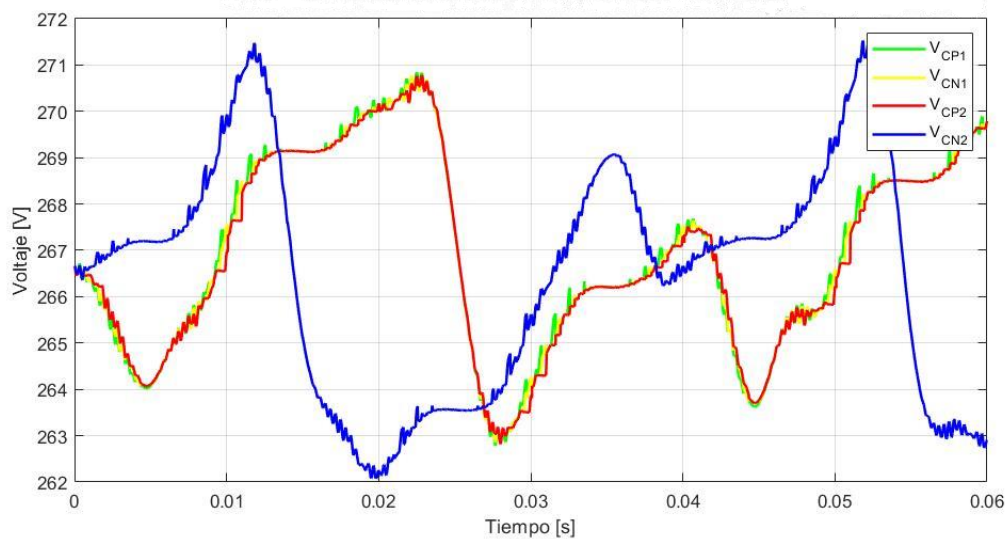


Figura 3. 49. Voltaje en los capacitores de la rama positiva y negativa de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

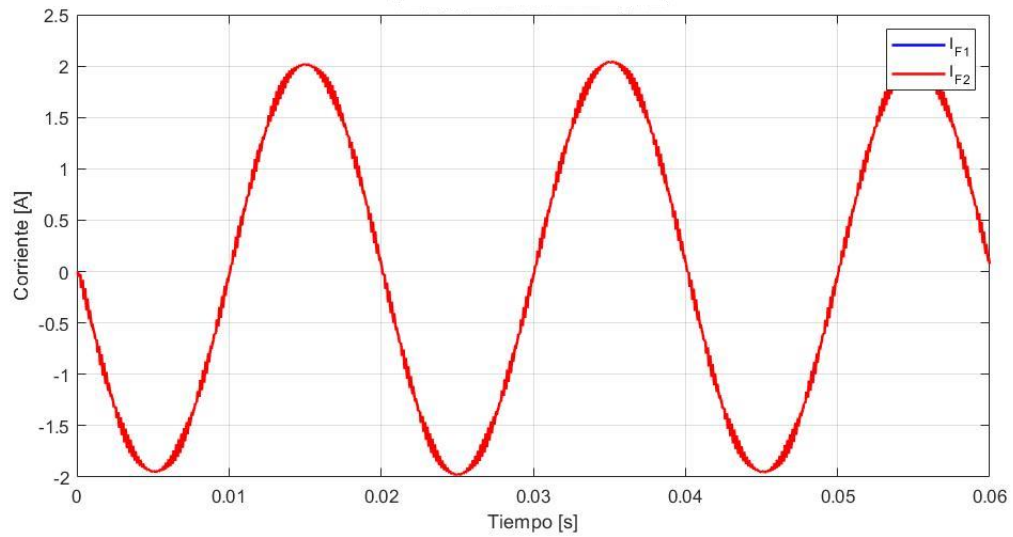


Figura 3. 50. Corriente en las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

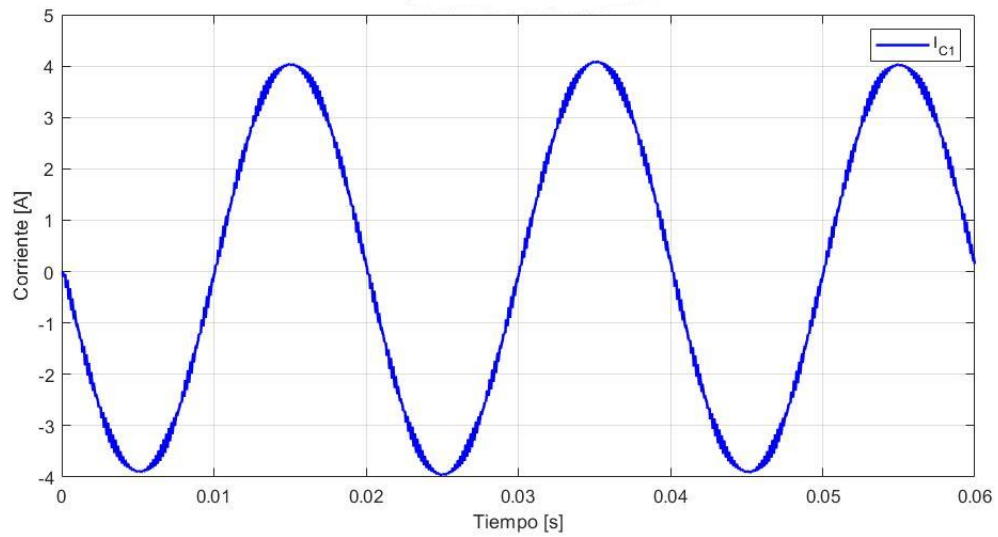


Figura 3. 51. Corriente en la carga 1.

Fuente: Matlab Simulink.

Parte 3

Esta tercera parte utilizará una capacitancia de $C = 50[\mu\text{F}]$.

En este escenario, se advierte que el voltaje de ramas presenta una mayor variación debido a la disminución de la capacitancia, sin embargo, se observa que a pesar de la baja frecuencia de conmutación la señal se ve estable. Para el caso de la corriente que se muestra en la figura 3.53, no es así, aquí se ve claramente cómo afecta el haber disminuido la frecuencia en comparación con las otras dos etapas.

Si se observa el voltaje que se obtiene en los capacitores de las ramas en la figura 3.54 se nota que se asemeja a los niveles obtenidos en las otras etapas con esta capacitancia. Lo que hace la diferencia es la disminución de la frecuencia de la portadora, que genera una menor estabilidad en los voltajes de los condensadores, ocasionando que estos difieran entre sí dentro de las ramas.

Al observar la corriente de salida que se presenta en las figuras 3.55 y 3.56 ocurre lo mismo que en etapas anteriores, donde lo que afecta en mayor medida es la disminución de la capacitancia, lo que genera que la salida obtenida no sea una forma de onda senoide esperada. Debido a la menor frecuencia de este escenario se observa que la señal de salida tiene una mayor distorsión.

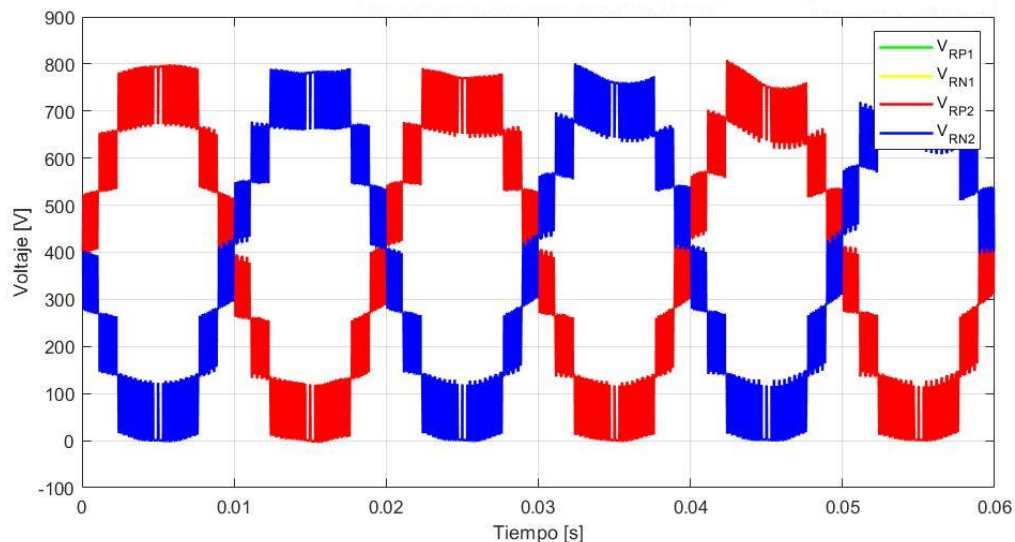


Figura 3. 52. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

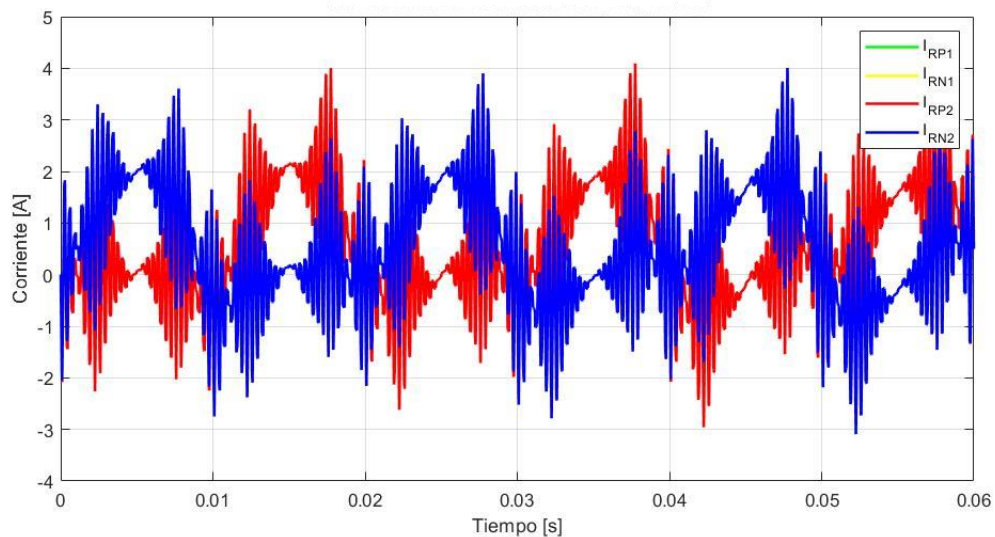


Figura 3. 53. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

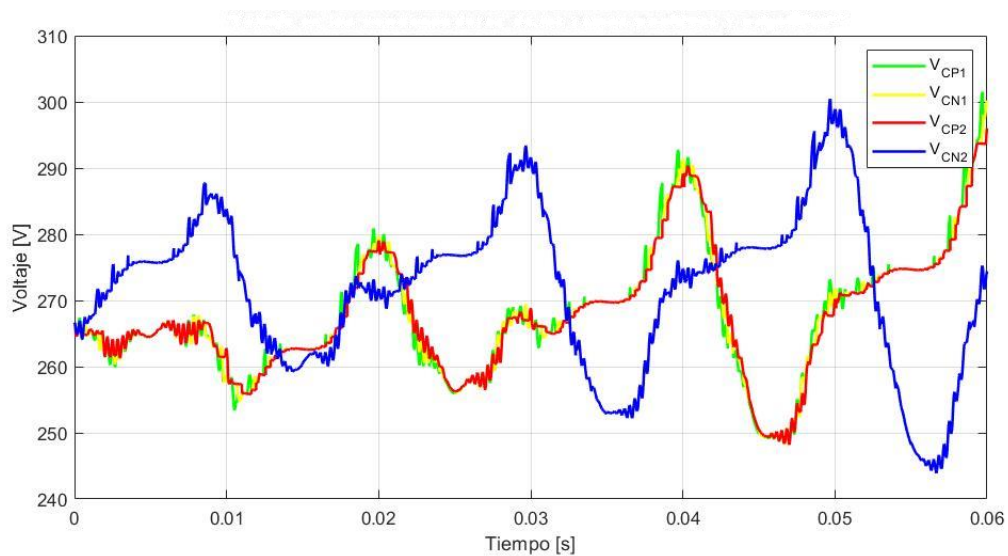


Figura 3. 54. Voltaje en los capacitores de la rama positiva y negativa de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

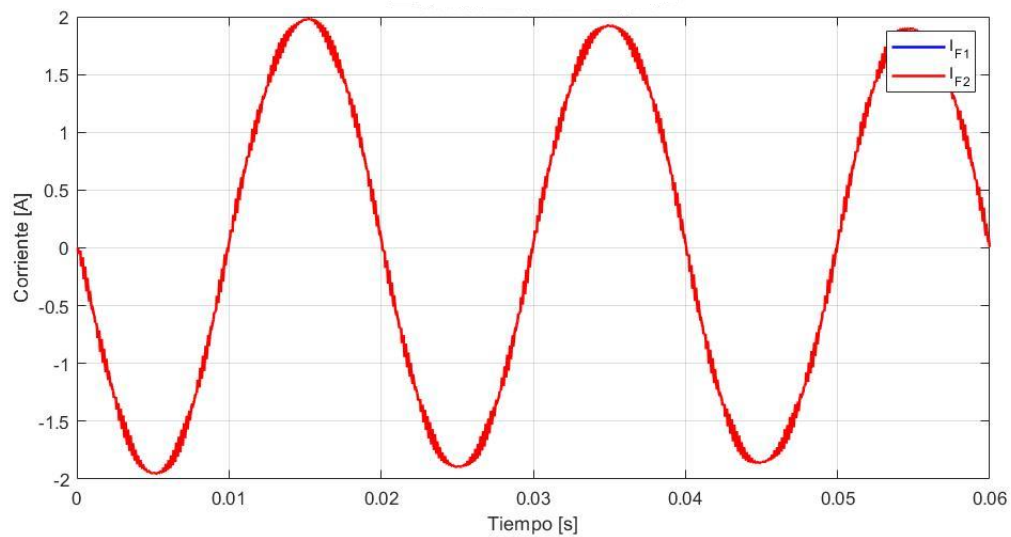


Figura 3. 55. Corriente en las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

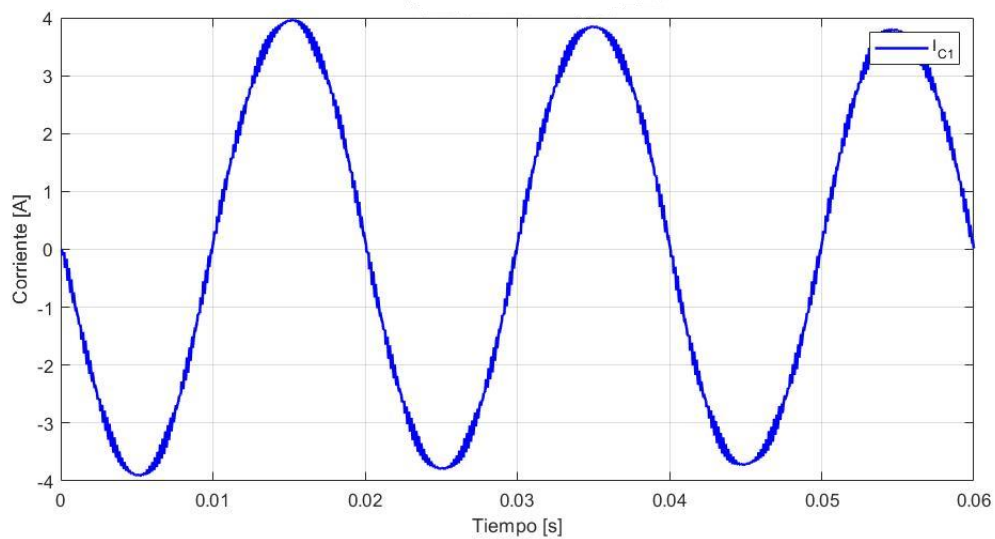


Figura 3. 56. Corriente en la carga 1.

Fuente: Matlab Simulink.

Parte 4

Esta cuarta parte utilizará una capacitancia de $C = 2 \text{ } [\mu\text{F}]$.

Al disminuir de manera drástica la capacitancia, y en conjunto con la baja frecuencia de la portadora, los resultados obtenidos difieren en gran medida a las etapas anteriores, como se aprecia en la figura 3.57 donde se presentan los voltajes presentes en las ramas. Aquí se observa que tienen una gran presencia de ruido. Lo mismo ocurre en la figura 3.58 con la corriente en las ramas, aquí se observa que esta se dispara en un comienzo, para luego oscilar entre el intervalo de valores normales, pero con una forma de onda que carece de aspecto sinusoidal.

En cuanto al voltaje presente en los capacitores de las ramas, al observar la figura 3.59 se aprecia que estos presentan una gran inestabilidad, debido a la baja conmutación que genera que estos no se estabilicen de forma correcta.

Ahora, si se observan las figuras 3.60 y 3.61 se percibe que la salida de corriente ya ha perdido totalmente su forma sinusoidal esperada, tanto en las fases como en la carga. A pesar que esto ya ocurría en las etapas anteriores al disminuir la capacitancia, esto se acrecentó al disminuir también la frecuencia de la portadora.

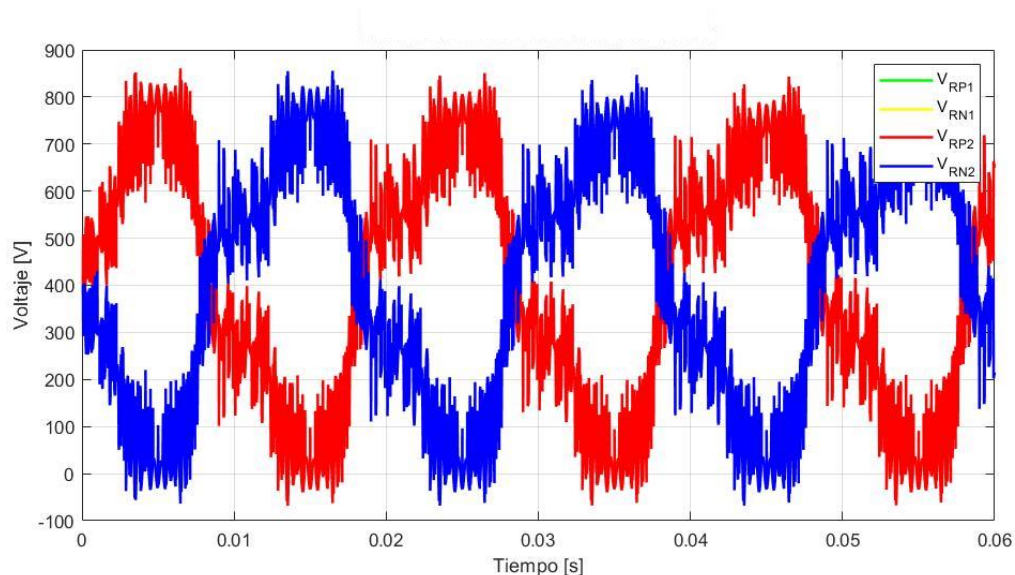


Figura 3. 57. Voltaje de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

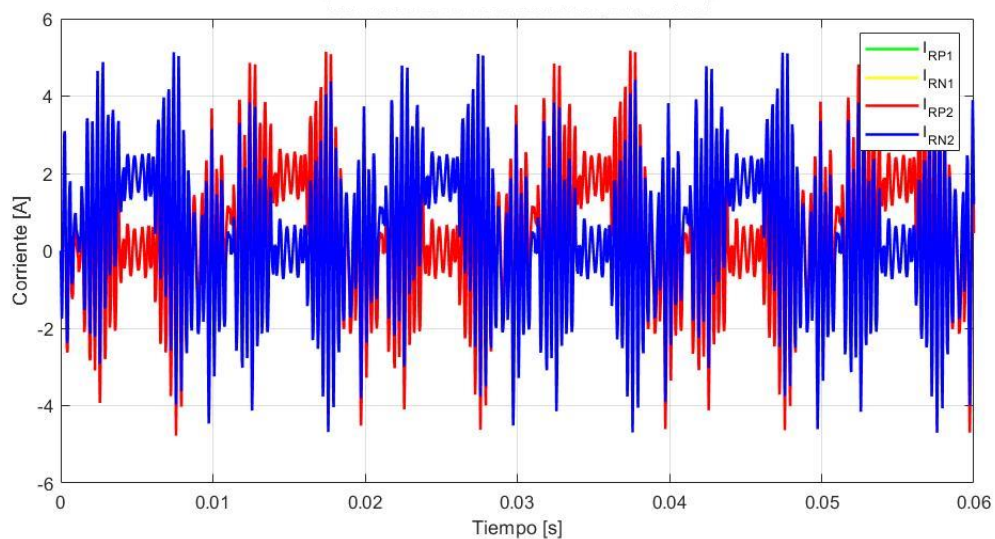


Figura 3. 58. Corriente de ramas positivas y negativas de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

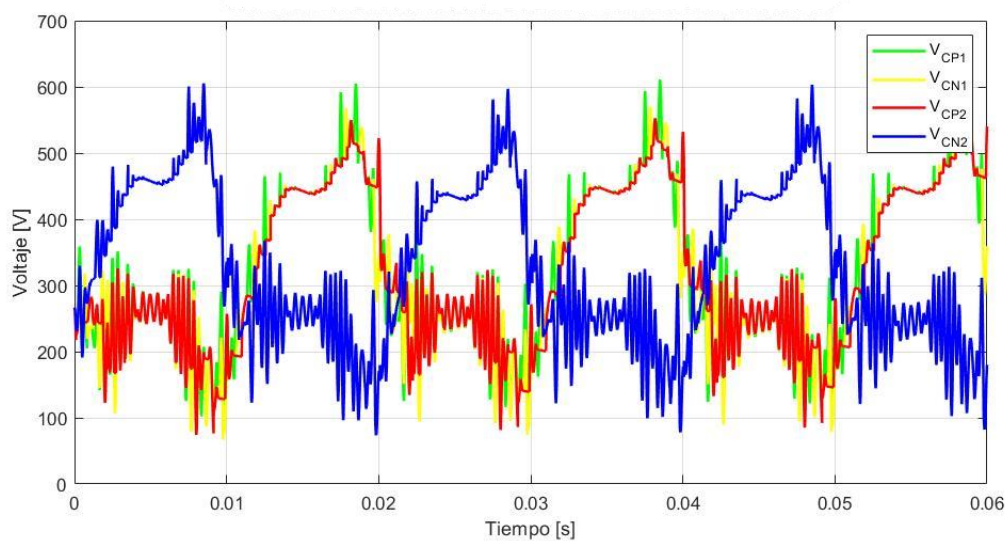


Figura 3. 59. Voltaje en los capacitores de la rama positiva y negativa de las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

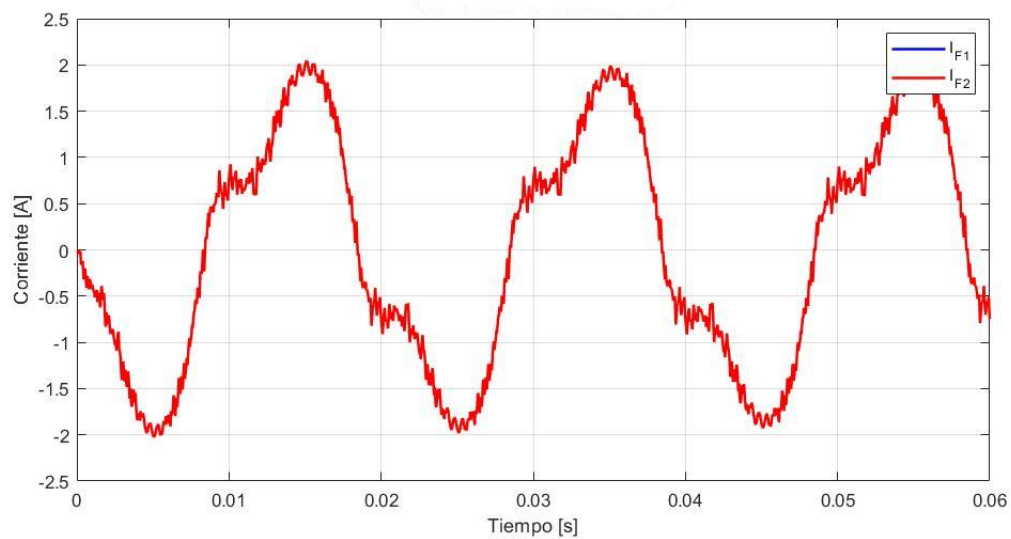


Figura 3. 60. Corriente en las fases 1 y 2.

Fuente: Matlab Simulink.

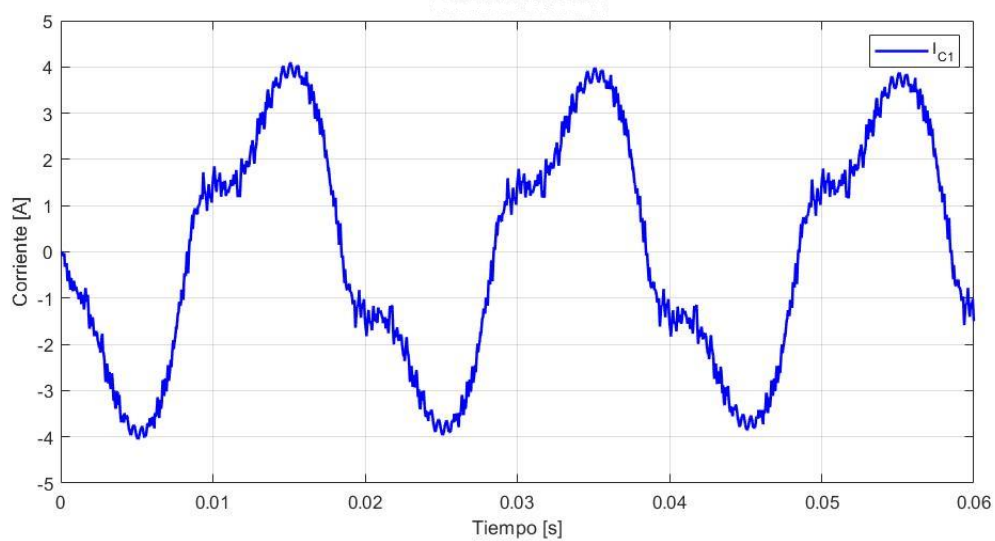


Figura 3. 61. Corriente en la carga 1.

Fuente: Matlab Simulink.

Se puede mencionar que es influyente la capacitancia utilizada en el circuito, debido a que de esta dependen los tiempos de carga y descarga, así como la estabilidad de los voltajes y corrientes presentes en las ramas del MMSPC. También se observó que al disminuir la frecuencia de la señal portadora el sistema se vuelve cada vez más inestable, debido a que ocurren menos estados de conmutación y los condensadores pasan menos tiempo en estado paralelo, que es lo que genera que estos se estabilicen y no causen problemas en el sistema. A pesar de ello, el sistema tiene la capacidad para funcionar aun con estados de baja frecuencia en la señal portadora y una baja capacitancia, pero se debe investigar un punto óptimo para ambos, donde se pueda llegar a la mínima capacitancia y mínima frecuencia de la triangular sin generar problemas en la red.

A continuación, se presenta una tabla resumen con puntuación del 1 al 10 evaluando la calidad de las señales obtenidas en cada caso, siendo 10 una calidad optima y 1 una calidad baja.

Tabla 3.2. Resumen calidad de las señales.

	Frecuencia			Calidad de las señales
Capacitancia	4.5 [kHz]	2.5 [kHz]	0.5 [kHz]	
1000[μF]	10	9	6	
500[μF]	9	8	5	
50[μF]	7	5	2	
2 [μF]	3	2	1	

Capítulo 4. Análisis de un MMSPC

4.1. Introducción

En esta instancia se implementará el sistema MMSPC completo, es decir, que contempla sus tres fases junto a un sistema de control de corriente. Al considerar los dos capítulos anteriores donde se expuso el funcionamiento de una de las ramas de forma particular y, posteriormente, el desempeño de una sola fase del MMSPC frente a diferentes escenarios, se está en condiciones de implementar el sistema incorporando sus tres fases.

4.2. Circuito y control

Para este escenario solo es necesario implementar el mismo circuito que se implementó en la etapa anterior (ver figura 3.1), pero en este caso incluyendo las tres fases, como se nota en la figura 4.1.

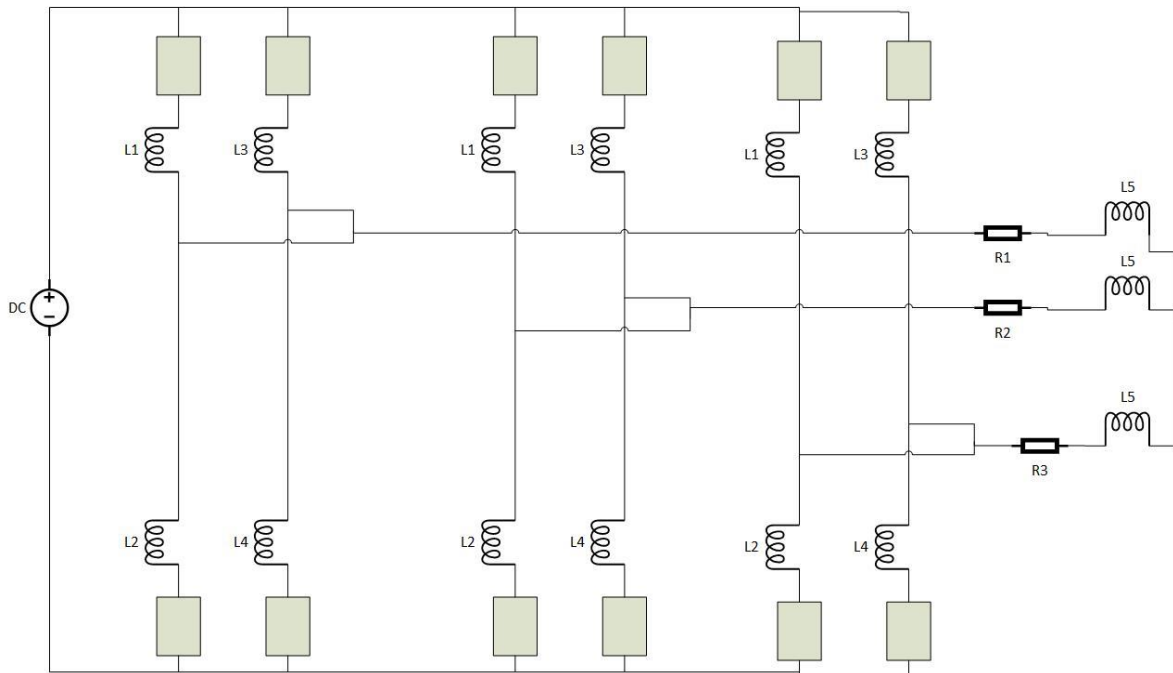


Figura 4.1. Circuito MMSPC con tres fases.

Fuente: elaboración propia.

Para el circuito de control fue necesario medir la corriente de salida en cada una de las cargas, esta se dividió por dos e ingreso como entrada al sistema, para hacer la transformación de coordenadas ABC a dq.

La corriente máxima del circuito es de $I_{max} = 18.75 [A]$, Con estos valores de corriente el sistema comienza a tener problemas de sobre modulación, por ello se utilizan valores inferiores para las pruebas de impacto de carga. (Ver anexo A1).

A través de métodos matemáticos, pasando el sistema de ABC a dq, se obtuvo la función de transferencia que se introdujo en el PI que se presenta en la ecuación 4.1, donde el modelo de la planta es una función de primer orden definida en la ecuación 4.2. Con la sintonización del PI se logra el control de corriente, el paso a paso se presenta en el Anexo 2.

$$PI = \frac{-0.029047*(S+2465)}{S} \quad \text{Ecc 4. 1}$$

$$\frac{V_{DC}*0.5}{R_{linea}+L_{linea}*S} = \frac{I_{linea}}{M_{AC}} \quad \text{Ecc 4. 2}$$

4.3. Análisis de impacto de carga

Para la evaluación del sistema MMSPC, se realizó un impacto de carga, en donde se comienza con una corriente inicial solicitada de 8 [A] y en el instante $t = 0.5 [s]$ cambia a 14 [A]. Se utiliza solo, aproximadamente, un 75% de la corriente máxima calculada anteriormente para evitar sobre modulación.

Se aprecia en la figura 4.2 que las tres corrientes de salida están correctamente desfasadas, y observando la figura 4.3 donde se presenta un acercamiento del grafico obtenido se observa el cambio que ocurre en los 0.5 segundos, donde se nota que no hay variación por el impacto de carga. En cuanto distorsión de la forma de onda, esta simplemente se adapta al requerimiento del sistema y se mantiene estable en todo el intervalo de tiempo.

Por su parte, en la figura 4.3 vemos como el controlador actúa de forma correcta, teniendo por un lado valores cercanos a los 16 [A] y por el otro a 28 [A].

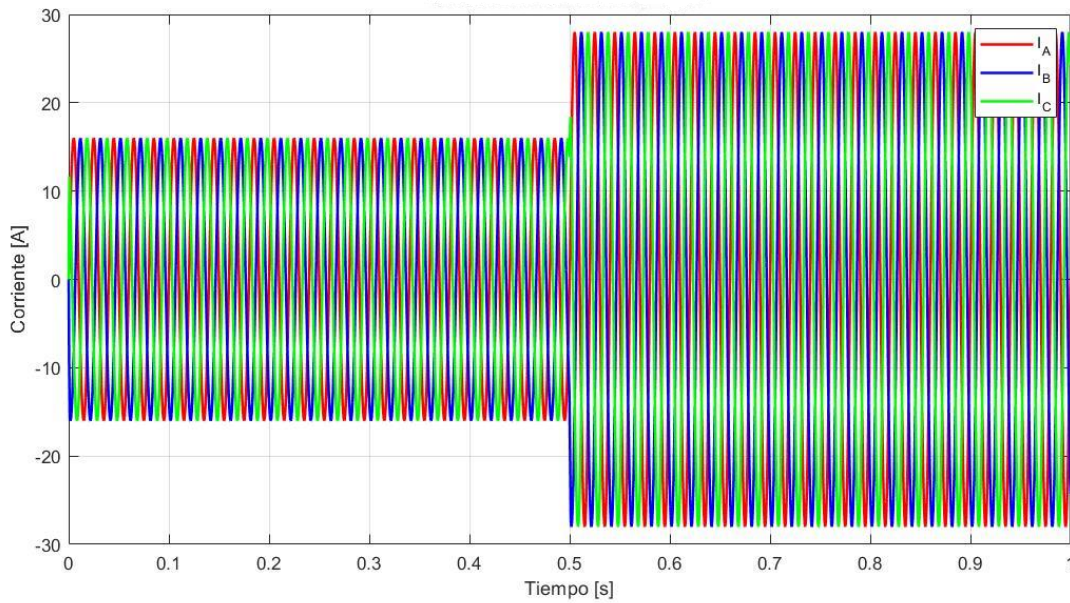


Figura 4.2. Corrientes de salida de las fases A, B y C presentes en la carga.

Fuente: Matlab Simulink.

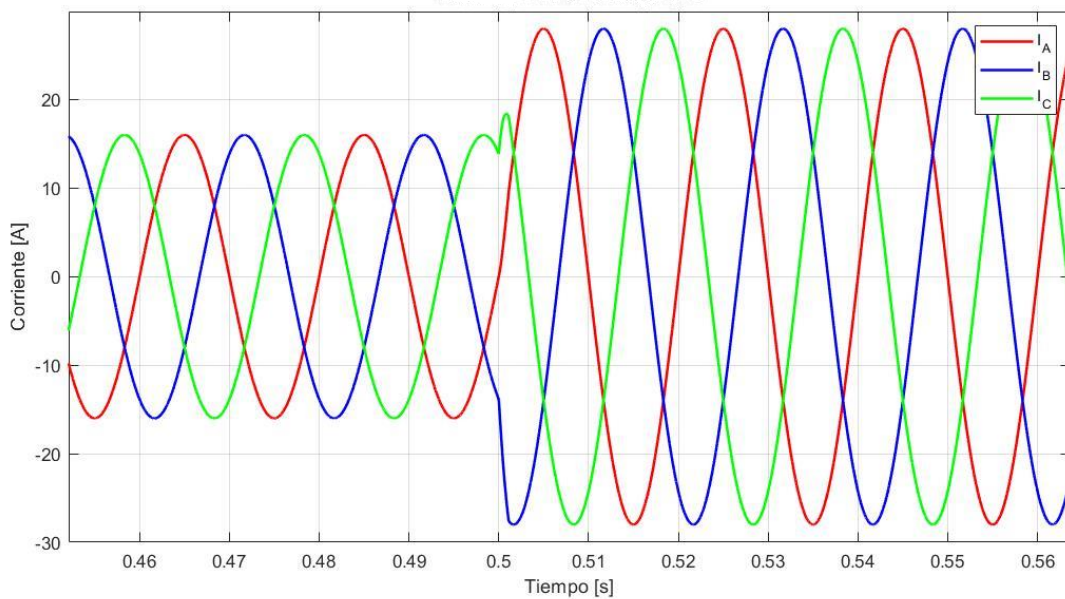


Figura 4.3. Corrientes de salida de las fases A, B y C presentes en la carga.

Fuente: Matlab Simulink.

Se observa, en la figura 4.4 la comparación entre las corrientes que circulan por cada fase interna de la fase A, junto a la corriente de salida de la fase A, donde se aprecia que la corriente de salida es el doble de las circulantes en las fases internas, lo que es esperable, puesto que el controlador

fue diseñado para controlar las corrientes internas de cada fase y que estas fuesen exactamente la mitad de la corriente esperada a la salida. También se constata que al igual que como en las figuras anteriores el sistema se mantiene estable en el tiempo.

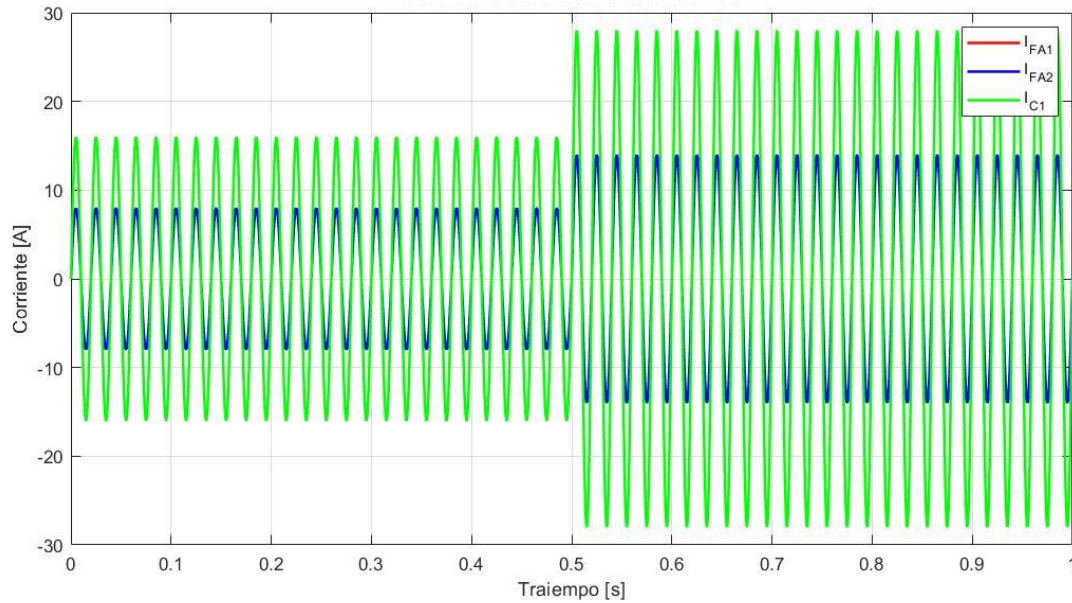


Figura 4.4. Corrientes de fase A1, A2 y de carga en la fase A.

Fuente: Matlab Simulink.

En la figura 4.5 se observa el voltaje presente en las ramas positivas y negativas de la fase A se constata que este se mantiene estable durante todo intervalo de tiempo muestreado, sin presentar perturbaciones considerables, inclusive en el momento de impacto de carga este no presenta mayores cambios que el de su amplitud, como se puede ver con mayor claridad en la figura 4.6. Sin embargo, se observa una pequeña elevación del voltaje en los últimos 0.2 segundos, como se aprecia en la figura 4.7, pero que no afectan al sistema al punto de llegar a desestabilizarlo.

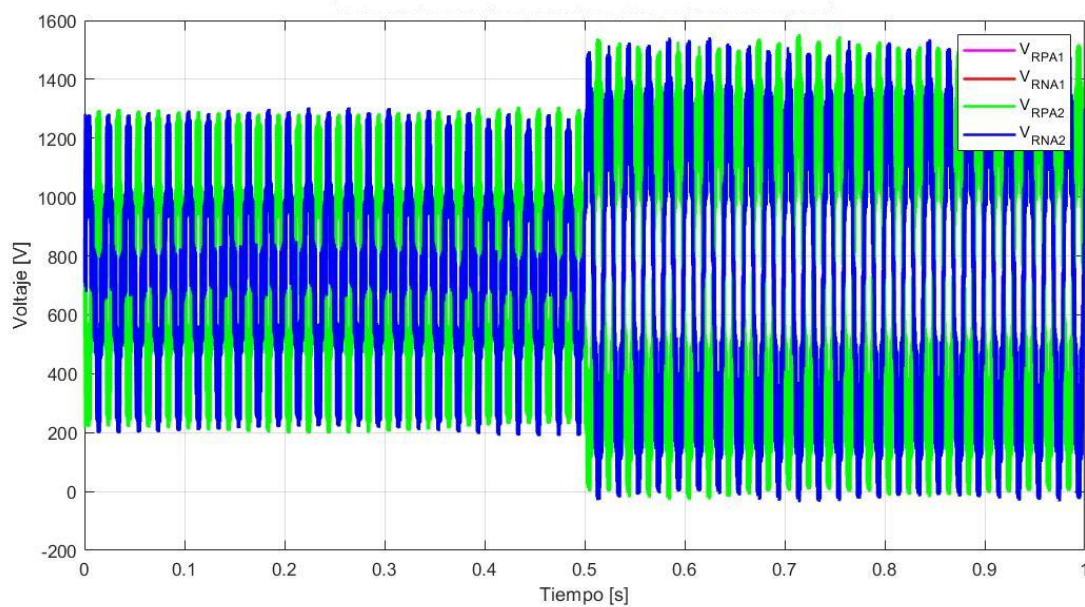


Figura 4.5. Voltaje de ramas positiva y negativas de las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

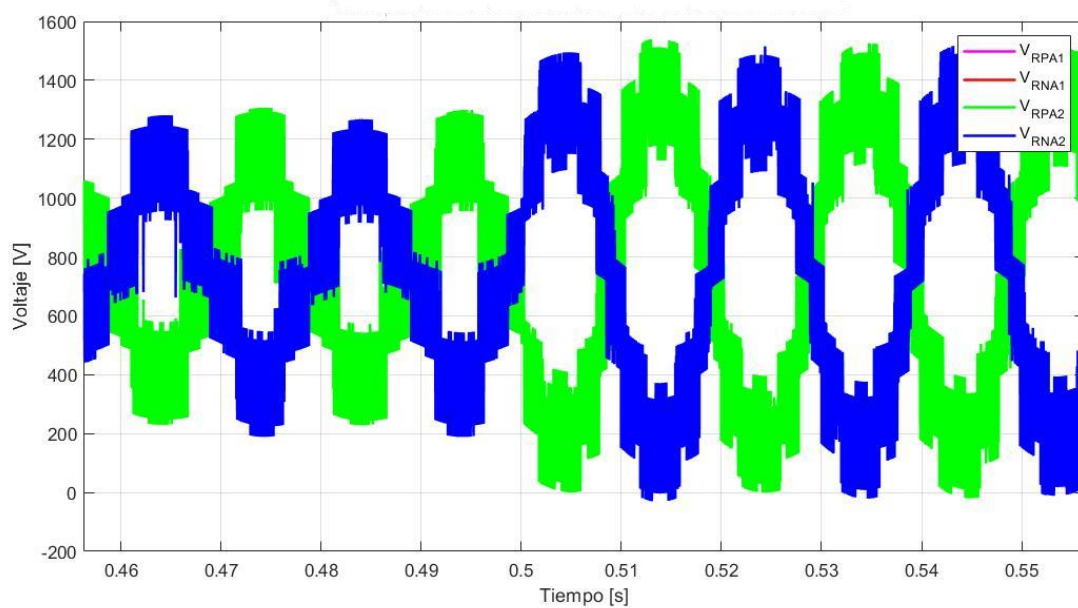


Figura 4.6. Voltaje de ramas positiva y negativas de las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

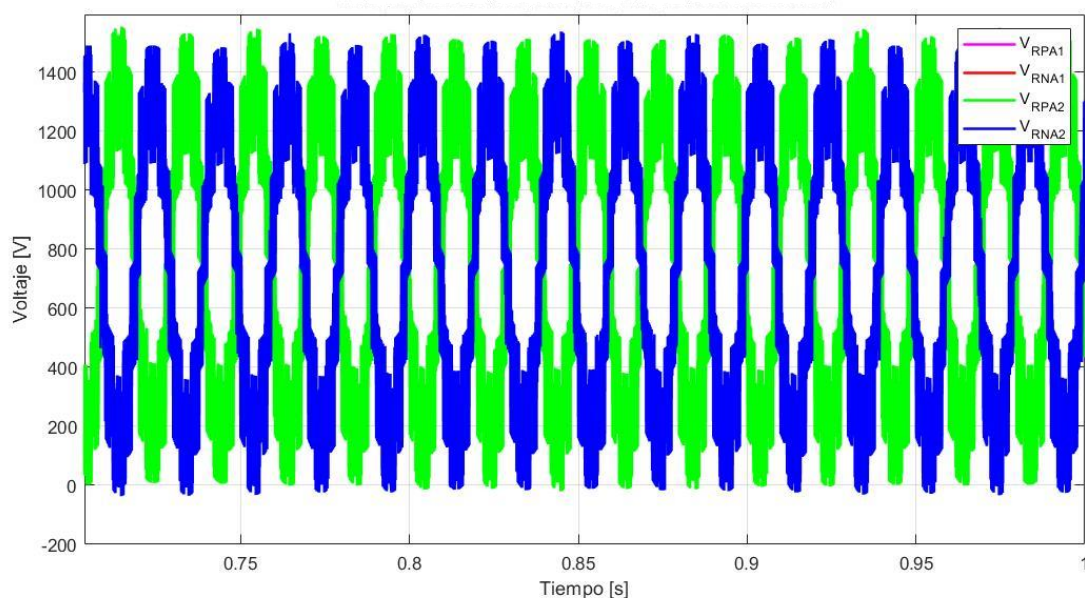


Figura 4.7. Voltaje de ramas positiva y negativas de las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

En cuanto a las figuras 4.8 y 4.9, donde se presentan los voltajes presentes en los capacitores, tanto de las ramas positivas como negativas de la fase A, se aprecia que estos se mantienen estables y en un rango aceptable de oscilación con respecto al valor promedio, incluso cuando se aplica el impacto de carga en el sistema.

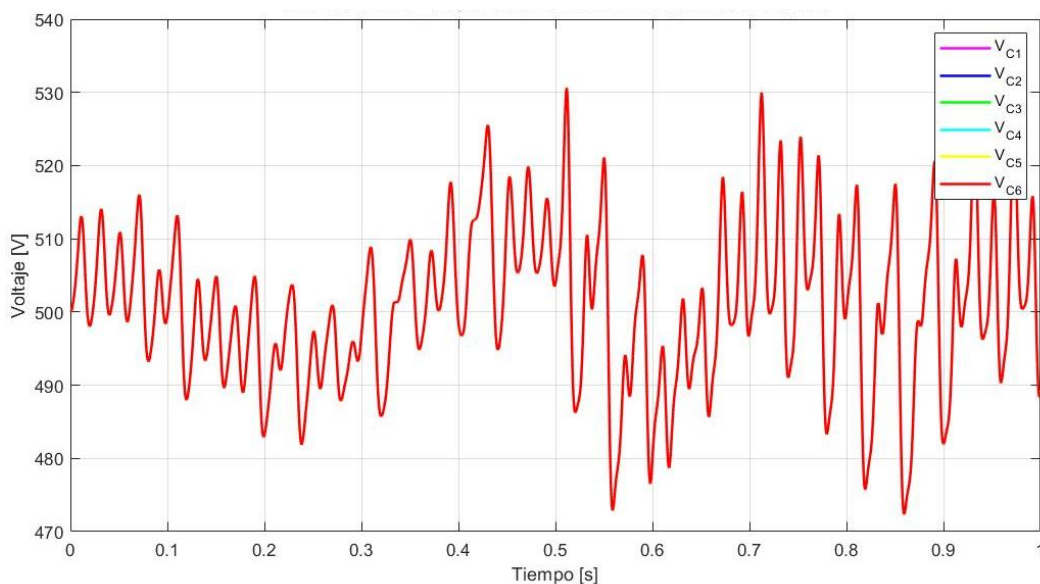


Figura 4.8. Voltaje en los condensadores de las ramas positivas de las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

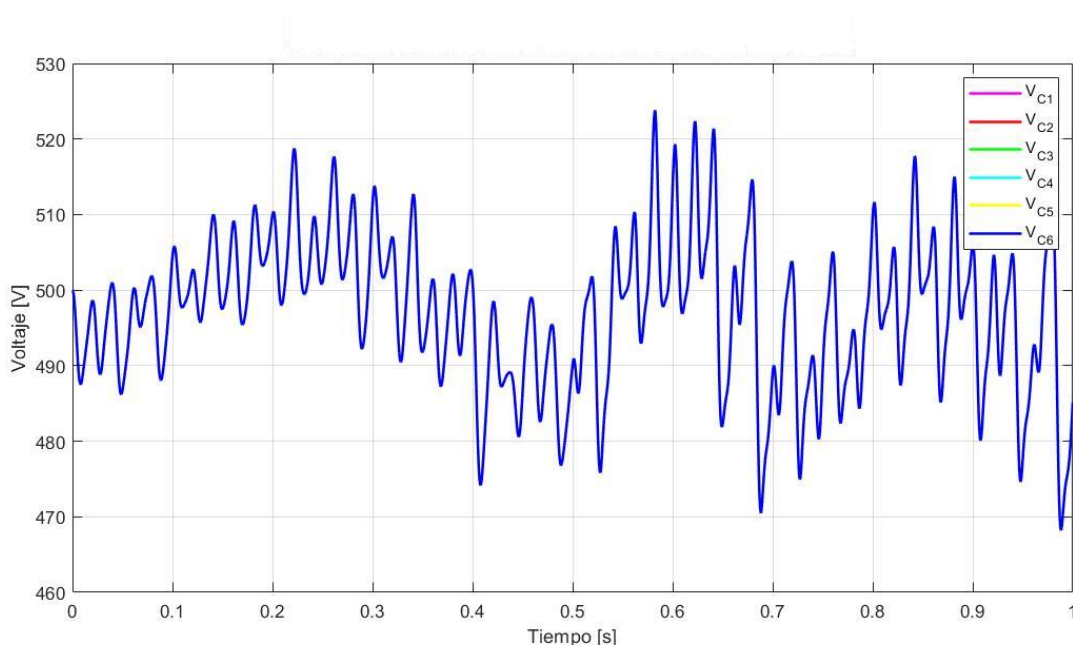


Figura 4.9. Voltaje en los condensadores de las ramas negativas de las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

En las figuras 4.10 y 4.11 se presentan las corrientes I_d e I_q , respectivamente, donde se observa claramente que no hay mayor problema en hacer un seguimiento del valor de referencia impuesto, aunque sí se observa una mayor oscilación en torno al valor de referencia después del impacto de carga. También, se aprecia un pequeño overshoot que se genera en el instante $t = 0.5$ [s] debido al cambio en la corriente solicitada en el sistema, vemos que tanto I_d como I_q se ven afectados ante las grandes variaciones de corriente.

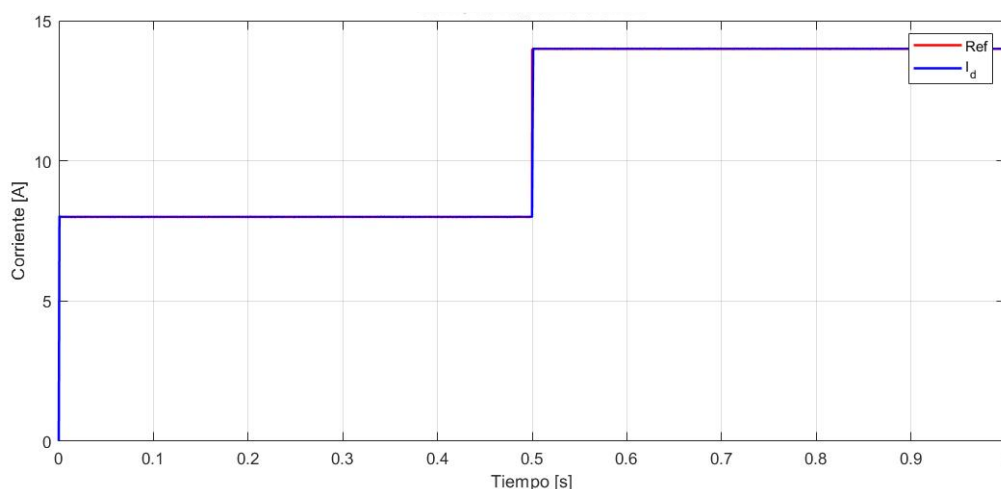


Figura 4.10. Corriente I_d y su referencia.

Fuente: Matlab Simulink.

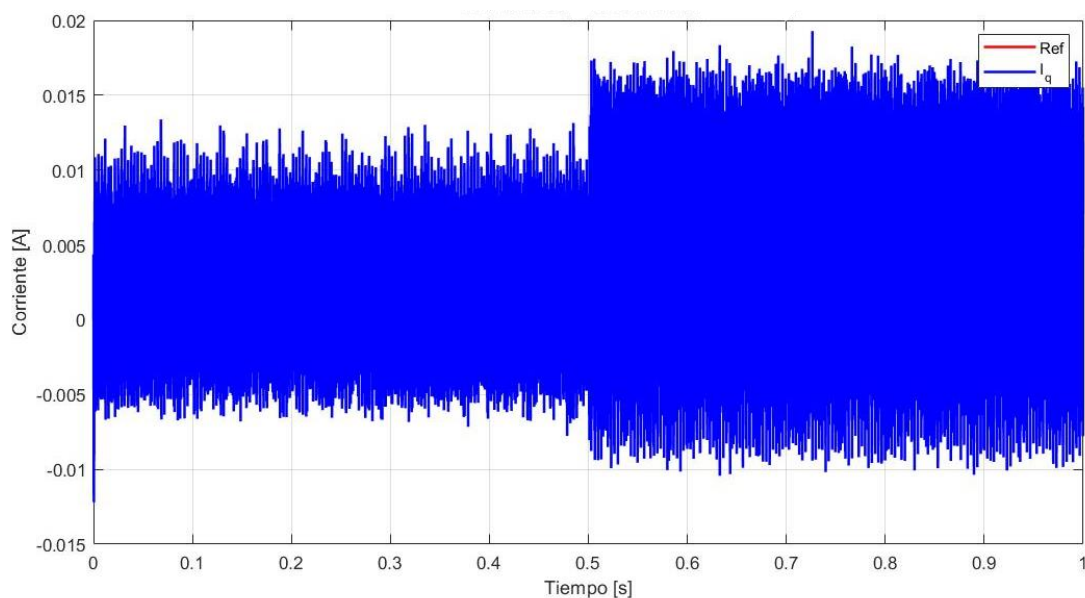


Figura 4.11. Corriente I_q y su referencia.

Fuente: Matlab Simulink.

Como se observa en la figura 4.12, con estos niveles de carga no se presentan problemas de sobre modulación en el sistema, por ello se aprecia que, aunque exista mayor dispersión en los valores promedios de los condensadores, y pequeñas desviaciones en los voltajes de rama, el sistema se mantiene estable.

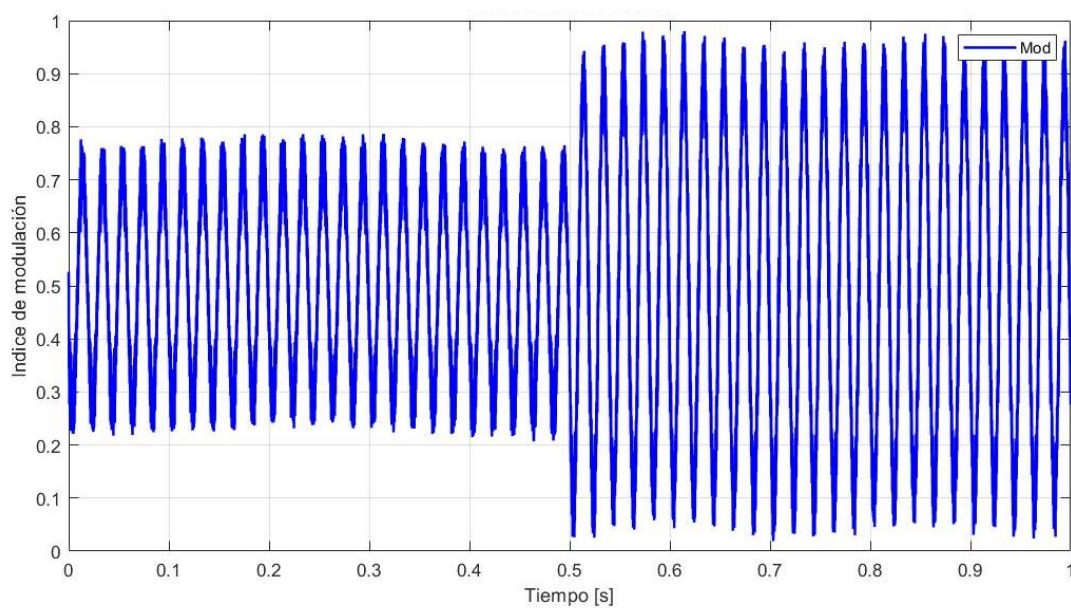


Figura 4.12. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink.

En síntesis, el sistema se comporta de la forma esperada, donde las tres fases funcionan de forma correcta y el sistema de control de corriente funciona correctamente, otorgando una salida de corrientes sinusoidales trifásicas desfasadas entre sí. También se observó que ante impactos de carga el sistema opera con normalidad sin presentar desbalances importantes, se estima que estos desbalances debiesen asentarse con el pasar del tiempo.

4.4. Análisis de casos

Para este análisis de caso se debe considerar que el sistema a implementar cambia con respecto al punto anterior, ya que se agregan inductancias y resistencias de rama para emular de forma efectiva la inductancia y pérdidas asociadas, el circuito implementado aquí se muestra en la figura 4.13.

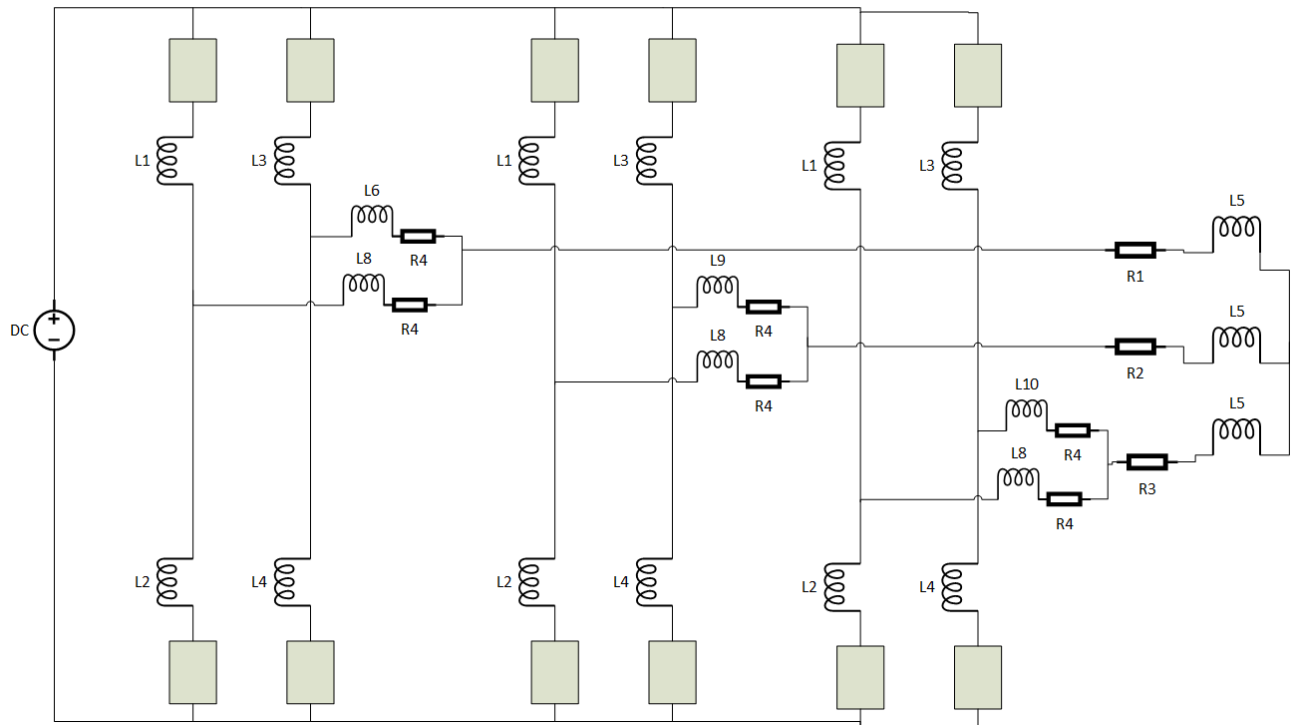


Figura 4.13. Circuito MMSPC con tres fases.

Fuente: elaboración propia.

4.4.1 Caso 1: Variación de frecuencia

En el primer caso se consideró como base que los inductores de ramas tienen un valor de $15 [mH]$ y las resistencias son de $0.1 [\Omega]$. Se busca saber cómo afecta la disminución de la frecuencia de conmutación a los parámetros del sistema, como es el voltaje en los condensadores, corrientes y voltajes de salida, entre otros.

A) $4.5 [kHz]$

En este primer apartado se utiliza una frecuencia de conmutación de $4.5 [kHz]$, al simular se obtienen las figuras 4.14 hasta la 4.19.

Aquí se observa que tanto el voltaje de la fase A1 como el de la fase A2 son similares en las figuras 4.14 y 4.15, aunque poseen diferencias mínimas como se observa en la figura 4.16 donde se presenta la diferencia entre las fases A1 y A2 que es del orden de los $[\mu V]$. En cuanto a los voltajes presentes en los condensadores de la rama A1 y A2 positivas, su diferencia se presenta en la figura 4.17, donde se nota que todos los condensadores se pueden considerar estables entre sí, teniendo diferencias mínimas entre ambas fases.

Por un lado, en la figura 4.18 se presentan los valores de la diferencia de voltajes en los condensadores de las ramas negativas A1 y A2, aquí se observa que el comportamiento con la rama positiva es similar, manteniendo un comportamiento estable. Por otra parte, en la figura 4.19 vemos que no existe una sobre modulación.

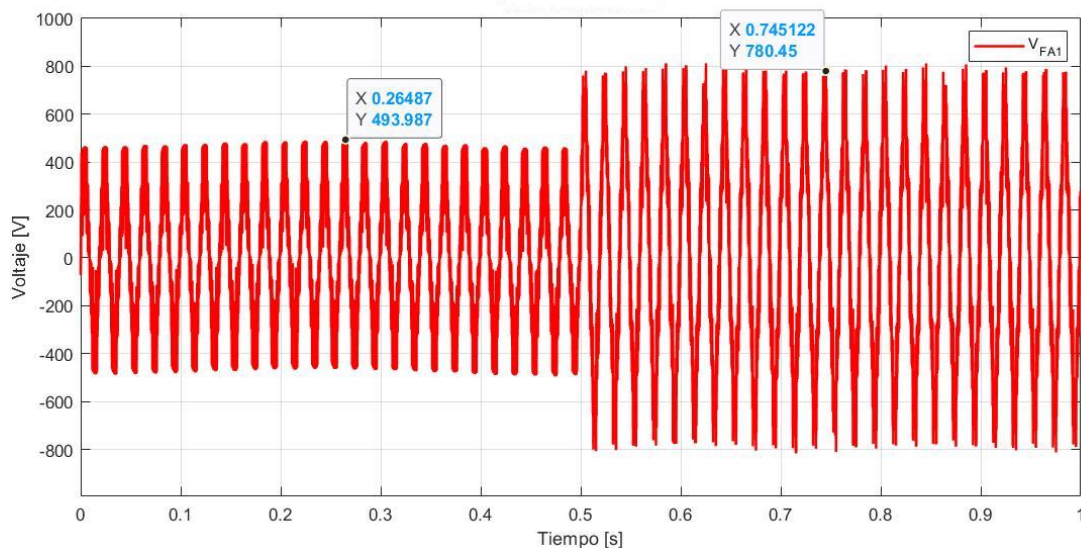


Figura 4.14. Voltaje de la fase A1.

Fuente: Matlab Simulink.

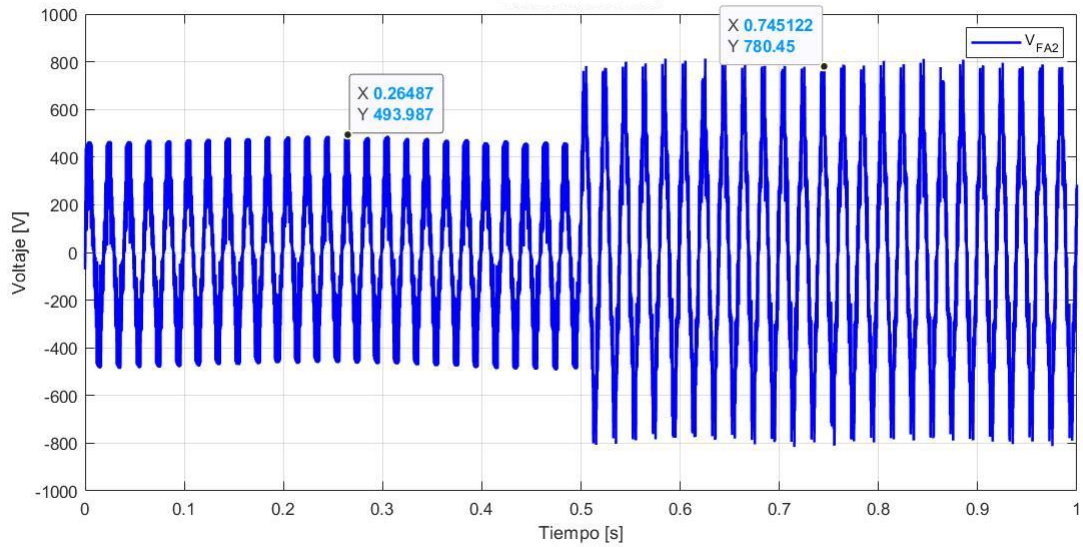


Figura 4.15. Voltaje de la fase A2.

Fuente: Matlab Simulink.

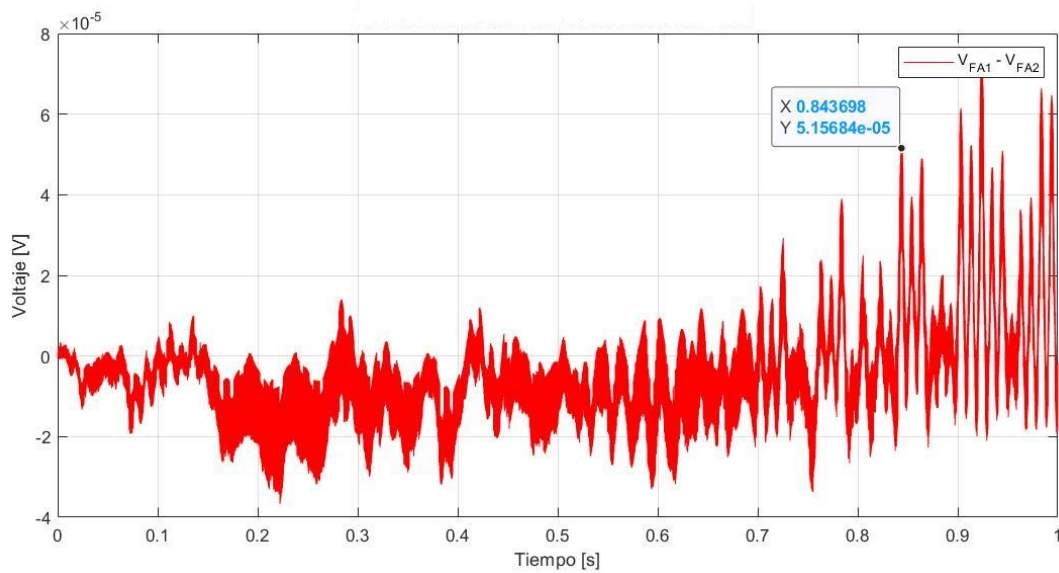


Figura 4.16. Diferencia de voltaje entre las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

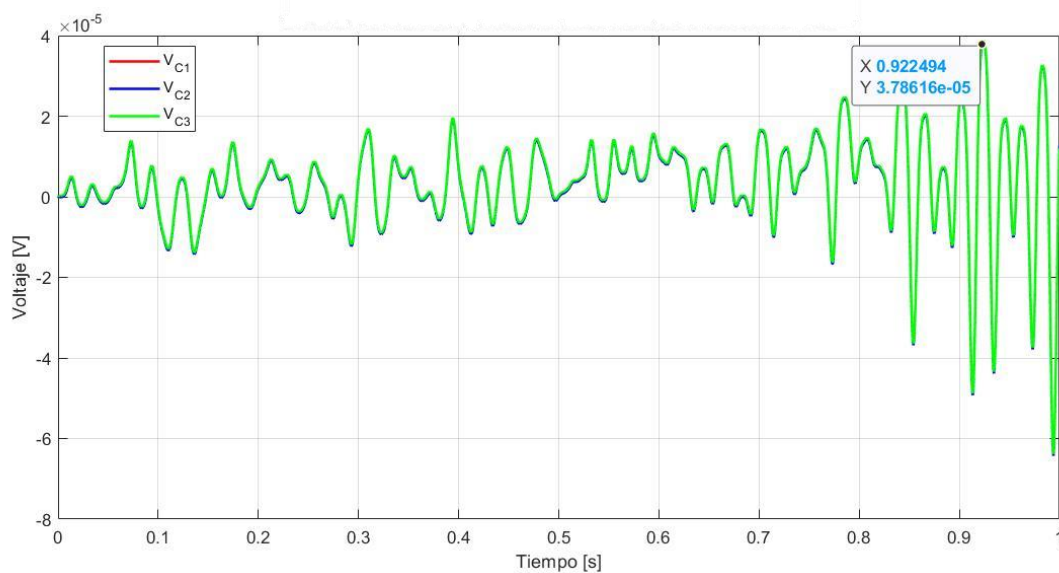


Figura 4.17. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

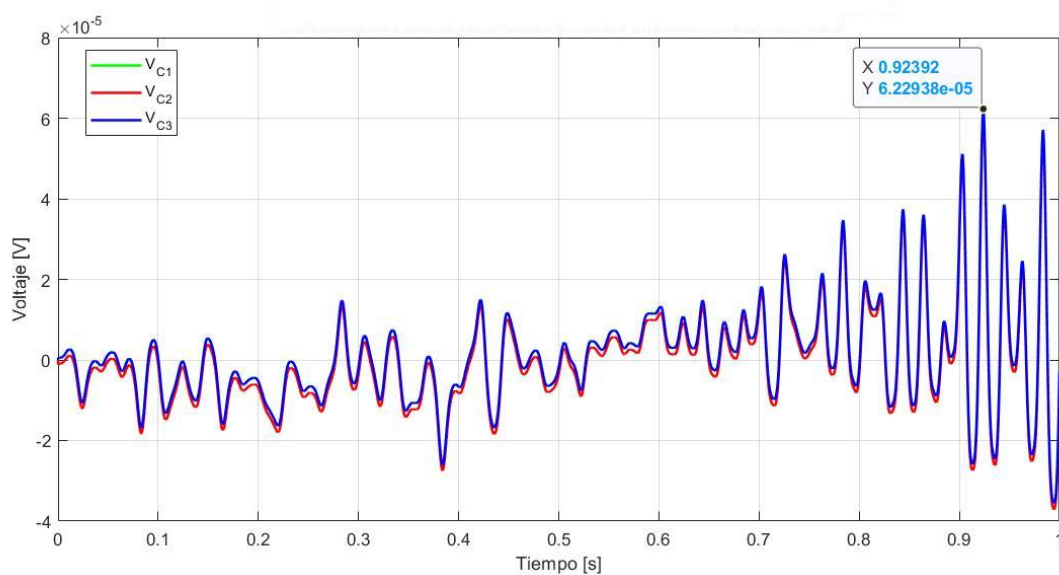


Figura 4.18. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

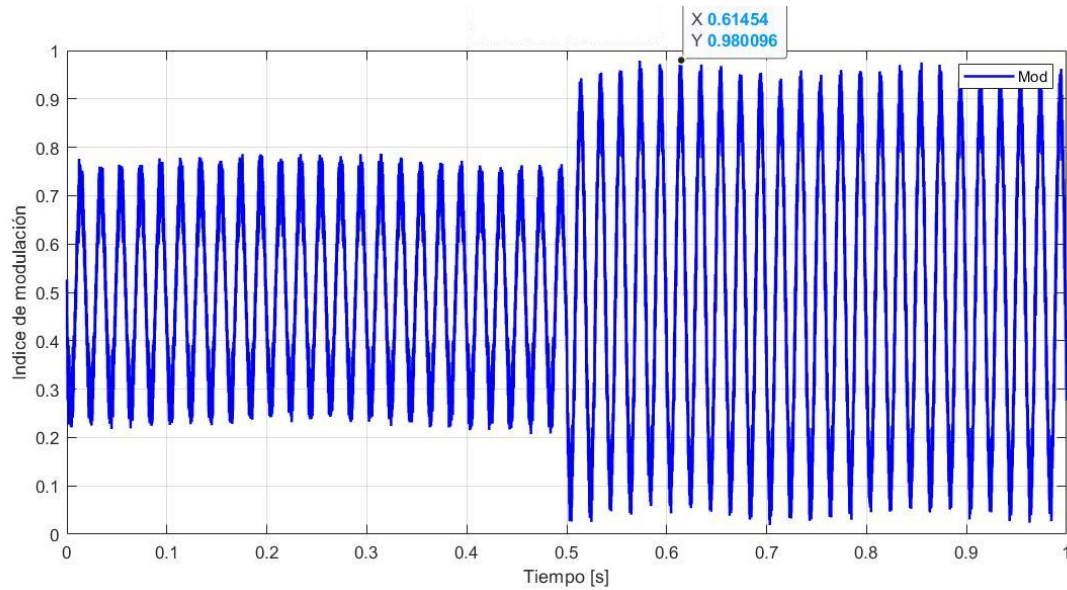


Figura 4.19. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink.

B) 1 [kHz]

En este segundo apartado se utiliza una frecuencia de conmutación de 1 [kHz], al simular se obtienen las figuras 4.20 hasta la 4.25.

Se observa en las figuras 4.20 y 4.21 que, al utilizar una menor frecuencia de conmutación, los voltajes de las ramas A1 y A2 presentan mayores variaciones en su forma de onda y, a la vez, una mayor diferencia de voltaje entre ramas, aunque esta es mínima, como se ve en la figura 4.22. A pesar de lo anterior, en las figuras 4.23 y 4.24 se observa que los voltajes en los condensadores, tanto para las ramas positivas como negativas se mantienen estables entre sí presentando una diferencia mínima entre fases, a pesar de la disminución de la frecuencia de conmutación.

En la figura 4.25 se observa que para este caso se está sobre modulando, a pesar de que el aumento del índice de modulación, con respecto al caso anterior es solo del 3.42%, por lo que mientras se disminuye la frecuencia de conmutación del sistema, aumenta el índice de modulación,

pero esto no se debe a que estas variables sean dependientes una de la otra, sino que al reducir la frecuencia de la portadora se tiene una señal que posee mayor contenido armónico, afectando de esta forma al índice de modulación.

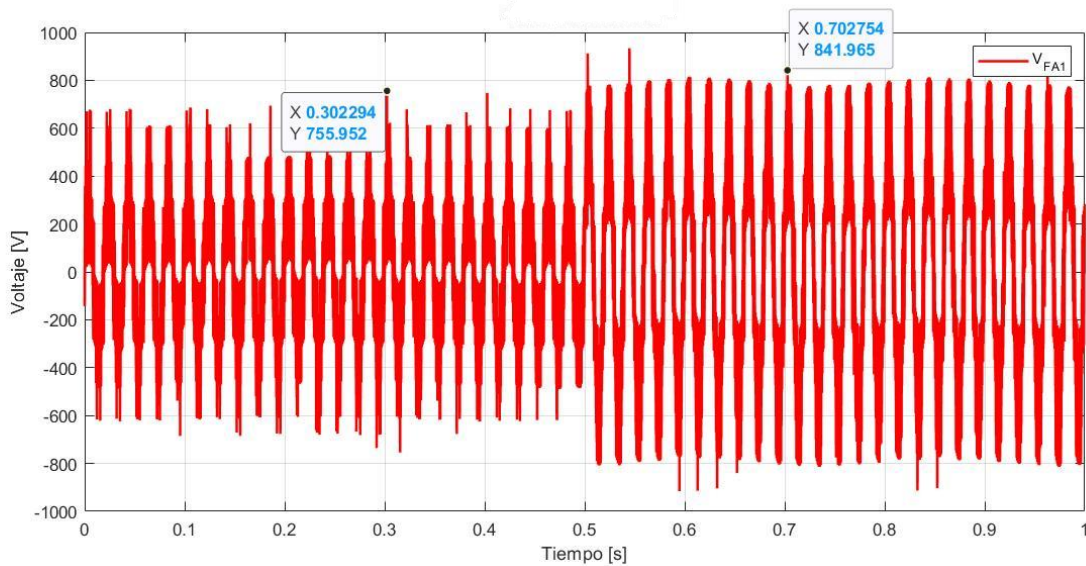


Figura 4.20. Voltaje de la fase A1.

Fuente: Matlab Simulink.

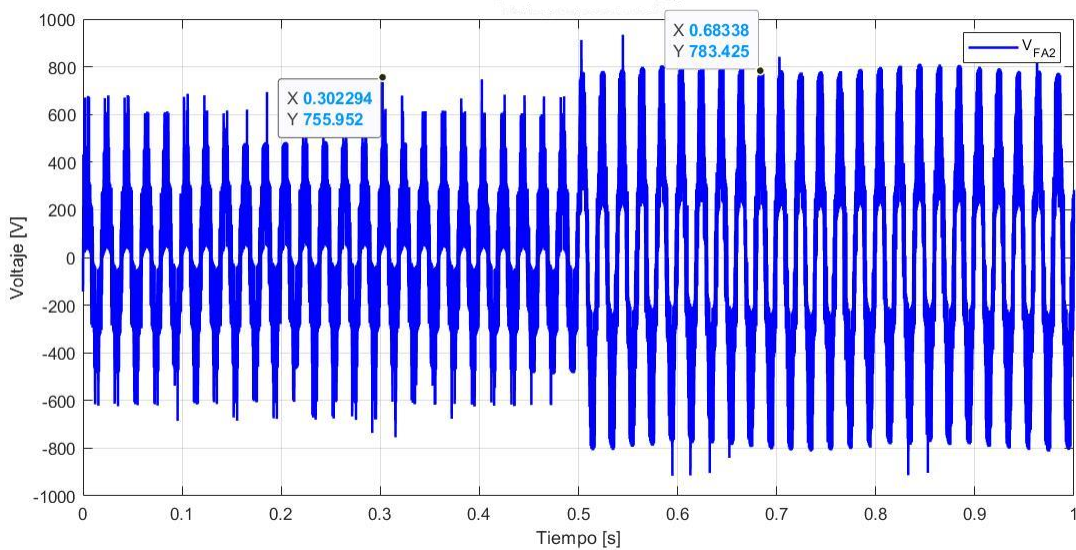


Figura 4.21. Voltaje de la fase A2.

Fuente: Matlab Simulink.

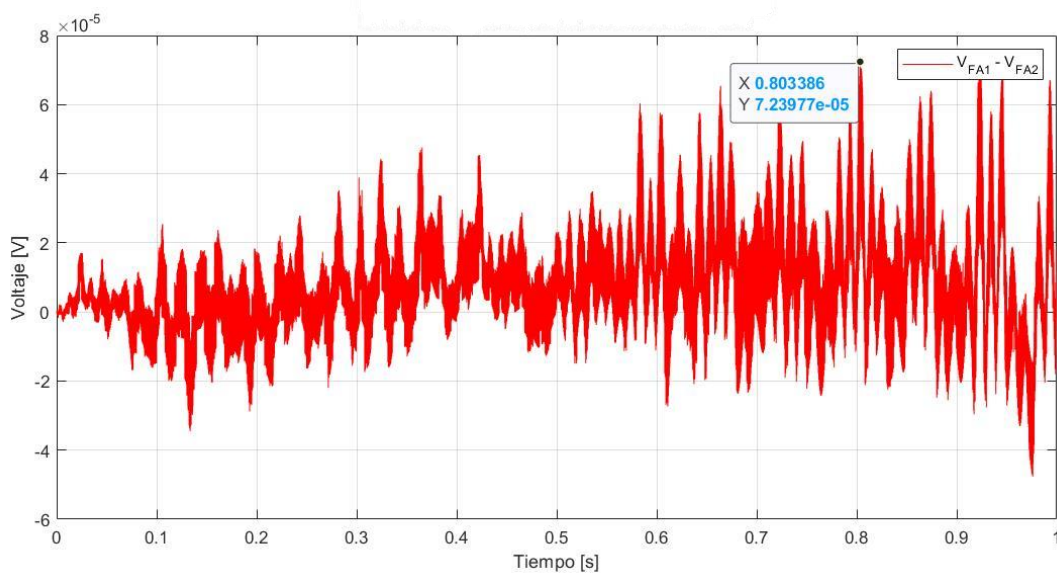


Figura 4.22. Diferencia de voltaje entre las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

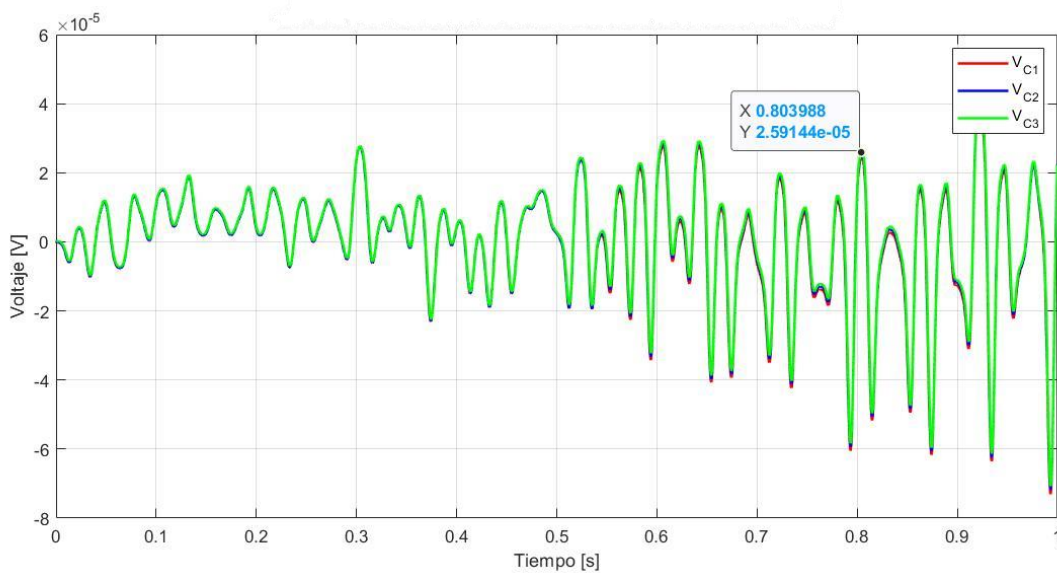


Figura 4.23. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

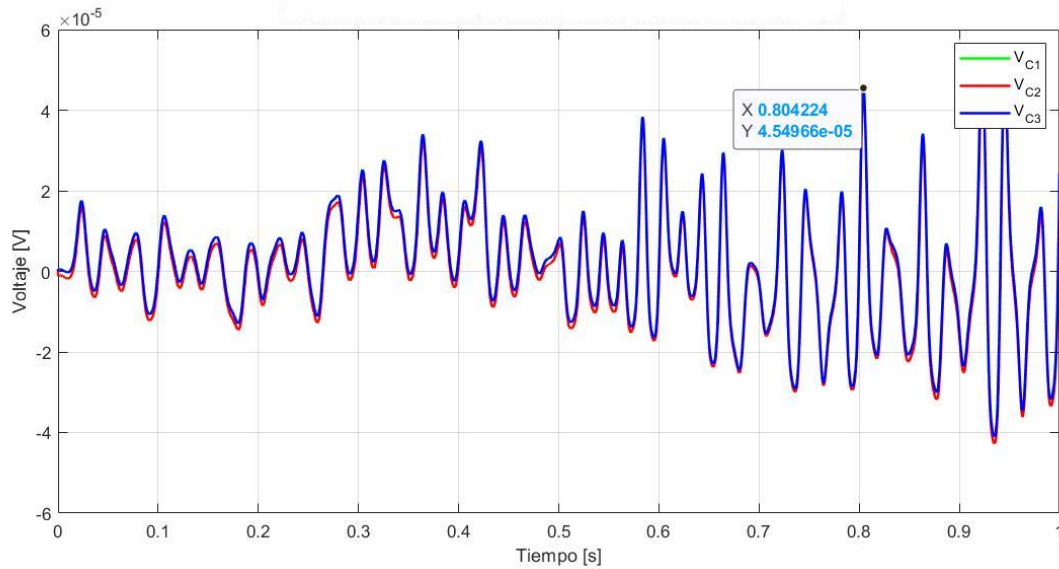


Figura 4.24. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

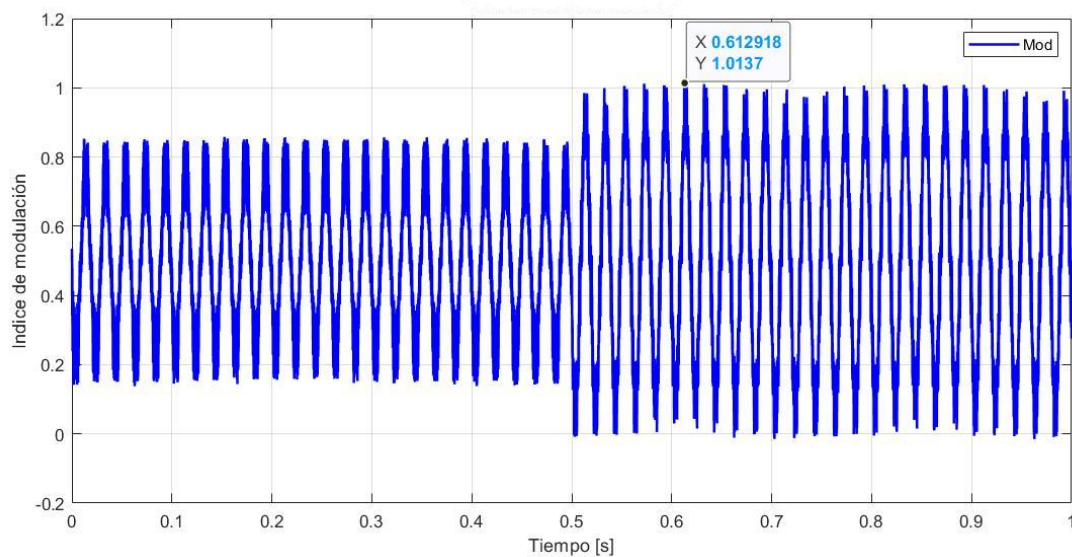


Figura 4.25. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink.

C) 0.5 [kHz]

En este tercer apartado se utiliza una frecuencia de conmutación de 0.5 [kHz], al simular se obtienen las figuras 4.26 hasta la 4.31.

De la figura 4.26 hasta la 4.31 se presentan los resultados con frecuencia de conmutación de 0.5 [kHz]. En las figuras 4.26 y 4.27 se notan los voltajes de las ramas A1 y A2, donde se observa que hay mayor distorsión en la forma de onda, pero como se advierte en la figura 4.28 no se presenta un aumento en la diferencia entre los voltajes de las ramas A1 y A2, se puede constatar que la diferencia que presentan es mínima, no llegando a afectar de forma evidente el balance de voltaje en los capacitores de cada rama tanto positiva como negativa, como se puede evidenciar en las figuras 4.29 y 4.30 donde se presentan las diferencias entre los condensadores de cada fase. En cuanto a la modulación que se presenta en la figura 4.31 se observa que no presenta mayor diferencia con el caso analizado en el punto b más que un pequeño aumento del 0.38%, teniendo así, un sistema sobre modulado.

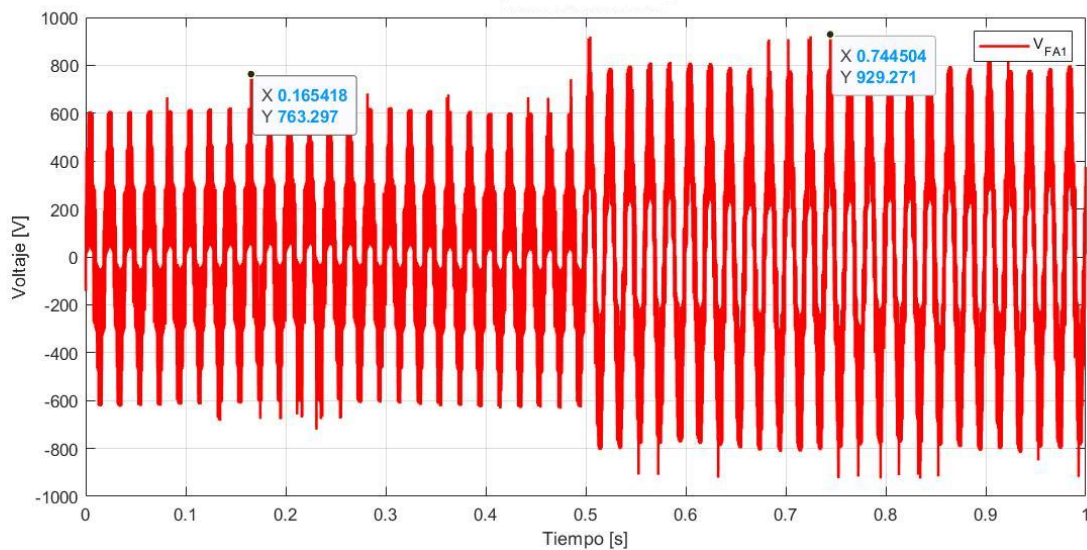


Figura 4.26. Voltaje de la fase A1.

Fuente: Matlab Simulink.

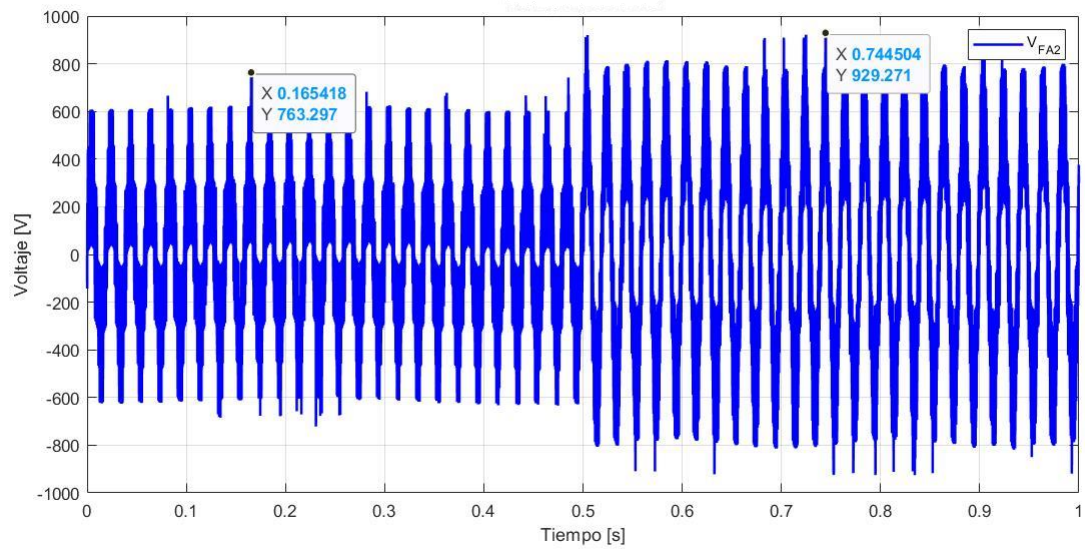


Figura 4.27. Voltaje de la fase A2.

Fuente: Matlab Simulink.

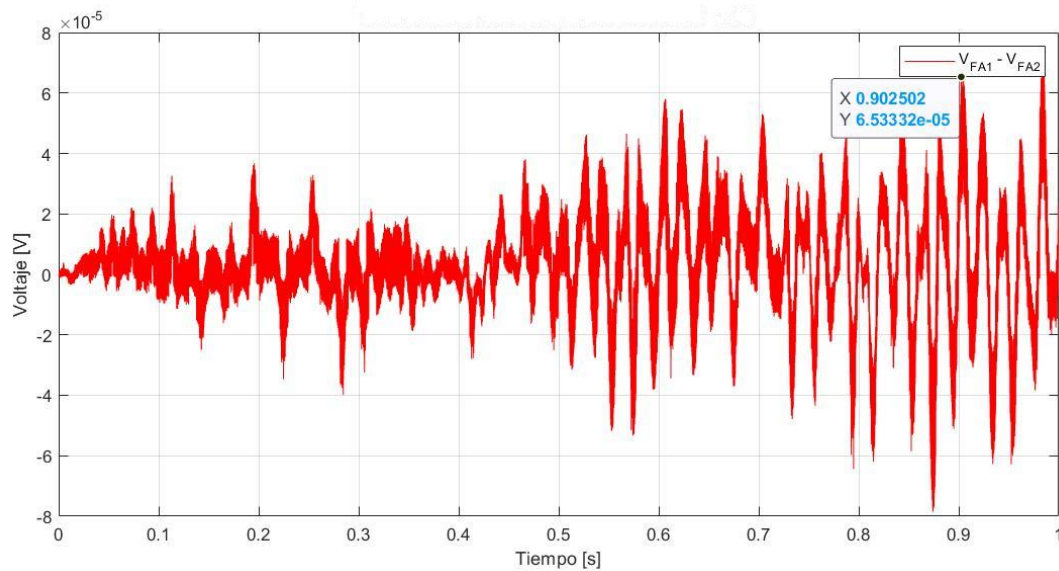


Figura 4.28. Diferencia de voltaje entre las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink

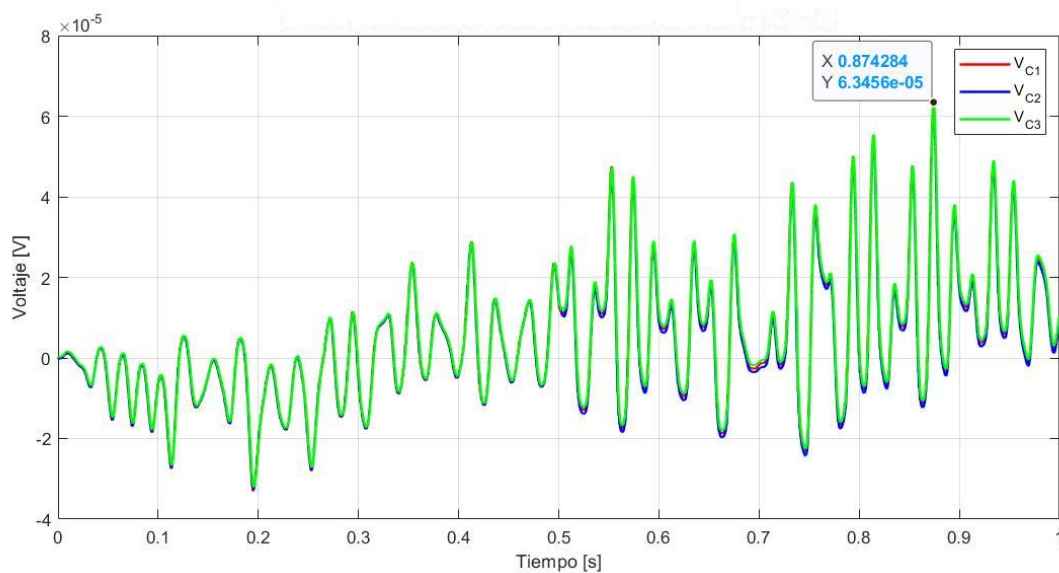


Figura 4.29. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

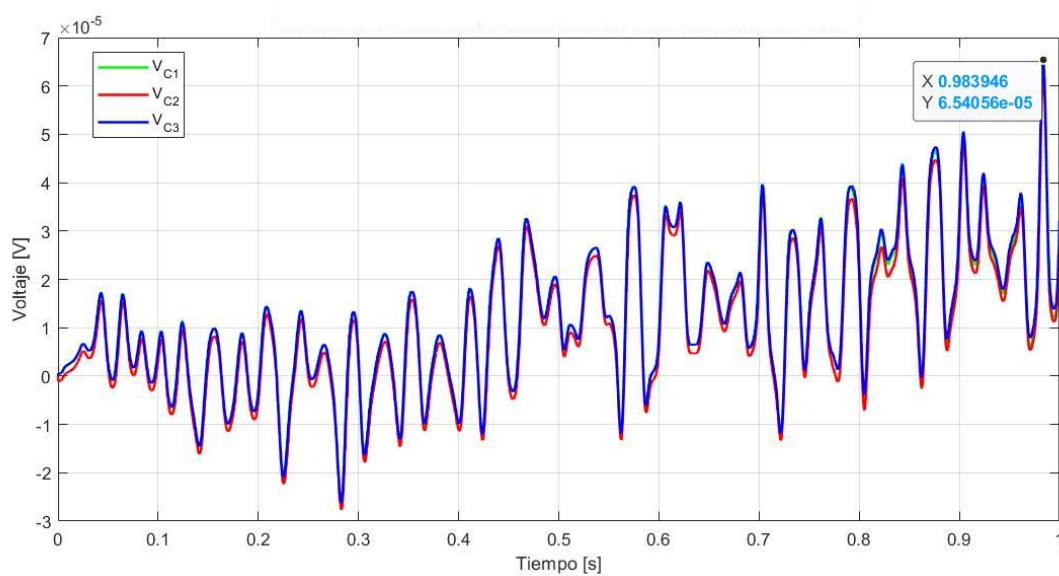


Figura 4.30. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

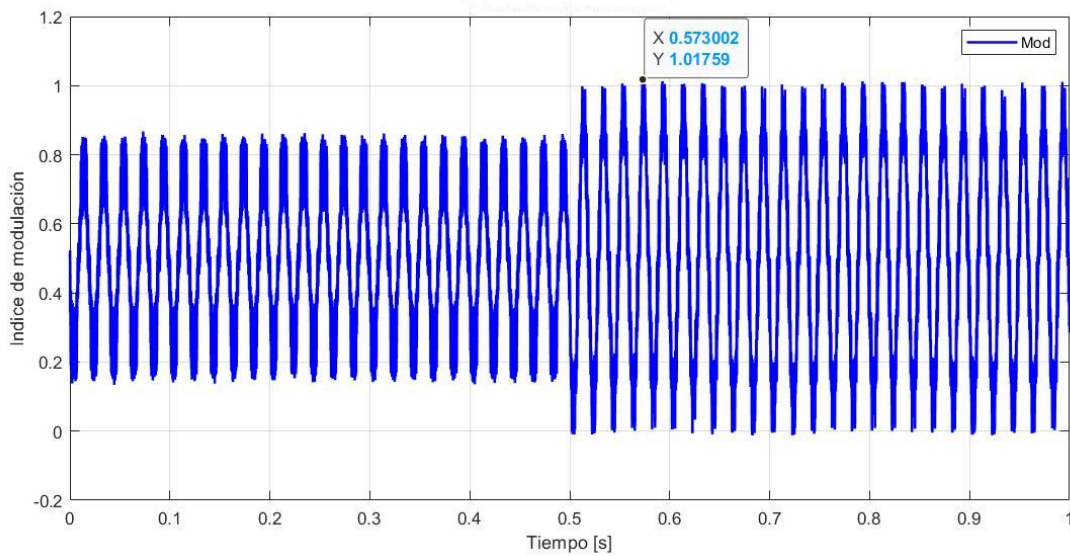


Figura 4.31. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink.

En síntesis, al variar la frecuencia de conmutación se ve aumentada la diferencia de voltaje entre las fases, aunque esto es mínimo y se puede obviar, pero en el caso del índice de modulación se ve que este puede verse aumentado en aproximadamente un 5% al utilizar velocidades de conmutación más lentas, dado el mayor contenido armónico de las señales con baja frecuencia.

4.4.2 Caso 2: Variación de inductancia

Para este caso se consideran como parámetros base una frecuencia de conmutación de 3 [kHz] junto a una resistencia de rama de valor 0.1 [Ω], donde se irán variando los valores de inductancias de las ramas, con el fin de observar el comportamiento del sistema al incorporar diferencias en los elementos de las ramas, exponiendo el sistema a casos extremos para comprobar si este se mantiene estable en el tiempo ante estas variaciones.

$$A) L_1 = 2 * L_2 = 5 [mH]$$

Para el primer caso se advierte que los voltajes de las ramas A1 y A2 observados en las figuras 4.32 y 4.33, no presentan una distorsión apreciable a simple vista, pero al observar la figura 4.34 se aprecia que la diferencia que presentan entre sí, no es menor. Esta diferencia de voltaje es ocasionada por la diferencia de los voltajes de los capacitores entre las ramas A1 y A2, tanto positivos como negativos, que se notan en las figuras 4.35 y 4.36 respectivamente. Por lo anterior, en la figura 4.37

se evidencia que tras el impacto de carga la oscilación presente en el índice de modulación crece, teniendo un comportamiento oscilatorio, pero no llegando a una sobre modulación.

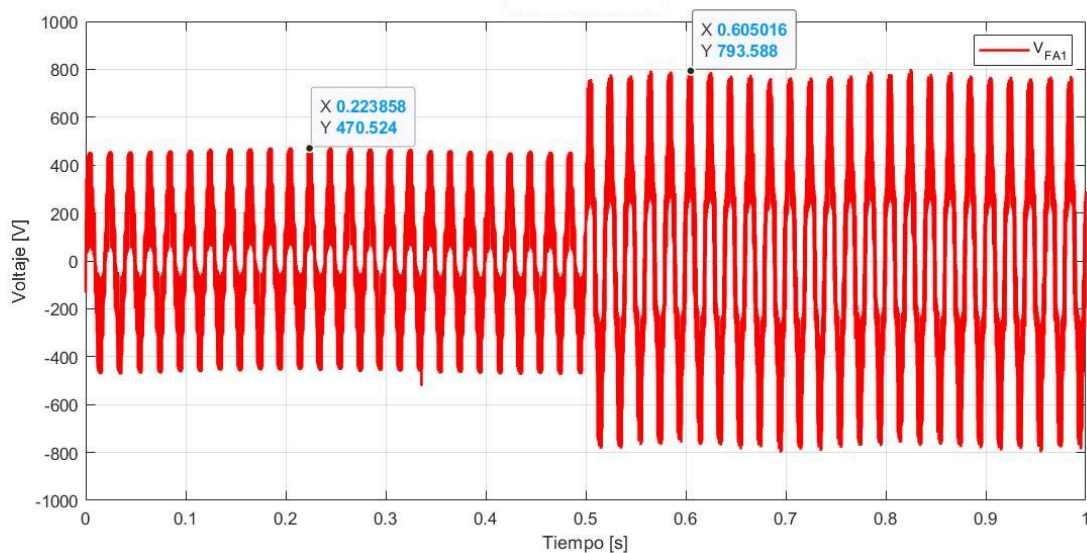


Figura 4.32. Voltaje de la fase A1.

Fuente: Matlab Simulink.

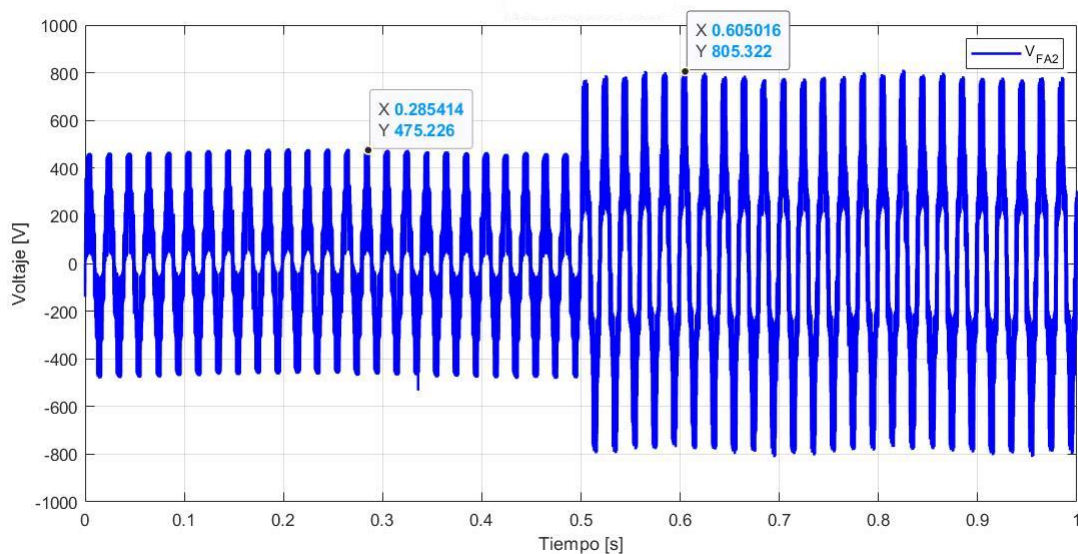


Figura 4.33. Voltaje de la fase A2.

Fuente: Matlab Simulink.

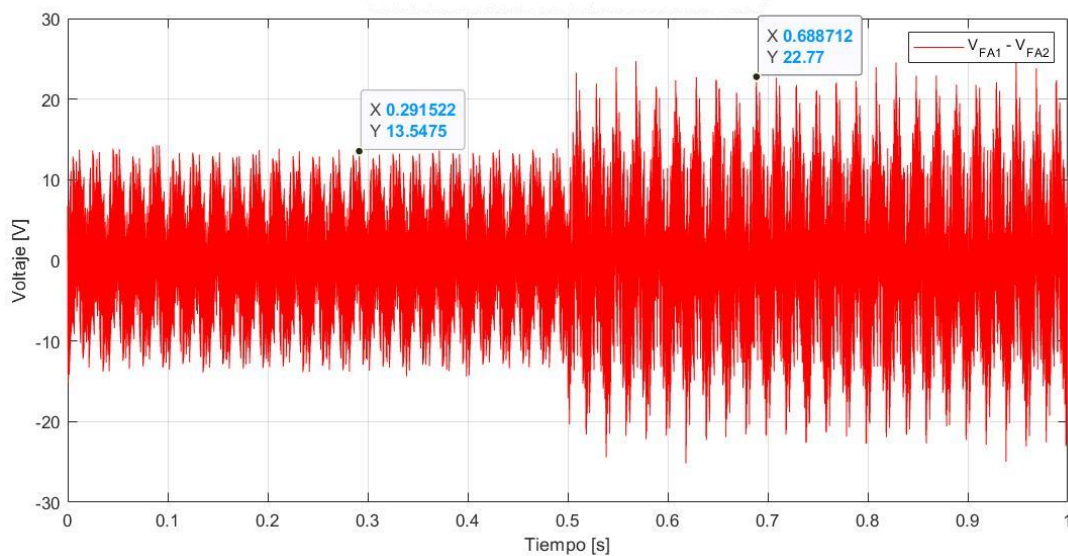


Figura 4.34. Diferencia de voltaje entre las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

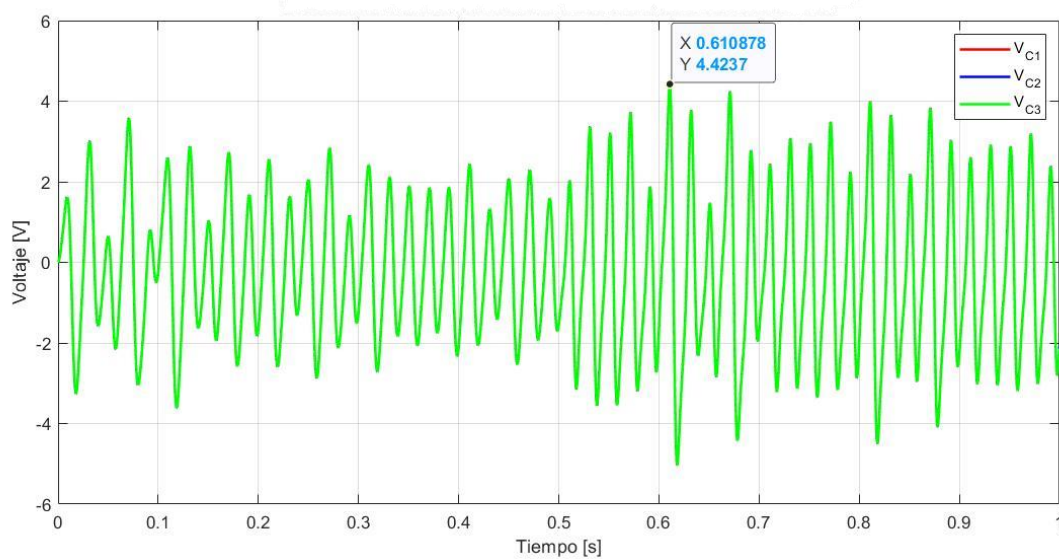


Figura 4.35. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink

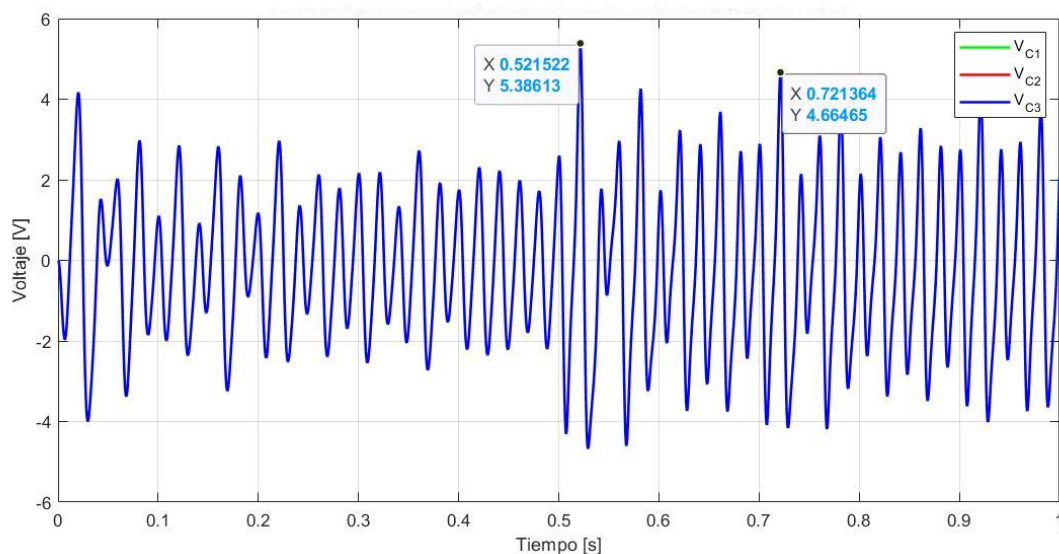


Figura 4.36. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

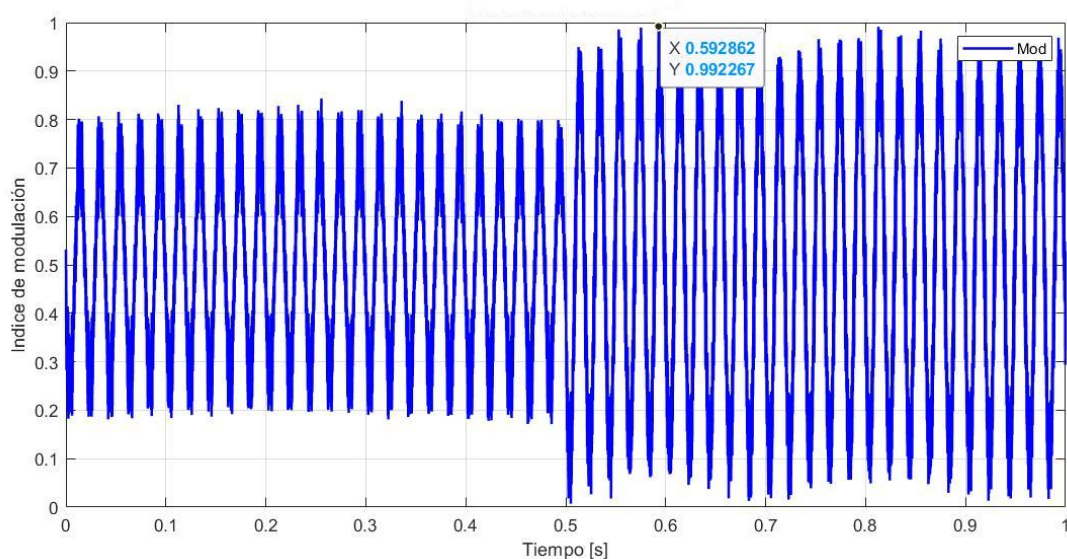


Figura 4.37. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink.

B) $L_1 = 2 * L_2 = 10 [mH]$

Se observa que al aumentar la inductancia no hay grandes cambios en las figuras 4.38 y 4.39, en contraste con las figuras 4.32 y 4.33, pero si hay un aumento en la diferencia de estos voltajes, como se nota en la figura 4.40, que en comparación con la figura 4.34 se percibe un aumento de

aproximadamente el 51.6%. En cuanto a los voltajes de los capacitores se observa en las figuras 4.41 y 4.42 que los condensadores aumentan la diferencia en sus valores entre las ramas A1 y A2, tanto positivas como negativas en un 46.12% y un 41.27%, respectivamente. Sin embargo, aunque difieren sus valores, estas diferencias no son excesivamente grandes como para generar un desbalance. También se advierte que el índice de modulación presentado en la figura 4.43 se mantiene estable bajo valores unitarios, presentando un aumento de solo el 0.45%.

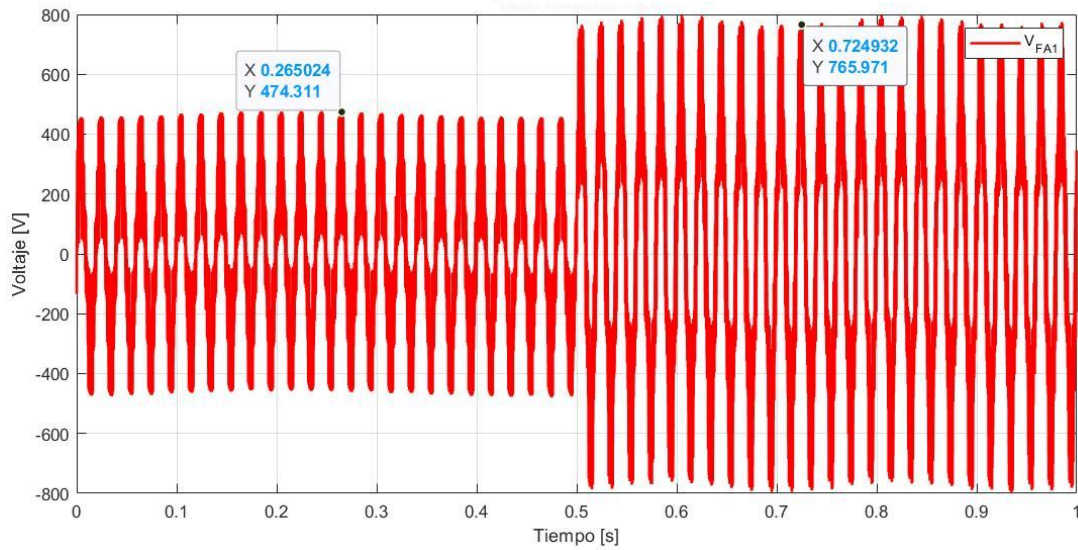


Figura 4.38. Voltaje de la fase A1.

Fuente: Matlab Simulink.

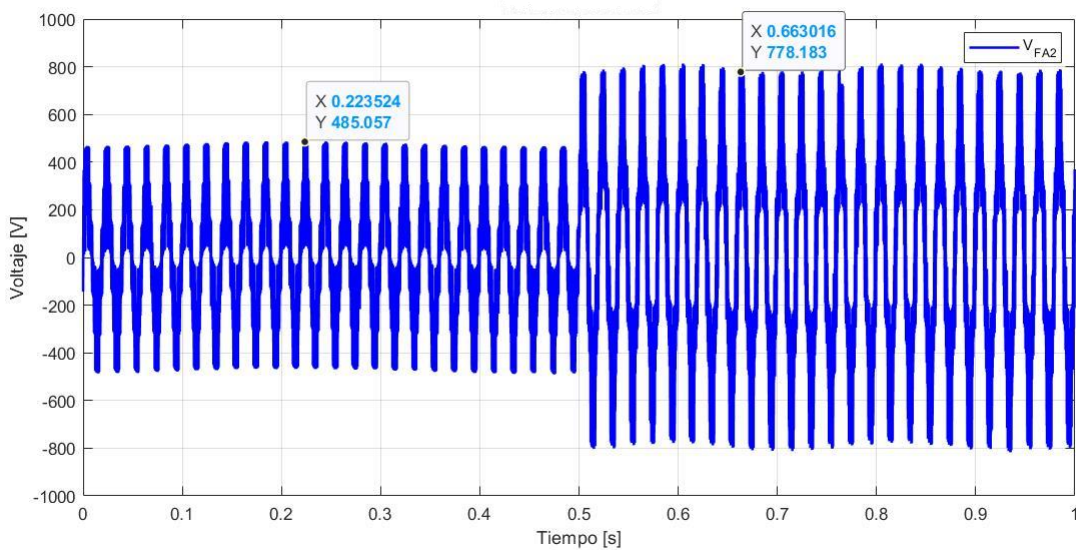


Figura 4.39. Voltaje de la fase A2.

Fuente: Matlab Simulink.

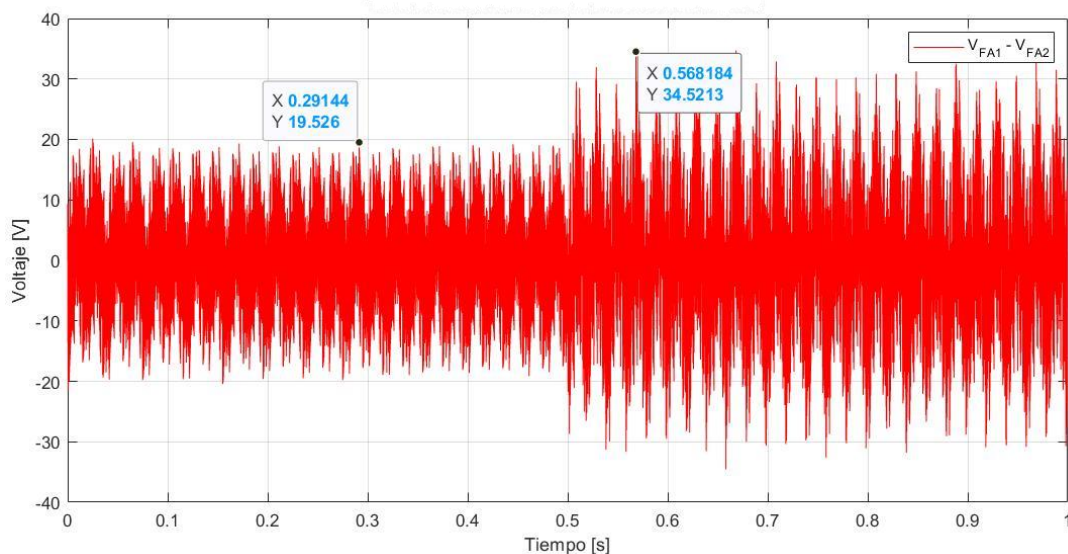


Figura 4.40. Diferencia de voltaje entre las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

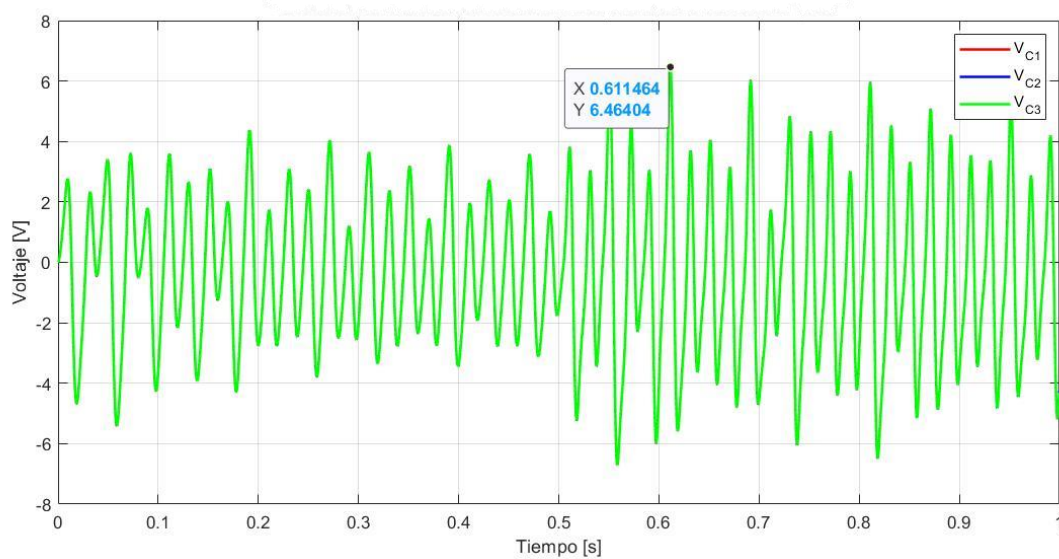


Figura 4.41. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

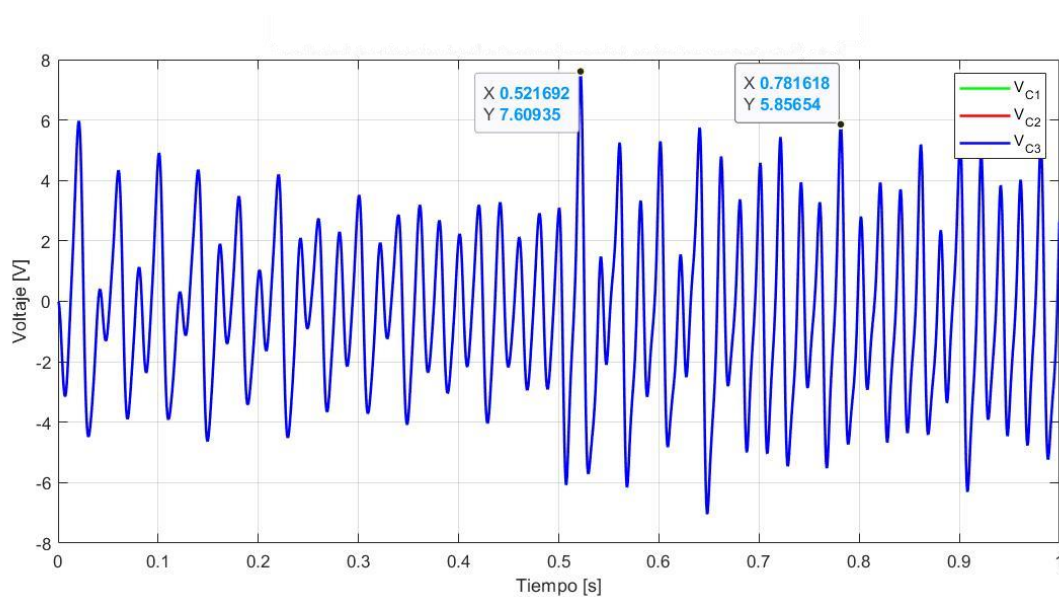


Figura 4.42. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

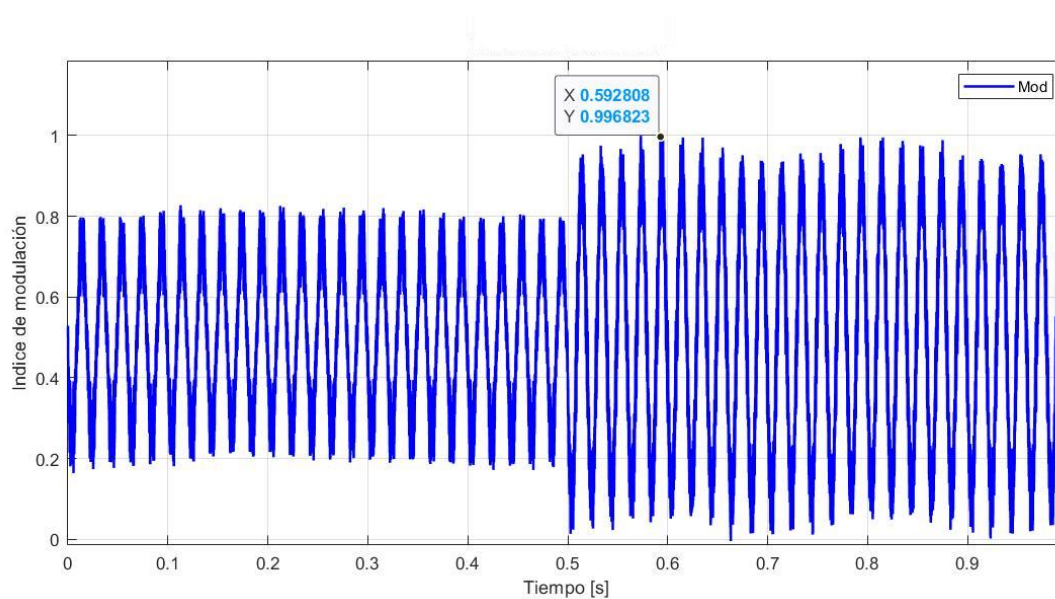


Figura 4.43. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink.

C) $L_1 = 2 * L_2 = 15 [mH]$

Vemos que, al aumentar nuevamente la inductancia, las formas de onda de los voltajes en las fases presentadas en las figuras 4.44 y 4.45 se mantienen estables, pero, observando la figura 4.46 se aprecia que la diferencia entre los voltajes de las ramas A1 y A2 se incrementa en un 4.58%, con respecto al caso anterior. En cuanto a los voltajes presentes en los capacitores, se observa que la brecha entre ramas aumenta en un 22.69% en las ramas positivas y un 13.86% en las ramas negativas, como se puede ver en las figuras 4.47 y 4.48, respectivamente, pero esto no afecta de forma considerable el índice de modulación que se presenta en la figura 4.49.

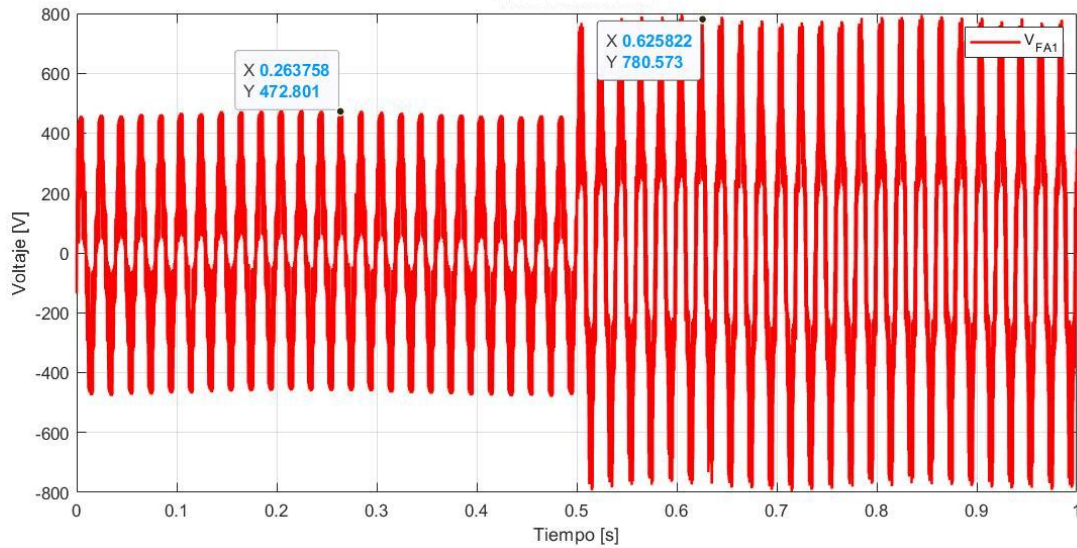


Figura 4.44. Voltaje de la fase A1.

Fuente: Matlab Simulink.

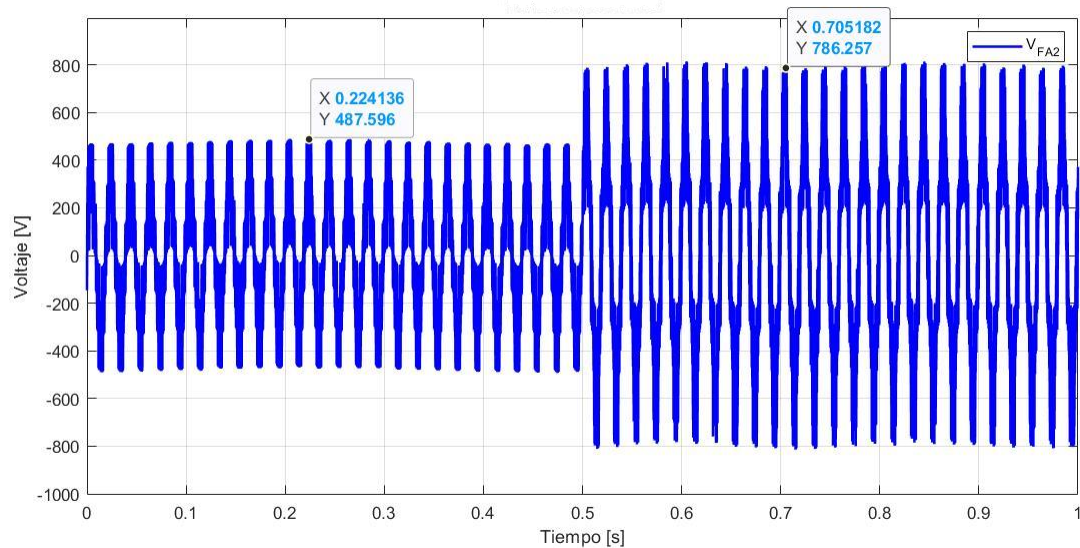


Figura 4.45. Voltaje de la fase A2.

Fuente: Matlab Simulink.

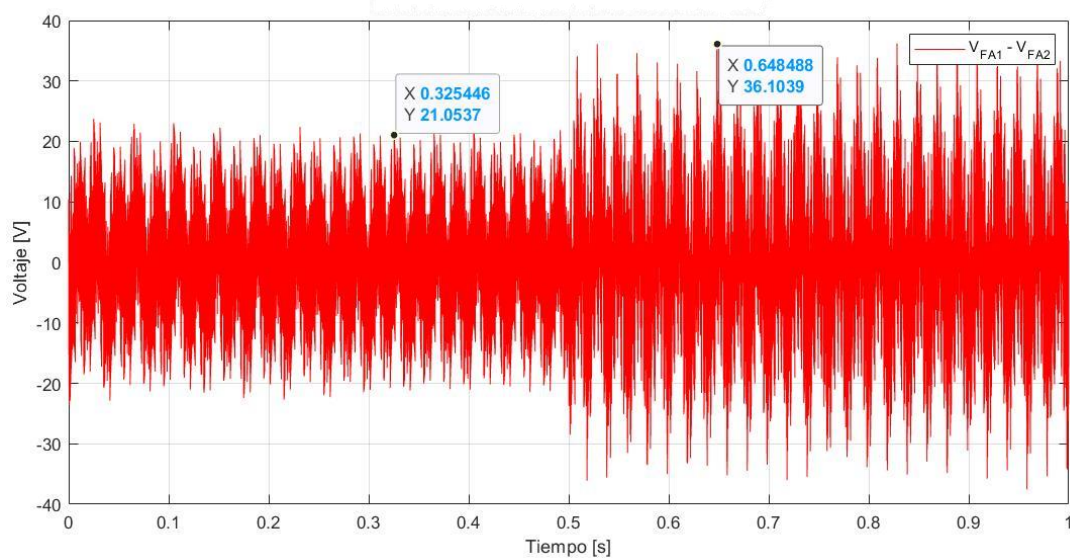


Figura 4.46. Diferencia de voltaje entre las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

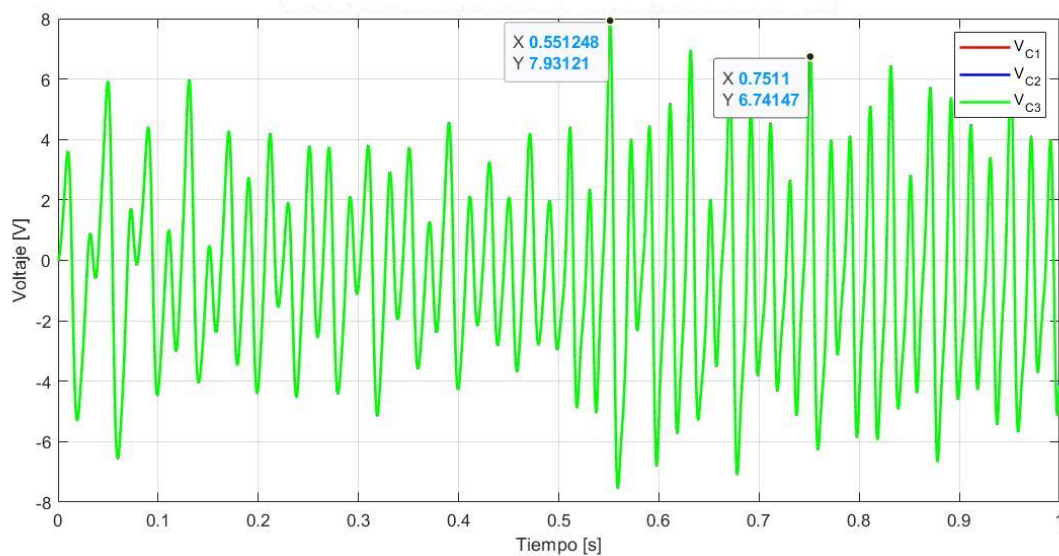


Figura 4.47. Diferencias de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

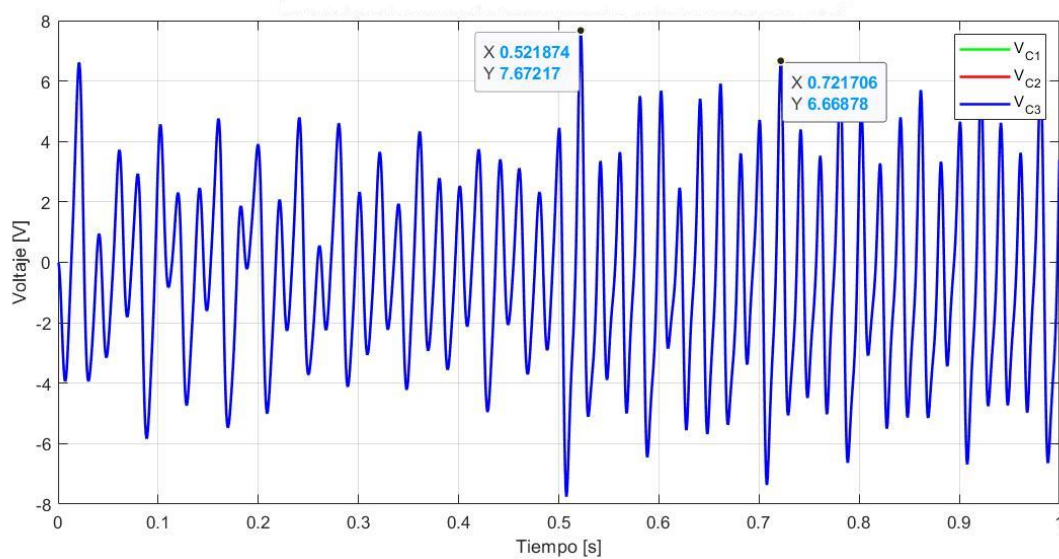


Figura 4.48. Diferencias de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

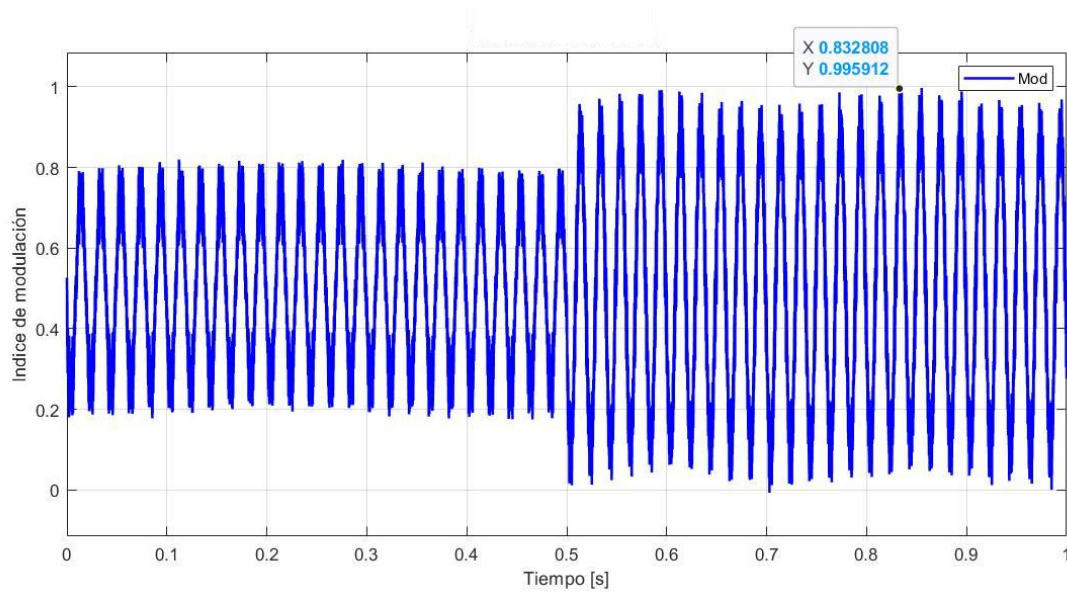


Figura 4.49. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink

D) $L_1 = 10 * L_2 = 15 [mH]$

Al aplicar esta configuración al circuito se observa de forma clara que hay un desbalance presente en los voltajes de las ramas A1 y A2 que se ven en las figuras 4.50 y 4.51, y en la figura 4.52 se ve que la diferencia entre los voltajes A1 y A2 aumentó a poco más del doble, al tener una diferencia tan significativa entre las inductancias de rama. Si se compara con la figura 4.46 el aumento fue de un 137.19%. Esta variación que se presenta entre los voltajes de rama se debe principalmente al desequilibrio presente en los voltajes de los condensadores de los submódulos de cada rama que, como se ve en las figuras 4.53 y 4.54 existe una diferencia entre los condensadores de las fases que no se puede pasar por alto, dado que esta, al igual que la diferencia de voltaje entre fases se incrementa a poco más del doble, en comparación con las figuras 4.48 y 4.47, lo que da como resultado un crecimiento del 95.78% en las ramas positivas y un 134% en las ramas negativas. Debido a lo anterior, se observa en la figura 4.55 una mayor oscilación del índice de modulación, de echo tiene un peak que sobrepasa el límite de 1, quedando por un instante el sistema sobre modulado, pero luego estabilizarse en valores bajo 1.

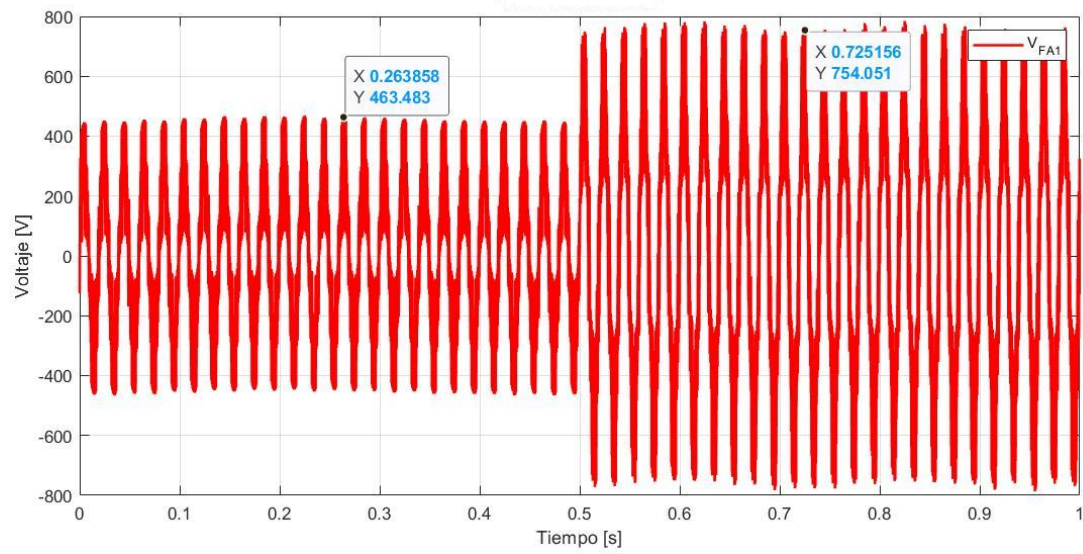


Figura 4.50. Voltaje de la fase A1.

Fuente: Matlab Simulink.

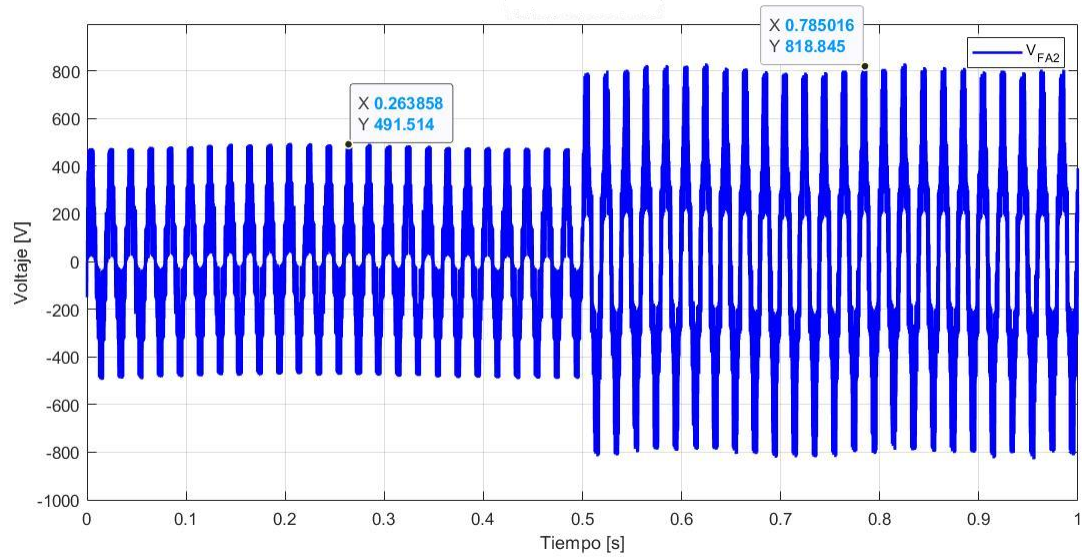


Figura 4.51. Voltaje de la fase A2.

Fuente: Matlab Simulink.

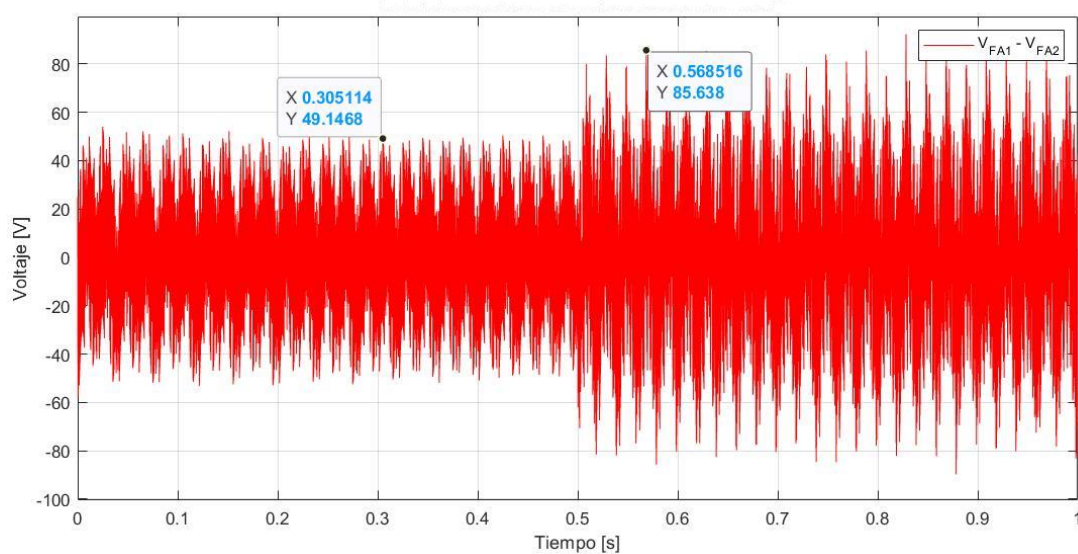


Figura 4.52. Diferencia de voltaje de la fase A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

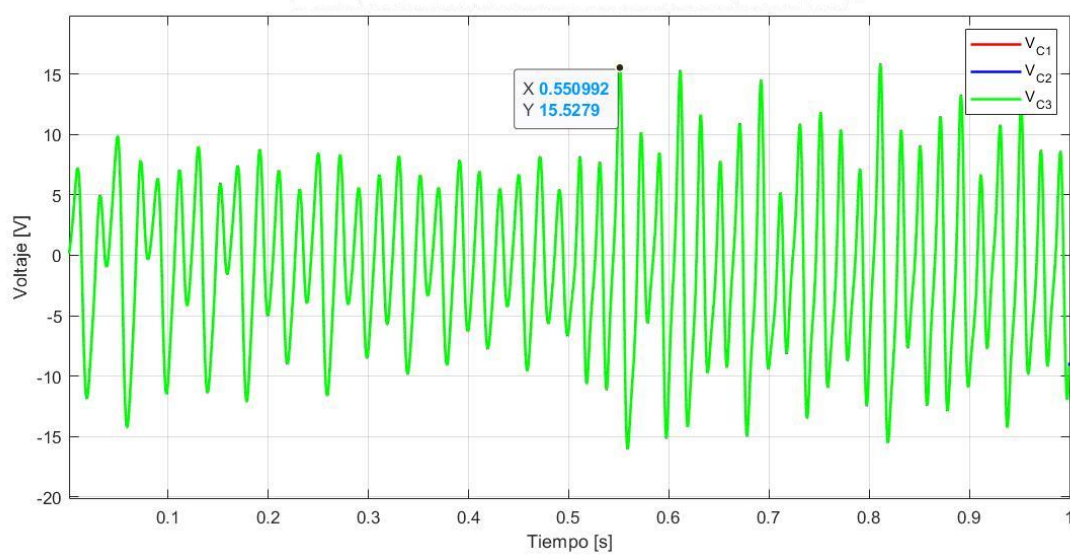


Figura 4.53. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

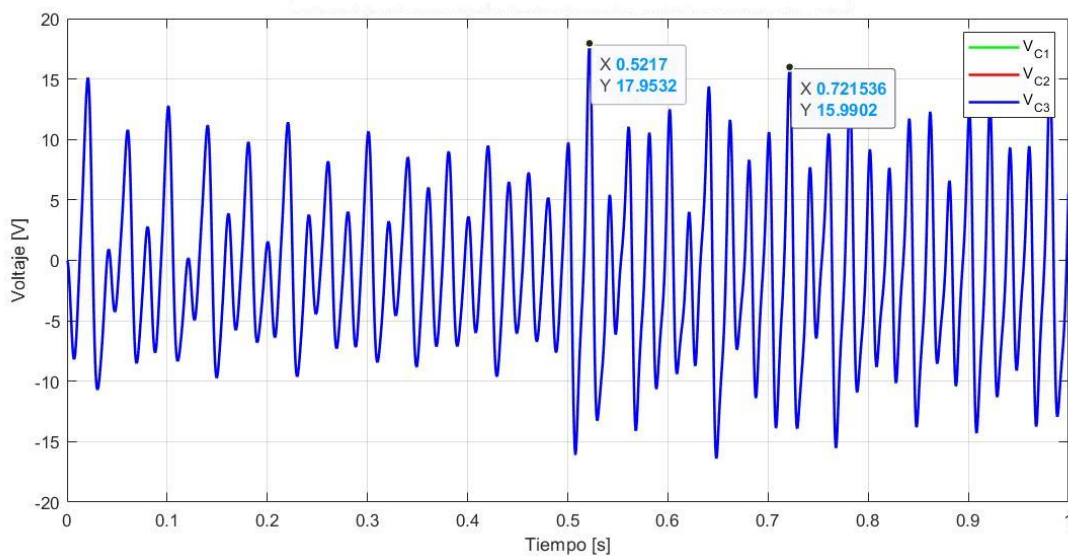


Figura 4.54. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

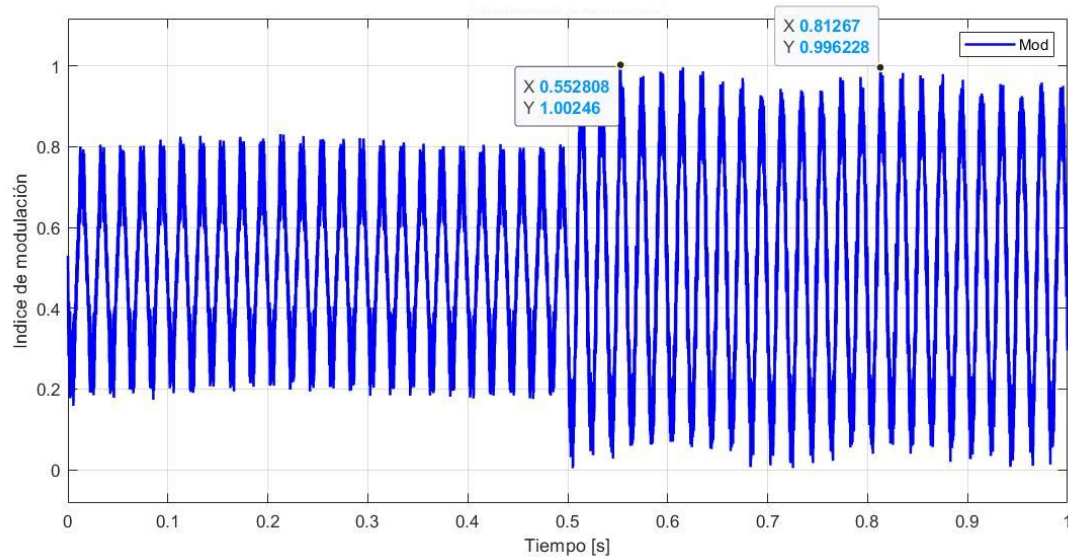


Figura 4.55. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink

$$E) L_1 = 100 * L_2 = 15 [mH]$$

Se observa que mientras más se aumenta la diferencia entre los inductores de rama, mayor es la diferencia entre los voltajes de rama, como se nota en la figura 4.58 contrastándola con la figura 4.52, lo que refleja un aumento del 29.9%. También se observa que los valores de voltaje que se muestran en las figuras 4.56 y 4.57 presentan mayor oscilación con esta configuración. Por su parte, en los voltajes de los capacitores se constata que la diferencia entre ramas aumenta en un 12.41% en las ramas positivas y un 22.97% en las ramas negativas, lo que trae como consecuencia que los voltajes de las fases difieran entre sí. En cuanto al índice de modulación se evidencia en la figura 4.61 que este no se sobre modula, pero sí aumenta su oscilación de la forma de onda.

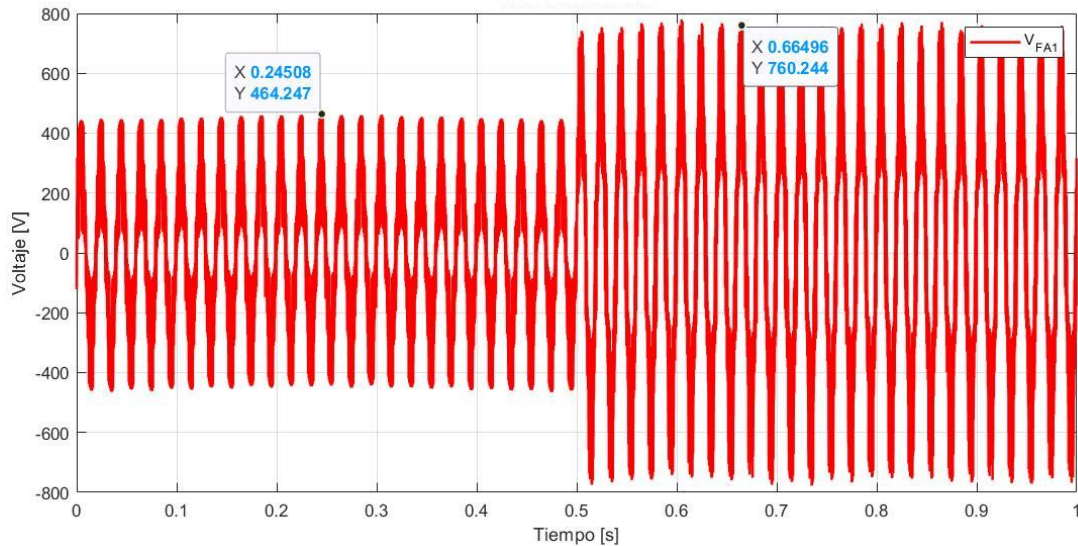


Figura 4.56. Voltaje de la fase A1.

Fuente: Matlab Simulink.

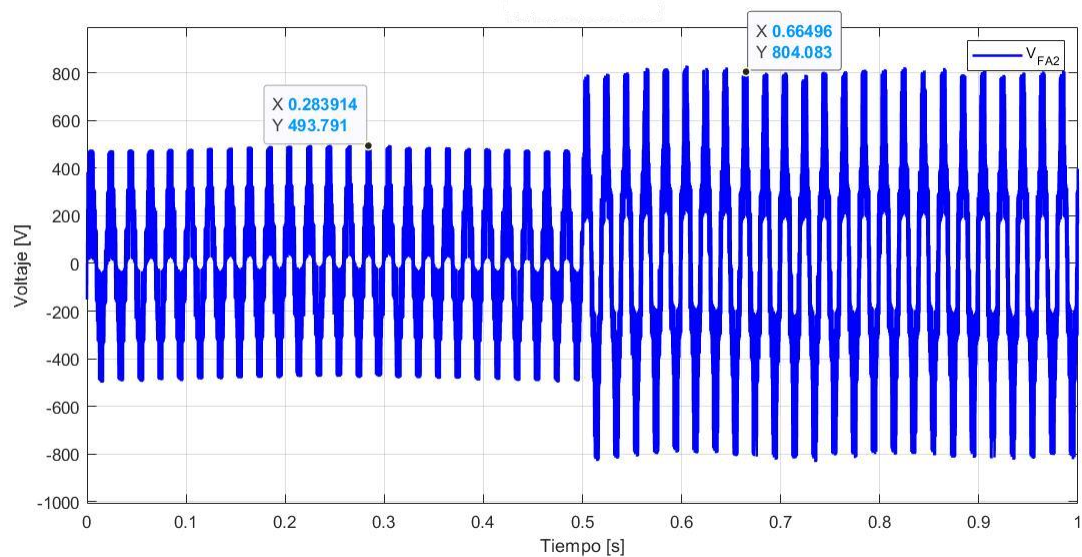


Figura 4.57. Voltaje de la fase A2.

Fuente: Matlab Simulink.

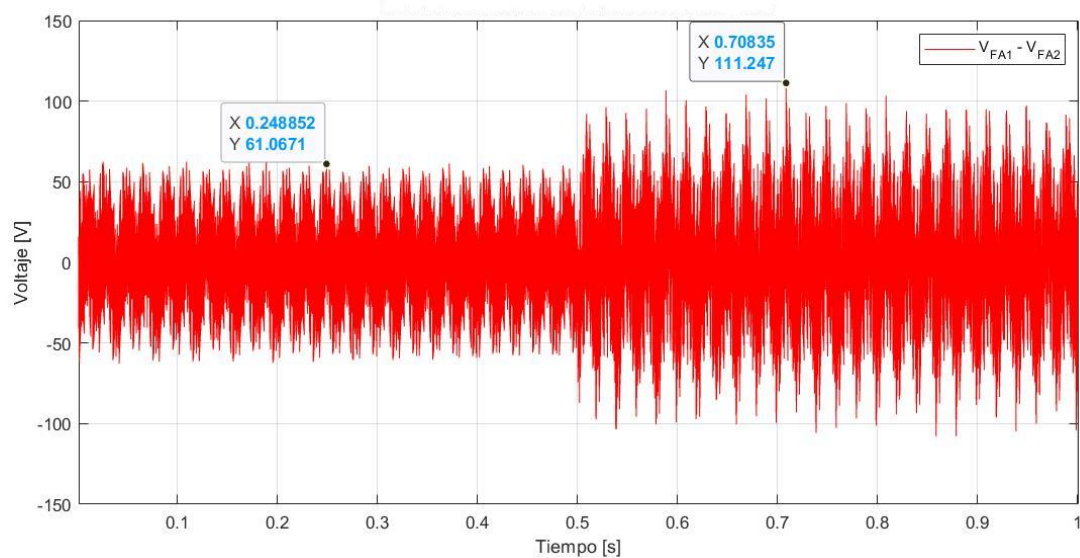


Figura 4.58. Diferencia de voltaje entre las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

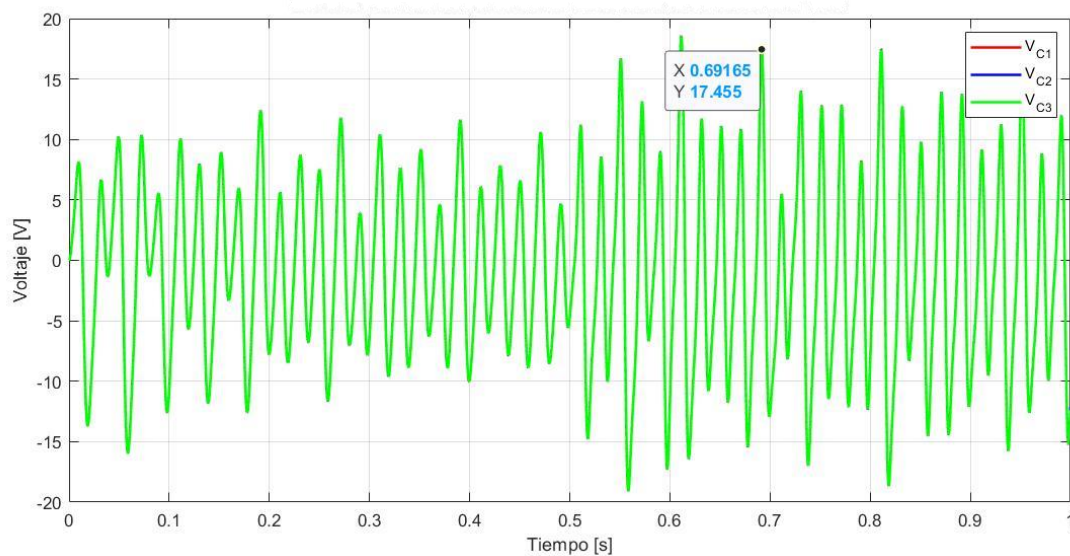


Figura 4.59. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

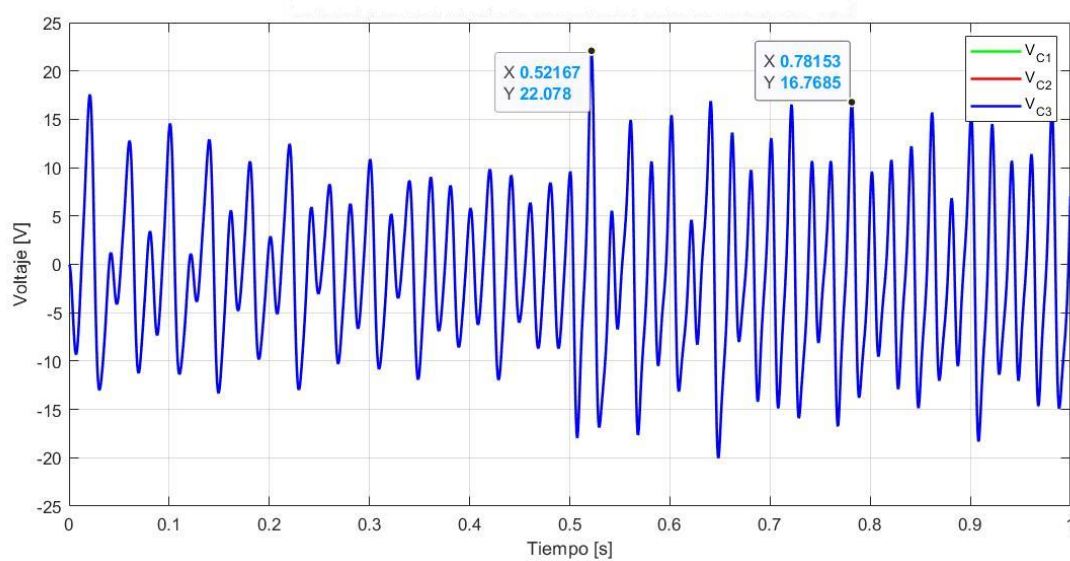


Figura 4.60. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

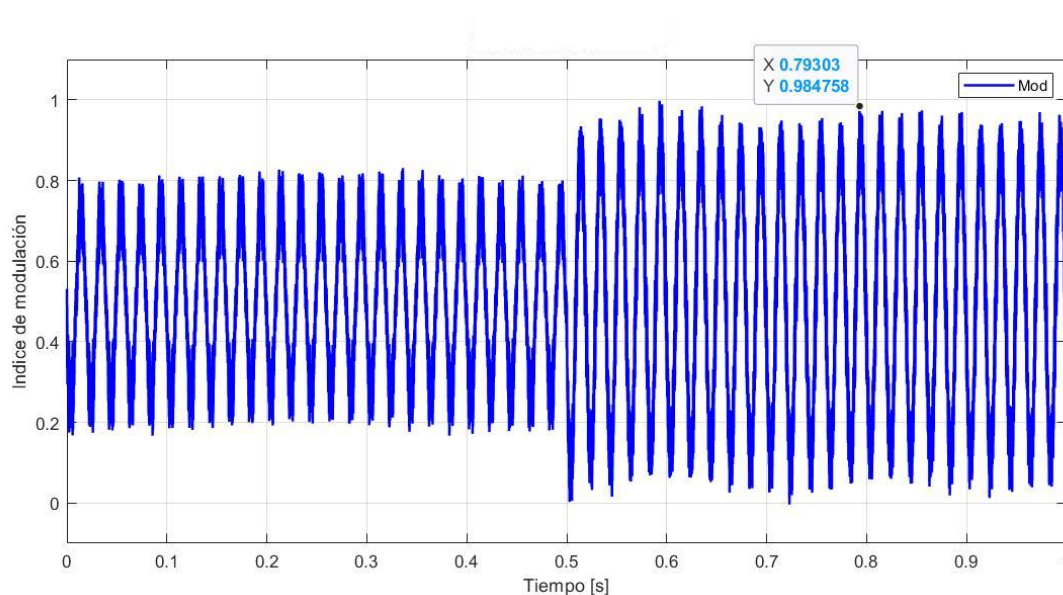


Figura 4.61. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink.

Se observa que mientras mayor es la diferencia entre las inductancias de ramas, mayor será la diferencia entre los voltajes de los condensadores y, por ende, la diferencia entre los voltajes de rama. A pesar de esto, no ocurre una sobre modulación en el sistema, salvo por un pequeño instante de tiempo en uno de los casos. A pesar de esto el sistema puede seguir funcionando de forma estable. Otro punto a destacar es que las diferencias de voltaje en los capacitores se presentan entre ramas y no de forma interna en cada rama, esto quiere decir que los condensadores internos de cada rama no difieren entre sí. De esta forma se evidencia que la inductancia afecta principalmente al voltaje que se presenta en los capacitores y que mientras menor sea la diferencia entre las inductancias de ramas, menor será la desviación de los voltajes de los condensadores entre las fases.

4.4.3 Caso 3: Variación de la resistencia

Para este caso se tienen como parámetros base una frecuencia de conmutación de 3 [kHz] y una inductancia de rama igual a 15 [mH], de esta forma se variará la resistencia de rama con diferentes valores y proporciones, con el fin de estudiar cómo afecta al circuito ya conocido.

$$A) R_1 = 2 * R_2 = 10 [\Omega]$$

Se observa que tanto en el voltaje de rama A1 como en el A2, que se muestran en las figuras 4.62 y 4.63, respectivamente, presentan peaks importantes que en casos anteriores no se habían constatado. En la figura 4.64 se evidencia la diferencia que existe entre los voltajes de rama A1 y A2, donde se presenta una diferencia notoria pero estable si se compara con los resultados obtenidos en las variaciones de inductancia.

Las diferencias en los voltajes presentes en los condensadores de las ramas positivas y negativas se presentan en las figuras 4.65 y 4.66, respectivamente. Se advierte que al variar la resistencia entre las ramas los valores de voltaje en los condensadores difieren entre ramas, y se debe tener en cuenta que la estabilidad del sistema depende netamente de la estabilidad del voltaje de los condensadores. Ahora si se nota la figura 4.67, la diferencia de resistencia entre las ramas aumenta de forma notoria el índice de modulación.

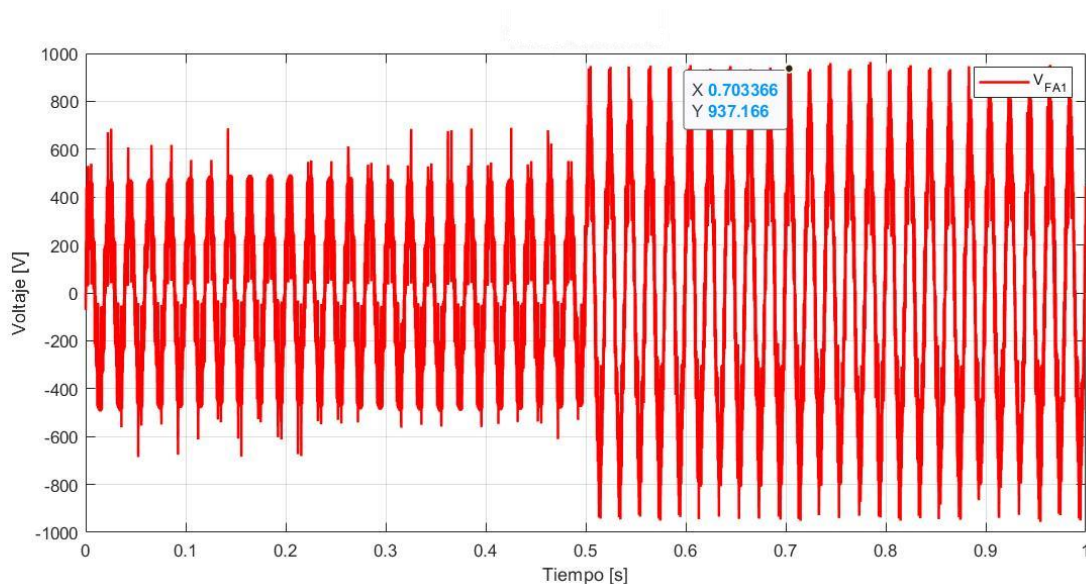


Figura 4.62. Voltaje de la fase A1.

Fuente: Matlab Simulink.

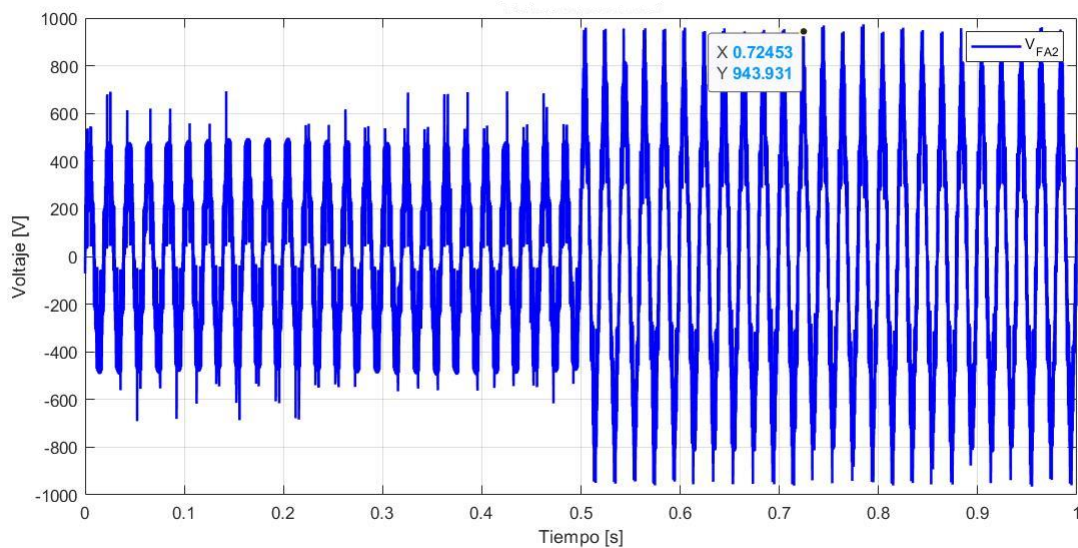


Figura 4.63. Voltaje de la fase A2.

Fuente: Matlab Simulink.

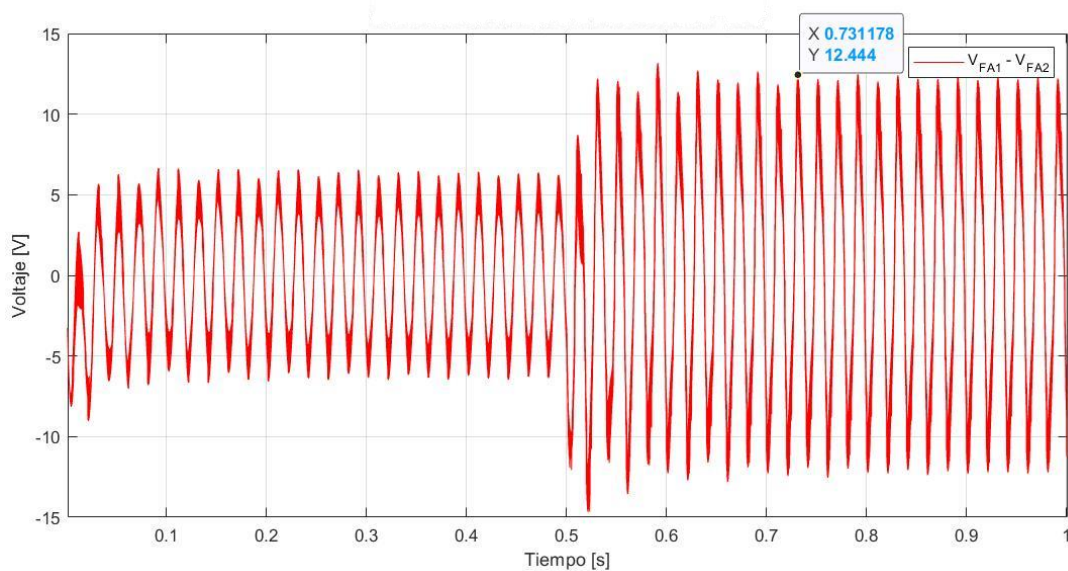


Figura 4.64. Diferencia de voltaje entre las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

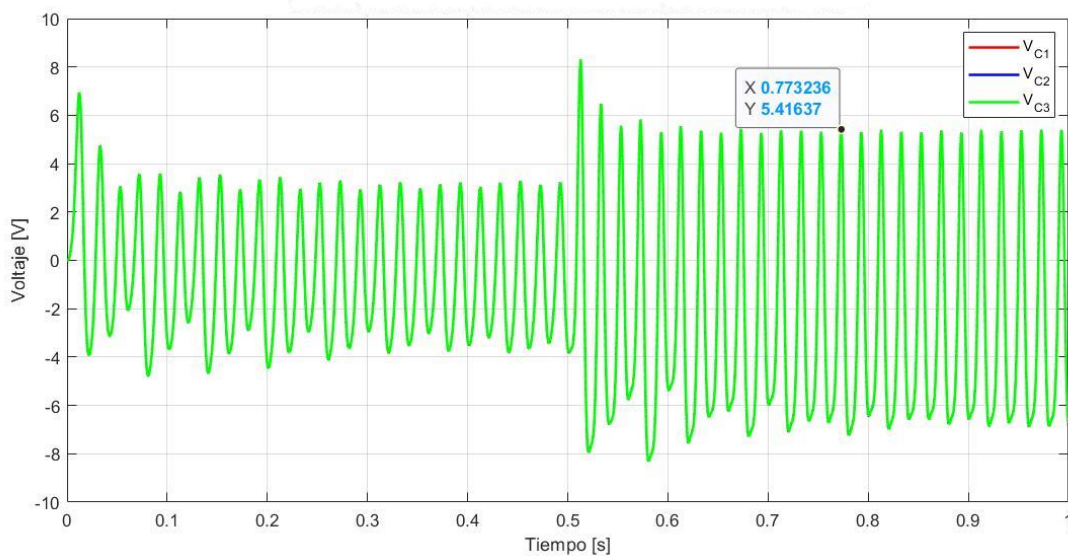


Figura 4.65. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

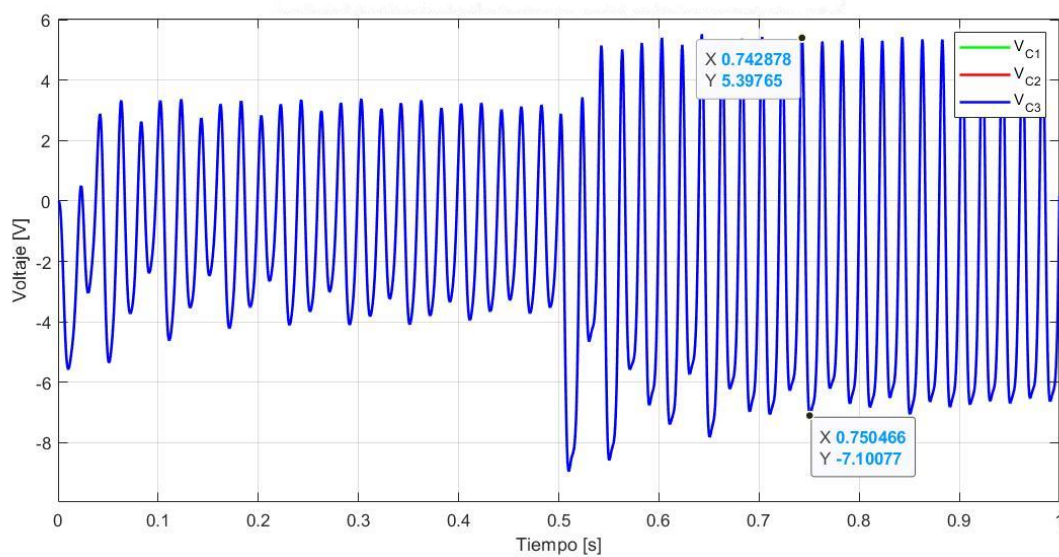


Figura 4.66. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

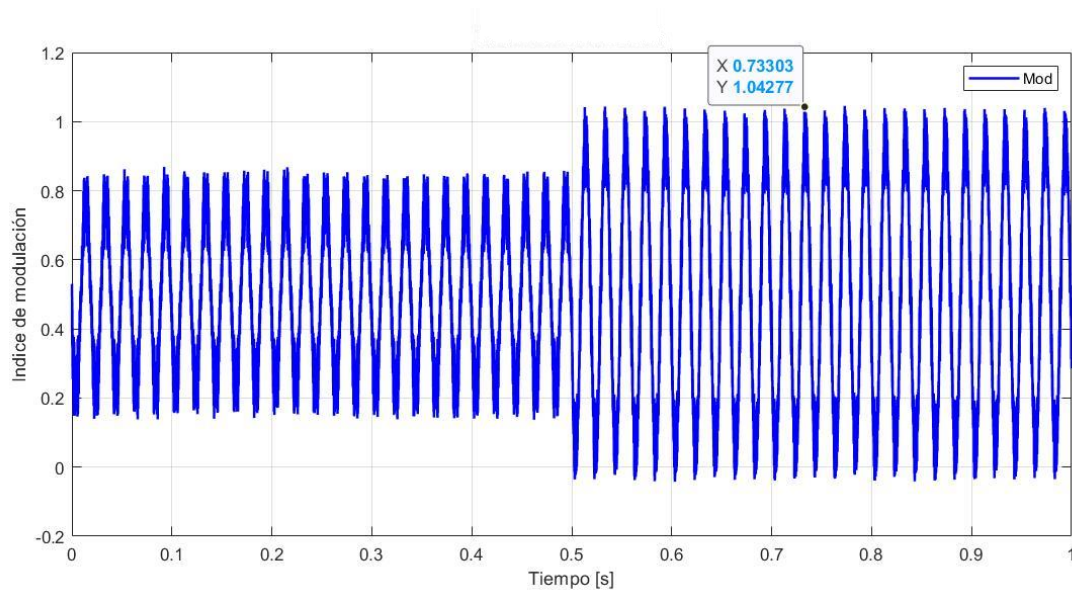


Figura 4.67. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink.

B) $R_1 = 2 * R_2 = 15 [\Omega]$

Al aumentar en un 50% los parámetros de resistencia, se observa que los problemas mencionados anteriormente se incrementan, teniendo mayores peaks en los voltajes de las fases A1 y A2, como se nota en las figuras 4.68 y 4.69, respectivamente. El aumento de estos valores es de aproximadamente un 2.85%, en consecuencia, existe una mayor diferencia entre los voltajes de las fases internas de la fase A, como se evidencia en la figura 4.70, incluso el impacto de carga se ve que afecta en mayor medida al no tener resistencias iguales entre las ramas, no obstante, si se compara con la figura 4.64 se percibe que en este caso existen algunos peaks y que el aumento de la diferencia es de aproximadamente un 17%. En cuanto a los voltajes presentes en los condensadores de las ramas positivas y negativas que se ven en las figuras 4.71 y 4.72, respectivamente, se advierte que se incrementan las diferencias entre cada rama. En comparación al caso anterior se tiene un aumento de aproximadamente el 7.7% para la rama positiva y del 9.3% para la rama negativa. A pesar de este aumento en la diferencia que existe entre los condensadores de las ramas, no afecta al índice de modulación de manera significativa, teniendo un aumento de solo el 0.33%, aproximadamente, al contrastar la figura 4.73 con la figura 4.67.

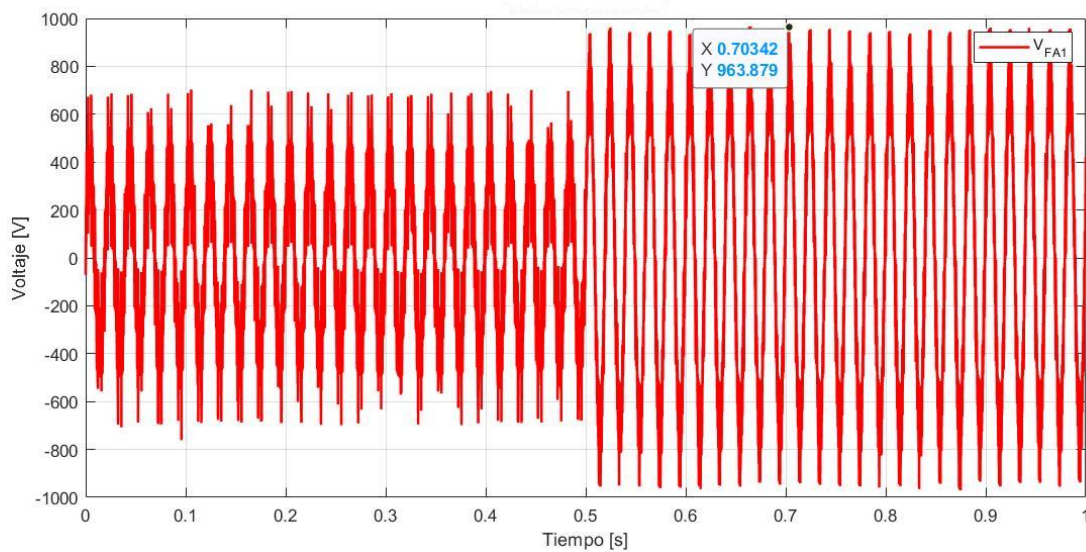


Figura 4.68. Voltaje de la fase A1.

Fuente: Matlab Simulink.

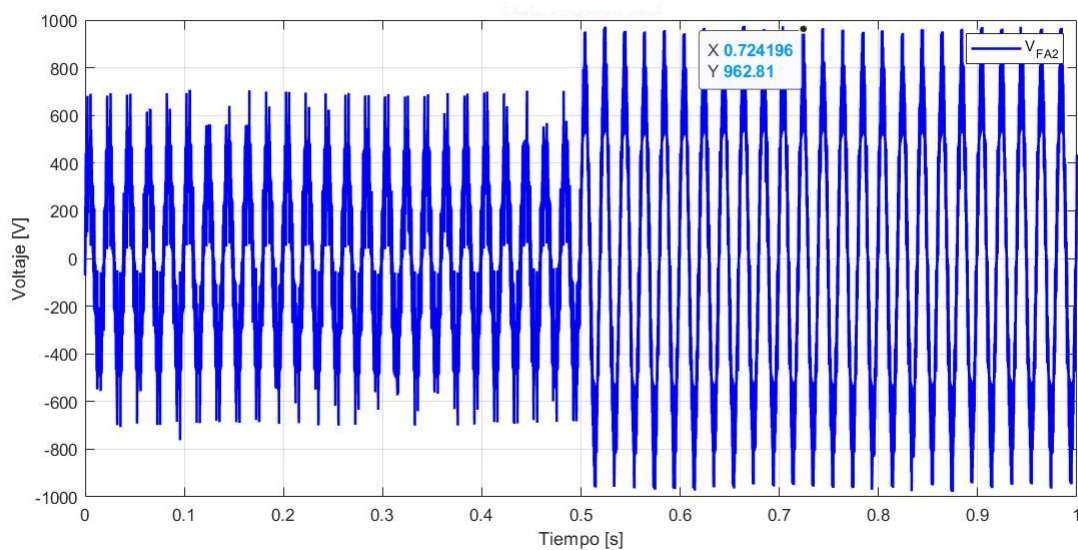


Figura 4.69. Voltaje de la fase A2.

Fuente: Matlab Simulink.

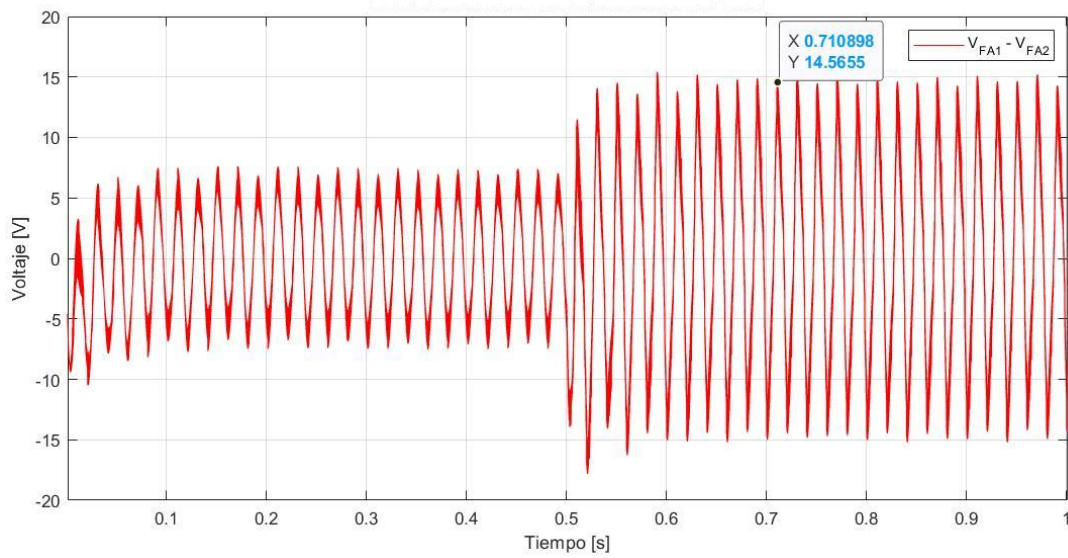


Figura 4.70. Diferencia de voltaje de las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

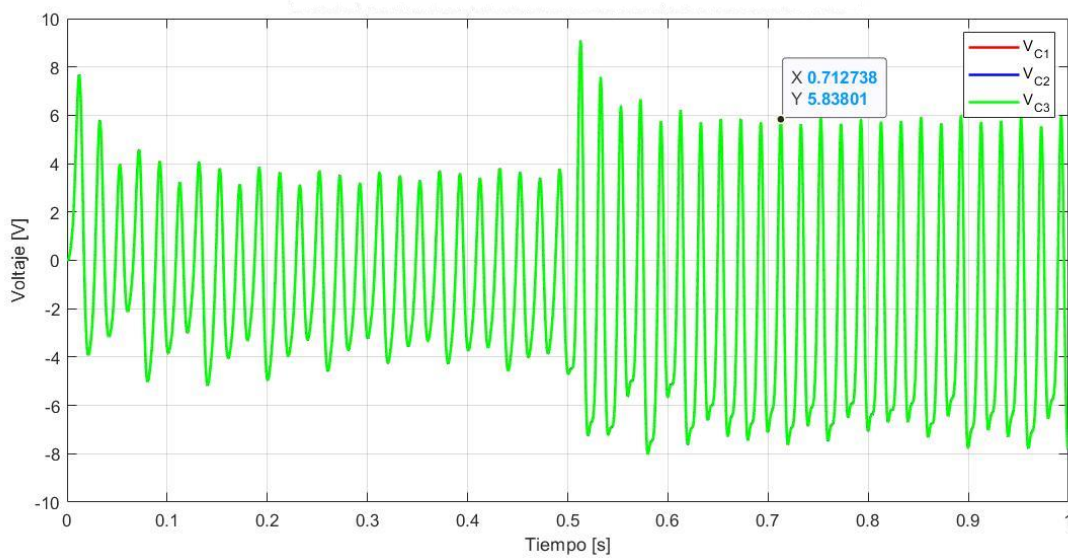


Figura 4.71. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

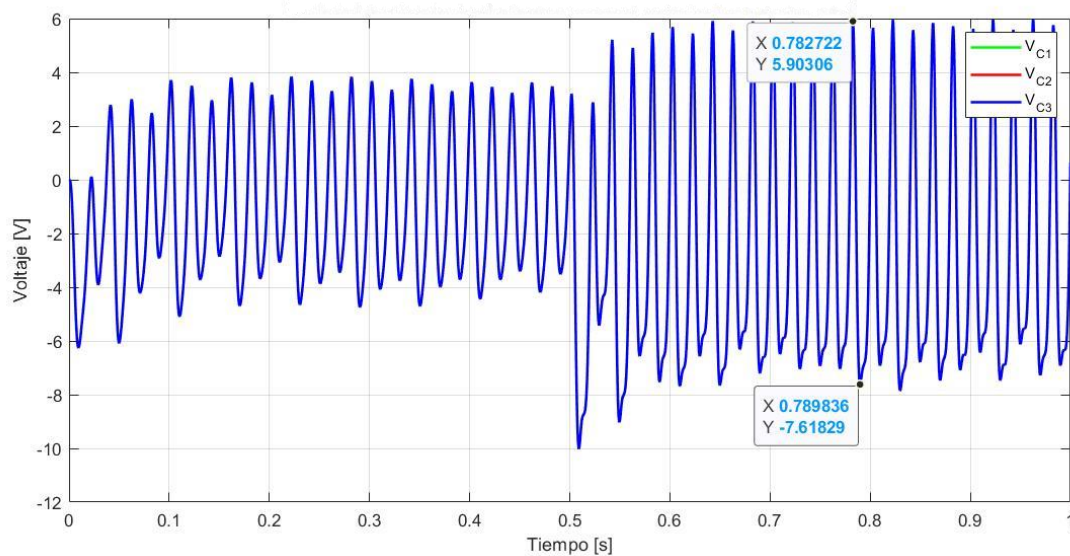


Figura 4.72. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

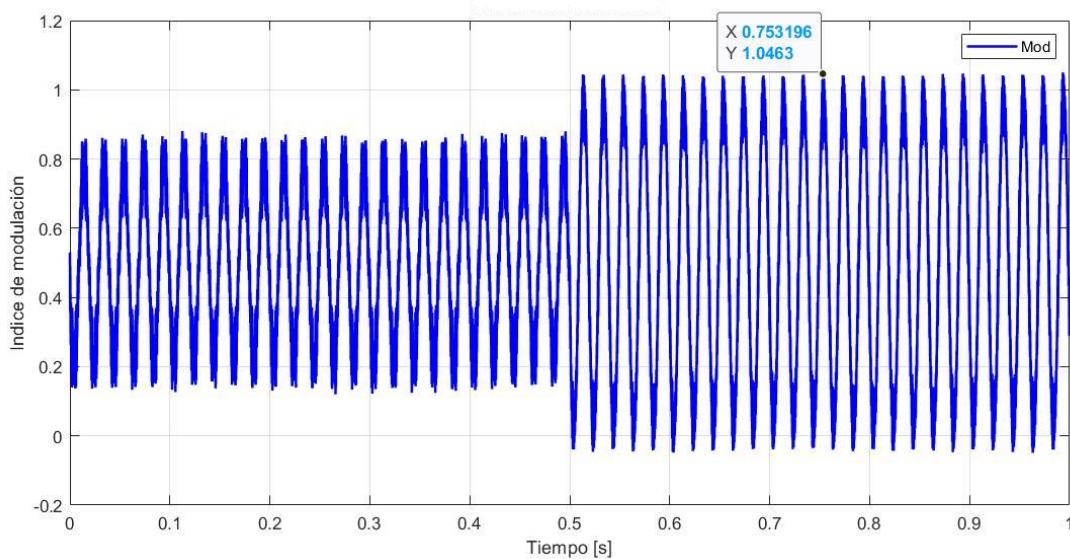


Figura 4.73. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink.

C) $R_1 = 2 * R_2 = 20 [\Omega]$

En las figuras 4.74 y 4.75 se evidencia que mientras más se aumenta la resistencia, los voltajes de ambas formas de onda presentan peaks inesperados con mayor frecuencia. Estos peaks en los voltajes de fase generan un aumento en la diferencia entre los voltajes de fase que se presenta en la figura 4.76, que al contrastarla con la figura 4.70 se tiene un aumento del 12.8%. Ahora, al observar la diferencia de voltaje presente en los condensadores que se ve en la figura 4.77, se observa en la rama positiva que, al aumentar la resistencia de las ramas, esto no tiene un gran impacto si se compara con el caso anterior, lo mismo ocurre en la figura 4.78 donde se presentan las diferencias que se obtienen en las ramas negativas, donde se tiene un incremento del 0.96% para la diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva y del 1.37% para la rama negativa. Se observa que con el aumento de esta diferencia en las resistencias de rama se tiene una pequeña disminución del índice de modulación del 0.36%, en comparación con el caso anterior.

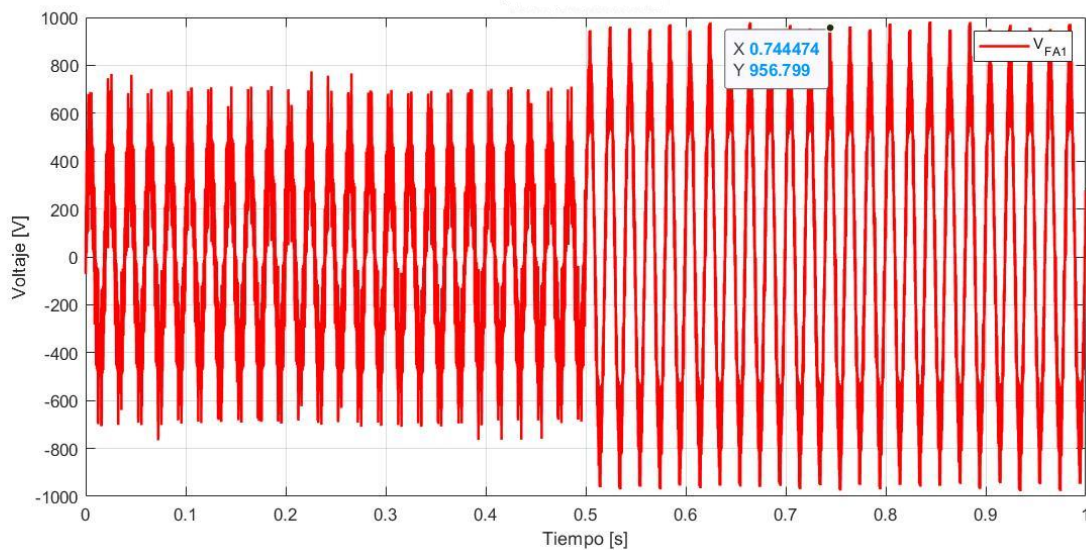


Figura 4.74. Voltaje de la fase A1.

Fuente: Matlab Simulink.

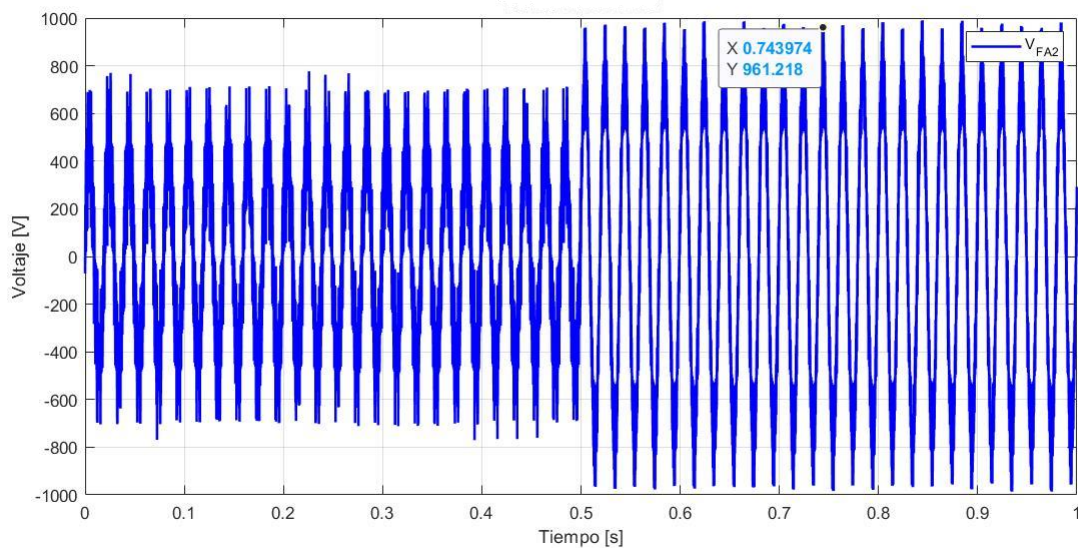


Figura 4.75. Voltaje de la fase A2.

Fuente: Matlab Simulink.

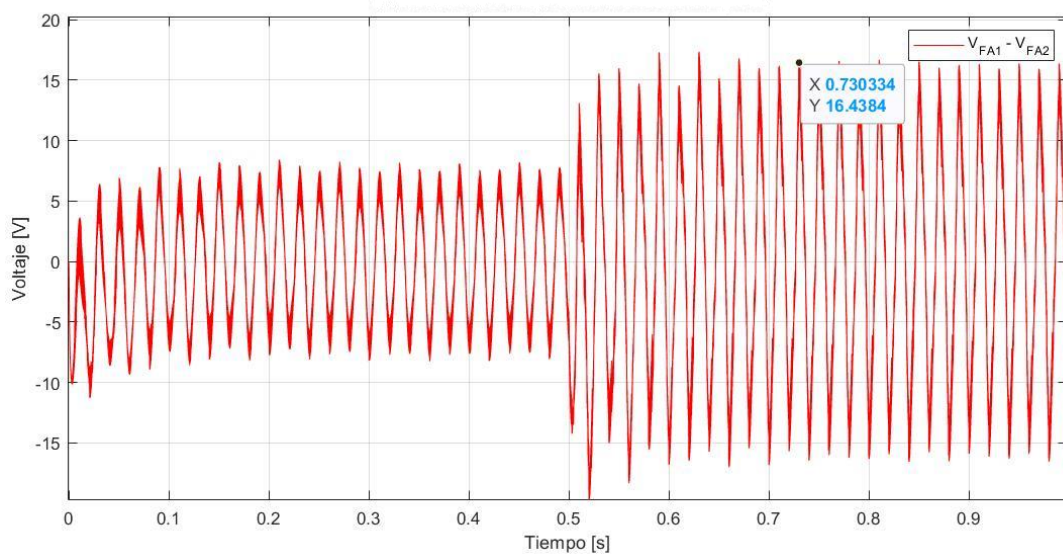


Figura 4.76. Diferencia de voltaje entre las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

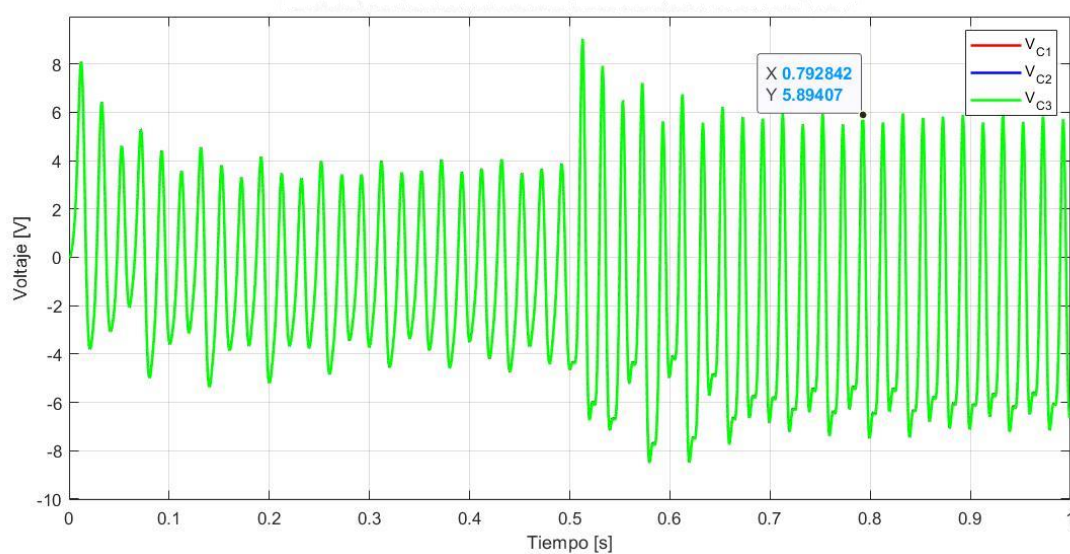


Figura 4.77. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

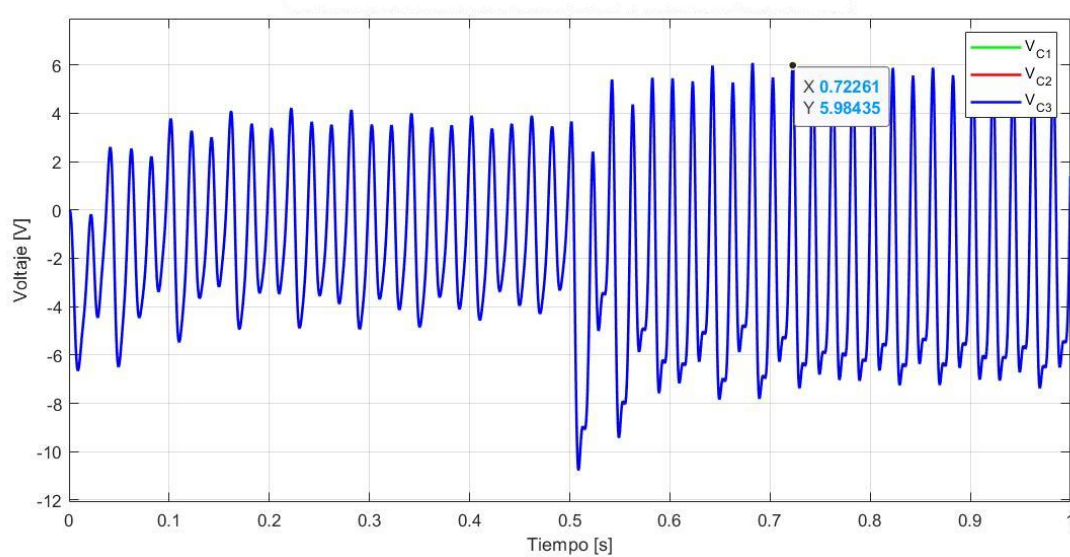


Figura 4.78. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

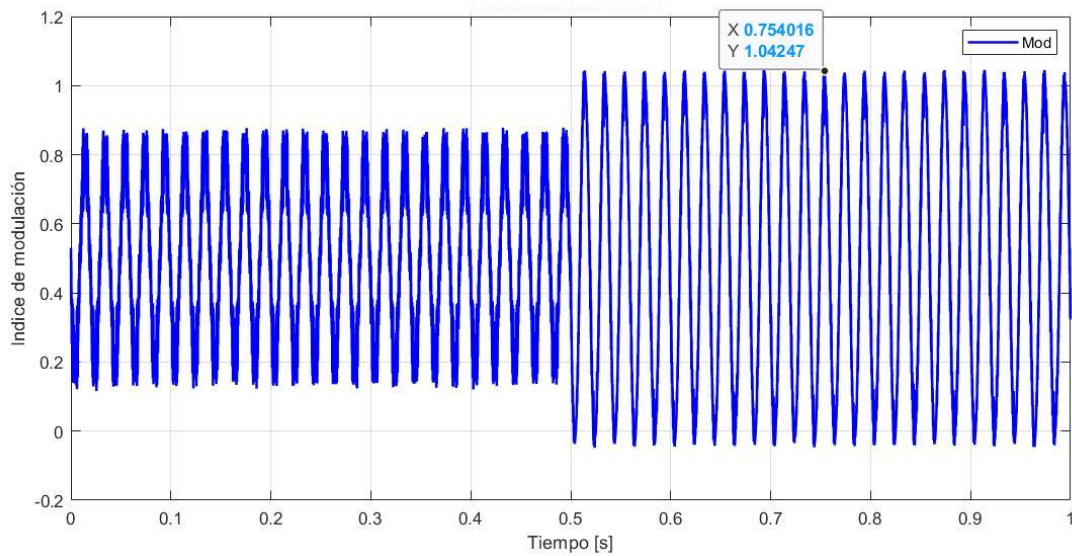


Figura 4.79. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink.

D) $R_1 = 10 * R_2 = 20 [\Omega]$

Para este caso se cambia la proporcionalidad de resistividad en cada rama, se constata que la distorsión presente en los voltajes de ramas que se ven en las figuras 4.80 y 4.81 se percibe disminuida con respecto al caso anterior, pero la diferencia entre sí crece en un 105.06%, cómo se observa en la figura 4.82 al compararla con la figura 4.76. En cuanto a la diferencia de voltajes presentes en los condensadores que se muestran en las figuras 4.83 y 4.84, se evidencia que al aumentar la diferencia de resistividad entre las ramas la diferencia de estos, también aumenta en 148.93% para la rama positiva y un 134.56% en la rama negativa. A pesar de esto, se aprecia en la figura 4.85 que el índice de modulación decrece levemente en comparación con el caso planteado en el punto C, disminuyendo en un 0.78%.

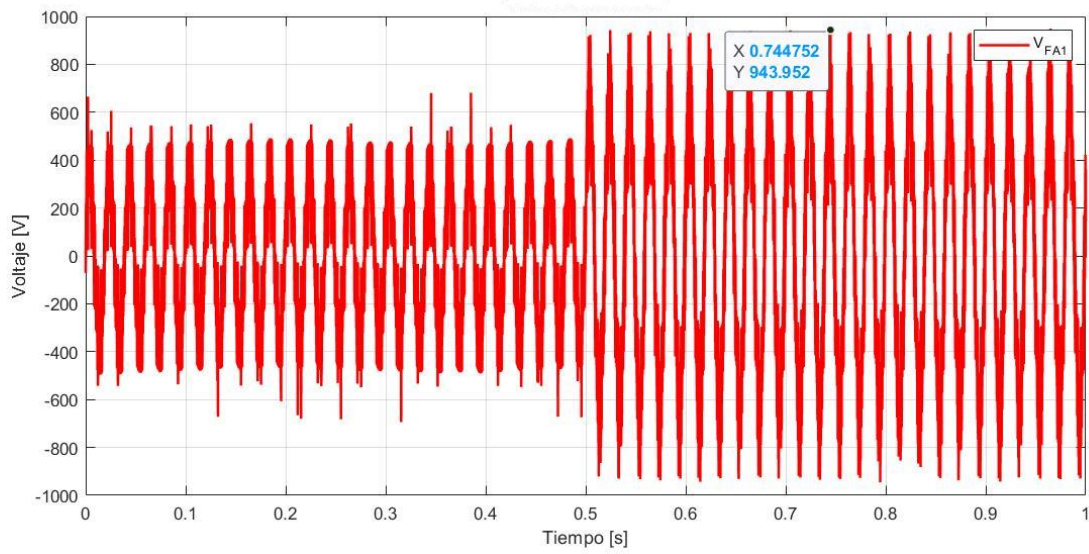


Figura 4.80. Voltaje de la fase A1.

Fuente: Matlab Simulink.

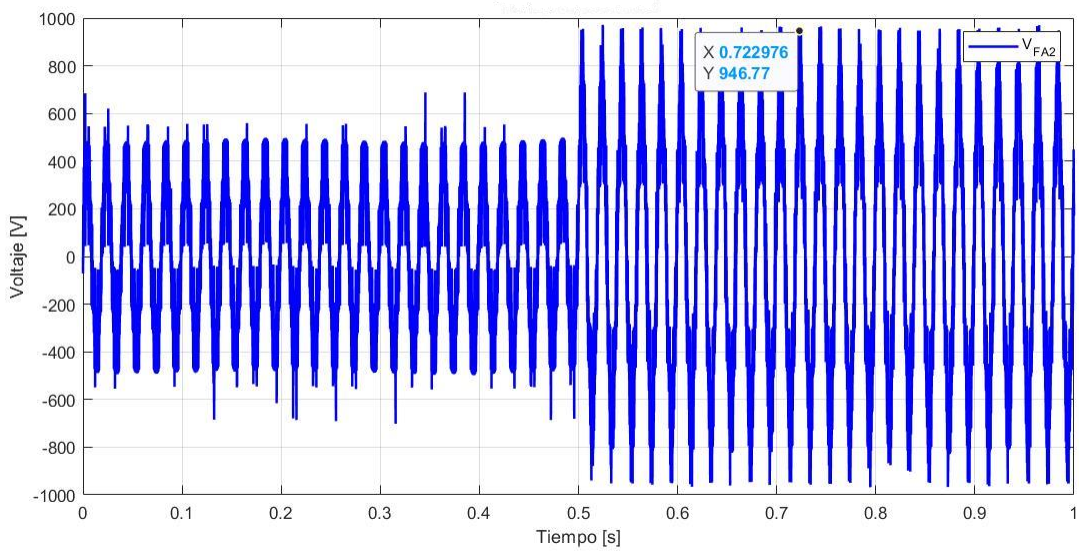


Figura 4.81. Voltaje de la fase A2.

Fuente: Matlab Simulink.

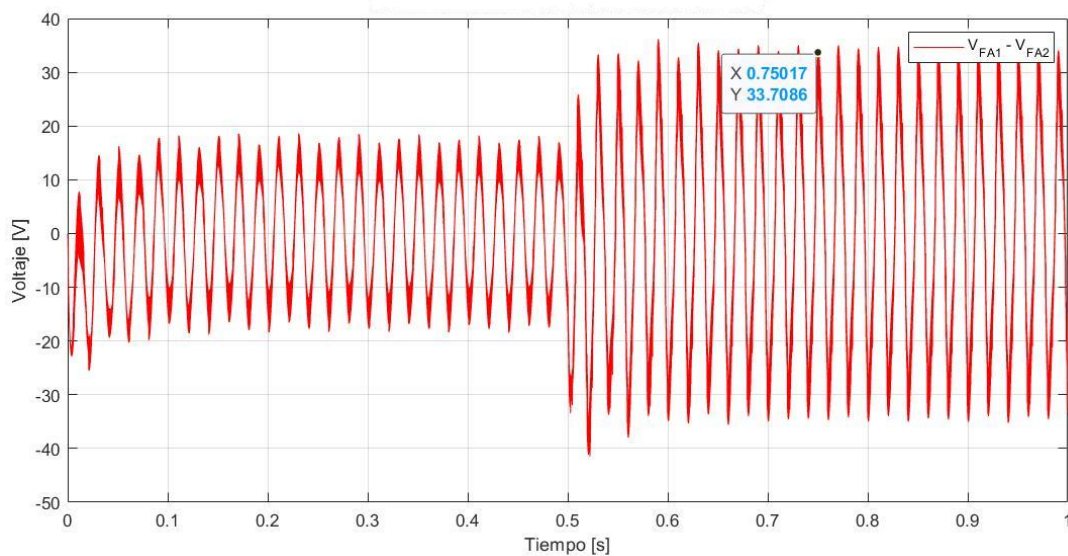


Figura 4.82. Diferencia de voltaje entre las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

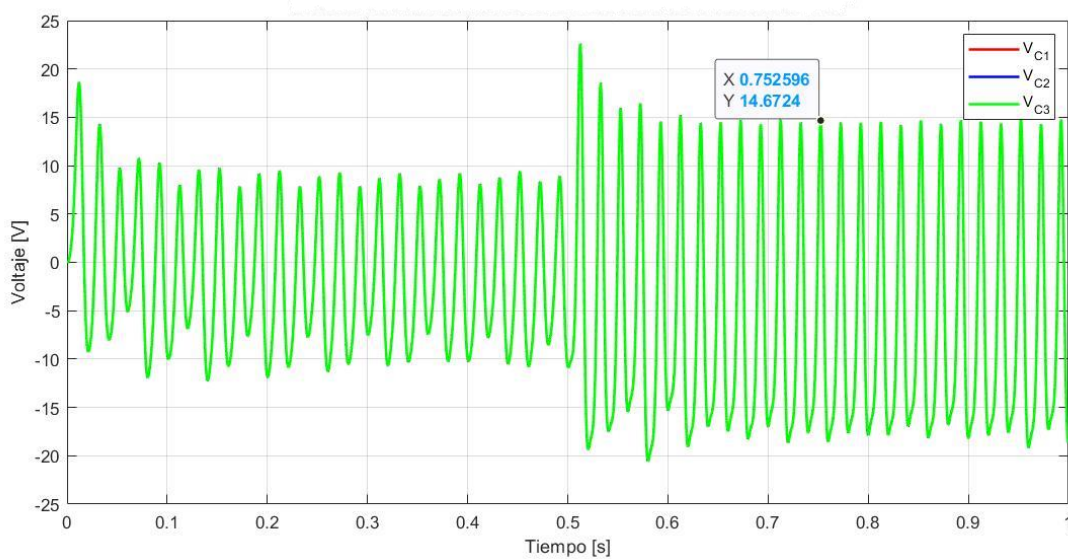


Figura 4.83. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

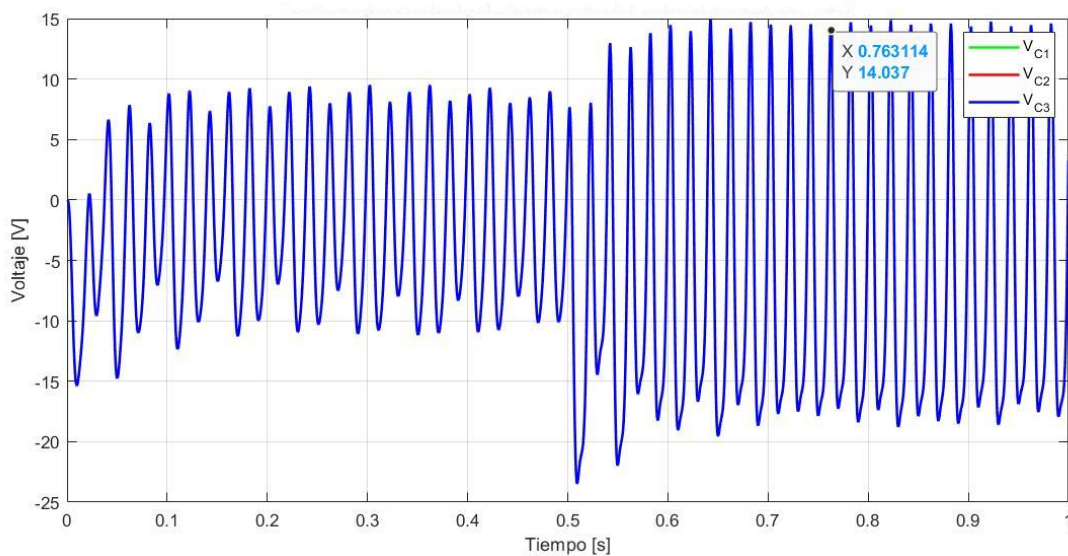


Figura 4.84. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

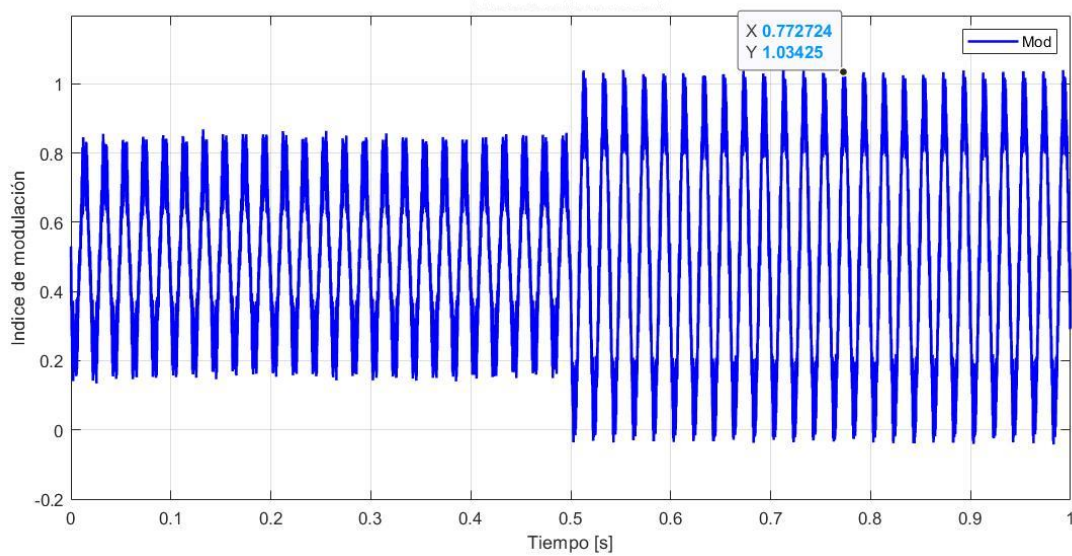


Figura 4.85. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink.

E) $R_1 = 20 * R_2 = 20 [\Omega]$

Como se observa en las figuras 4.86 y 4.87, donde se presentan los voltajes de ramas A1 y A2, al aumentar la diferencia entre las resistencias de ramas también aumenta la distorsión presente en estas y, en consecuencia, aumenta levemente la diferencia de los voltajes de las ramas A1 y A2 en un 11.23% en sus peaks, como se ve en la figura 4.88, en comparación con el caso presentado en la figura 4.82.

En cuanto a las figuras 4.89 y 4.90, se aprecia que la diferencia de voltajes de los condensadores difiere aún más entre ramas y aumenta levemente los valores peaks de las diferencias en un 10.16% para las ramas positivas y un 15.65% en las ramas negativas. A pesar de lo anterior, en la figura 4.91 se observa que el índice de modulación se ve disminuido en un 0.29% en comparación con el caso mostrado en el punto D.

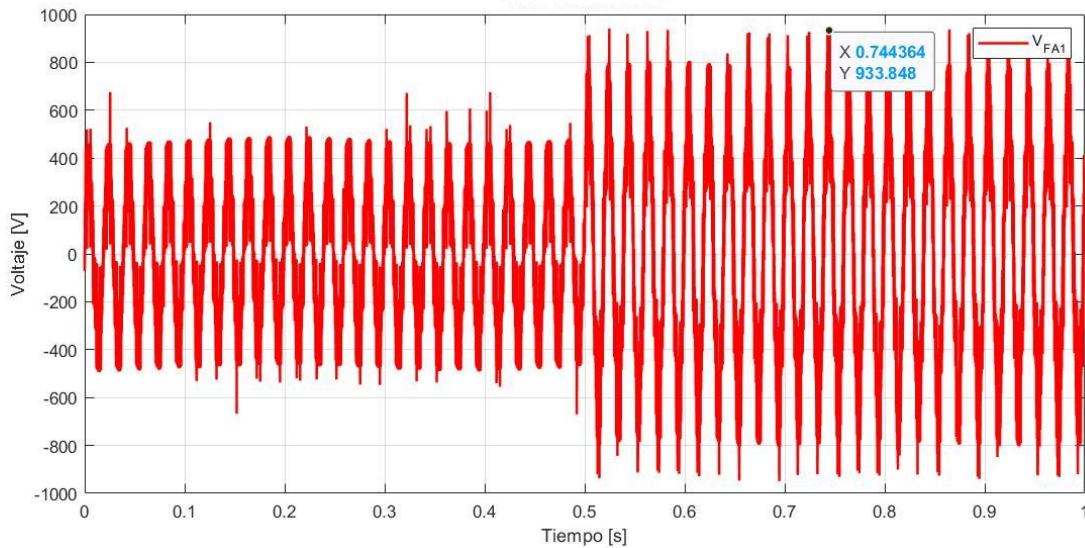


Figura 4.86. Voltaje de la fase A1.

Fuente: Matlab Simulink.

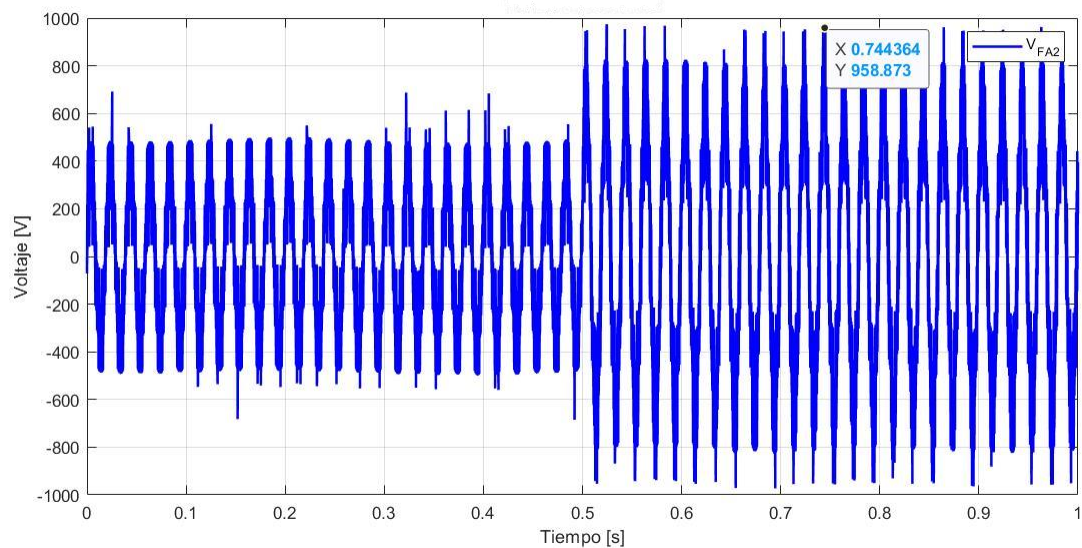


Figura 4.87. Voltaje de la fase A2.

Fuente: Matlab Simulink.

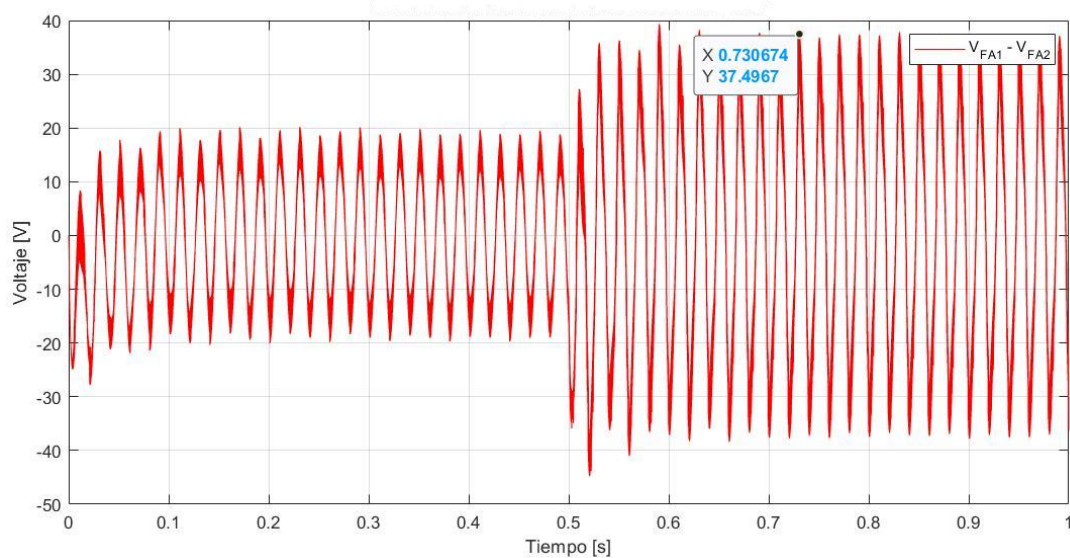


Figura 4.88. Diferencia de voltaje entre las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

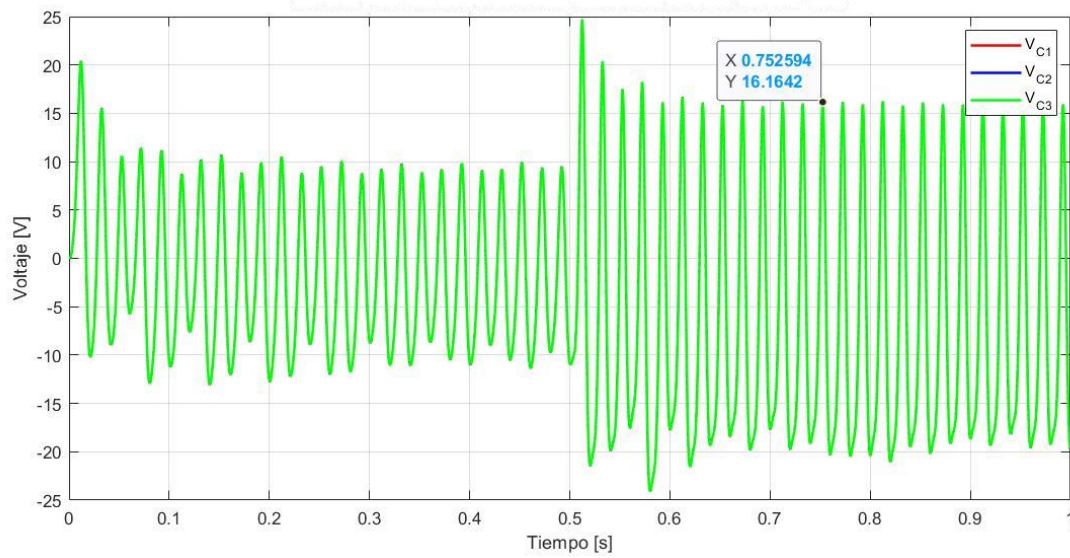


Figura 4.89. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

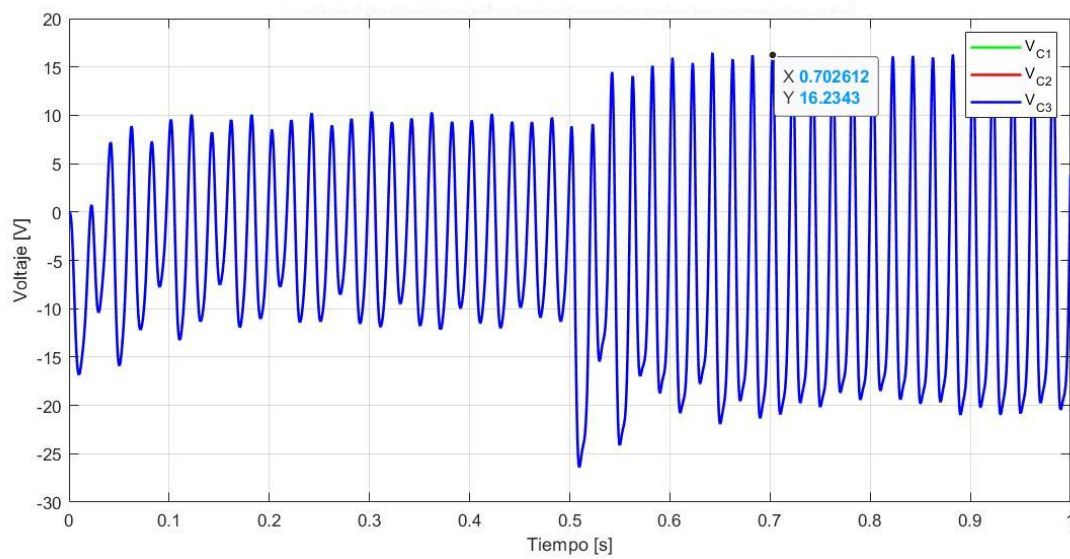


Figura 4.90. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

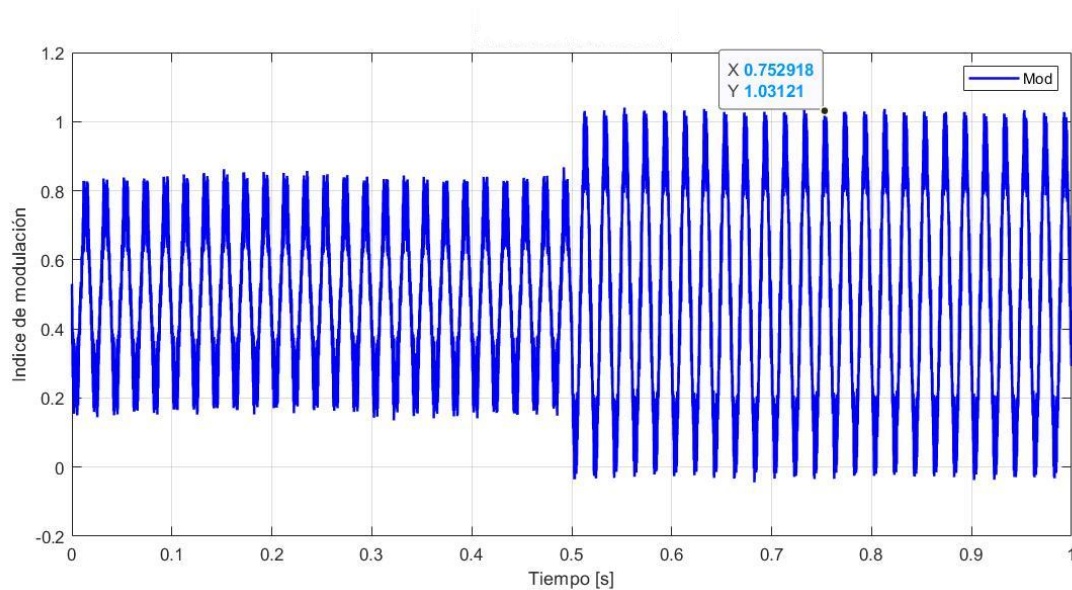


Figura 4.91. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink.

F) $R_1 = 100 * R_2 = 20 [\Omega]$

Para este caso se decidió implementar una diferencia excesiva y así constatar qué tanto afecta la diferencia que existe entre las resistividades de las ramas. Como se evidencia en las figuras 4.92, 4.93 y 4.94 no se presentan grandes diferencias con respecto a cuando se tenía que $R_1 = 20 * R_2$, de hecho, la diferencia de voltajes presentada en la figura 4.94 solo crece un 3.02% en comparación con la figura 4.88. En cuanto a la diferencia entre los voltajes presentes en los condensadores de las ramas positivas y negativas que se muestran en las figuras 4.95 y 4.96 respectivamente, se observa un leve aumento en sus valores con respecto a lo que se nota en las figuras 4.89 y 4.90, donde se presentan los valores obtenidos en la rama positiva y negativa, respectivamente, presentando un aumento del 8.18% en el caso de la rama positiva y un 6.75% en el caso de la diferencia presente en las ramas negativas. Como se aprecia este aumento no es significativo. Por su parte, el índice de modulación que se presenta en la figura 4.97 se ve disminuido en un 0.009% con respecto a la figura 4.91, lo cual es mínimo, y con ello aún se está en presencia de una sobre modulación y, por ende, ante un sistema inestable.

Se podría decir que mientras mayor sea la diferencia entre las resistencias de ramas, se tendrá una mayor desviación de los voltajes de los condensadores, pero entre ramas y no dentro de las mismas. En cuanto a las diferencias de voltajes de las ramas que se presentan, vemos que llegando a una diferencia de 20:1 o más entre cada rama estas dejan de tener un aumento significativo, por lo que si

se tiene una diferencia de 20:1 o 100:1 entre las ramas, se podrían considerar como casos similares, aunque no lo son y, si presentan leves diferencias de aumento en los voltajes de los condensadores tanto en ramas positivas como negativas de aproximadamente un 10%. En cuanto al índice de modulación, se ve que este no es afectado por la gran diferencia de resistividad entre las ramas, si no que se nota, principalmente, afectado por la resistencia presente en las ramas mientras mayor es la resistencia de cada rama, mayor es el índice de modulación.

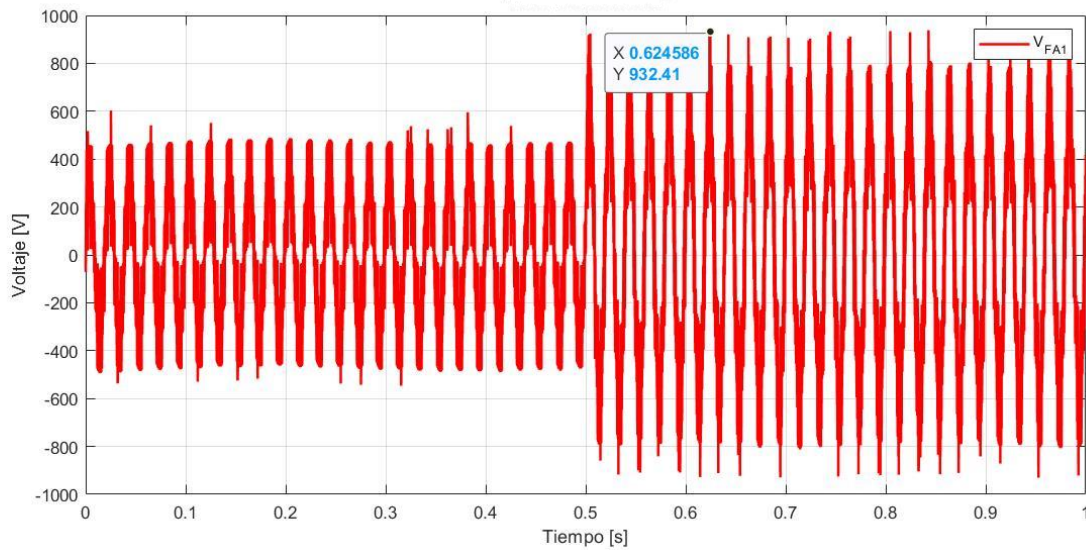


Figura 4.92. Voltaje de la fase A1.

Fuente: Matlab Simulink.

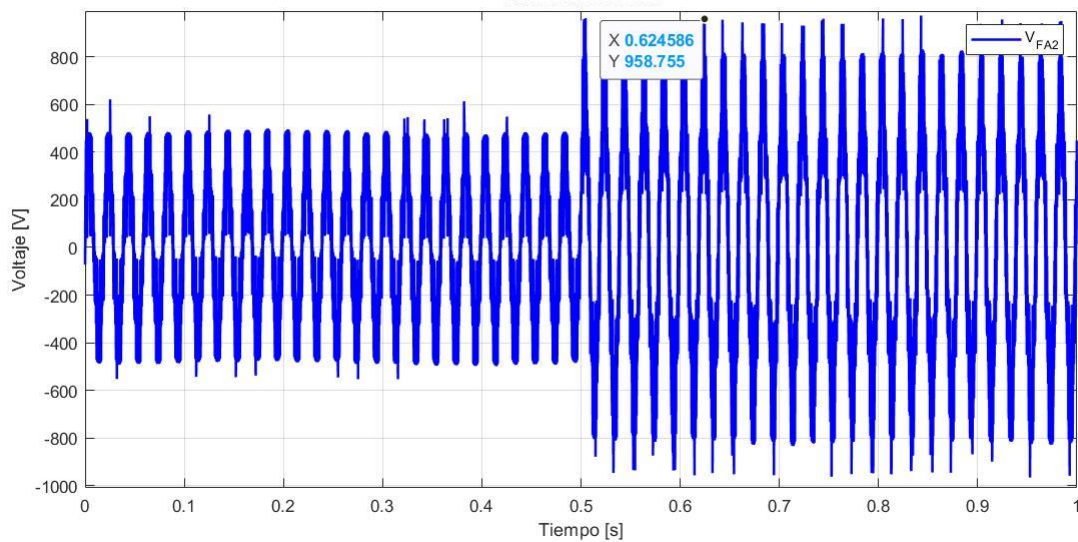


Figura 4.93. Voltaje de la fase A2.

Fuente: Matlab Simulink.

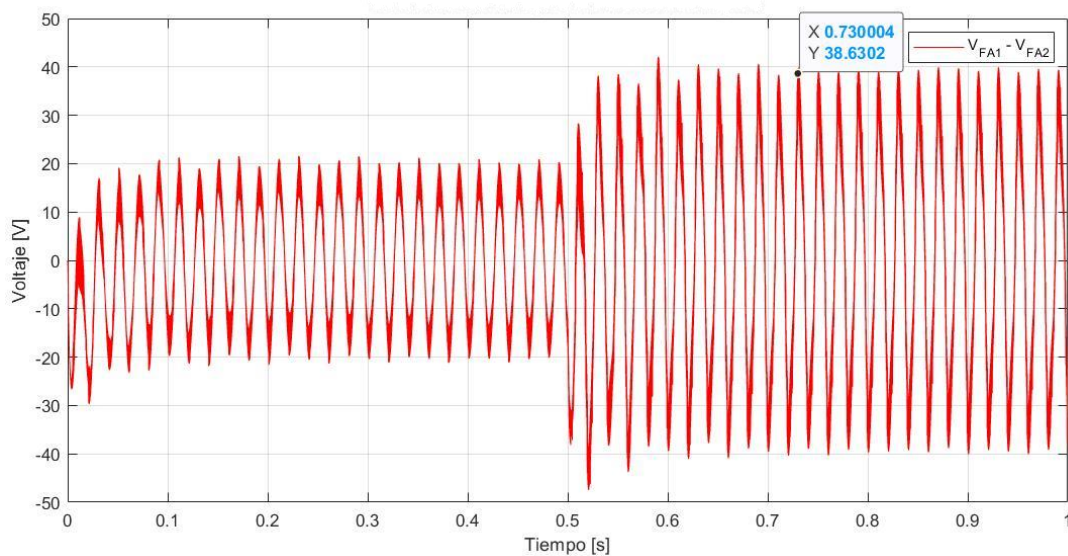


Figura 4.94. Diferencia de voltaje entre las fases A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

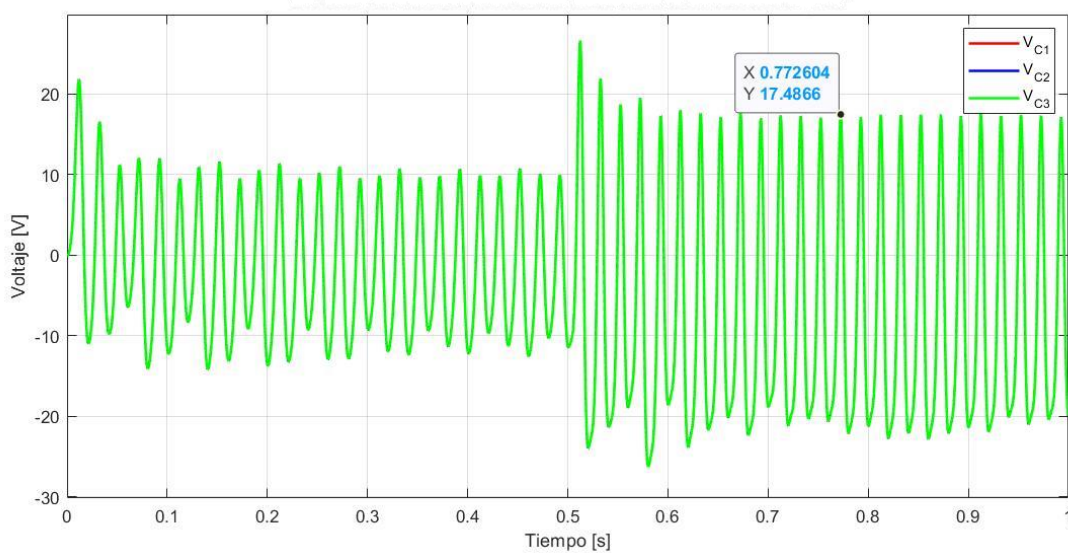


Figura 4.95. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama positiva A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

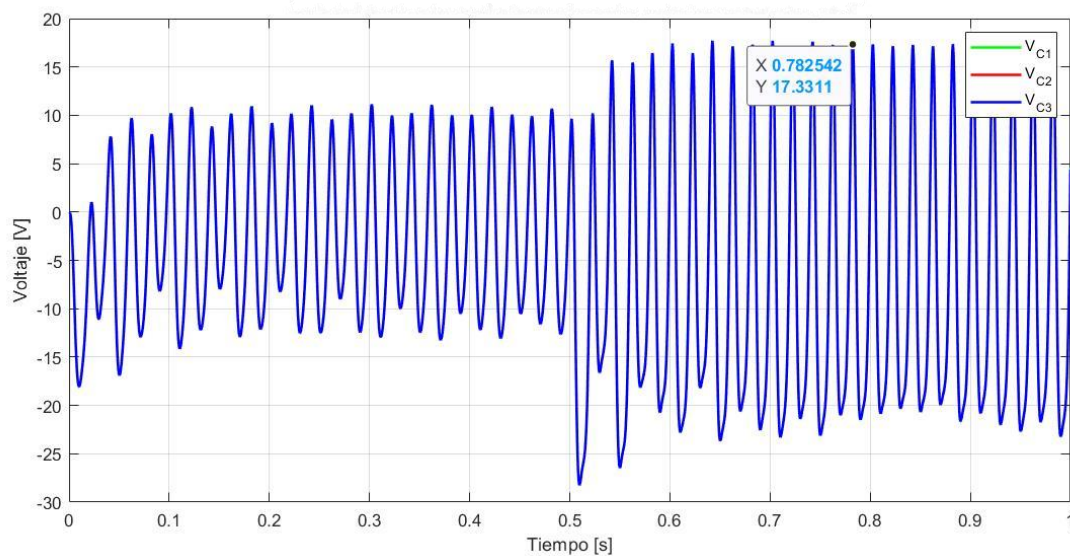


Figura 4.96. Diferencia de voltaje en los condensadores de la rama negativa A1 y A2.

Fuente: Matlab Simulink.

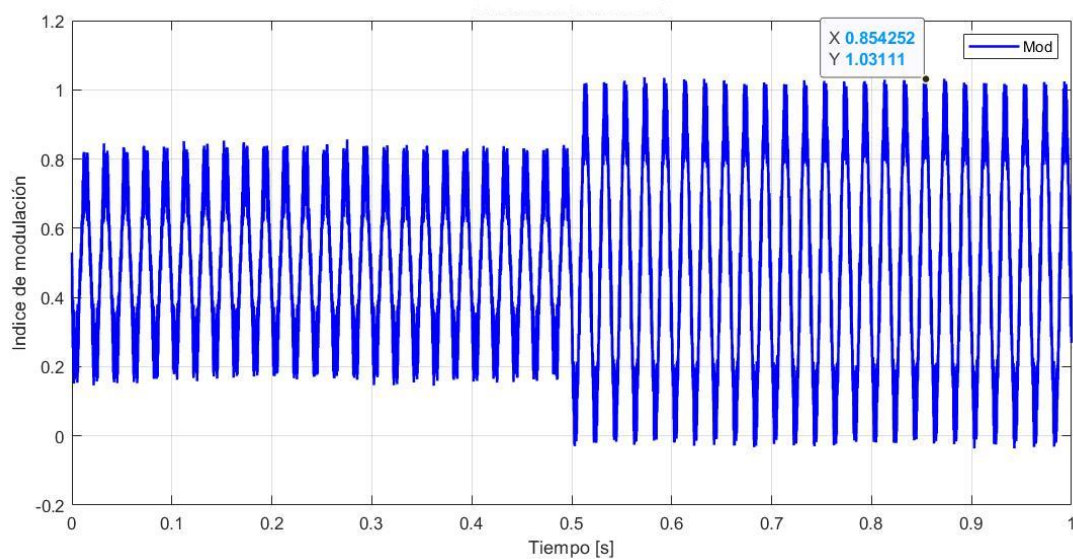


Figura 4.97. Índice de modulación.

Fuente: Matlab Simulink.

4.5. Aplicación de inductores acoplados en el sistema MMSPC

En las simulaciones anteriores se apreció que, al variar las inductancias de las fases internas del sistema, se generaba una diferencia notoria entre sus corrientes y voltajes de salida. En esta parte del proyecto se utilizan inductores acoplados, donde dependiendo de la conexión, es posible eliminar la corriente diferencial, lo que implicaría una reducción de la corriente que circula entre las fases en paralelo y, por ende, mejoraría la eficiencia y balance del sistema.

En este apartado del trabajo, se busca constatar si estas diferencias son reducidas y, de ser así, determinar el porcentaje de reducción para verificar si es conveniente el cambio de inductores separados por inductores acoplados. De esta forma, se realiza una comparativa entre la utilización de inductores acoplados y separados para el sistema MMSPC, con el fin de reducir la corriente circulante de paralización del sistema. Se espera corroborar si el sistema posee una mayor estabilidad al incorporar estos elementos en el circuito mostrado en la figura 4.98, donde los inductores de las ramas internas de cada fase que se encuentran marcados en amarillo, son reemplazados por inductores acoplados.

Se compararán los resultados utilizando los valores de la tabla 4.1, tanto para un circuito con inductores acoplados como para uno con inductores separados. Para tener claridad con los datos que se presentan en la tabla 4.1 se han marcado los diferentes elementos pasivos del sistema, teniendo así las resistencias e inductores de rama en gris, resistencia e inductores de fase en amarillo y resistencias e inductores de carga en rojo.

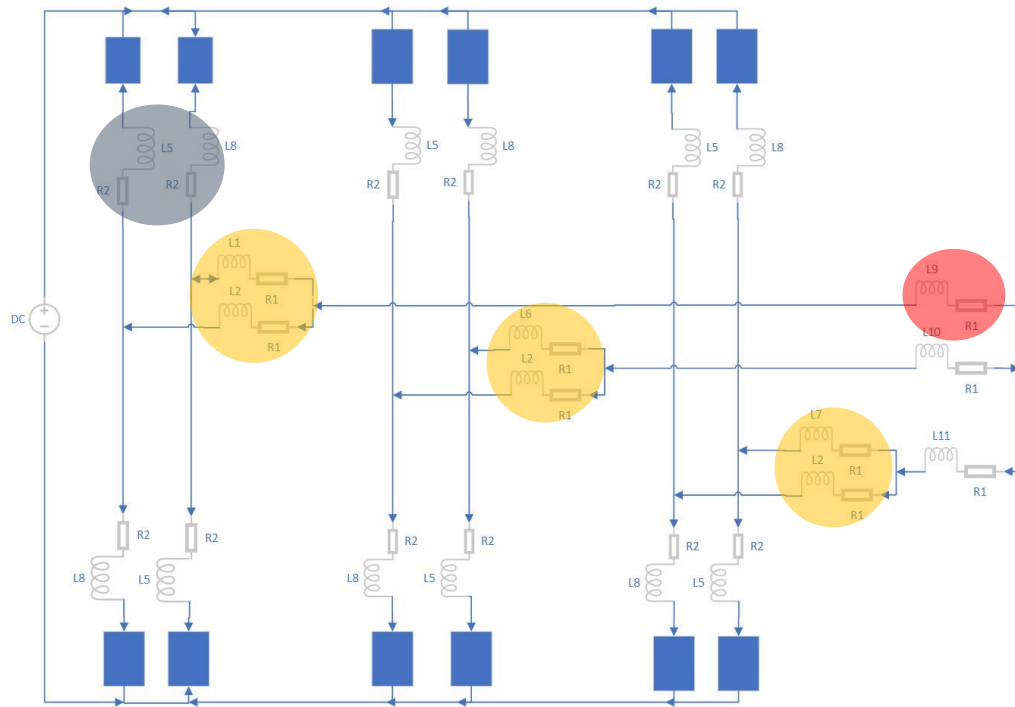


Figura 4.98. Circuito MMSPC con tres fases.

Fuente: elaboración propia.

4.5.1 Resultados

En la Tabla 4.1 se presentan los valores de simulación de este sistema, con este análisis se busca ver si el comportamiento mejora al utilizar inductores acoplados en el circuito.

Tabla 4.2. Valores de los Elementos Presentes en el Circuito.

Parámetro	Valor
V_{DC}	1500 [V]
f_c	4.5 [kHz]
Inductor de carga	15 [mH]
Resistencia de carga	20 [Ω]
Inductor de fase interna A1	16.5 [mH]
Inductor de fase interna A2	13.5 [mH]
Resistencia de fase interna A1	0.1 [Ω]
Resistencia de fase interna A2	0.1 [Ω]
Inductores de rama	20 [mH]
Resistencias de rama	0.1 [Ω]
Impacto de carga	$t = 0.1$ [s]
Corriente inicial	8 [A]
Corriente final	14 [A]

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados de la simulación, contrastando los casos con inductores acoplados y separados. Se debe tener en consideración que para este caso el impacto de carga se realizó en el instante $t = 0.1$ [s] para poder apreciar en mayor medida la estabilidad de ambos circuitos en el tiempo.

Para una mejor comprensión se mostrará dónde se efectúan las mediciones de los resultados obtenidos para cada caso. Como se observa en la figura 4.98, el sistema se compone de tres fases, por lo que se hará un acercamiento a la fase A, que es la que se analiza en este documento, considerando que el comportamiento de las tres fases es equivalente.

En la figura 4.99 vemos un acercamiento a la fase A, aquí se muestra dónde se realizan las mediciones de la corriente circulante que capturan los inductores acoplados, lo que se presenta luego en la figura 4.100.

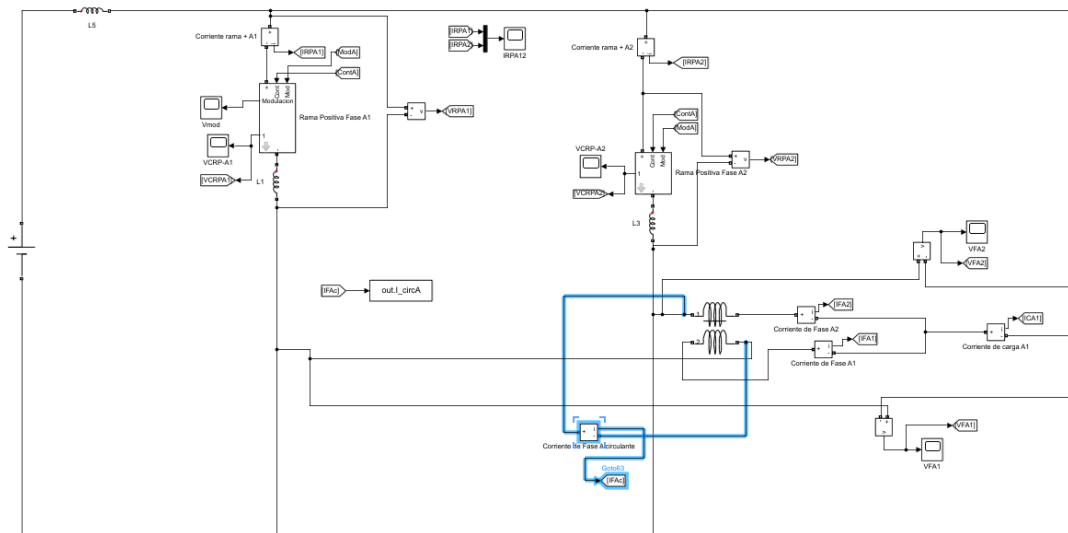


Figura 4.99. Medición de corriente circulante en los inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

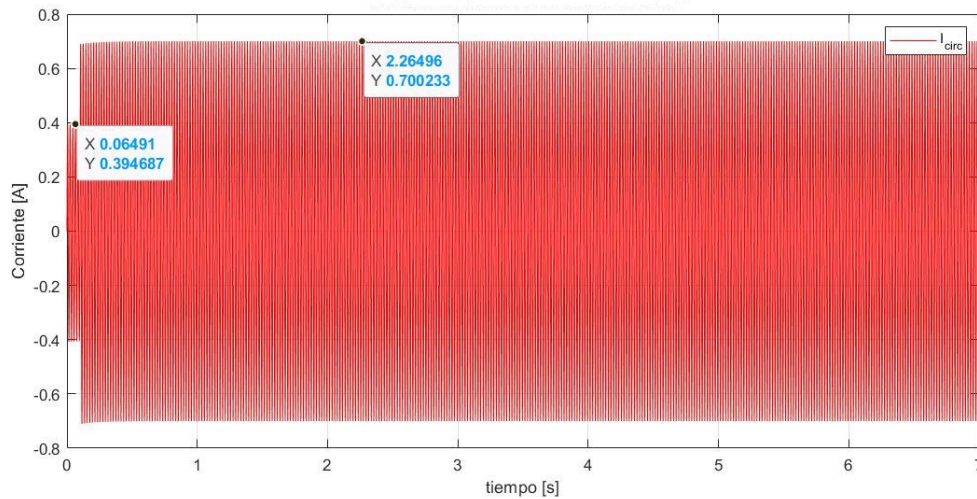


Figura 4.100. Corriente circulante en los inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

Al observar la figura 4.100, se nota que se tiene un comportamiento estable en la corriente circulante que se logra capturar a través de los inductores acoplados, y contrastando con la figura 4.102, donde se presenta la diferencia entre las corrientes de las fases internas A1 y A2, se aprecia que la corriente circulante es equivalente a aproximadamente un 50% de la diferencia que se presenta entre las fases internas y a un 5% de la corriente de fase total.

En la figura 4.101 se muestra dónde se efectúan las mediciones de las corrientes de fase A1 y A2. Cabe destacar que tanto para inductores acoplados como separados las mediciones son las mismas.

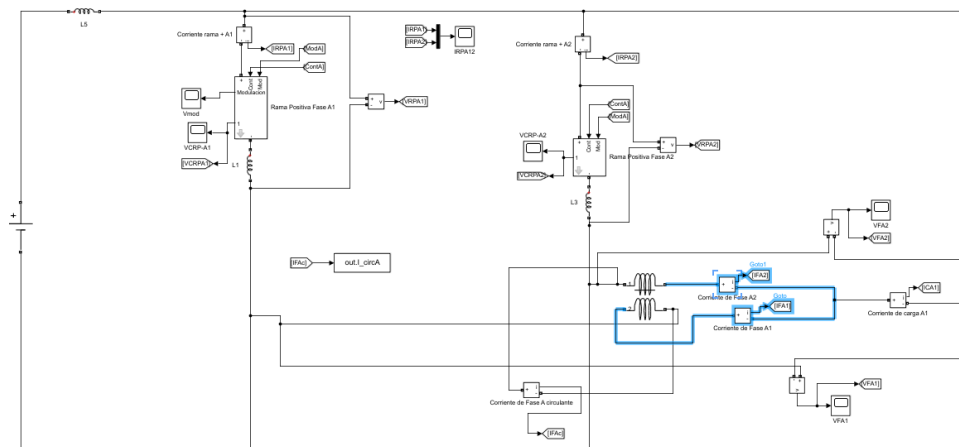


Figura 4.101. Medición de la diferencia de corriente entre las fases internas A1 y A2 con inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

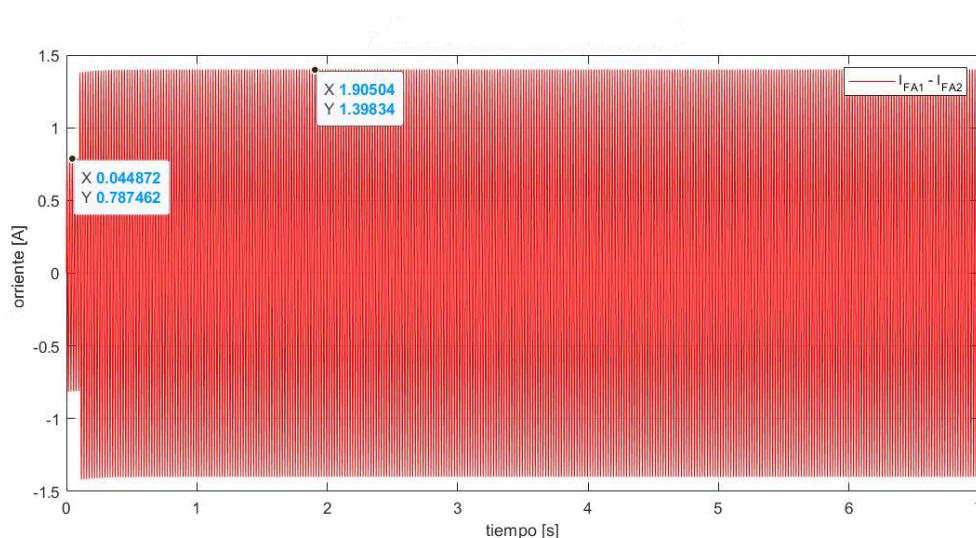


Figura 4.102. Diferencia de corriente entre las fases internas A1 y A2 con inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

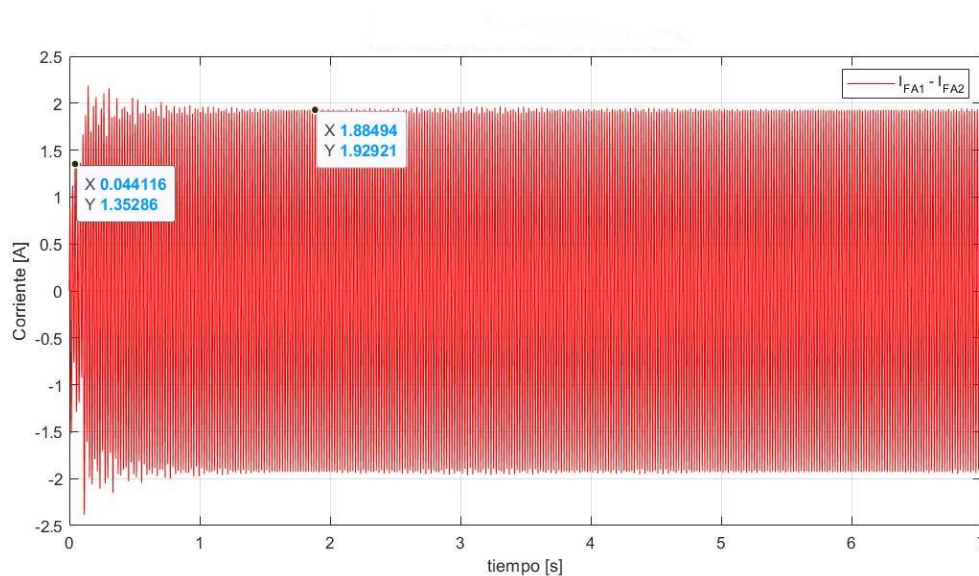


Figura 4.103. Diferencia de corriente entre las fases internas A1 y A2 con inductores separados.

Fuente: elaboración propia.

Si se compara el resultado de la figura 4.103 con el de la figura 4.102, se observa claramente cómo se disminuye la diferencia entre las corrientes de las fases A1 y A2 al utilizar inductores acoplados, disminuyendo en aproximadamente un 37.96% la diferencia de corriente entre las fases. Además, se evidencia que el comportamiento de la misma variable es más estable cuando se utilizan inductores acoplados.

$$I_{FA1} - I_{FA2} = 1.92921[A] \text{ (Inductores separados)}$$

$$I_{FA1} - I_{FA2} = 1.39834[A] \text{ (Inductores acoplados)}$$

Las mediciones de los voltajes en los condensadores se efectúan dentro de las ramas, donde cada rama se compone de 3 módulos y, cada uno de ellos, posee un capacitor, como se observa en las figuras 4.104, 4.105 y 4.106.

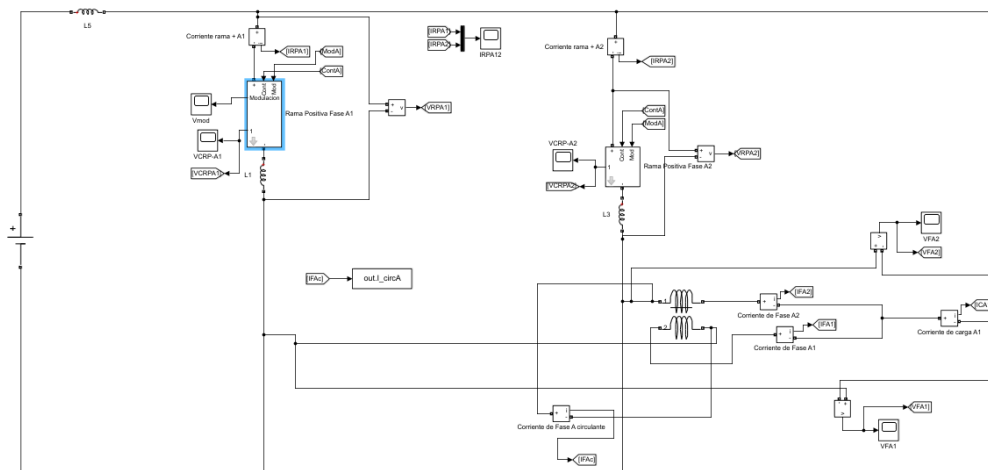


Figura 4.104. Medición de voltaje en los condensadores de las ramas positivas A1 y A2 con inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

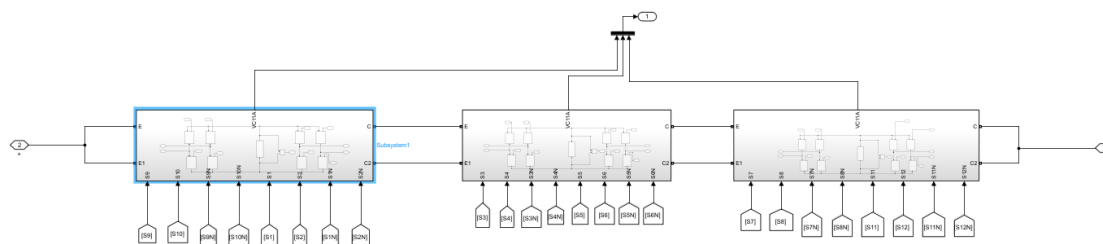


Figura 4.105. Medición de voltaje en los condensadores de las ramas positivas A1 y A2 con inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

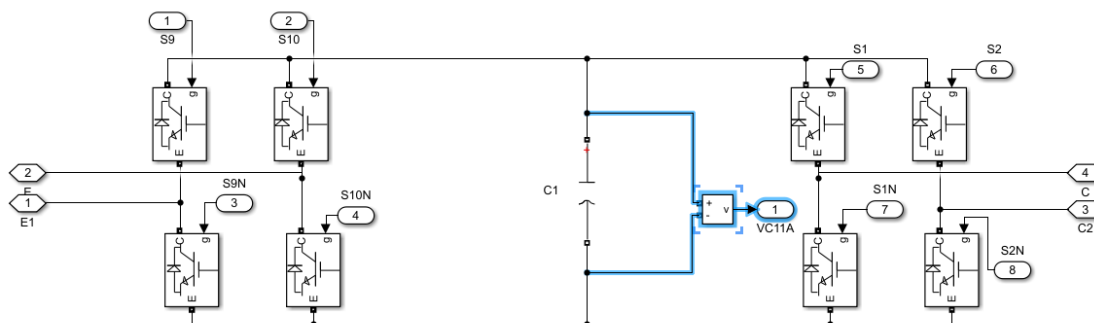


Figura 4.106. Medición de voltaje en los condensadores de las ramas positivas A1 y A2 con inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

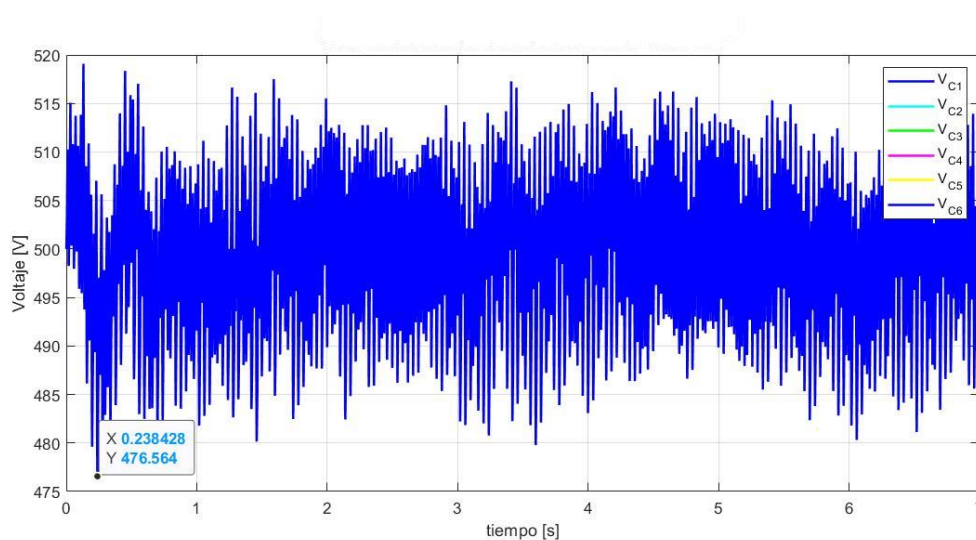


Figura 4.107. Voltaje en los condensadores de las ramas positivas A1 y A2 con inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

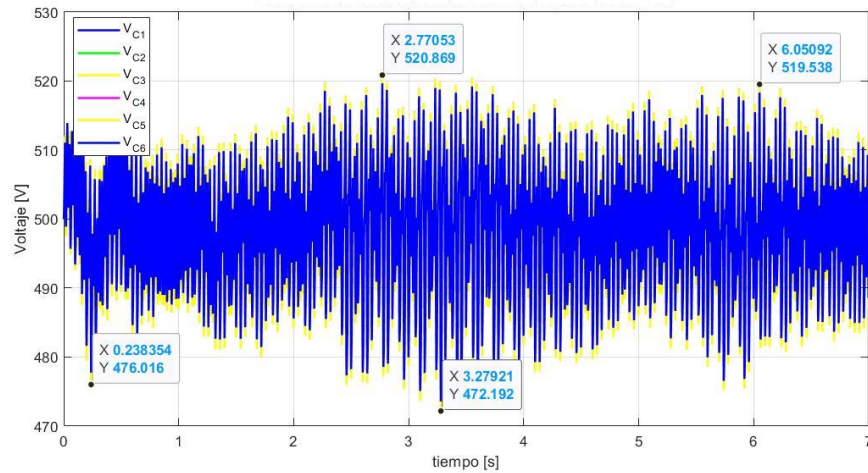


Figura 4.108. Voltaje en los condensadores de las ramas positivas A1 y A2 con inductores separados.

Fuente: elaboración propia.

Por un lado, al contrastar las figuras 4.107 y 4.108, donde se presentan los voltajes de las ramas positivas con inductores acoplados y separados respectivamente, se observa que, la variación de sus valores es uniforme entre todos los condensadores de cada rama y, se mantiene estable y cercano al promedio esperado, que corresponde a $\frac{V_{DC}}{3}$. En cuanto a sus diferencias, se observa que, los voltajes máximos y mínimos que alcanzan los condensadores se notan disminuidos en un 1.65% al utilizar inductores acoplados. Por otro lado, se observa que al utilizar inductores separados la diferencia entre los voltajes de los capacitores crece, haciéndose notoria la diferencia entre una rama y otra. Lo mismo ocurre con los condensadores de las ramas negativas que se presentan en las figuras 4.109 y 4.110.

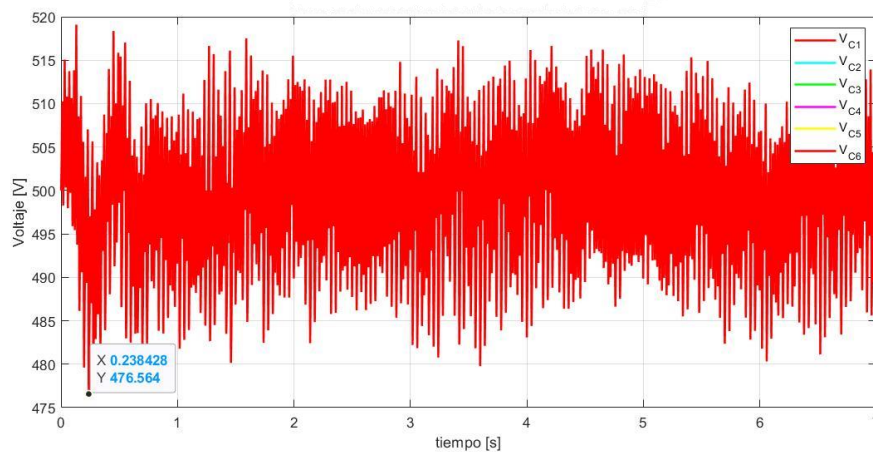


Figura 4.109. Voltaje en los condensadores de las ramas negativas A1 y A2 con inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

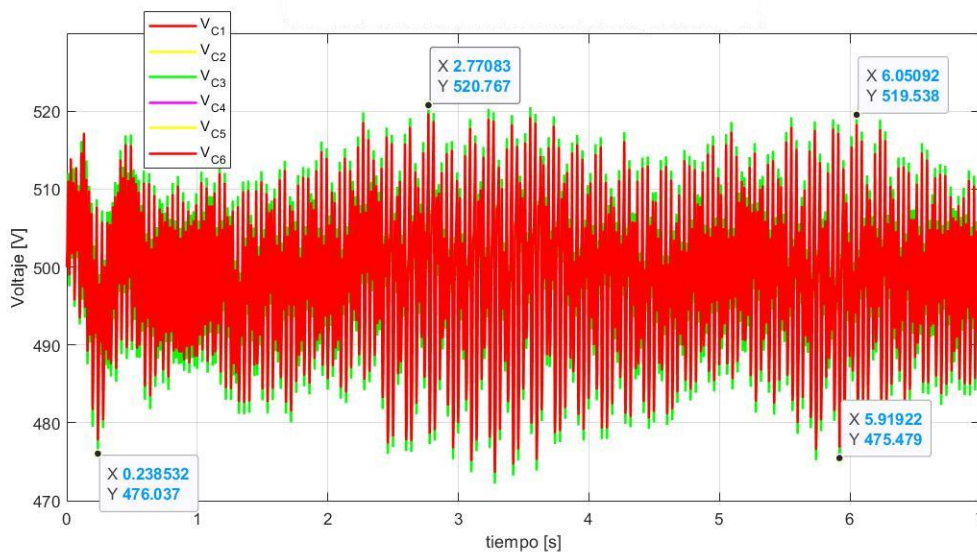


Figura 4.110. Voltaje en los condensadores de las ramas negativas A1 y A2 con inductores separados.

Fuente: elaboración propia.

En las figuras 4.111 y 4.112 se presentan las mediciones de corriente de fases y carga para la fase A.

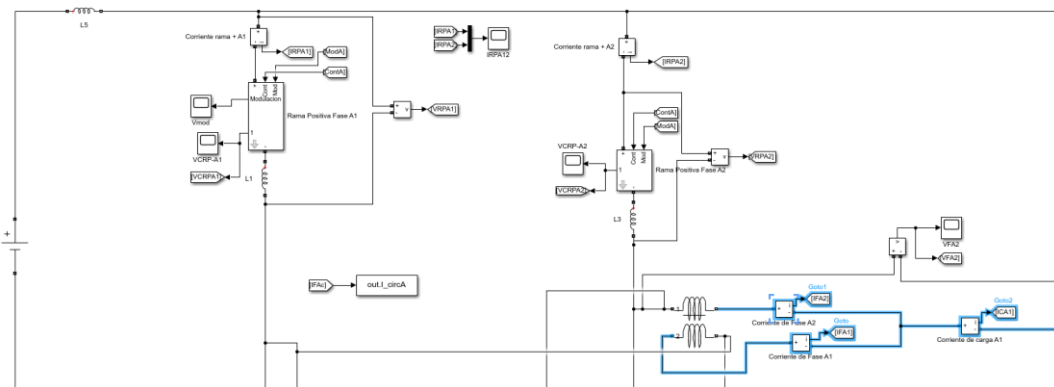


Figura 4.111. Medición de corrientes de fase y carga con inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

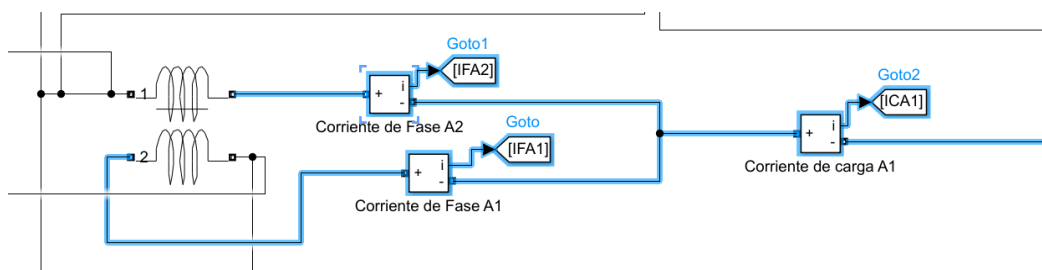


Figura 4.112. Medición de corrientes de fase y carga con inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

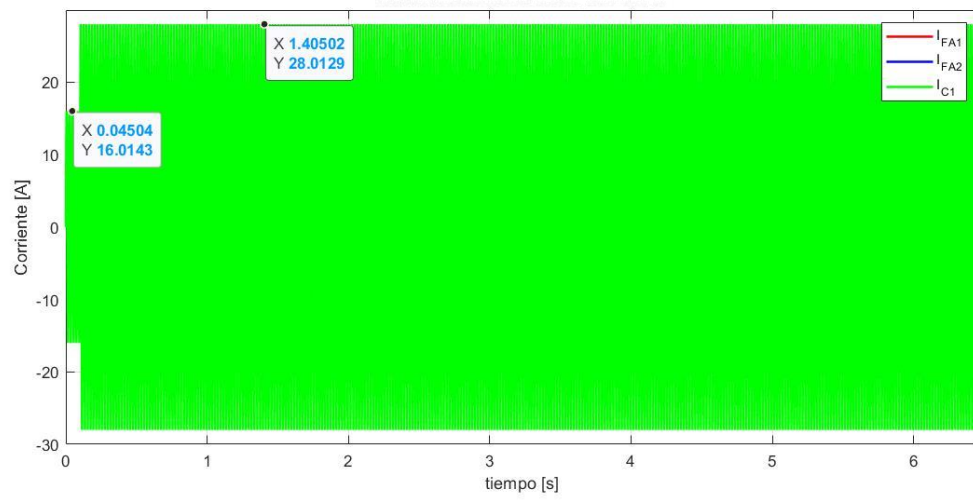


Figura 4.113. Corrientes de fases y carga con inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

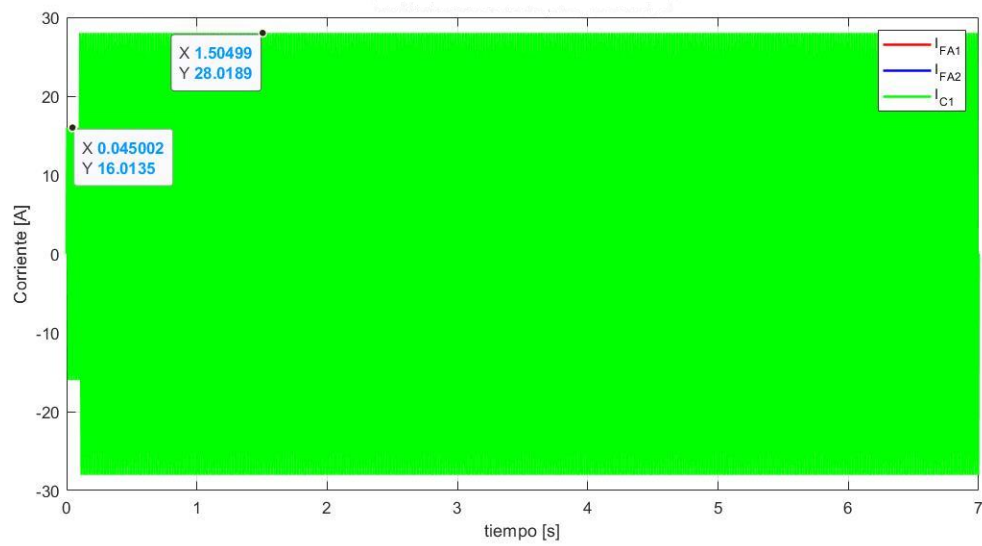


Figura 4.114. Corrientes de fase y carga con inductores separados.

Fuente: elaboración propia.

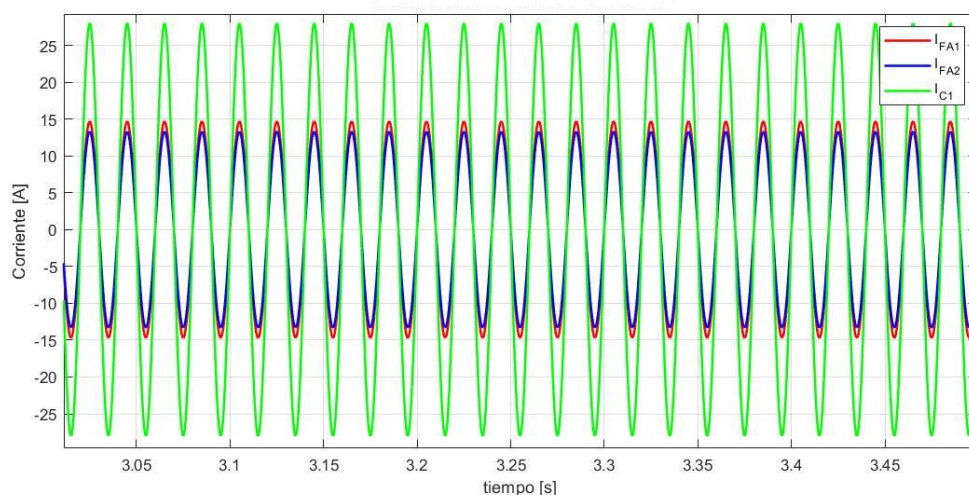


Figura 4.115. Corrientes de fase y carga con inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

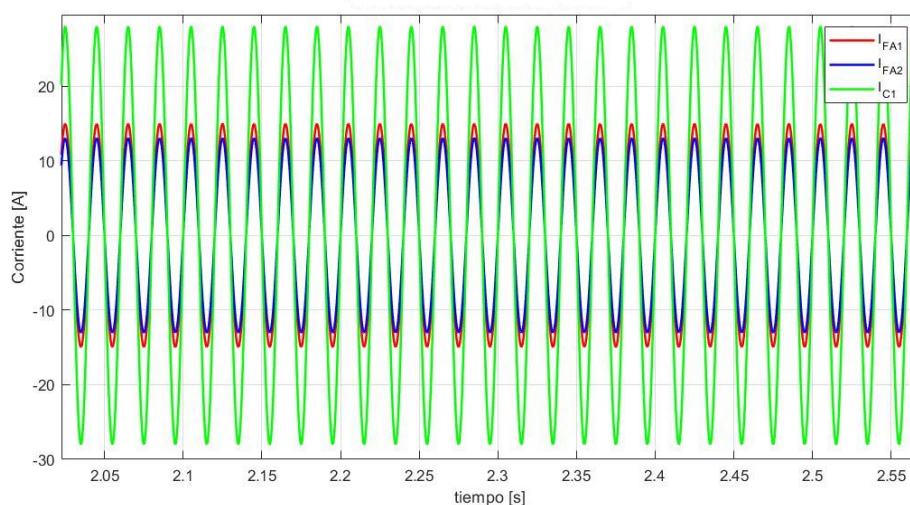


Figura 4.116. Corrientes de fase y carga con inductores separados.

Fuente: elaboración propia.

Como se constató en las figuras 4.102 y 4.103, existe una pequeña diferencia entre las ramas positivas y negativas del sistema, que es visible a su vez en las figuras 4.115 y 4.116. Se aprecia que esta variación se mantiene estable en el tiempo y no presenta discrepancias importantes, incluso cuando se realiza un impacto de carga en el sistema como se observa en las figuras 4.113 y 4.114. Al observar la figura 4.115 y contrastarla con la figura 4.116, se nota que la diferencia que se presenta entre las fases A1 y A2 aumenta al utilizar inductores separados en el sistema, como ya se advirtió en la figura 4.103.

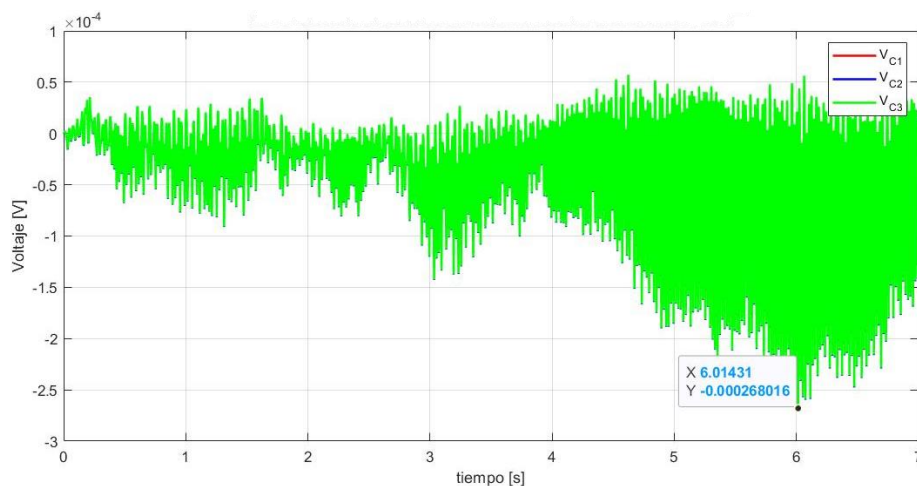


Figura 4.117. Diferencia de voltaje entre los condensadores de las ramas positivas A1 y A2 con inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

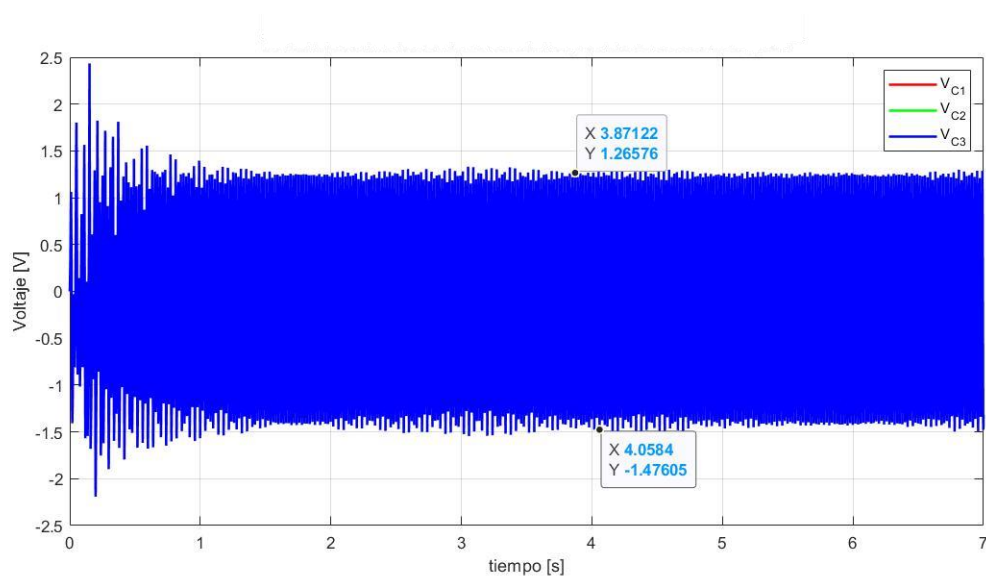


Figura 4.118. Diferencia de voltaje entre los condensadores de las ramas positivas A1 y A2 con inductores separados.

Fuente: elaboración propia.

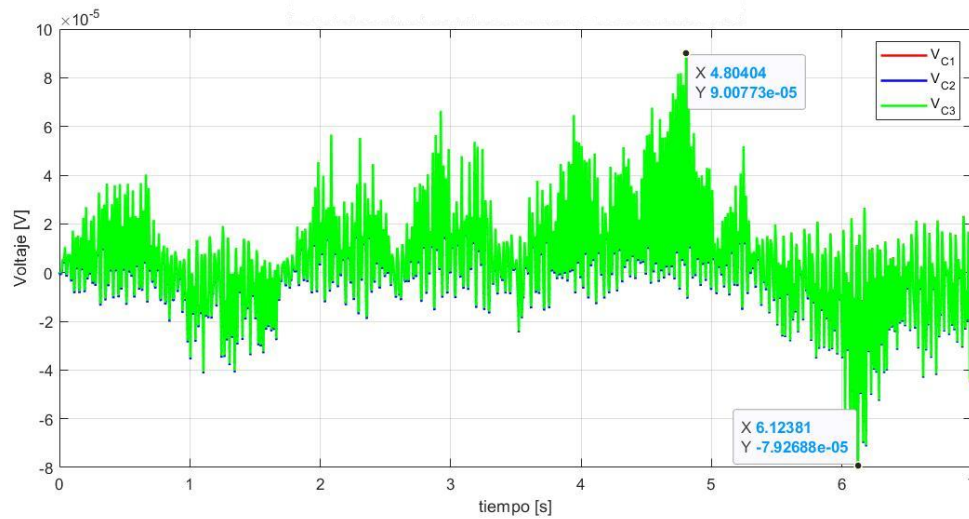


Figura 4.119. Diferencia de voltaje entre los condensadores de las ramas negativas A1 y A2 con inductores acoplados.

Fuente: elaboración propia.

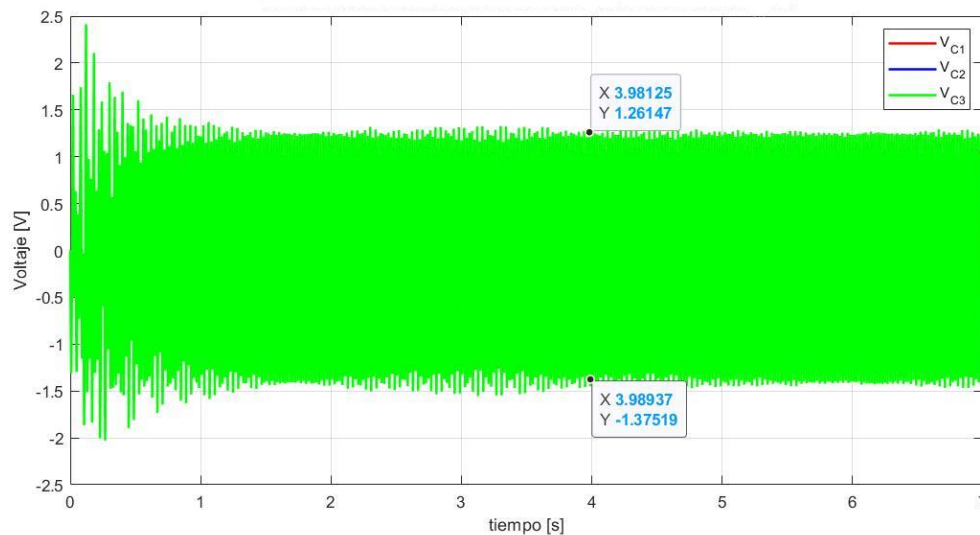


Figura 4.120. Diferencia de voltaje entre los condensadores de las ramas negativas A1 y A2 con inductores separados.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 4.117 se observa que la diferencia de voltaje en los condensadores que existe entre las ramas positivas A1 y A2 es mínima, a pesar de que existe un aumento después de realizar el impacto de carga, esta no supera los valores del orden de los milivolts para el caso con inductores acoplados. Ahora si bien, se comparan las figuras 4.117 y 4.118, la diferencia de voltaje entre las

ramas positivas de cada fase se ve reducida en aproximadamente un 99.9% al utilizar inductores acoplados y lo mismo ocurre con las diferencias de voltajes en las ramas negativas que se presentan en las figuras 4.119 y 4.120, donde se muestra la discrepancia de voltaje para el caso con inductores acoplados y para el caso con inductores separados respectivamente.

Capítulo 5. Conclusiones

5.1. Sumario

Se realizaron diferentes circuitos de prueba hasta llegar a un convertidor multinivel con fases en paralelo, con ello se esperaba estudiar como funcionaban las diferentes conexiones que existían en el sistema, tanto las conexiones en paralelo dentro de los módulos, para estabilizar los condensadores que es la base de los sistemas basados en MMSPC, como las conexiones en paralelo que se hacían entre las fases internas, para proporcionar una mayor corriente de salida hacia la carga. Se hizo un análisis desde el nivel micro de un sistema basado en convertidores multinivel con conexión en serie/paralelo, hasta llegar al MMSPC final, en el que se efectuaron distintos escenarios de funcionamiento, entre ellos la variación de la frecuencia de conmutación del sistema, variación de las resistencias e inductancias de fase e incluso se realizó un cambio de componentes en el sistema para notar la reacción que tenía el circuito propuesto bajo diversas condiciones y, así determinar que parámetros tenían mayor influencia en el correcto funcionamiento del sistema.

5.2. Conclusiones

En síntesis, se observa que el sistema se comporta de forma correcta entregando corrientes perfectamente sinusoidales y desfasadas entre sí en la salida. Se evidenció que existen diferentes parámetros que afectan el funcionamiento del sistema, uno de estos es su frecuencia de conmutación., En particular para un valor de frecuencia de $0.5 [kHz]$ se advirtió un alza de hasta un 5% en el índice de modulación del sistema en comparación con el caso de $4.5 [kHz]$. Debido a la disminución en la frecuencia de conmutación se tiene una mayor incorporación de armónicos por la mala calidad de la señal moduladora.

Otros parámetros de importancia son las resistencias e inductancias de fase utilizadas, donde a través de las diversas pruebas se apreció que las resistencias afectaban directamente el índice de modulación, por lo que si se aumentaban los valores resistivos en las ramas se evidenciaba un aumento en el índice de modulación, llegando a desestabilizar el sistema. Al tener diferentes resistencias en las ramas del sistema, los voltajes en los capacitores comienzan a diferir. En cuanto a las inductancias, estas afectaban mayormente a los voltajes de los capacitores cuando presentaban diferencias entre ramas, pero no se vio que se generase un problema al aumentar las inductancias en las ramas a valores como los $15 [mH]$.

En conclusión, la frecuencia, la resistencia y la inductancia de las ramas afectan de forma directa el voltaje presente en los condensadores, generando un aumento en las diferencias presentes entre las ramas de un 26.69% en el caso de la disminución de la frecuencia, un aumento del 399.54% al comparar los casos 1 y 5 de variación de inductancia y un aumento del 194.36% en la diferencia de voltaje presente entre las ramas al contrastar el primer y último caso propuesto en el análisis de las resistencias de fase. Se nota que el efecto mayor es producido por las resistencias y los inductores. En cuanto al índice de modulación este se ve principalmente afectado por el aumento de la resistencia y la disminución de la frecuencia dado el mayor contenido armónico.

Por su parte, al analizar todos los casos propuestos, se observa que, al utilizar inductores, tanto acoplados como separados, los condensadores se mantienen estables en el tiempo, sin tener grandes variaciones en sus voltajes y manteniéndose en torno al valor promedio. Sin embargo, el método que presenta mejores resultados es utilizando inductores acoplados, reduciendo la variación de voltaje de los condensadores en un 1.65%, como se aprecia en la comparación de las figuras 4.107, 4.108, 4.109 y 4.110, donde también se observa que no existe una diferencia visible entre los condensadores de una rama y otra al utilizar inductores acoplados. Lo anterior se comprueba en las figuras 4.117, 4.118, 4.119 y 4.120, donde se aprecia que al utilizar inductores acoplados la diferencia de voltaje entre los condensadores de las ramas se nota reducida en un 99.9% en comparación con lo obtenido con inductores separados. Esta reducción en la diferencia de voltaje entre los condensadores da paso a que se reduzca la corriente circulante de paralelización en un 37.96% como se constata al comparar las figuras 4.102 y 4.103, teniendo así un sistema más estable que posee menores variaciones entre ramas y menores pérdidas al reducir la corriente circulante de paralelización.

Finalmente, debido a la implementación de esta topología en el circuito, donde se permite la conexión en serie y paralelo del sistema, se observó que se lograba conectar en paralelo las fases para proporcionar una mayor corriente a la salida. Cabe destacar que, no fue necesario en ningún momento un sistema de control para mantener los voltajes de los capacitores en un rango aceptable debido a que la topología del MMSPC asegura el balance interno del sistema.

5.3. Trabajo Futuro

Este trabajo aún posee diversas aristas que pueden ser optimizadas, como encontrar los valores óptimos del sistema o los valores mínimos de resistencia, capacitancia e inductancia con los que se pueda operar sin problemas. También se podría trabajar en la aplicación de un prototipo físico con lo ya analizado en este trabajo.

Bibliografía

- [1] Z. Li, R. Lizana F., S. Sha, Z. Yu, A. V. Peterchev, y S. M. Goetz, «Module Implementation and Modulation Strategy for Sensorless Balancing in Modular Multilevel Converters», *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, n.º 9, pp. 8405-8416, sep. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2886147.
- [2] F. R. Allende, M. A. Perez, F. Flores-Bahamonde, y M. Malinowski, «Modeling of cross-circulating currents in a MMC with parallel connected submodules in Solid State Transformers», en *2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Kyoto, Japan, jun. 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/ISIE45552.2021.9576241.
- [3] J. Fang, F. Blaabjerg, S. Liu, y S. Goetz, «A Review of Multilevel Converters With Parallel Connectivity», *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, n.º 11, pp. 12468-12489, nov. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3075211.
- [4] M. A. Perez, F. Ruiz, J. R. Espinoza, y M. Malinowski, «Control of Solid State Transformer based on Modular Multilevel Converters with Interconnecting Dual Active Bridges», en *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Vancouver, BC, Canada, jun. 2019, pp. 2343-2348. doi: 10.1109/ISIE.2019.8781544.
- [5] G. Gohil, L. Bede, R. Teodorescu, T. Kerekes, y F. Blaabjerg, «An Integrated Inductor for Parallel Interleaved VSCs and PWM Schemes for Flux Minimization», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, n.º 12, pp. 7534-7546, dic. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2455059.

Anexo A. Leyes Importantes

A.1. Cálculo de corriente del circuito

El cálculo de la corriente máxima presente en una rama se calculó de la siguiente manera:

$$I_{max} = \frac{V_{dc}}{2} * \frac{1}{R}$$

Con $V_{dc} = 1500 [V]$ y $R = 20 [\Omega]$, se tiene:

$$I_{max} = 18.75 [A]$$

A.2. Controlador PI

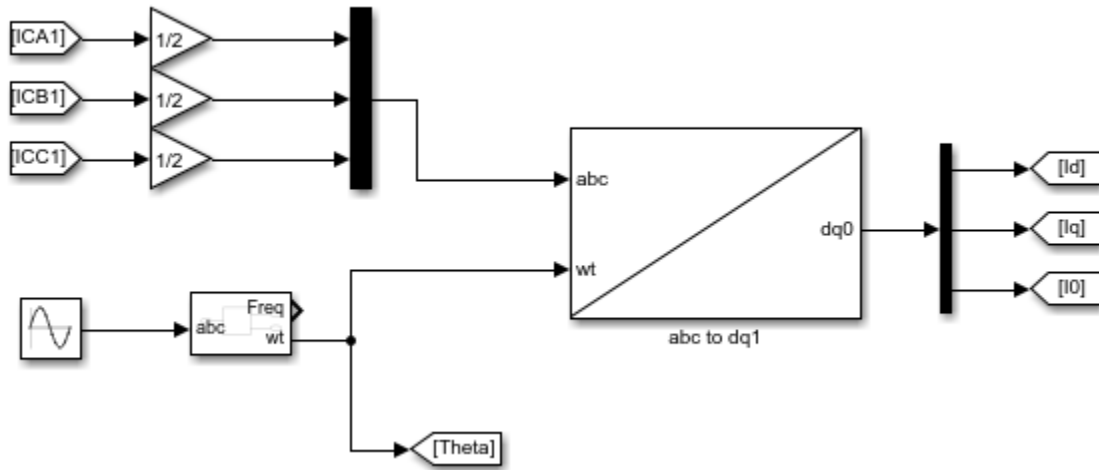


Figura A.2.1. Traspaso de coordenadas ABC a dq.

Fuente: Matlab Simulink.

En la figura A.2.1. se ve parte del sistema de control, donde se crea una red ficticia para obtener un ángulo Theta (θ) y así orientarse con la red, luego se ingresan como señales de entrada las corrientes de carga en cada fase, divididas por dos para hacer el control de las corrientes de las fases internas, pasando de ABC a dq, obteniendo como resultado Id e Iq.

Con I_d e I_q obtenidos estos entran a un lazo de control donde se comparan con el valor deseado de estos parámetros, como se muestra en la figura A.2.2.

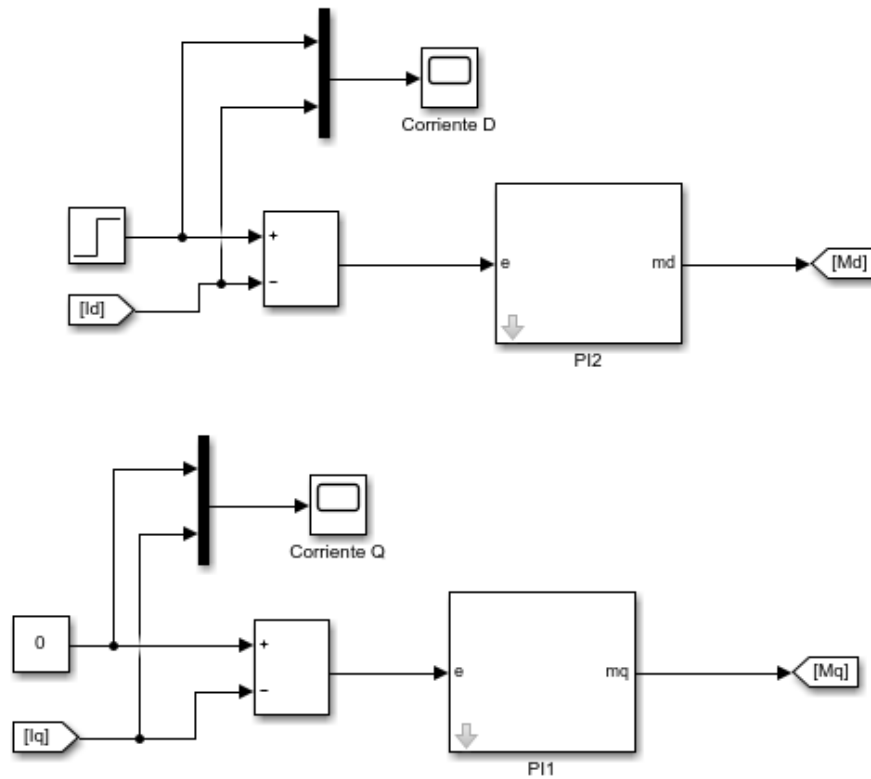


Figura A.2.2. Controlador PI para corrientes I_d e I_q .

Fuente: Matlab Simulink.

A través de la sintonización, junto al paso por el controlador PI se obtienen M_d y M_q , estas nuevas señales se pasan de dq a abc como se nota en la figura A.2.3, para así obtener los índices de modulación M_a , M_b y M_c .

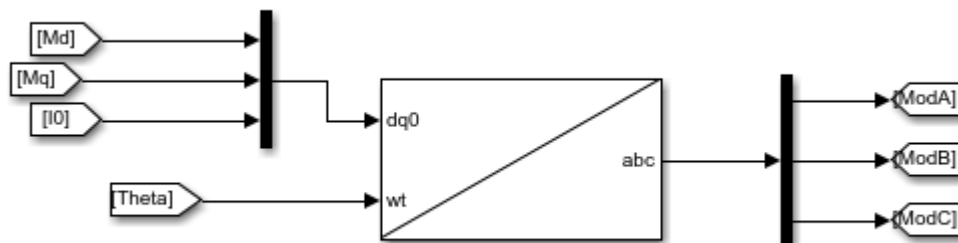


Figura A.2.3. Traspaso de coordenadas dq a ABC.

Fuente: Matlab Simulink.

Para el diseño del controlador PI con un factor de amortiguamiento $\zeta = 0.707$, y una frecuencia de corte $f_c = 500[Hz]$, fue necesario obtener la ecuación de transferencia del sistema. Para ello se aplicó la ley de voltajes de Kirchoff, en una de las fases junto a su salida, y se obtuvo la siguiente ecuación.

$$2L_o * \frac{di_o}{dt} + L * \frac{di_o}{dt} + 2 * R * i_o = -(V_p - V_n) \quad \dots (1)$$

$$(2 * L_o + L) * \frac{di_o}{dt} + 2 * R_o * i_o = -(V_p - V_n)$$

Con V_p y V_n :

$$V_p = \frac{V_{DC}}{2} * (m_s + m_o) \quad \dots (2)$$

$$V_n = \frac{V_{DC}}{2} * (m_s - m_o) \quad \dots (3)$$

$$(2 * L_o + L) * \frac{di_o}{dt} + 2 * R_o * i_o = -N * \frac{V_{DC}}{2} * (m_s - m_o + m_s + m_o)$$

$$(2 * L_o + L) * \frac{di_o}{dt} + 2 * R_o * i_o = -N * \frac{V_{DC}}{2} * (2 * m_s)$$

Con $m_s = 0.5$, se tiene:

$$(2 * L_o + L) * \frac{di_o}{dt} + 2 * R_o * i_o = -N * \frac{V_{DC}}{2}$$

Al aplicar transformada de Laplace, se obtiene:

$$(2 * L_o + L) * S * I_o + 2 * R_o * I_o = -N * \frac{V_{DC}}{2}$$

$$I_o = -\frac{N * V_{DC}}{(4 * L_o + 2 * L) * S + 4 * R_o} \quad \dots (4)$$

Esta función de transferencia se ingresa a Matlab y se sintoniza el controlador con el comando “rltool”, obteniendo de esta forma el controlador PI.

$$PI = \frac{-0.029047 * (S + 2465)}{S}$$