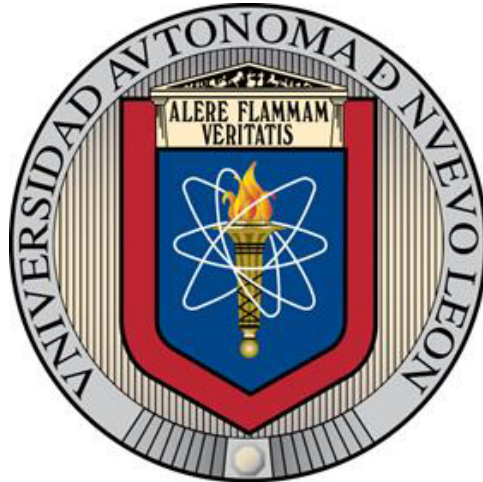


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**ESTIMACIÓN DE LA TENSIÓN DE LOS CONDENSADORES EN UN
CONVERTIDOR MULTINIVEL DE CONDENSADORES FLOTANTES
UTILIZANDO UN NÚMERO REDUCIDO DE SENSORES**

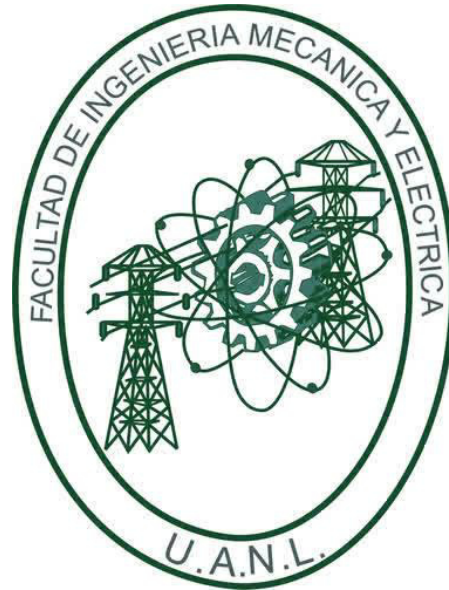
POR

ING. ALEX PAUL ERDMANN OLVERA

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA**

JULIO, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTIMACIÓN DE LA TENSIÓN DE LOS CONDENSADORES EN UN
CONVERTIDOR MULTINIVEL DE CONDENSADORES FLOTANTES
UTILIZANDO UN NÚMERO REDUCIDO DE SENSORES**

POR

ING. ALEX PAUL ERDMANN OLVERA

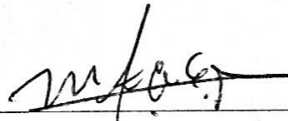
**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA**

JULIO, 2018

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

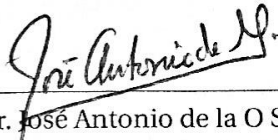
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «**Estimación de la tensión de los condensadores en un Convertidor Multinivel de Condensadores Flotantes utilizando un número reducido de sensores**», realizada por el alumno Ing. Alex Paul Erdmann Olvera, con número de matrícula 1880622, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica.

El Comité de Tesis



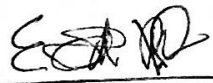
Dr. Miguel Francisco Escalante Gutiérrez

Asesor



Dr. José Antonio de la O Serna

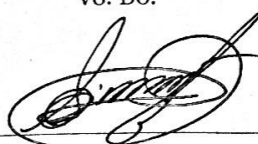
Revisor



Dr. César Emilio Villarreal Rodríguez

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, julio 2018

Dedicatoria y Agradecimientos

A mis padres Francis y Alex, que con todo su amor y esfuerzo han hecho que pueda ver alcanzadas mis metas a lo largo de mi vida. Gracias por todos sus consejos, y sobre todo por enseñarme que no hay límites mientras se tenga pasión por lo que se hace.

A mi novia Grecia, que me ha apoyado incondicionalmente a lo largo de éste arduo trabajo, con momentos llenos de felicidad.

A mi asesor de Tesis Dr. Miguel Escalante, por sus enseñanzas, consejos y amistad durante la maestría.

A mis revisores de Tesis Dr. Antonio de la O y Dr. Cesar Villareal, por sus consejos y críticas constructivas.

Al CONACYT, por el apoyo económico que se me ha brindado.

A mi familia en general.

A mis demás maestros y amigos.

RESUMEN

En los últimos años, la demanda global de energía eléctrica ha crecido considerablemente. Así mismo, las preocupaciones por el agotamiento de los combustibles fósiles y el impacto adverso de su combustión en el medio ambiente y en la salud de la población, han incentivado la búsqueda de nuevas fuentes de energía como alternativa a este tipo de combustibles. En respuesta a los retos que esto implica, los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEPs) están cambiando. Actualmente, existe la tendencia de incorporar a la red eléctrica fuentes de energía renovables como: solar, eólica, hidráulica, etc. En México la Ley de Transición Energética (LTE) contempla que para el año 2024 el 35 % de la energía eléctrica del país sea generada por medio de energías renovables [1]. Actualmente, la hidroelectricidad es la principal fuente de generación en esta categoría con el 10.08 %, seguida de la eólica con un 3.05 % y la geotérmica con un 1.98 % de la generación total. Si bien, la capacidad instalada de generación eólica es mínima, se espera que en los próximos años tenga un crecimiento acelerado debido a que es la tecnología más competitiva comparada con el resto de las energías renovables. Igualmente, se pronostica que la generación fotovoltaica tenga un crecimiento importante, dado el gran potencial del país en este rubro.

Estas fuentes de energía renovable utilizan sistemas de captación de energía (paneles solares, aerogeneradores) que no pueden conectarse directamente a la red eléctrica debido a que las formas de onda de tensión y corriente generadas son incompatibles con las características específicas de la red; por lo tanto, uno de los principales componentes de un sistema de generación eólica / solar es el convertidor estático de potencia. Este es el medio a través del cual se acondiciona la energía recu-

perada y se inyecta a la red eléctrica. Entre las diferentes topologías de convertidores estáticos, los convertidores multinivel tienen un gran potencial para estas aplicaciones. Estos pueden operar en niveles de tensión mayores al nivel de tensión soportado por los semiconductores que componen al convertidor; esto habilita interconexiones en niveles de media y alta tensión, lo que podría prescindir del transformador de acoplamiento. Además, mejoran la calidad de las formas de onda, y reducen el estrés dieléctrico del equipo, reduciendo las posibilidades de falla.

En general, los convertidores multinivel utilizan en su estructura un arreglo de semiconductores y condensadores. Los condensadores están cargados a una cierta tensión, a partir de la cual se asegura la forma de onda multinivel a la salida del convertidor y además, se asegura que la tensión de trabajo de los semiconductores sea una fracción de la tensión total del convertidor. Por lo tanto, los convertidores multinivel requieren de un control interno para asegurar el nivel de tensión de los condensadores. Este control necesita conocer en todo momento la tensión de los condensadores. Al incrementar el número de niveles en el convertidor se incrementa la cantidad de condensadores; por lo que se necesitaría la misma cantidad de sensores de tensión, aumentando la complejidad, costo y eventualmente se podría comprometer la confiabilidad del sistema.

Es por ello que en años recientes se han desarrollado esquemas de estimación u observación que permiten conocer el valor de la tensión de los condensadores a partir de un número reducido de sensores. Sin embargo, algunos de los algoritmos propuestos en la literatura son complejos y de un alto costo computacional. Así mismo, en la mayoría de los casos, los esquemas de estimación propuestos son probados ante condiciones particulares de operación del convertidor (i.e.: control PWM, control directo, uso de todos los niveles), lo cual impone restricciones en su aplicación.

En este trabajo se propone un método para estimar las tensiones de los condensadores en un convertidor multinivel del tipo condensadores flotantes utilizando un número reducido de sensores. El método propuesto es simple pero preciso en la esti-

mación y de bajo costo computacional para implementarlo en tiempo real. Además, es flexible ya que puede ser aplicado a cualquier tipo de control y a cualquier tipo de convertidor multinivel.

El algoritmo propuesto se basa en las ecuaciones que describen el comportamiento dinámico del convertidor. Específicamente, en la expresión de la tensión de salida, la cual se puede representar como una combinación lineal de las funciones de conmutación, de las tensiones de los condensadores y de la fuente de DC. Además, se utiliza la ecuación de la dinámica de la tensión de los condensadores. Así, el método se basa en la medición de la tensión y de la corriente de salida del convertidor, por lo que el esquema de estimación únicamente requiere de dos sensores, uno de tensión y otro de corriente.

La estructura del estimador consiste en un sistema de ecuaciones lineales sobredeterminado que representan a la tensión de salida. La solución del sistema de ecuaciones representa una estimación de las tensiones de los condensadores y de la fuente de DC. Entre las propiedades sobresalientes del método se tienen las siguientes: bajo costo computacional, no requiere de ganancias o de sintonización, tiene una baja dependencia paramétrica, se puede escalar fácilmente a n-niveles, las estimaciones son muy precisas, se puede aplicar a un control directo y a un control con modulación PWM, entre otras.

Para probar el desempeño del método propuesto, se realizan pruebas considerando diferentes condiciones operativas del sistema, tanto en simulación como de manera experimental; los resultados demuestran el correcto funcionamiento del método y validan que se puede incorporar en los lazos de control para el balance de la tensión de los condensadores y para el control del seguimiento de la corriente de salida del convertidor.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria y Agradecimientos	v
Resumen	vii
Nomenclatura	xxiv
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Revisión Bibliográfica	6
1.2.1. Estimadores para FCMC	6
1.2.2. Estimadores para otras topologías	7
1.3. Motivación	10
1.4. Objetivo	11
1.5. Hipótesis	11
1.6. Metodología	12
1.7. Estructura de la Tesis	14
1.8. Conclusiones del Capítulo 1	16

2. Convertidor Multinivel de Condensadores Flotantes	17
2.1. Modelo dinámico del FCMC	18
2.1.1. Propiedades del modelo dinámico del FCMC	21
2.2. Conclusiones del Capítulo 2	23
3. Esquemas de estimación propuestos	24
3.1. Preliminares	25
3.2. Primer propuesta: Sistema de Ecuaciones Dinámicas (SED)	27
3.2.1. Paso 1: Actualización en lazo abierto de las estimaciones de las tensiones de los condensadores	31
3.2.2. Paso 2: Actualización en lazo abierto de las ecuaciones pasadas	33
3.2.3. Paso 3: El sistema de ecuaciones exacto y su solución	34
3.3. Segunda propuesta: Sistema de Ecuaciones Sobre-Determinado (SESD)	37
3.3.1. Paso 1: Actualización en lazo abierto de las estimaciones de las tensiones de los condensadores	39
3.3.2. Paso 2: Actualización en lazo abierto de las ecuaciones base .	40
3.3.3. Paso 3: El sistema de ecuaciones sobre-determinado y su solución	41
3.4. Aplicación del esquema de estimación con un control directo del convertidor	46
3.5. Aplicación del esquema de estimación con una modulación en ancho de pulsos (PWM) del convertidor	49
3.6. Conclusiones del Capítulo 3	55

4. Pruebas de simulación y experimentales	56
4.1. Estimación y control directo del convertidor	58
4.1.1. Pruebas con simulaciones numéricas - Control directo	62
4.1.1.1. Prueba no. 1: Primer Propuesta SED, convertidor de 5 niveles, condiciones ideales	62
4.1.1.2. Prueba no. 2: Segunda Propuesta SESD, convertidor de 5 niveles, condiciones ideales	67
4.1.1.3. Comparación propuesta 1 SED / propuesta 2 SESD .	71
4.1.1.4. Prueba no. 3: Segunda Propuesta SESD, convertidor de 9 niveles, condiciones ideales	73
4.1.1.5. Prueba no. 3.A: Utilizando sensores de tensión, con- vertidor de 9 niveles, condiciones ideales	78
4.1.1.6. Prueba no. 4: Segunda Propuesta SESD, convertidor de 9 niveles, considerando incertidumbre paramétrica	81
4.1.1.7. Prueba no. 5: Segunda Propuesta SESD, convertidor de 9 niveles, con ruido en la medición de tensión y corriente de salida	86
4.1.1.8. Prueba no. 6: Segunda Propuesta SESD, convertidor de 9 niveles, considerando incertidumbre paramétrica y ruido en las mediciones de tensión y corriente de salida	91
4.1.2. Pruebas experimentales - Control directo	96
4.1.2.1. Prueba no. 7: Segunda Propuesta SESD, convertidor de 9 niveles - Pruebas experimentales	96

4.2. Control del convertidor con modulación por ancho de pulso (PWM)	103
4.2.1. Pruebas con simulaciones numéricas - Control PWM	107
4.2.1.1. Prueba no. 8: Segunda Propuesta SESD, estimación con esquema de modulación de tipo PWM, condicio- nes ideales	107
4.2.1.2. Prueba no. 9: Segunda Propuesta SESD, estimación de valores promedio con modulación PWM, condi- ciones ideales	113
4.2.1.3. Prueba no. 10: Segunda Propuesta SESD, estimación de valores promedio con modulación PWM, conside- rando incertidumbre paramétrica y ruido en las me- diciones de tensión y corriente de salida	119
4.2.2. Pruebas experimentales - Control PWM	123
4.2.2.1. Prueba no. 11: Segunda Propuesta SESD, estimación de valores promedio con modulación PWM - Pruebas experimentales	123
4.3. Singularidades del esquema de estimación propuesto	131
4.3.1. Control Directo	131
4.3.2. Modulación PWM	134
4.4. Conclusiones del Capítulo 4	137
5. Conclusiones y Recomendaciones	139
5.1. Aportaciones	141
5.2. Recomendaciones para trabajos futuros	141

A. Códigos de MATLAB de los esquemas de estimación	143
A.1. Primer Propuesta SED - Control directo	143
A.2. Segunda Propuesta SESD - Control directo	149
A.3. Segunda Propuesta SESD - Control con modulación PWM	152
A.4. Segunda Propuesta SESD - Control con modulación PWM, estimación de valores promedio	156
 Bibliografía	 160

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Presencia de convertidores de Electrónica de Potencia en las redes eléctricas.	3
2.1. Estructura básica de un FCMC de n -niveles conectado a una carga de tipo Resistivo-Inductiva (R-L).	18
3.1. Proyección de las ecuaciones pasadas al instante presente, $t = kT$. . .	28
3.2. Diagrama de flujo de la primer propuesta de estimación.	36
3.3. Diagrama de flujo de la segunda propuesta de estimación.	45
3.4. Representación gráfica de un control directo.	47
3.5. Diagrama de bloques de la implementación del estimador con un control directo del convertidor.	48
3.6. Representación gráfica de una modulación por ancho de pulso (PWM).	51
3.7. Diagrama de bloques de la implementación del estimador en un control con modulación PWM.	52
3.8. Diagrama de flujo de la segunda propuesta de estimación para una modulación PWM.	54

4.1. Diagrama a bloques del sistema de prueba - control directo del convertidor.	58
4.2. Diagrama de flujo de la primer propuesta de estimación aplicada a un control directo.	63
4.3. Prueba 1: Tensión y corriente de salida. SED, CDir, 5N, CI.	64
4.4. Prueba 1: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SED, CDir, 5N, CI.	65
4.5. Prueba 1: Error en las estimaciones. SED, CDir, 5N, CI.	66
4.6. Diagrama de flujo de la segunda propuesta de estimación aplicado a un control directo.	67
4.7. Prueba 2: Tensión y corriente de salida. SESD, CDir, 5N, CI.	68
4.8. Prueba 2: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD, CDir, 5N, CI.	69
4.9. Prueba 2: Error en las estimaciones. SESD, CDir, 5N, CI.	70
4.10. Prueba 3: Tensión y corriente de salida. SESD, CDir, 9N, CI.	74
4.11. Prueba 3: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD, CDir, 9N, CI.	75
4.12. Prueba 3: Error en las estimaciones. SESD, CDir, 9N, CI.	76
4.13. Prueba 3.A: Tensión y corriente de salida. Utilizando sensores de tensión, 9N, CI.	78
4.14. Prueba 3.A: Valor real de la tensión en los condensadores. Utilizando sensores de tensión, 9N, CI.	79
4.15. Prueba 4: Tensión y corriente de salida. SESD, CDir, 9N, IP.	82

4.16. Prueba 4: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD, CDir, 9N, IP.	83
4.17. Prueba 4: Error en las estimaciones. SESD, CDir, 9N, IP.	84
4.18. Prueba 5: Tensión y corriente de salida. SESD, CDir, 9N, RMTCS. . .	86
4.19. Prueba 5: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD, CDir, 9N, RMTCS.	88
4.20. Prueba 5: Error en las estimaciones. SESD, CDir, 9N, RMTCS. . . .	89
4.21. Prueba 6: Tensión y corriente de salida. SESD, CDir, 9N, IP, RMTCS.	91
4.22. Prueba 6: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD, CDir, 9N, IP, RMTCS.	93
4.23. Prueba 6: Error en las estimaciones. SESD, CDir, 9N, IP, RMTCS. . .	94
4.24. Prototipo de laboratorio, FCMC de 9 niveles.	96
4.25. Prueba 7: Tensión y corriente de salida. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.	97
4.26. Prueba 7: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.	98
4.27. Prueba 7: Error en las estimaciones. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.	99
4.28. Prueba 7: Acercamiento a los niveles de la tensión de salida. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.	101
4.29. Prueba 7: Transitorio de encendido, variación de la fuente de DC de 0 V a 100 V. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.	102

4.30. Prueba 7: Transitorio durante operación, variación de la fuente de DC de 100 V a 150 V. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.	102
4.31. Sistema de prueba - control PWM del convertidor.	104
4.32. Diagrama de flujo de la segunda propuesta de estimación aplicada a un control PWM.	108
4.33. Prueba 8: Tensión y corriente de salida. SESD, CPWM, 5N, CI.	109
4.34. Prueba 8: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD, CPWM, 5N, CI.	110
4.35. Prueba 8: Error en las estimaciones. SESD, CPWM, 5N, CI.	111
4.36. Sistema de prueba - control PWM del convertidor, para estimación de valores promedio.	114
4.37. Diagrama de flujo para estimar los los valores promedio de las tensiones de los condensadores con un control PWM.	115
4.38. Prueba 9: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, CI.	116
4.39. Prueba 9: Error en las estimaciones. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, CI.	117
4.40. Prueba 9: Tensión y corriente de salida. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, CI.	118
4.41. Prueba 10: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, IP, RMTCS.120	
4.42. Prueba 10: Error en las estimaciones. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, IP, RMTCS.	121

4.43. Prueba 10: Tensión y corriente de salida. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, IP, RMTCS.	122
4.44. Prototipo de laboratorio, FCMC de 5 niveles usando una modulación PWM.	123
4.45. Detector de flancos de subida y bajada, en las señales de control. . . .	124
4.46. Esquemático del circuito de detector de flancos para un FCMC de 5 niveles.	125
4.47. Prueba 11: Tensión y corriente de salida. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.	127
4.48. Prueba 11: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.	127
4.49. Prueba 11: Error en las estimaciones. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.	128
4.50. Prueba 11: Acercamiento a los niveles de la tensión de salida. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.	129
4.51. Prueba 11: Transitorio de encendido, variación de la fuente de DC de 0 V a 100 V. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.	130
4.52. Prueba 11: Transitorio durante operación, variación de la fuente de DC de 100 V a 150 V. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.	130
4.53. Error de convergencia en un control directo. Tensión y corriente de salida.	132

4.54. Error de convergencia en un control directo. Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores.	133
4.55. Error de convergencia en una modulación PWM, valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores.	135
A.1. Diagrama en simulink de la Primer Propuesta de Estimación, aplicada a un control directo.	148
A.2. Diagrama en simulink de la Segunda Propuesta de Estimación, aplicada a un control directo.	151
A.3. Diagrama en simulink de la Segunda Propuesta de Estimación, aplicada a un control PWM.	155
A.4. Diagrama en simulink de la Segunda Propuesta de Estimación modificada, aplicada a un control PWM.	159

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Variables asociadas a un FCMC de 5 niveles.	26
3.2. Secuencia de estados con una modulación PWM de un FCMC de 5 niveles.	50
4.1. Lista de abreviaturas utilizadas en el Capítulo 4.	57
4.2. Tensión nominal de operación de los condensadores flotantes en un FCMC de 5 niveles.	59
4.3. Tensión nominal de operación de los condensadores flotantes en un FCMC de 9 niveles.	59
4.4. Resumen de pruebas simuladas y experimentales para un control directo.	60
4.5. Parámetros del sistema para un control directo.	61
4.6. Prueba 1: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SED, CDir, 5N, CI.	65
4.7. Prueba 1: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SED, CDir, 5N, CI.	66
4.8. Prueba 2: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 5N, CI.	70

4.9. Prueba 2: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 5N, CI.	70
4.10. Prueba 3: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, CI.	77
4.11. Prueba 3: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, CI.	77
4.12. Prueba 4: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, IP.	85
4.13. Prueba 4: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, IP.	85
4.14. Prueba 5: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, RMTCS.	90
4.15. Prueba 5: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, RMTCS.	90
4.16. Prueba 6: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, IP, RMTCS.	95
4.17. Prueba 6: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, IP, RMTCS.	95
4.18. Prueba 7: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.	100
4.19. Prueba 7: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.	100
4.20. Parámetros del sistema para una modulación PWM.	105

4.21. Resumen de pruebas simuladas y experimentales para una modulación PWM.	106
4.22. Prueba 8: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CPWM, 5N, CI.	111
4.23. Prueba 8: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CPWM, 5N, CI.	112
4.24. Prueba 9: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, CI.	117
4.25. Prueba 9: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, CI.	117
4.26. Prueba 10: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, IP, RMTCS.	121
4.27. Prueba 10: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, IP, RMTCS.	121
4.28. Prueba 11: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.	128
4.29. Prueba 11: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.	128

NOMENCLATURA

SEPs	Sistemas Eléctricos de Potencia
GD	Generación Distribuida
CD, DC	Corriente Directa
CA, AC	Corriente Alterna
FCMC	Convertidor Multinivel de Condensadores Flotantes
PWM	Modulación por Ancho de Pulso
HVDC	Corriente Directa de Alta Tensión
FACTS	Sistemas Flexibles de Transmisión de AC
STATCOM	Compensador Estático Síncrono

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la demanda global de energía eléctrica ha crecido considerablemente. Así mismo, las preocupaciones por el agotamiento de los combustibles fósiles y el impacto adverso de su combustión en el medio ambiente y en la salud de la población, han incentivado la búsqueda de nuevas fuentes de energía como alternativa a este tipo de combustibles. En respuesta a los retos que esto implica, los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEPs) están cambiando. Actualmente, existe la tendencia de incorporar a la red eléctrica fuentes de energía renovables como: solar, eólica, hidráulica, etc. En México la Ley de Transición Energética (LTE) contempla que para el año 2024 el 35 % de la energía eléctrica del país sea generada por medio de energías renovables [1]. Actualmente, la hidroelectricidad es la principal fuente de generación en esta categoría con el 10.08 %, seguida de la eólica con un 3.05 % y la geotérmica con un 1.98 % de la generación total. Si bien, la capacidad instalada de generación eólica es mínima, se espera que en los próximos años tenga un crecimiento acelerado debido a que es la tecnología más competitiva comparada con el resto de las energías renovables. Igualmente, se pronostica que la generación fotovoltaica tenga un crecimiento importante, dado el gran potencial del país en este rubro.

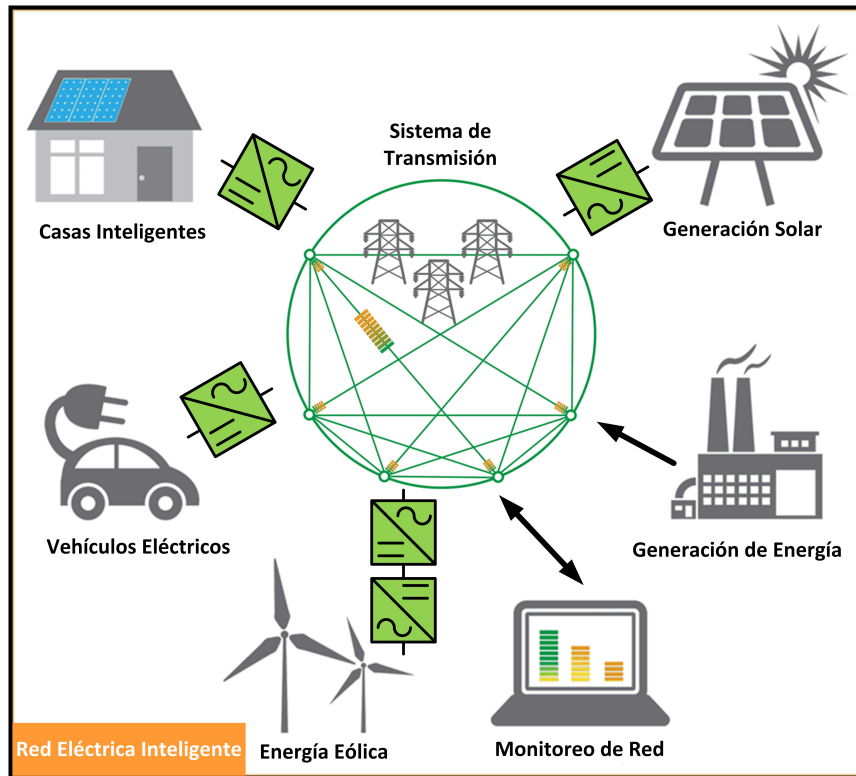
Así, los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEPs) están evolucionando para incorporar nuevas fuentes de generación, adaptarse a nuevos patrones de consumo, y al mismo tiempo, manejar nuevos esquemas para la producción y comercialización

de energía eléctrica. Por un lado, los sistemas de generación de energía eléctrica convencional, que utilizan combustibles fósiles, tienden a desaparecer. Entre las causas de esta tendencia se tienen los problemas de contaminación ambiental y la escasez de hidrocarburos, entre otras. Por otra parte, aparecen nuevos esquemas de generación, conocidos como *Generación Distribuida* (GD). La GD se define como aquel tipo de generación de pequeña escala que se conecta directamente a las redes de distribución -en los distintos niveles de tensión que se tengan- y preferentemente cerca de los centros de consumo. Las principales categorías de estos sistemas son [2]:

- Generación Distribuida (GD): Generación de energía en las redes de distribución. Comprende recursos como unidades de generación o plantas de biogás y fuentes de energía renovable como eólica y solar.
- Almacenamiento de energía: baterías, volantes inerciales, entre otras.
- Demanda programada: Cambios en el patrón del consumo de los usuarios en respuesta a las condiciones del mercado, como precios variables o pago de incentivos.

Mientras que los costos de la generación convencional siguen aumentando, el precio de los sistemas de *Generación Distribuida* (GD) y renovables continúan disminuyendo [3]. Con esto, su penetración en los sistemas de potencia sigue aumentando.

Por lo general, este nuevo tipo de generación no puede ser conectado directamente a la red eléctrica debido a la incompatibilidad de los parámetros técnicos de ambos sistemas como: tensión, frecuencia, contenido armónico, entre otros. Por lo tanto, se requiere de una interfaz para que dichos sistemas puedan ser conectados a las redes eléctricas que se encargan del transporte y distribución de la energía eléctrica. Estas interfaces son implementadas con dispositivos de *Electrónica de Potencia* que acondicionan la energía para que pueda ser compartida entre un sistema y otro. Esta idea se ilustra en la Fig. 1.1, en donde se observa que el convertidor estático tiene un rol muy importante en el control y acondicionamiento de la energía eléctrica.



Toon, J. (2018). Applying lessons learned from one of the biggest blackouts in history. [online] Phys.org. Disponible en: <https://phys.org/news/2014-02-lessons-biggest-blackouts-history.html> [26 de Mayo de 2018].

Figura 1.1: Presencia de convertidores de Electrónica de Potencia en las redes eléctricas.

Así, los convertidores estáticos permiten realizar funciones, como controlar los flujos de potencia, implementar consumo programado, optimizar la generación, etc. Estas funciones serían difícilmente implementadas en un sistema eléctrico tradicional.

Por otra parte, los avances en los dispositivos semiconductores de potencia y en los microprocesadores, han propiciado el desarrollo de nuevas topologías de conversión estática que resuelven algunas de las dificultades técnicas de la aplicación de la electrónica de potencia en redes eléctricas. Entre dichos desarrollos se tiene a las topologías de convertidores estáticos conocidas como multinivel [4].

Las contribuciones más importantes de los convertidores multinivel son: habilitan la aplicación de convertidores estáticos en niveles de tensión mayores que las especificaciones de los dispositivos individuales, reducen el gradiente de tensión

dv/dt de las formas de onda, adaptados para aplicaciones de media y alta tensión. En la actualidad, dichos sistemas han sido propuestos para aplicaciones fotovoltaicas, microturbinas, celdas de combustible, turbinas eólicas y sistemas de almacenamiento de energía incluyendo los coches eléctricos; son extensamente utilizados como filtros activos, FACTS, STATCOMs, entre otros [5–10].

Existen diferentes estructuras o topologías de convertidores multinivel [11–15], sin embargo, todas producen una tensión a la salida que está formada por más de dos niveles discretos de tensión. Así mismo, los niveles discretos de tensión son asegurados por condensadores cargados o fuentes de tensión independientes, que son conectados con la salida por medio de semiconductores de potencia. Así, funcionalmente, la tensión de salida se puede expresar como una combinación lineal de las tensiones de dichos condensadores (o fuentes) [16,17]. Además, las tensiones de los condensadores (o fuentes) aseguran la repartición equilibrada de la tensión entre los semiconductores que conforman la estructura. Esto último exige que dichas tensiones se mantengan reguladas, ya que por una parte aseguran el buen desempeño del convertidor (i.e. tensión de salida conformada por niveles discretos de tensión), y por otra parte la integridad física del convertidor (i.e. repartición equilibrada de la tensión entre los semiconductores de la estructura). Dicho requerimiento exige un lazo de control, el cual a su vez requiere del conocimiento de dichas tensiones.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se mencionó en la parte introductoria de este trabajo, un requerimiento de los convertidores multinivel es mantener reguladas las tensiones de los condensadores que forman parte del convertidor. Esto conlleva a la utilización de un control de balance de tensión de los condensadores como el presentado en [18,19]. El control de balance de tensión necesita conocer en todo momento el valor de la tensión de cada condensador para poder llevar a cabo la regulación [20]. La solución directa sería la medición utilizando sensores de tensión, sin embargo, esta solución presenta

los siguientes problemas:

- La utilización de sensores es difícil debido a los altos niveles de tensión que se manejan.
- Generaría un incremento en el costo monetario del convertidor (hardware requerido).
- Ocasionaría el aumento en el tamaño del equipo.
- Se necesitaría un gran número de canales de comunicación, lo que comprometería la confiabilidad del sistema.
- La complejidad crece cuando se tiene un gran número de niveles ya que es necesario introducir más condensadores y por lo tanto más sensores de tensión.

Por estas razones, en años recientes se han presentado estrategias de estimación que permiten una *medición* indirecta de la tensión de estos condensadores, eliminando así los problemas antes mencionados.

En este trabajo se propone un método para estimar las tensiones de los condensadores en convertidores multinivel. El desarrollo de la propuesta se basa en una estructura multinivel de tipo condensadores flotantes (FCMC), ya que en el laboratorio se cuenta con un prototipo para las validaciones experimentales. Sin embargo, esto no limita la validez de la metodología para aplicarse a otras estructuras de conversión multinivel en donde la salida se pueda expresar como una función lineal de las tensiones de los condensadores y de una función de modulación.

En la siguiente sección se presenta una revisión bibliográfica de artículos científicos en donde se han propuesto esquemas de estimación para convertidores estáticos de tipo multinivel.

1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los algoritmos de estimación que permiten conocer la tensión en los condensadores que forman parte de la estructura interna de los convertidores multinivel han sido objeto de intensa investigación durante la última década [16–19, 21–27]. El prescindir de sensores de tensión permite reducir el costo monetario del equipo y además incrementar su confiabilidad; son una herramienta deseable cuando se tiene un gran número de condensadores. A continuación se presenta un análisis crítico de trabajos recientes realizados sobre este tipo de algoritmos, teniendo un mayor interés por aquellos que se enfocan particularmente en el convertidor multinivel de tipo condensadores flotantes.

1.2.1 ESTIMADORES PARA FCMC

En [17] se propone un esquema para estimar la tensión en los condensadores y la fuente de DC en un FCMC de 5 niveles que utiliza un solo sensor de tensión a la salida del convertidor. El método propuesto toma en cuenta la función de conmutación que relaciona las tensiones de los condensadores con la tensión de salida, obteniendo así una ecuación algebraica que representa a las mediciones de la tensión de salida. Luego de varias mediciones se crea un sistema de ecuaciones sobredeterminado que se puede resolver mediante el método de *mínimos cuadrados ordinarios*. El algoritmo se prueba en simulación con datos reales. Sin embargo, para que la aproximación sea buena, la estimación debe realizarse un gran número de veces entre conmutaciones, por lo que sería difícil usarla en tiempo real.

En [19] se propone un algoritmo que utiliza un solo sensor de tensión para estimar la tensión en los condensadores y la fuente de DC. Se obtiene una diferencia de tensión tomando el estado de conmutación actual y el pasado, de esta forma se puede obtener una “medición” indirecta del condensador que a conmutado de apaga-

do ha encendido (encendido / apagado) que posteriormente se utiliza en un control de tensión. Sin embargo, solo se puede estimar un condensador por conmutación. El esquema se prueba físicamente en un FCMC de 5 niveles.

Por su parte en [21] se desarrolla un esquema basado en el Filtro de Kalman. Se proponen 2 metodologías dependiendo de las mediciones disponibles: sensando la tensión de DC de entrada en el primer caso y midiendo la tensión de salida en el segundo, en cualquiera de ellos es necesario también contar con la medición de la corriente de salida. El modelado dinámico de la tensión de los condensadores se realiza con una aproximación de primer orden y se muestran resultados simulados en un FCMC de 4 niveles.

Adicionalmente en [18], se muestra un esquema para estimar la tensión de los condensadores utilizando un sensor de tensión y otro de corriente a la salida. Básicamente, cada condensador parte de una condición inicial y conociendo la corriente de salida y la función de conmutación se puede conocer la dinámica interna de cada condensador (dinámica de lazo abierto). Sin embargo, la precisión en la estimación depende de que en algún momento se consiga medir directamente la tensión de cada condensador, y esto solo puede asegurarse si se utilizan todos los niveles de tensión o forzando los estados que aseguren una medición directa que corrija los errores introducidos por el funcionamiento en lazo abierto. Se realizan pruebas experimentales con un convertidor de 5 niveles.

1.2.2 ESTIMADORES PARA OTRAS TOPOLOGÍAS

En la literatura se proponen 2 estrategias generales para conocer la tensión de los condensadores en los convertidores multinivel a partir de la medición de la tensión de salida. En la primer estrategia [22], la tensión en los condensadores se mide directamente cuando solo hay un condensador conectado a la salida. Una deficiencia importante es que la estrategia falla cuando más de un condensador define la tensión

de salida. Por lo tanto, las oportunidades de medición están limitadas, especialmente en convertidores de un gran número de niveles. Para los casos donde múltiples condensadores intervienen, se tiene que implementar un mecanismo de estimación diferente para resolver este problema.

La segunda estrategia [23, 24] no depende de la medición directa. Se utilizan las señales de conmutación para detectar si un condensador ha sido conectado o desconectado entre una transición y otra. Utilizando un solo sensor de tensión a la salida, se sustrae la medición actual de la anterior y por consiguiente, se obtiene la medición de la tensión en el condensador que produce el nuevo nivel de tensión. Esta técnica solo puede ser utilizada en una modulación PWM, ya que entre cada conmutación solo cambia el estado de un condensador. En ciertos casos se debe introducir la medición de la corriente de salida para incluir la dinámica interna de los condensadores.

En años recientes la topología que ha recibido mas atención es el Convertidor Multinivel Modular [16, 25–33] debido a sus ventajas sobre las demás, principalmente su modularidad. En [25] se presenta un esquema para estimar las tensiones en los condensadores en cada módulo. El esquema propuesto se basa en un sistema predictivo-correctivo. La parte predictiva se realiza midiendo la corriente de salida y conociendo las señales internas de modulación, mientras que el modelo de corrección se basa en la medición de la tensión de salida. Se presentan resultados en simulación para mostrar el desempeño del algoritmo.

Por su lado en [26], se desarrolla una técnica de medición para la topología modular, donde el mínimo número de sensores de tensión es de dos. Cada sensor toma la medición de un grupo de módulos, los cuales están conectados en serie, una nueva medición es adquirida cuando se activa un solo módulo. Posteriormente, se implementa un algoritmo de estimación midiendo la corriente de salida y conociendo los módulos activos y así se determina la dinámica de las tensiones. Sin embargo, presenta complicaciones cuando se tiene un gran número de niveles ya que se re-

queriría de un mayor número de sensores; en el documento se presentan pruebas simuladas para 20 módulos y experimentales para 8 módulos.

Otras propuestas de solución se basan en esquemas de observación. Por ejemplo, en [16] se propone un observador no lineal utilizando el modelo instantáneo del convertidor; mediante la medición de la corriente de salida se logra estimar la tensión en los condensadores. En comparación con utilizar sensores de tensión, resulta más ventajosa la medición de corriente ya que se manejan grandes niveles de tensión por lo que se necesitarían sensores de gran capacidad. Sin embargo, el desarrollo matemático del esquema es complejo y depende de ganancias difíciles de determinar.

Por otro lado, en [27], basado en un observador de modos deslizantes y utilizando el modelo instantáneo del convertidor, se propone un observador para la tensión de la fuente de DC y de los condensadores. Se selecciona el observador de modos deslizantes que utiliza un enfoque de control equivalente debido a su robustez ante incertidumbres en las ecuaciones del sistema. El método requiere de la medición de la corriente y tensión de salida del convertidor.

Se puede concluir que efectivamente los esquemas de estimación están teniendo un gran interés debido a sus claras ventajas sobre la técnica común de medir las tensiones con sensores. Muchas de las propuestas tienen similitudes entre si ya que se basan en la medición de la tensión y corriente de salida, desafortunadamente algunas no presentan una explicación clara de como se dedujo el método o las ecuaciones utilizadas. Otros esquemas son demasiado complicados para ser implementados en tiempo real, o tienen parámetros de ajuste difíciles de sintonizar. Además, las pruebas realizadas muestran pocos resultados dejando dudas de la correcta operación de los métodos propuestos ante diferentes escenarios operativos del sistema.

1.3 MOTIVACIÓN

Uno de los principales elementos de las redes eléctricas del futuro serán los convertidores estáticos de potencia [34–37]. Dentro de la familia de los convertidores estáticos, los convertidores de tipo multinivel tienen mucho potencial para aplicaciones relacionadas con el tratamiento y control de grandes cantidades de energía, es decir, su potencial en aplicaciones en los sistemas eléctricos de potencia es muy grande [38–44].

Actualmente, se conocen 3 estructuras de conversión multinivel [12–15]: Convertidores de tipo neutro anclado conocida como NPC (Neutral-Point-Clamped), de tipo condensadores flotantes, y convertidores de tipo modular, incluyendo los puentes H en cascada y las más recientes estructuras denominadas convertidores multinivel modulares. En general, todas ellas utilizan condensadores cargados como un componente principal en sus estructuras. Por lo tanto, un lazo de regulación para el control de las tensiones en los condensadores es fundamental. Así mismo, los lazos de control requieren conocer las tensiones de los condensadores para llevar a cabo la regulación. La medición directa es la solución más obvia. Sin embargo, cuando el número de niveles aumenta, esta tarea se vuelve compleja y costosa. Así, la medición indirecta con un número reducido de sensores se vuelve muy atractiva en dichos casos [45–47].

Dadas las bondades de usar un reducido número de sensores, en los últimos años se han propuesto algoritmos de estimación u observadores que permiten conocer indirectamente el valor de esas tensiones. Muchas de éstas propuestas presentan complicaciones como: complejidad matemática, alta dependencia del modelo del sistema, requieren sintonizar ganancias que no son fáciles de determinar, las pruebas experimentales documentadas usan todos sus niveles de tensión, solo se prueban utilizando un tipo de control, etc.; además, algunos no pueden ser utilizados en tiempo real o sería muy costoso.

Por consiguiente, en este trabajo se propone un método que contribuye a la

solución de algunas problemáticas de los métodos de estimación existentes. El trabajo se enfoca en el convertidor de condensadores flotantes, ya que se cuenta con un prototipo para las pruebas experimentales. Sin embargo, la propuesta es aplicable a otras estructuras en donde la tensión de salida se pueda representar como una combinación lineal de las tensiones de los condensadores y una función de modulación.

1.4 OBJETIVO

Desarrollar un método para estimar la tensión de los condensadores en un convertidor multinivel de tipo condensadores flotantes utilizando un solo sensor de tensión y otro de corriente. Entre las metas consideradas se tienen las siguientes:

- Que se pueda implementar en tiempo real, es decir que sea de bajo costo computacional.
- Que sea robusto ante variaciones de los parámetros del sistema.
- En la medida de lo posible, que no requiera sintonización.
- Que la estimación sea lo suficientemente buena para poder realizar el control interno del sistema.

1.5 HIPÓTESIS

La tensión de salida de los convertidores multinivel, considerados en este trabajo, está determinada por una combinación lineal de las tensiones de los condensadores, y una función de modulación definida por las señales de control de los dispositivos semiconductores de potencia. Además, entre conmutaciones, la evolución de la tensión de los condensadores puede aproximarse como la carga (descarga) de un condensador considerando una corriente constante. Las funciones de conmutación

son conocidas –son determinadas por la estrategia de control–, igualmente, la evolución de las tensiones entre conmutaciones son conocidas e igualmente determinadas por las funciones de conmutación y por la corriente de salida.

Así, en cada instante de conmutación se puede obtener una ecuación algebraica lineal, que en conjunto con los estados de conmutación pasados permita obtener un sistema de ecuaciones que se pueda resolver y de esta manera estimar la tensión en cada uno de los condensadores.

1.6 METODOLOGÍA

Para alcanzar el objetivo de la tesis, se aplicó la siguiente metodología:

1. Revisión bibliográfica.

Se realizó una revisión de la bibliografía para conocer el estado del arte de los algoritmos de estimación aplicados a los convertidores multinivel. En este punto, se hizo un análisis crítico de los trabajos encontrados, lo cual nos permitió conocer las principales ventajas del enfoque propuesto por éste trabajo.

2. Modelado del sistema.

- a)* Se modeló el sistema por un conjunto de ecuaciones lineales basadas en la función de conmutación y en las mediciones de la tensión y corriente de salida.
- b)* Estudio del modelo planteado: Se estudiaron las propiedades del conjunto de ecuaciones para conocer la factibilidad de ser usadas para determinar (estimar) las tensiones de los condensadores.

3. Desarrollo del método de estimación.

A partir del estudio realizado en el punto 2, se procedió a desarrollar un método para estimar las tensiones de los condensadores.

4. Pruebas en simulación.

Se procedió a realizar las pruebas de validación del (los) algoritmo(s) propuesto(s) y se evaluó su desempeño cuando se utiliza en conjunto con el lazo de control de las tensiones de los condensadores y de la corriente de salida. Se consideraron diversos escenarios operativos para asegurarse de su correcto funcionamiento en los posibles escenarios operativos del sistema.

5. Optimización de los algoritmos propuestos.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en el punto 4, se procedió a la mejora del algoritmo en vista de solucionar algunos de los problemas encontrados.

6. Pruebas experimentales.

A partir de las simulaciones, se optimizó el código para implementar el algoritmo en un banco de prueba experimental. Dadas las limitaciones de la capacidad de computo disponible, el código debió de optimizarse para poderlo implementar en tiempo real. De acuerdo a la naturaleza del sistema, el tiempo disponible para los cálculos es limitado a unas cuantas decenas de microsegundos.

7. Evaluación del algoritmo.

Se evaluó el algoritmo propuesto analizando el error que existe entre el valor estimado y la medición. Además, se observó el impacto que tienen las estimaciones en el control de balance de tensión de los condensadores así como en el control de corriente.

8. Escritura de tesis.

La documentación del trabajo se realizó de manera continua.

1.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis se divide en 5 capítulos y 1 apéndice, a continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos:

1. Primer Capítulo:

Se presenta una introducción haciendo énfasis en la importancia de los convertidores multinivel en las redes eléctricas. Se plantea el problema que se busca resolver, se realiza una revisión bibliográfica sobre trabajos encontrados en la literatura y la motivación por la cual se pretende realizar este trabajo. Además, se plantea el objetivo general y los objetivos particulares, la hipótesis que permitirá cumplir tales objetivos y se presenta la metodología con la que se trabajó a lo largo de este proyecto.

2. Segundo Capítulo:

Se presenta el modelo dinámico del FCMC a partir del cual se definen las diferentes variables que describen el comportamiento dinámico del convertidor; se identifican las propiedades del modelo sobre las cuales se basa el método de estimación propuesto.

3. Tercer capítulo:

Se desarrollan los métodos de estimación propuestos y se detalla su aplicación en convertidores multinivel de tipo condensadores flotantes, usando un control directo y un control por modulación por ancho de pulsos (PWM).

4. Cuarto Capítulo:

Se presentan las pruebas realizadas tanto en simulación y como experimentales, donde se analiza el desempeño del esquema propuesto.

5. Quinto Capítulo:

Se dan las conclusiones y recomendaciones del trabajo desarrollado.

6. Apéndice A:

Se presentan detalles de los algoritmos y de su implementación; se muestra el código y los diagramas de *MATLAB* / *simulink* que se usaron en las pruebas.

1.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 1

En los últimos años, los Sistemas Eléctricos de Potencia están en plena evolución. Así, la incorporación de fuentes de energía renovables, principalmente eólica y fotovoltaica, es una de las principales características distintivas en las redes eléctricas del futuro. Los convertidores estáticos de potencia son el elemento que habilita la incorporación de dichas fuentes en los sistemas tradicionales de corriente alterna. Específicamente, los convertidores estáticos de tipo multinivel presentan características muy atractivas en dichas aplicaciones. En particular, los convertidores multinivel han causado un gran interés de estudio debido a las características favorables que presentan en aplicaciones de media y alta potencia.

Este gran interés motiva a que investigadores expertos en el área desarrollen nuevas herramientas que permitan utilizar dichos sistemas de conversión de una manera confiable, competitiva y eficaz. La complejidad de su estructura, así como la necesidad de controlar las tensiones en los condensadores de la estructura, hace necesario tener un control para dichas variables. A la fecha se han propuesto varias estrategias para el control de las variables internas del convertidor. Todas ellas requieren conocer la tensión en cada uno de los condensadores internos de la estructura. Sin embargo, cuando el número de condensadores es elevado, esta tarea se complica y la solución directa a través de sensores presenta dificultades adicionales.

Es por ello, que en años recientes se han desarrollado observadores o estimadores que permiten medir indirectamente dichas variables, pero muchas de estas propuestas son complejas tanto en el planteamiento matemático como en su implementación en tiempo real. Por estas situaciones, en este trabajo se plantea encontrar un esquema de estimación con un fundamento matemático sencillo, que se pueda escalar a n -estimaciones y que puede ser aplicado en tiempo real sin dificultades.

Así mismo, se han expuesto las motivaciones del proyecto, sus objetivos y la metodología utilizada.

CAPÍTULO 2

CONVERTIDOR MULTINIVEL DE CONDENSADORES FLOTANTES

La topología de convertidor multinivel de tipo condensadores flotantes (FCMC) fue propuesta a inicios de los 90s por Meynard and Foch [48–51]. Su principio de operación se basa en el uso de condensadores para definir, de manera equilibrada, la repartición de la tensión de entrada entre los interruptores; así mismo, las tensiones de los condensadores determinan los niveles discretos de la tensión de salida.

Una de las propiedades sobresalientes de este convertidor son las múltiples combinaciones de conmutación para el mismo nivel de tensión; esta característica es conocida como *propiedad de redundancia de estados*. Esta propiedad ofrece flexibilidad en la estrategia de control para el balance de las tensiones de los condensadores; varias estrategias para el balance de las tensiones de los condensadores se basan en esta propiedad.

Con el fin de entender mas a detalle el funcionamiento de este convertidor, a continuación se presenta el modelado dinámico del convertidor.

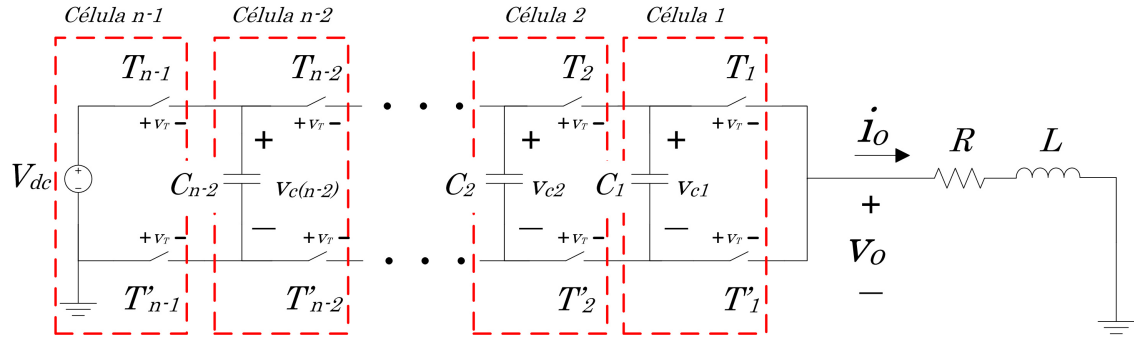


Figura 2.1: Estructura básica de un FCMC de n -niveles conectado a una carga de tipo Resistivo-Inductiva (R-L).

2.1 MODELO DINÁMICO DEL FCMC

En la Fig. 2.1 se muestra la estructura básica de un FCMC de n número de niveles. Consiste de $n - 1$ células de conmutación, las cuales están formadas por los interruptores complementarios T y T' a los que se les aplican señales de control complementarias, sc y $\overline{sc} \in \{0(OFF), 1(ON)\}$, respectivamente. Se define una variable denominada *función de conmutación*, S_j , definida por las señales de control:

$$S_j = sc_j - sc_{j+1} \text{ para } j = 1, 2, \dots, n - 1. \quad (2.1)$$

donde si $j = n - 1$, $sc_{j+1} = 0$.

Así, la función de conmutación es una variable discreta con tres posibles valores, $S_j \in \{-1, 0, 1\}$.

Entonces, la tensión de salida, v_o , se puede definir como una combinación lineal de la tensión de entrada V_{dc} y $n - 2$ tensiones de los condensadores, v_{cj} , es decir:

$$v_o = \sum_{j=1}^{n-1} v_{cj} \cdot S_j. \quad (2.2)$$

donde si $j = n - 1$, $v_{cj} = V_{dc}$.

Así mismo, el nivel de tensión, que se define como α , se expresa en función de las señales de control como:

$$\alpha = \sum_{j=1}^{n-1} s c_j \quad (2.3)$$

Como se expresa por (2.2), las tensiones de los condensadores se combinan en serie para definir el nivel de tensión a la salida, por lo tanto, la corriente que circula por ellos es la corriente de salida, i_o , y el sentido es determinado por la función de conmutación S_j , de acuerdo con:

$$i_{c_j} = -S_j \cdot i_o \quad (2.4)$$

Así, la dinámica de la tensión de cada condensador está dada por:

$$\frac{dv_{c_j}}{dt} = -\frac{1}{C_j} \cdot i_o(t) \cdot S_j \quad (2.5)$$

Ya que S_j puede tomar 3 valores, se pueden definir 3 posibles escenarios para la dinámica de los condensadores:

- $S_j = -1$, la corriente i_{c_j} es positiva (entra al condensador j y lo carga).
- $S_j = 0$, la corriente i_{c_j} es nula (el condensador j se mantiene sin cambio).
- $S_j = 1$, la corriente i_{c_j} es negativa (sale del condensador j y lo descarga).

En (2.2) se observa que los niveles en la tensión de salida están directamente definidos por la tensión en los condensadores. Así, la condición que determina que los niveles discretos de tensión sean de igual magnitud es que las tensiones de los condensadores deben de estar definidos de acuerdo con la siguiente expresión:

$$v_{c_j} = \frac{j}{n-1} \cdot V_{dc} \quad (2.6)$$

Cumplir con la restricción (2.6) permite, además, anclar las tensiones de los interruptores a una fracción de la tensión de entrada, V_{dc} ; los interruptores serán sometidos a una tensión, v_T , definida por (2.7).

$$v_T = \frac{1}{n-1} \cdot V_{dc} \quad (2.7)$$

Por otra parte, el modelo del convertidor alimentando una carga de tipo resistivo-inductiva (R-L), se puede expresar por:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{S}_j)\mathbf{x} + \mathbf{B}V_{dc} \quad (2.8)$$

el cual representa un modelo híbrido, donde:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_o \\ v_{c1} \\ \vdots \\ v_{c(n-2)} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$, representa el vector de estados.

$$\mathbf{A}(\mathbf{S}_j) = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \frac{S_1}{L} & \frac{S_2}{L} & \cdots & \frac{S_{n-2}}{L} \\ -\frac{S_1}{C_1} & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ -\frac{S_2}{C_2} & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ -\frac{S_{n-2}}{C_{n-2}} & 0 & \cdots & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{S_{n-1}}{L} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

donde:

- $\mathbf{A}(\mathbf{S}_j) \in \mathbb{R}^{(n-1) \times (n-1)}$
- $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$

Adicionalmente, el número de posibles estados de conmutación de un convertidor de n niveles está dado por:

$$N_{st} = 2^{n-1} \quad (2.12)$$

Como ya se mencionó, esta topología presenta una propiedad particular llamada *redundancia de estados*, es decir, diferentes combinaciones de conmutación para los interruptores, pueden producir un mismo nivel de tensión a la salida del convertidor. Esta propiedad es utilizada por la mayoría de los esquemas propuestos para el control de la tensión en los condensadores.

2.1.1 PROPIEDADES DEL MODELO DINÁMICO DEL FCMC

A continuación se presenta un análisis de las propiedades que presentan las ecuaciones del modelo dinámico del FCMC, y sobre las cuales se basa el método de estimación propuesto.

La principal propiedad sobre la que se basa este trabajo es que la tensión de salida del convertidor se puede expresar como una combinación lineal (ecuaciones lineales) de las funciones de conmutación, S_j , de las tensiones de los condensadores, v_{cj} , y de la tensión de la fuente de DC, V_{dc} . Por lo tanto, se puede generar un sistema de ecuaciones lineales que pueda ser resuelto para obtener una estimación de las tensiones (v_{cj} y V_{dc}). Para ello se deberá de formar un sistema de $(n-1)$ ecuaciones para encontrar las $(n-1)$ incógnitas del sistema.

Sin embargo se presentan algunas dificultades y el conformar un sistema de ecuaciones consistentes no es tan sencillo. Por un lado, durante cada ejecución del algoritmo de control del convertidor, un nuevo estado de conmutación (ecuación) es aplicado; las ecuaciones obtenidas en tiempos anteriores al instante actual no podrían ser incluidas al sistema de ecuaciones, ya que entre cada estado de conmutación las tensiones de los condensadores han tenido una dinámica, por lo que la información

contenida en las ecuaciones pasadas ya no sería válida en el instante actual.

Por otra parte, la dinámica de la tensión entre conmutaciones puede ser calculada a partir de (2.5). Esta ecuación solo depende de la capacitancia de los condensadores flotantes, C ; de la corriente de salida, i_o ; de la función de conmutación, S_j ; y del tiempo que dura cada estado de conmutación, Δt . Esto permite que la dinámica entre conmutaciones se pueda estimar (en lazo-abierto) fácilmente, dado que todas estas variables son conocidas o se pueden medir. Así, la dinámica de cada condensador puede ser incluida para ajustar las ecuaciones correspondientes a estados de conmutación pasados, con lo que se podría conformar un sistema de ecuaciones lineales consistente válido en el instante actual.

Cabe mencionar que algunos métodos de balance de tensión requieren conocer los valores instantáneos de las tensiones en los condensadores para funcionar adecuadamente. Por lo tanto, el sistema de observación deberá de ser muy preciso para poderlo incorporar en un lazo de control para las tensiones de los condensadores. Lo que se busca con este lazo de control es cumplir con la restricción en (2.6); en caso contrario, si las estimaciones no son precisas, la tensión nominal de operación de cada condensador no podría ser alcanzada, y por lo tanto se comprometería la seguridad del sistema, ya que los interruptores se someterían a una tensión diferente a la especificada en (2.7). Por ello, una prueba muy importante es el desempeño del lazo de control de tensión cuando este utilice los valores estimados de las tensiones; sin una buena estimación el control de tensión no podría lograr su objetivo.

Con lo anterior, se da una idea general sobre las propiedades que presentan las ecuaciones del FCMC y como pueden ser aplicadas para diseñar un esquema para estimar las tensiones de los condensadores y de la fuente de DC. En el siguiente capítulo se presentan los esquemas de estimación propuestos, los cuales están basados en las propiedades expuestas en esta sección.

2.2 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 2

En este capítulo, se introduce el modelo dinámico del FCMC. Se detalla la estructura interna del convertidor así como las variables involucradas. Las ecuaciones presentadas están basadas en un modelo matemático simple del convertidor, ya que como se ha mencionado en el Capítulo 1, se requiere que el algoritmo de estimación no sea complejo computacionalmente para poder ser utilizado en tiempo real. Además, de las ecuaciones presentadas, solo una tiene dependencia paramétrica al depender de la capacitancia de los condensadores.

Como se explicó, la tensión de salida del convertidor puede ser expresada de una manera simple como una combinación lineal de las funciones de conmutación y de las tensiones de los condensadores (ecuación lineal). También, la dinámica de los condensadores se puede obtener a partir de las funciones de conmutación, de la corriente de salida, la capacitancia de los condensadores y del tiempo de aplicación de los estados de conmutación. Por lo tanto, utilizando el estado de conmutación actual y estados de conmutación pasados, se podría generar un sistema de ecuaciones que se pueda resolver para determinar el valor de todas las variables.

Durante cada nuevo instante de conmutación, se puede obtener una nueva ecuación que contendrá información referente al valor de la tensión de los condensadores y de la fuente de DC, sin embargo, al estar involucradas las tensiones de más de un condensador (en una ecuación) sería imposible diferenciar la contribución de cada uno sobre la tensión de salida. Es por ello que se propone la creación de un sistema de ecuaciones.

En el siguiente capítulo se desarrolla un esquema de estimación para las tensiones de los condensadores, haciendo uso de las ideas presentadas en este capítulo.

CAPÍTULO 3

ESQUEMAS DE ESTIMACIÓN PROPUESTOS

En este capítulo se desarrollan las propuestas de solución para la estimación de la tensión de los condensadores y de la fuente de DC en un convertidor multinivel de condensadores flotantes. El esquema propuesto se basa en el modelo presentado en el Capítulo 2. Se plantea un sistema de ecuaciones lineales para representar la tensión de salida como una combinación lineal de la tensión de los condensadores y de la fuente de tensión de entrada. Luego, se proponen dos alternativas para estimar las tensiones de los condensadores y de la fuente de entrada a partir de dicho sistema de ecuaciones.

En la primer propuesta se plantea la solución exacta del sistema de ecuaciones, donde se tiene un mismo número de incógnitas y de ecuaciones; mientras que la segunda propuesta es una simplificación de la primera, en donde se propone un sistema de ecuaciones sobredeterminado (mayor número de ecuaciones que de incógnitas), cuya solución aproximada se obtiene por el método de mínimos cuadrados ordinarios.

Además, se explica detalladamente como implementar el esquema de estimación en un control de lazo-cerrado del convertidor, tanto en el caso de un control directo como en el caso de una modulación de ancho de pulsos (PWM) multinivel.

3.1 PRELIMINARES

En el Capítulo 2 se estableció que la tensión de salida del convertidor multinivel es determinada por una combinación lineal de las tensiones de los condensadores y de la fuente de alimentación de entrada, como se expresa en (2.2). Es decir, para cada estado de conmutación del convertidor se puede obtener una ecuación lineal para la tensión de salida, en la cual están involucradas las tensiones de los condensadores, la tensión de entrada y las señales de control. En la Tabla 3.1 se muestra un resumen de las variables principales de un convertidor de 5-niveles. Se tienen 16 estados de conmutación (numerados del 0 al 15), definidos por las combinaciones de las señales de control ($sc_1 - sc_4$). Para cada estado de conmutación se muestran las funciones de conmutación, $S_1 - S_4$, definidas por (2.1), la ecuaciones de la tensión de salida, definidas por (2.2), así como el nivel de tensión, α y el signo de la evolución de las tensiones de cada condensador, considerando una corriente de salida positiva.

Así, suponiendo una secuencia de estados de conmutación sucesivos, se puede definir un sistema de ecuaciones lineales representando la tensión de salida, de tal forma que este sistema se pueda resolver para estimar las tensiones de los condensadores y el valor de la fuente de alimentación de entrada. Para ello se requiere medir la tensión de salida del convertidor y conocer las funciones de conmutación, las cuales se determinan a partir de las señales de control. Luego, se forma un sistema de ecuaciones que se pueda invertir para encontrar las incógnitas del sistema [17], es decir las tensiones de los condensadores y de la fuente de alimentación de entrada. Este método presenta el inconveniente de que requiere una elevada frecuencia de muestreo, o que en ocasiones el sistema de ecuaciones es inconsistente o tiene un número infinito de soluciones. Otra posibilidad, que también ya ha sido explorada en algunos trabajos [18], es aprovechar los estados en los cuales la tensión de salida está definida por una sola tensión de un condensador o de la fuente de alimentación (ver Tabla 3.1); esto permite conocer el valor de dicha tensión (esto equivale a una medición directa). Luego, en los casos donde no se tiene una medición directa, se

Medición directa	Señales de control				Funciones de conmutación				Ecuaciones de la tensión de salida	Nivel de tensión	Dinámica Interna en condensadores			
	No.	sc_4	sc_3	sc_2	sc_1	S_4	S_3	S_2			S_1	v_o	α	Δv_{e3}
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C_1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	$S_1 \cdot v_{c1}$	1	0	0	-1
	2	0	0	1	0	0	0	1	-1	$S_2 \cdot v_{e2} + S_1 \cdot v_{c1}$	1	0	-1	+1
C_2	3	0	0	1	1	0	0	1	0	$S_2 \cdot v_{e2}$	2	0	-1	0
	4	0	1	0	0	0	1	-1	0	$S_3 \cdot v_{e3} + S_2 \cdot v_{e2}$	1	-1	+1	0
	5	0	1	0	1	0	1	-1	1	$S_3 \cdot v_{e3} + S_2 \cdot v_{e2} + S_1 \cdot v_{c1}$	2	-1	+1	-1
	6	0	1	1	0	0	1	0	-1	$S_3 \cdot v_{e3} + S_1 \cdot v_{c1}$	2	-1	0	+1
C_3	7	0	1	1	1	0	1	0	0	$S_3 \cdot v_{e3}$	3	-1	0	0
	8	1	0	0	0	1	-1	0	0	$S_4 \cdot V_{dc} + S_3 \cdot v_{e3}$	1	+1	0	0
	9	1	0	0	1	1	-1	0	1	$S_4 \cdot V_{dc} + S_3 \cdot v_{e3} + S_1 \cdot v_{c1}$	2	+1	0	-1
	10	1	0	1	0	1	-1	1	-1	$S_4 \cdot V_{dc} + S_3 \cdot v_{e3} + S_2 \cdot v_{e2} + S_1 \cdot v_{c1}$	2	+1	-1	+1
	11	1	0	1	1	1	-1	1	0	$S_4 \cdot V_{dc} + S_3 \cdot v_{e3} + S_2 \cdot v_{e2}$	3	+1	-1	0
	12	1	1	0	0	1	0	-1	0	$S_4 \cdot V_{dc} + S_2 \cdot v_{e2}$	2	0	+1	0
	13	1	1	0	1	1	0	-1	1	$S_4 \cdot V_{dc} + S_2 \cdot v_{e2} + S_1 \cdot v_{c1}$	3	0	+1	-1
	14	1	1	1	0	1	0	0	-1	$S_4 \cdot V_{dc} + S_1 \cdot v_{c1}$	3	0	0	+1
V_{dc}	15	1	1	1	1	1	0	0	0	$S_4 \cdot V_{dc}$	4	0	0	0

Tabla 3.1: Variables asociadas a un FCMC de 5 niveles.

recurre a una estimación en lazo abierto según (2.5). Este método presenta el inconveniente de que puede tener grandes errores cuando las mediciones directas nunca ocurren o cuando están muy espaciadas.

Además, la dinámica de la tensión entre conmutaciones sucesivas, hace que las ecuaciones formadas con estados de conmutación pasados no sean válidas en el momento actual, entonces este es otro aspecto que se deberá de considerar al estimar las tensiones a partir del sistema de ecuaciones lineales que definen la tensión de salida.

Sin embargo, la dinámica del condensador se puede aproximar por su dinámica de lazo-abierto (2.5) si se conocen los parámetros que determinan dicha dinámica. De esta forma, esta información se puede incorporar al sistema y actualizar las ecuaciones pasadas para hacerlas vigentes en el momento actual; la solución de este nuevo sistema ofrecería una solución muy aproximada al valor real de la tensión de los condensadores.

3.2 PRIMER PROPUESTA: SISTEMA DE ECUACIONES DINÁMICAS (SED)

La primer propuesta se basa en un sistema de ecuaciones que se irá actualizando en cada nuevo estado de conmutación (estado presente). El sistema formado tendrá tantas ecuaciones como número de incógnitas (número de tensiones a estimar). En cada nuevo estado de conmutación se formará una nueva ecuación, y las ecuaciones pasadas serán actualizadas considerando la dinámica que tuvieron las tensiones de los condensadores entre el estado pasado anterior y el estado presente; de esta manera el sistema de ecuaciones será dinámico al ir incorporando la dinámica de las tensiones de los condensadores entre cada conmutación.

Para explicar esta propuesta, en la Fig. 3.1 se muestra una línea de tiempo,

tomando a kT como el instante actual. A través del tiempo se han tenido diferentes estados de conmutación a partir de los cuales se formaron ecuaciones lineales representando a la tensión de salida.

Las ecuaciones pasadas no se pueden utilizar en el momento actual (kT) debido a la dinámica de las tensiones de los condensadores entre conmutaciones. Sin embargo, ya que la dinámica de las tensiones de los condensadores es conocida, dada por (2.5), las ecuaciones pasadas se pueden ajustar para que sean válidas en el instante kT . El sistema de ecuaciones actualizado será válido para el instante actual, conteniendo información para estimar las tensiones de los condensadores en dicho instante de tiempo.

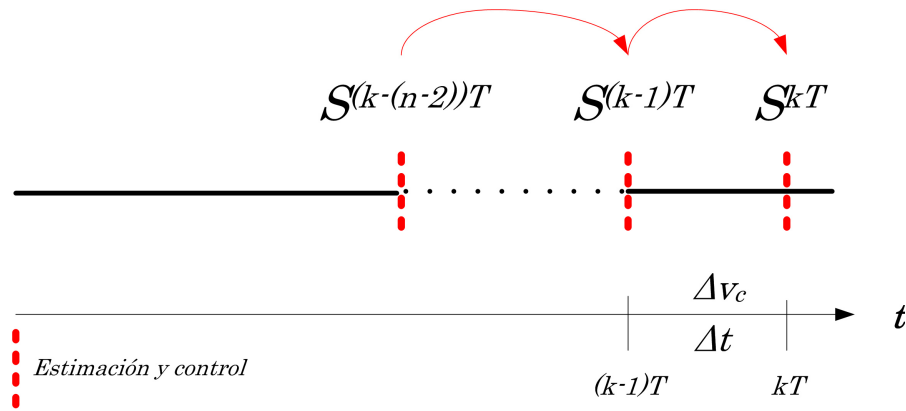


Figura 3.1: Proyección de las ecuaciones pasadas al instante presente, $t = kT$.

El número de variables que se desea estimar es de $(n - 1)$: la tensión de la fuente de DC y las tensiones de $(n - 2)$ condensadores flotantes, entonces se necesita $(n - 1)$ ecuaciones. Estas ecuaciones estarán definidas por (2.2). A continuación se explica como se forma el sistema de ecuaciones requerido:

1. Definición de la ecuación en el instante $t = kT$

Con la medición de la tensión de salida, v_o , y conociendo las señales de control,

se forma la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} v_o^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1^k & S_2^k & \cdots & S_{n-1}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{c1}^k \\ v_{c2}^k \\ \vdots \\ v_{c(n-1)}^k \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

donde:

- S_y^k , $y = 1, \dots, (n - 1)$, son las funciones de conmutación del convertidor en $t = kT$.
- v_{cy}^k , $y = 1, \dots, (n - 1)$, son las tensiones de los condensadores (incógnitas) en $t = kT$, donde $v_{c(n-1)}^k$ es la tensión de la fuente de DC.
- v_o^k , es la medición (observación) de la tensión de salida en $t = kT$, el cual es función lineal de las tensiones en los condensadores v_c^k y de las funciones de conmutación S^k .

2. Definición de las ecuaciones pasadas del instante $t = (k - 1)T$ a $t = (k - (n - 2))T$

Se toman $(n - 2)$ ecuaciones pasadas expresándolas en su forma matricial:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_{o1}^{k-1} \\ \hat{v}_{o2}^{k-1} \\ \vdots \\ \hat{v}_{o(n-2)}^{k-1} \end{bmatrix}}_{\hat{v}_o^{k-1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} S_1^{k-1} & S_2^{k-1} & \cdots & S_{(n-1)}^{k-1} \\ S_1^{k-2} & S_2^{k-2} & \cdots & S_{(n-1)}^{k-2} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ S_1^{k-(n-2)} & S_2^{k-(n-2)} & \cdots & S_{(n-1)}^{k-(n-2)} \end{bmatrix}}_{\mathcal{A}(S_j)} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_{c1}^{k-1} \\ \hat{v}_{c2}^{k-1} \\ \vdots \\ \hat{v}_{c(n-1)}^{k-1} \end{bmatrix}}_{\hat{v}_c^{k-1}} \quad (3.2)$$

Expresando (3.2) en su forma compacta:

$$\hat{v}_o^{k-1} = \mathcal{A}(S_j) \hat{v}_c^{k-1} \quad (3.3)$$

donde:

- $\mathcal{A}(\mathbf{S}_j) \in \mathbb{R}^{(n-2) \times (n-1)}$, es la matriz que contiene las funciones de conmutación $S_y^{k-1} - S_y^{k-(n-2)}$, $y = 1, \dots, (n-1)$, de las ecuaciones pasadas que van desde $t = (k-1)T$ a $t = (k-(n-2))T$.
- $\hat{\mathbf{v}}_c^{k-1} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$, es el vector columna de las tensiones estimadas de los condensadores \hat{v}_{cy}^{k-1} , $y = 1, \dots, (n-1)$, en $t = (k-1)T$, donde $\hat{v}_{c(n-1)}^{k-1}$ es la estimación de la tensión de la fuente de DC.
- $\hat{\mathbf{v}}_o^{k-1} \in \mathbb{R}^{(n-2) \times 1}$, son las *observaciones estimadas* de la tensión de salida \hat{v}_{ox}^{k-1} , $x = 1, \dots, (n-2)$, en $t = (k-1)T$. Estos valores son obtenidos a partir de los estimados de las tensiones de los condensadores \hat{v}_{cy}^{k-1} , $y = 1, \dots, (n-1)$, en $t = (k-1)T$ y de las funciones de conmutación S_y , que van desde $t = (k-1)T$ a $t = (k-(n-2))T$ (ecuaciones pasadas).

En el sistema de ecuaciones (3.3), tanto $\hat{\mathbf{v}}_o^{k-1}$ como $\hat{\mathbf{v}}_c^{k-1}$ son vectores que se van actualizando (al instante k) en cada periodo de muestreo - esto se explica en la siguiente sección. También, la matriz que contiene los estados de conmutación pasados $\mathcal{A}(\mathbf{S}_j)$, se actualiza con el último estado de conmutación de $t = (k-1)T$. Es por ello que este método se ha nombrado *Sistema de Ecuaciones Dinámicas*.

El conjunto de ecuaciones (3.1-3.2) definen la tensión de salida en términos de las tensiones de los condensadores (combinación lineal). La ecuación (3.1) contiene información de la tensión de los condensadores en $t = kT$. Sin embargo, (3.2) contiene información de la tensión de los condensadores en $t = (k-1)T$, lo cual deberá ser ajustado para que la información sea válida en $t = kT$, y así tener un sistema de ecuaciones con información correspondiente al instante de tiempo actual, es decir $t = kT$.

La actualización de (3.2) al instante $t = kT$ se puede llevar a cabo considerando la dinámica de la tensión de los condensadores entre los instantes de conmutación $t = (k-1)T$ a $t = kT$, definida a partir de (2.5). De esta manera las ecuaciones definidas por (3.1-3.2) serán temporalmente compatibles, conteniendo todas información de

las tensiones de los condensadores actualizadas al instante $t = kT$. Así, este sistema podrá usarse para estimar las tensiones de los condensadores en el instante $t = kT$.

A continuación se explica el proceso de actualización del sistema de ecuaciones (3.2).

3.2.1 PASO 1: ACTUALIZACIÓN EN LAZO ABIERTO DE LAS ESTIMACIONES DE LAS TENSIONES DE LOS CONDENSADORES

El sistema de ecuaciones (3.2) define las *observaciones estimadas* de la tensión de salida en términos de las tensiones estimadas de los condensadores en $t = (k-1)T$, y lo que se requiere es un sistema de ecuaciones en términos de las tensiones estimadas de los condensadores en $t = kT$. Entonces, lo que se requiere es ajustar los estimados de las tensiones de los condensadores en $t = (k-1)T$ al instante $t = kT$. Así, tomando las estimaciones de la tensión de los condensadores del instante $t = (k-1)T$, y conociendo la corriente de salida en el instante $t = kT$, i_o^k , se puede calcular el incremento o decremento de la tensión en los condensadores entre $t = (k-1)T$ y $t = kT$, definido como, Δv_c^k :

$$\Delta v_{cj}^k = \frac{1}{C} \cdot \int_{(k-1)T}^{kT} i_{cj}^{k-1} \cdot dt \quad (3.4)$$

introduciendo (2.4) en (3.4) resulta en:

$$\Delta v_{cj}^k = -\frac{1}{C} \cdot i_o^{k-1} \cdot T \cdot S_j^k \quad (3.5)$$

Con $i_o^{k-1} = i_o^k$, ya que se considera constante durante todo el tiempo que es aplicado el estado de conmutación actual.

Así, (3.5) representa una estimación en *lazo abierto* de las variaciones de las tensiones de los condensadores entre $t = (k-1)T$ y el instante $t = kT$; se considera que la corriente de salida permanece constante entre instantes de conmutación, es

decir T es suficientemente pequeño con respecto a la dinámica de la corriente de salida.

Las estimaciones de las tensiones de los condensadores en el instante de tiempo $t = (k-1)T$ representa una estimación en *lazo abierto* tomando en cuenta la variación de la tensión dada en (3.5) y se expresa por:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_{c1}^{k-} \\ \hat{v}_{c2}^{k-} \\ \vdots \\ \hat{v}_{c(n-1)}^{k-} \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{v}}_c^{k-}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_{c1}^{k-1} \\ \hat{v}_{c2}^{k-1} \\ \vdots \\ \hat{v}_{c(n-1)}^{k-1} \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{v}}_c^{k-1}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta v_{c1}^k \\ \Delta v_{c2}^k \\ \vdots \\ \Delta v_{c(n-1)}^k \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{v}_c^k} \quad (3.6)$$

Expresando (3.6) en su forma compacta:

$$\hat{\mathbf{v}}_c^{k-} = \hat{\mathbf{v}}_c^{k-1} + \Delta \mathbf{v}_c^k \quad (3.7)$$

donde:

- $\hat{\mathbf{v}}_c^{k-1} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$, es el vector columna de las tensiones estimadas de los condensadores \hat{v}_{cy}^{k-1} , $y = 1, \dots, (n-1)$, en $t = (k-1)T$, donde $\hat{v}_{c(n-1)}^{k-1}$ es la estimación de la tensión de la fuente de DC.
- $\Delta \mathbf{v}_c^k \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$, es el vector columna de las variaciones de tensión de los condensadores Δv_{cy}^k , $y = 1, \dots, (n-1)$, entre $t = (k-1)T$ y $t = kT$; con $\Delta v_{c(n-1)}^k = 0$ porque se considera que entre instantes de conmutación la fuente de alimentación de entrada permanece constante.
- $\hat{\mathbf{v}}_c^{k-} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$, es el vector columna de las tensiones estimadas en *lazo abierto* de los condensadores \hat{v}_{cy}^{k-} , $y = 1, \dots, (n-1)$, ajustada al instante $t = kT$. El superíndice $k-$ expresa la estimación en *lazo abierto*.

3.2.2 PASO 2: ACTUALIZACIÓN EN LAZO ABIERTO DE LAS ECUACIONES PASADAS

Ahora, tomado en cuenta la actualización en *lazo abierto* de las estimaciones de las tensiones de los condensadores, dada por (3.6), las ecuaciones pasadas que definen la estimación de la tensión de salida, (3.2), son actualizadas reemplazando las estimaciones de las tensiones de los condensadores en $t = (k - 1)T$ por las estimaciones ajustadas, definidas en (3.6), resultando en:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_{o1}^k \\ \hat{v}_{o2}^k \\ \vdots \\ \hat{v}_{o(n-2)}^k \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{v}}_o^k} = \underbrace{\begin{bmatrix} S_1^{k-1} & S_2^{k-1} & \cdots & S_{(n-1)}^{k-1} \\ S_1^{k-2} & S_2^{k-2} & \cdots & S_{(n-1)}^{k-2} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ S_1^{k-(n-2)} & S_2^{k-(n-2)} & \cdots & S_{(n-1)}^{k-(n-2)} \end{bmatrix}}_{\mathcal{A}(S_j)} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_{c1}^{k-} \\ \hat{v}_{c2}^{k-} \\ \vdots \\ \hat{v}_{c(n-1)}^{k-} \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{v}}_c^{k-}} \quad (3.8)$$

Expresando (3.8) en su forma compacta:

$$\hat{\mathbf{v}}_o^k = \mathcal{A}(S_j) \hat{\mathbf{v}}_c^{k-} \quad (3.9)$$

donde:

- $\hat{\mathbf{v}}_o^k \in \mathbb{R}^{(n-2) \times 1}$, es el vector columna de las *observaciones estimadas* de la tensión de salida \hat{v}_{ox}^k , $x = 1, \dots, (n - 2)$, en $t = kT$. Estos valores son obtenidos a partir de los estimados en *lazo abierto* de las tensiones de los condensadores \hat{v}_{cy}^{k-} , $y = 1, \dots, (n - 1)$, en $t = (k-1)T$ y de las funciones de conmutación S_y , que van desde $t = (k - 1)T$ a $t = (k - (n - 2))T$ (ecuaciones pasadas).

3.2.3 PASO 3: EL SISTEMA DE ECUACIONES EXACTO Y SU SOLUCIÓN

Ahora, ya que tanto (3.1) como (3.8) definen la tensión de salida, en $t = kT$, como una combinación lineal de las tensiones de los condensadores, entonces (3.1) y (3.8) se pueden combinar para formar un sistema de $(n - 1)$ ecuaciones lineales a partir del cual se puede estimar la tensión de los $(n - 1)$ condensadores. El sistema resultante es:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} v_o^k \\ \vdots \\ \hat{v}_{o(n-2)}^k \end{bmatrix}}_{\mathbf{y}} = \underbrace{\begin{bmatrix} S_1^k & S_2^k & \cdots & S_{(n-1)}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_1^{k-(n-2)} & S_2^{k-(n-2)} & \cdots & S_{(n-1)}^{k-(n-2)} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}(\mathbf{S}_j)} \underbrace{\begin{bmatrix} v_{c1}^k \\ v_{c2}^k \\ \vdots \\ v_{c(n-1)}^k \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}} \quad (3.10)$$

Expresando (3.10) en su forma compacta:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}(\mathbf{S}_j) \mathbf{x} \quad (3.11)$$

donde:

- $\mathbf{A}(\mathbf{S}_j) \in \mathbb{R}^{(n-1) \times (n-1)}$, es la matriz cuadrada definida por las funciones de conmutación del instante $t = kT$ (ecuación actual) y por las funciones de conmutación pasadas (ecuaciones pasadas).
- $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$, es el vector columna de las tensiones de los condensadores (incógnitas) v_{cy}^k , $y = 1, \dots, (n - 1)$, en $t = kT$.
- $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$, es el vector columna con la medición (observación) de la tensión de salida v_o^k y *observaciones estimadas* \hat{v}_{ox}^k , $x = 1, \dots, (n - 2)$, en $t = kT$.

La solución de (3.11) es una estimación de las tensiones de los condensadores y de la tensión de la fuente de entrada, en $t = kT$, es decir:

$$\hat{\mathbf{x}}^k = \mathbf{A}(\mathbf{S}_j)^{-1} \mathbf{y} \quad (3.12)$$

donde $\hat{\mathbf{x}}^k$ representa el vector de tensiones estimadas en $t = kT$. *Éstos estimados en $t = kT$ serán utilizados en el próximo instante de muestreo ($t = (k + 1)T$) pasando a ser las tensiones de los condensadores estimadas en $t = (k - 1)T$ de (3.2).*

Sin embargo, la estimación de las tensiones a partir de (3.12) solo se puede llevar a cabo si el rango de la matriz $\mathbf{A}(\mathbf{S}_j)$ es igual a $(n - 1)$ (i.e. $\mathcal{R}(\mathbf{A}(\mathbf{S}_j)) = (n - 1)$), lo cual significa que ésta se puede invertir o que es un sistema de ecuaciones regular.

Esta última condición no siempre se puede satisfacer. El control que genera los estados de conmutación puede generar una secuencia de ecuaciones para la cual el sistema de ecuaciones resultante no tenga solución o tenga mas de una solución. Esto es una limitación del algoritmo propuesto. El sistema de ecuaciones se puede volver irregular cuando, por ejemplo:

- El control genere de manera consecutiva el mismo estado de conmutación, generando dependencia lineal entre los renglones de la matriz.
- Exista dependencia lineal entre columnas.
- Se presenta el estado 0 de conmutación con lo que se tendrían renglones nulos.
- Existen secuencias de control de 4 ecuaciones consecutivas que definen un sistema de ecuaciones irregular; el algoritmo de estimación no tiene ningún control sobre esto.

Para manejar las restricciones impuestas, se deben incluir rutinas específicas para los diferentes casos que se presenten, incrementando la complejidad del algoritmo y el costo computacional requerido. Entre las adecuaciones se puede recurrir a la reducción del sistema o la aplicación del método de mínimos cuadrados ordinarios para tener estimados en cada instante de muestreo.

La Fig. 3.2 muestra el diagrama de flujo del algoritmo de la primer propuesta de estimación. Como se puede apreciar, existen múltiples rutinas que dependen, principalmente, de las funciones de conmutación que definen la matriz $A(S_j)$; en todo momento se busca obtener un sistema de ecuaciones para el cual exista una

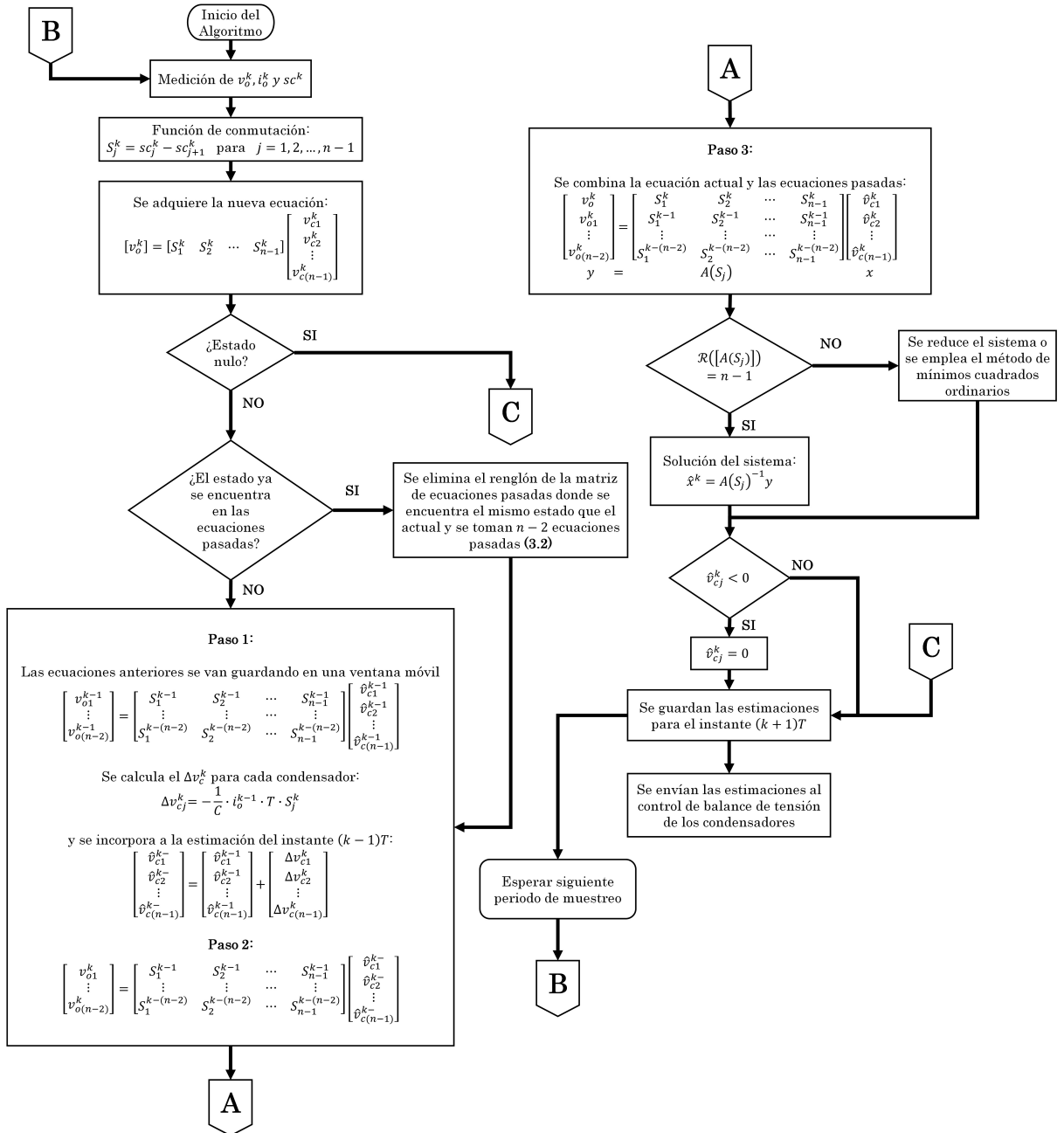


Figura 3.2: Diagrama de flujo de la primer propuesta de estimación.

solución única. Además, el esquema requiere el cálculo de la inversa de una matriz. El cálculo de la inversa es un proceso que demanda considerable tiempo computacional lo que lo limita en las aplicaciones en tiempo real, principalmente cuando el número de estimaciones sea grande.

3.3 SEGUNDA PROPUESTA: SISTEMA DE ECUACIONES SOBRE-DETERMINADO (SESD)

Debido a las restricciones de la primer propuesta de estimación, en esta sección se presenta una segunda propuesta. Esta segunda propuesta se basa en un sistema de ecuaciones sobre-determinado, cuya solución representa una estimación de las tensiones de los condensadores y de la fuente de alimentación de entrada. La solución aproximada del sistema de ecuaciones sobre-determinado se lleva a cabo usando el método de mínimos cuadrados ordinarios.

El sistema de ecuaciones se define con un sistema base (de rango completo) que asegura la solución del sistema para cualquier estado de conmutación. Es decir, se define una parte fija del sistema de ecuaciones que conserva los valores estimados de las tensiones y se combina con una nueva ecuación definida por el estado de conmutación en el instante de tiempo $t = kT$; el sistema de ecuaciones sobre-determinado podrá siempre resolverse por el método de mínimos cuadrados ordinarios.

Además, la simplicidad de la base fija seleccionada reduce la complejidad del algoritmo de estimación, reduciendo los cálculos requeridos y por lo tanto haciendo que este algoritmo se pueda aplicar a sistemas con un gran número de condensadores. A continuación se detalla el esquema de estimación propuesto usando un sistema sobre-determinado de ecuaciones lineales.

1. Definición del sistema de ecuaciones base

Debido a las dificultades de la primer propuesta, se hizo una simplificación de

ella. La simplificación se basa en lo siguiente: (1) Como se observa en (3.8), este sistema de ecuaciones sirve para conservar los estimados de las tensiones, por lo que cualquier sistema de ecuaciones que permita conservar dichas estimaciones puede emplearse para definir esta parte del sistema de ecuaciones; (2) Las inconsistencias del sistema completo se deben a que veces, no existe información de algunos estados por lo que no se les puede estimar; (3) Relacionado con el punto anterior, el rango completo del sistema no siempre se puede asegurar, teniendo que recurrir a rutinas especiales para cada caso.

La primera restricción mencionada se puede solucionar si la matriz de coeficientes $\mathcal{A}(\mathcal{S}_j)$ de (3.2), se compone de una matriz base, \mathcal{A}_B , definida como el sistema base canónico en \mathbb{R}^{n-1} , es decir:

$$\mathcal{A}_B = I_{(n-1) \times (n-1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Así, el sistema (3.2) se replanteará de la siguiente forma:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_{o1}^{k-1} \\ \hat{v}_{o2}^{k-1} \\ \vdots \\ \hat{v}_{o(n-1)}^{k-1} \end{bmatrix}}_{\hat{v}_o^{k-1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}}_{\mathcal{A}_B} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_{c1}^{k-1} \\ \hat{v}_{c2}^{k-1} \\ \vdots \\ \hat{v}_{c(n-1)}^{k-1} \end{bmatrix}}_{\hat{v}_c^{k-1}} \quad (3.14)$$

Nótese que el sistema (3.14) se compone de $n-1$ ecuaciones, a diferencia del sistema (3.2) que contiene $n-2$ ecuaciones. Ahora, expresando (3.14) en su forma compacta:

$$\hat{v}_o^{k-1} = \mathcal{A}_B \hat{v}_c^{k-1} \quad (3.15)$$

donde:

- $\mathcal{A}_B \in \mathbb{R}^{(n-1) \times (n-1)}$, es la matriz que contiene las ecuaciones base. Está parte del sistema de ecuaciones actuará como una memoria del valor previo de las tensiones estimadas en los condensadores y en la fuente de alimentación.
- $\hat{\mathbf{v}}_c^{k-1} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$, es el vector columna de las tensiones estimadas de los condensadores \hat{v}_{cy}^{k-1} , $y = 1, \dots, (n-1)$, en $t = (k-1)T$, donde $\hat{v}_{c(n-1)}^{k-1}$ es la estimación de la tensión de la fuente de DC.
- $\hat{\mathbf{v}}_o^{k-1} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$, son las *observaciones estimadas* de la tensión de salida \hat{v}_{oy}^{k-1} , $y = 1, \dots, (n-1)$, en $t = (k-1)T$. Estos valores son obtenidos a partir de los estimados de las tensiones de los condensadores \hat{v}_{cy}^{k-1} , $y = 1, \dots, (n-1)$, en $t = (k-1)T$ y de las ecuaciones base.

Al igual que en el primer esquema, las estimaciones pasadas se deberán de actualizar para tomar en cuenta la dinámica de las tensiones entre dos instantes de muestreo (o de conmutación) consecutivos.

3.3.1 PASO 1: ACTUALIZACIÓN EN LAZO ABIERTO DE LAS ESTIMACIONES DE LAS TENSIONES DE LOS CONDENSADORES

Para hacer la corrección de las estimaciones pasadas (obtenidas en $t = (k-1)T$), se les debe agregar el incremento / decremento de la tensión que se presenta entre dos conmutaciones sucesivas, es decir entre $t = (k-1)T$ y $t = kT$.

$$\Delta v_{cj}^k = -\frac{1}{C} \cdot i_o^{k-1} \cdot T \cdot S_j^k \quad (3.16)$$

Este procedimiento se explicó en el primer esquema, y esta dado por (3.6) o

re-escrito como (3.17):

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_{c1}^{k-} \\ \hat{v}_{c2}^{k-} \\ \vdots \\ \hat{v}_{c(n-1)}^{k-} \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{v}}_c^{k-}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_{c1}^{k-1} \\ \hat{v}_{c2}^{k-1} \\ \vdots \\ \hat{v}_{c(n-1)}^{k-1} \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{v}}_c^{k-1}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta v_{c1}^k \\ \Delta v_{c2}^k \\ \vdots \\ \Delta v_{c(n-1)}^k \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{v}_c^k} \quad (3.17)$$

Expresando (3.17) en su forma compacta:

$$\hat{\mathbf{v}}_c^{k-} = \hat{\mathbf{v}}_c^{k-1} + \Delta \mathbf{v}_c^k \quad (3.18)$$

donde:

- $\hat{\mathbf{v}}_c^{k-1} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$, es el vector columna de las tensiones estimadas de los condensadores \hat{v}_{cy}^{k-1} , $y = 1, \dots, (n-1)$, en $t = (k-1)T$, donde $\hat{v}_{c(n-1)}^{k-1}$ es la estimación de la tensión de la fuente de DC.
- $\Delta \mathbf{v}_c^k \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$, es el vector columna de las variaciones de tensión de los condensadores Δv_{cy}^k , $y = 1, \dots, (n-1)$, entre $t = (k-1)T$ y $t = kT$; con $\Delta v_{c(n-1)}^k = 0$ porque se considera que entre instantes de conmutación la fuente de alimentación de entrada permanece constante.
- $\hat{\mathbf{v}}_c^{k-} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$, es el vector columna de las tensiones estimadas en *lazo abierto* de los condensadores \hat{v}_{cy}^{k-} , $y = 1, \dots, (n-1)$, ajustada al instante $t = kT$. *El superíndice $k-$ expresa la estimación en lazo abierto.*

3.3.2 PASO 2: ACTUALIZACIÓN EN LAZO ABIERTO DE LAS ECUACIONES BASE

Una vez calculada la variación de la tensión entre los dos instantes de tiempo, se actualizan las ecuaciones base, es decir:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_{o1}^k \\ \hat{v}_{o2}^k \\ \vdots \\ \hat{v}_{o(n-1)}^k \end{bmatrix}}_{\hat{v}_o^k} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}}_{\mathcal{A}_B} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{v}_{c1}^{k-} \\ \hat{v}_{c2}^{k-} \\ \vdots \\ \hat{v}_{c(n-1)}^{k-} \end{bmatrix}}_{\hat{v}_c^{k-}} \quad (3.19)$$

Expresando (3.19) en su forma compacta:

$$\hat{v}_o^k = \mathcal{A}_B \hat{v}_c^{k-} \quad (3.20)$$

donde:

- $\hat{v}_o^k \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$, es el vector columna de las *observaciones estimadas* de la tensión de salida \hat{v}_{oy}^k , $y = 1, \dots, (n-1)$, en $t = kT$. Estos valores son obtenidos a partir de los estimados en *lazo abierto* de las tensiones de los condensadores \hat{v}_{cy}^{k-} , $y = 1, \dots, (n-1)$, en $t = (k-)T$ y de las ecuaciones base.

En esencia, (3.19) representa una aproximación de las tensiones de los condensadores en *lazo abierto*; se podría decir una estimación en *lazo abierto* para el instante de tiempo $t = kT$.

A continuación se muestra como combinando la ecuación (3.1) de la tensión de salida para el instante $t = kT$ y el sistema definido por (3.19) se forma un sistema sobre-determinado de ecuaciones lineales a partir del cual se lleva a cabo la estimación.

3.3.3 PASO 3: EL SISTEMA DE ECUACIONES SOBRE-DETERMINADO Y SU SOLUCIÓN

La tensión de salida del convertidor se ha definido en (2.2) como una combinación lineal de las tensiones de los condensadores y de la fuente de alimentación, y

expresada en (3.21) para el instante de conmutación $t = kT$ como:

$$\begin{bmatrix} v_o^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1^k & S_2^k & \cdots & S_{n-1}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{c1}^k \\ v_{c2}^k \\ \vdots \\ v_{c(n-1)}^k \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Ahora, dado que tanto (3.19) como (3.21) definen a la tensión de salida en $t = kT$, se pueden combinar para formar un sistema de ecuaciones lineales sobre-determinado, resultando en:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} v_o^k \\ \vdots \\ \hat{v}_{o1}^k \\ \hat{v}_{o2}^k \\ \vdots \\ \hat{v}_{o(n-1)}^k \end{bmatrix}}_{\mathbf{y}} = \underbrace{\begin{bmatrix} S_1^k & S_2^k & \cdots & S_{n-1}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_B} \underbrace{\begin{bmatrix} v_{c1}^k \\ v_{c2}^k \\ \vdots \\ v_{c(n-1)}^k \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}} \quad (3.22)$$

Expresando (3.22) en su forma compacta:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}_B \mathbf{x} \quad (3.23)$$

donde:

- $\mathbf{A}_B \in \mathbb{R}^{n \times (n-1)}$, es una matriz rectangular definida por las funciones de conmutación del instante $t = kT$ (ecuación actual) y por la matriz de ecuaciones base \mathcal{A}_B definida por (3.13).
- $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 1}$, es el vector columna de las tensiones de los condensadores (incógnitas) v_{cy}^k , $y = 1, \dots, (n-1)$, en $t = kT$.
- $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, es el vector columna con la medición (observación) de la tensión de salida v_o^k y *observaciones estimadas* \hat{v}_{oy}^k , $y = 1, \dots, (n-1)$, en $t = kT$.

La solución del sistema (3.23) representa la estimación de las tensiones para el instante de tiempo $t = kT$. Como se observa, la matriz \mathbf{A}_B no es una matriz cuadrada, entonces no puede ser invertida de manera directa para obtener la solución del sistema. Para encontrar la solución aproximada del sistema recurrimos a una solución aproximada usando el método de mínimos cuadrados ordinarios, es decir:

$$\hat{\mathbf{x}}^k = (\mathbf{A}_B^T \mathbf{A}_B)^{-1} \mathbf{A}_B^T \mathbf{y} \quad (3.24)$$

donde $\hat{\mathbf{x}}^k$ es el vector de los estimados para el instante $t = kT$. Note que la estimación está basada en una predicción en lazo abierto de las tensiones de los condensadores y una parte en lazo cerrado que es introducida por la ecuación definida en cada instante de conmutación $t = kT$. Además, el uso del sistema auxiliar (3.19) asegura que el sistema sobre-determinado siempre tenga solución - la inversa de $(\mathbf{A}_B^T \mathbf{A}_B)$ siempre existe -, sin importar la nueva ecuación que se incorpora en cada instante de muestreo.

Ahora, tomando ventaja del gran número de ceros que contiene la matriz \mathbf{A}_B (i.e. es una matriz dispersa) se puede resolver el sistema de ecuaciones para obtener una ecuación directa para cada una de las estimaciones. Así, las estimaciones se pueden expresar como:

$$\hat{v}_{cj}^k = \frac{v_o^k - [S_1^k \cdot \hat{v}_{o1}^k + \dots + S_{n-1}^k \cdot \hat{v}_{o(n-1)}^k]}{1 + (S_1^k)^2 + \dots + (S_{n-1}^k)^2} \cdot S_j^k + \hat{v}_{oj}^k \quad (3.25)$$

donde:

- S_j^k , $j = 1, \dots, (n - 1)$, son las funciones de conmutación del estado actual en $t = kT$.
- \hat{v}_{oj}^k , $j = 1, \dots, (n - 1)$, representa la estimación en *lazo abierto*, en $t = kT$, de la tensión del condensador j .

- \hat{v}_{cj}^k , $j = 1, \dots, (n - 1)$, representa la estimación, en $t = kT$, de la tensión del condensador j .

A partir de (3.25) se pueden entender los detalles de como funciona este esquema de estimación. En la primer parte:

$$\frac{v_o^k - [S_1^k \cdot \hat{v}_{o1}^k + \dots + S_{n-1}^k \cdot \hat{v}_{o(n-1)}^k]}{1 + (S_1^k)^2 + \dots + (S_{n-1}^k)^2} \cdot S_j^k + \dots$$

se obtiene un error, de la salida medida con respecto a la estimada; este error se divide entre el número de condensadores que participan en la definición de la tensión de salida en ese instante; este factor es común a todas las estimaciones y constituye un término de corrección en lazo cerrado, por lo que solo se calcula una sola vez.

La segunda parte de la ecuación representa la estimación en lazo abierto:

$$\dots + \hat{v}_{oj}^k$$

a la cual se le agrega el término de corrección de lazo cerrado. *Éstos estimados en $t = kT$ serán utilizados en el próximo instante de muestreo ($t = (k + 1)T$) pasando a ser las tensiones de los condensadores estimadas en $t = (k - 1)T$ de (3.14).*

El algoritmo para implementar el esquema de estimación se basa únicamente en (3.17) y (3.25), lo cual solo requiere de operaciones aritméticas básicas, dando como resultado un algoritmo de bajo costo computacional que puede fácilmente implementarse en aplicaciones en tiempo real.

En la Fig. 3.3 se muestra el diagrama de flujo para implementar el algoritmo de la segunda propuesta de estimación. En comparación con el diagrama de flujo de la primer propuesta, se puede observar que es más simple. Se han eliminado las rutinas de decisión, la utilización de matrices y el cálculo de las inversas, por lo que se obtiene una reducción considerable en el tiempo de ejecución del algoritmo, además su implementación es muy sencilla, permitiendo que se pueda usar en aplicaciones de control y estimación en tiempo real.

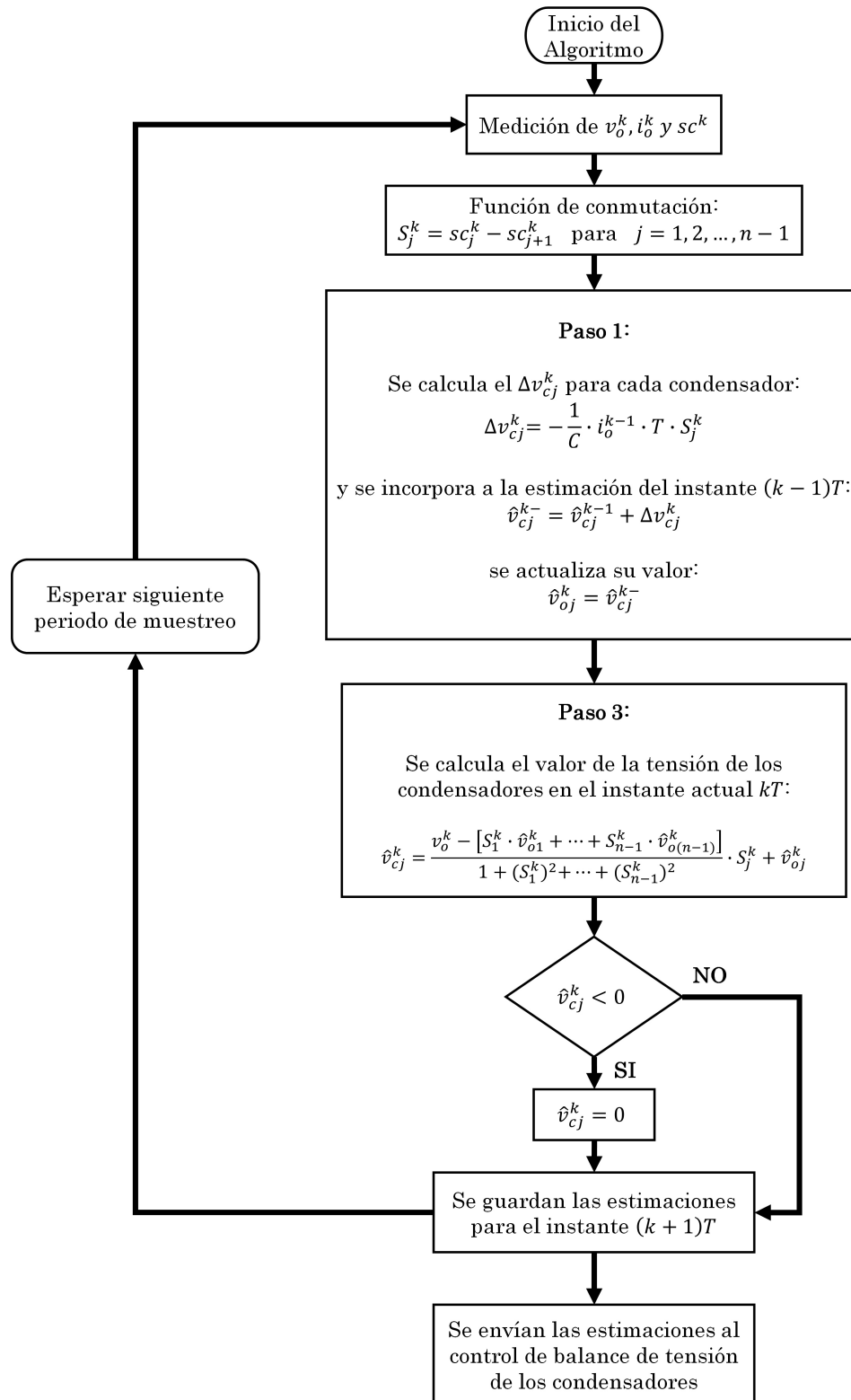


Figura 3.3: Diagrama de flujo de la segunda propuesta de estimación.

3.4 APLICACIÓN DEL ESQUEMA DE ESTIMACIÓN CON UN CONTROL DIRECTO DEL CONVERTIDOR

La principal característica del control directo es que las señales de control son generadas directamente por el algoritmo de control, sin pasar por una etapa de modulación. Los estados de conmutación aplicados al convertidor tienen una duración fija (conocida), y son generados por el algoritmo de control del convertidor de manera periódica. El objetivo del control del convertidor, por lo general, es dar seguimiento a una corriente de referencia y mantener el balance de las tensiones de los condensadores del convertidor [18].

La Fig. 3.4 muestra la representación gráfica de la generación de las señales de control del convertidor; en esencia, en cada periodo de muestreo, el algoritmo de control actualiza las señales de control que cumplan en ese instante con los objetivos de control planteados. Por ejemplo, tomando el caso de un FCMC de 5 niveles, donde se cuenta con 16 posibles estados (Tabla 3.1), se debe de elegir de entre ellos el estado que, de manera simultánea, asegure el seguimiento de la corriente de referencia y el balance de las tensiones de los condensadores [18]. Este procedimiento se ejecuta de manera periódica, a intervalos regulares de tiempo indicados en la Fig. 3.4 como Δt .

En este caso todos los estados de conmutación aplicados duran la misma cantidad de tiempo, es por ello que Δt es constante y por lo tanto conocido. Así, el esquema de estimación propuesto puede ser aplicado de manera directa y dependería del conocimiento de los estados de los interruptores, sc , de las mediciones de la corriente i_o y de la tensión v_o ; la duración de los estados de conmutación es conocida y contante, igual a Δt y definida por la periodicidad requerida por los algoritmos de control del convertidor.

En la Fig. 3.5 se presenta el diagrama de bloques del sistema utilizando un control directo del convertidor. A continuación se resumen sus partes principales y

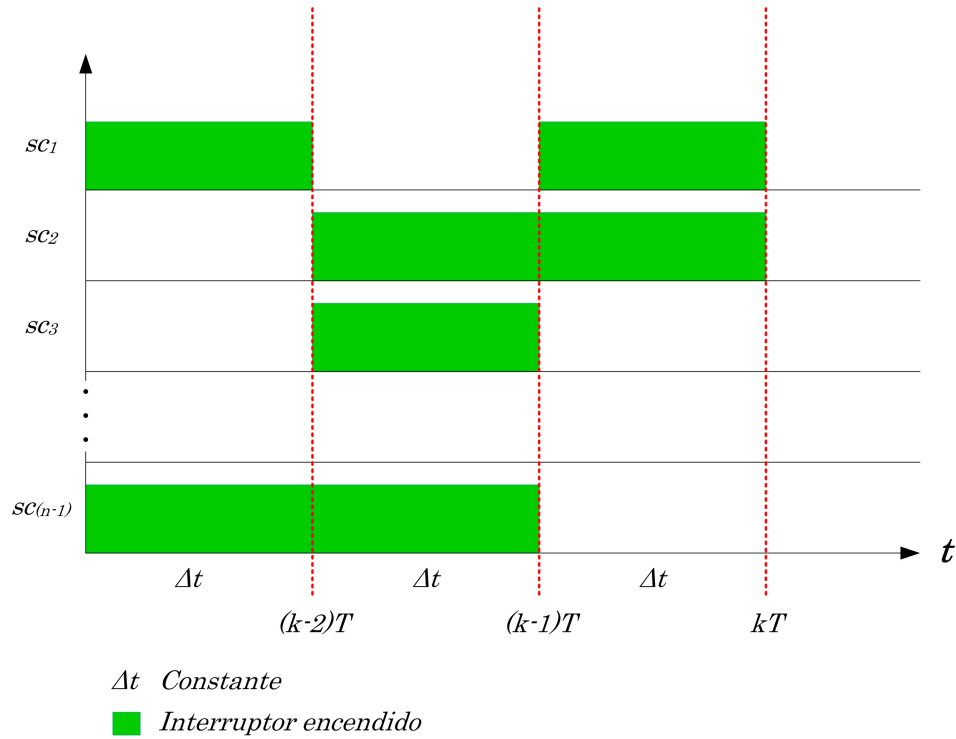


Figura 3.4: Representación gráfica de un control directo.

la operación del mismo.

- Se tiene un FCMC conectado a una carga R-L.
- Se mide la tensión (v_o) y corriente (i_o) de salida del convertidor.
- Ambas mediciones, junto con una corriente de salida de referencia, se introducen al sistema de control y estimación discreto.
- El sistema de control se ejecuta periódicamente con un periodo de muestreo Δt , el cual es fijo.
- En primer lugar se ejecuta el algoritmo de estimación, luego se calcula el nivel de tensión requerido por la corriente de referencia y en tercer lugar se ejecuta el control de balance de tensión de los condensadores que requiere de las estimaciones obtenidas; se prueban los estados de conmutación disponibles y se decide por el óptimo. Tanto el control de balance de tensión como el control de corriente se tomaron de [18].

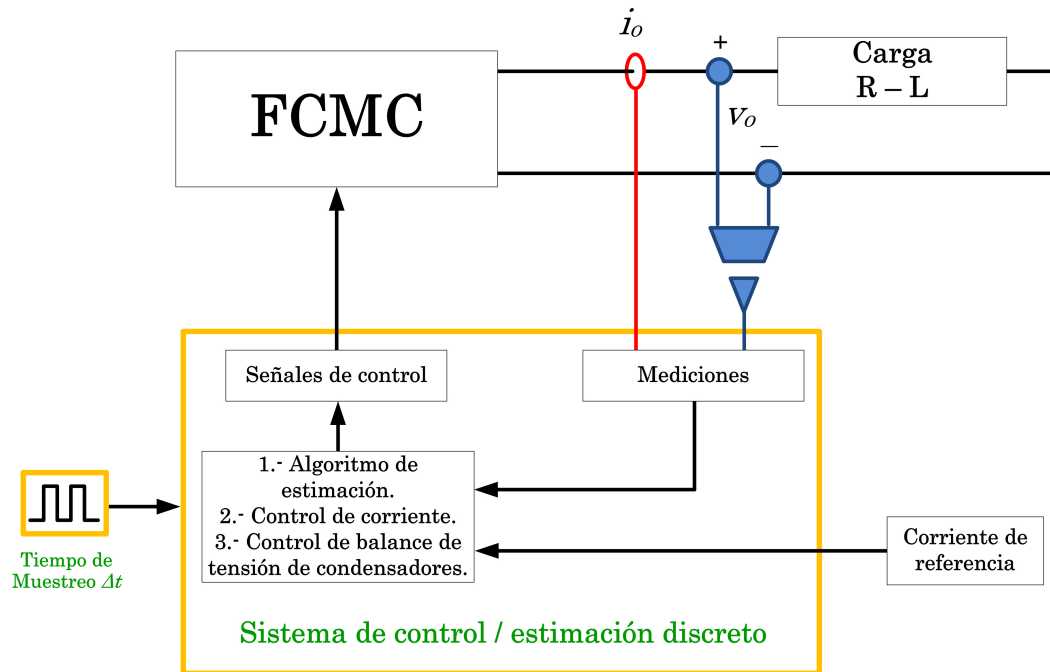


Figura 3.5: Diagrama de bloques de la implementación del estimador con un control directo del convertidor.

- Se envían las señales de control directamente al convertidor.

Así, al utilizar un control directo del convertidor la implementación del estimador es directa y sencilla; como se observa en el diagrama de bloques se necesitan pocos recursos para la operación del sistema. Es de importancia señalar que el balance de las tensiones de los condensadores necesita el valor instantáneo de las tensiones de los condensadores para que el control de tensión funcione de manera correcta.

3.5 APLICACIÓN DEL ESQUEMA DE ESTIMACIÓN CON UNA MODULACIÓN EN ANCHO DE PULSOS (PWM) DEL CONVERTIDOR

Cuando el convertidor se controla a través de un modulador de ancho de pulsos (PWM), las señales de control no son generadas directamente por el controlador del convertidor. En este caso, el controlador genera un ciclo de trabajo que es procesado por el modulador PWM para generar las señales de control. Para la implementación del proceso de modulación existen varios esquemas. Entre las técnicas de implementación más conocidas se tiene la modulación seno-triangular, en donde una portadora triangular se compara con una señal modulante (en general sinusoidal, pero puede ser arbitraria) para generar las señales de control. Otro esquema conocido es la modulación de tipo vectorial, aplicable a configuraciones trifásicas, en donde las tensiones de las fases son tratadas como vectores; esto facilita la implementación digital, ya que los ciclos de trabajo se pueden calcular de manera analítica. Mayores detalles de estos métodos se encuentran ampliamente difundidos en la literatura especializada, por ejemplo en [52].

Así, el proceso de modulación PWM-multinivel genera una secuencia de estados de conmutación, que son función del ciclo de trabajo generado por el controlador del convertidor. Para un esquema de modulación en particular, las secuencias están predefinidas de acuerdo al rango de variación del ciclo de trabajo, D , aplicado. Tomando como ejemplo los estados posibles en un convertidor de 5 niveles (Tabla 3.1), y aplicando una modulación con portadoras triangulares desfasadas de $\pi/4$ rad, se obtienen las secuencias de estados mostradas en la Tabla 3.2.

Además, la duración de cada estado de la secuencia es función del valor del ciclo de trabajo. Esta característica agrega una dificultad al método de estimación ya que para estimar la dinámica entre conmutaciones se requiere conocer Δt .

Caso	Secuencia de estados
$D = 0$	0 – 0 – 0 – 0
$0 > D < 0.25$	8 – 0 – 4 – 0 – 2 – 0 – 1 – 0
$D = 0.25$	8 – 4 – 2 – 1
$0.25 > D < 0.50$	9 – 8 – 12 – 4 – 6 – 2 – 3 – 1
$D = 0.50$	9 – 12 – 6 – 3
$0.50 > D < 0.75$	11 – 9 – 13 – 12 – 14 – 6 – 7 – 3
$D = 0.75$	11 – 13 – 14 – 7
$0.75 > D < 1$	15 – 11 – 15 – 13 – 15 – 14 – 15 – 7
$D = 1$	15 – 15 – 15 – 15

Tabla 3.2: Secuencia de estados con una modulación PWM de un FCMC de 5 niveles.

En la Fig. 3.6 se muestra de manera gráfica como la duración de los estados de conmutación depende del valor del ciclo de trabajo; al tener un Δt variable se requiere medirlo de alguna forma para que sea usado en el proceso de estimación. Esto se puede resolver con un sistema externo que monitoree las señales de control y detecte los cambios en los estados de conmutación y mida el tiempo que dura cada uno; esto agregará complejidad al sistema de estimación.

Para resumir los puntos mas sobresalientes del esquema de estimación / control con modulación de tipo PWM, en la Fig. 3.7 se muestra el diagrama de bloques del sistema con una modulación PWM. A continuación se resumen sus partes principales y la operación del mismo.

- Se tiene un FCMC conectado a una carga R-L.
- Dentro del sistema de control / estimación discreto se tienen 2 subsistemas los cuales funcionan de manera asíncrona.
- En el subsistema 1, se ejecutan a intervalos regulares Δt , las siguientes tareas:
 - Se toma la medición de la corriente de salida i_o .

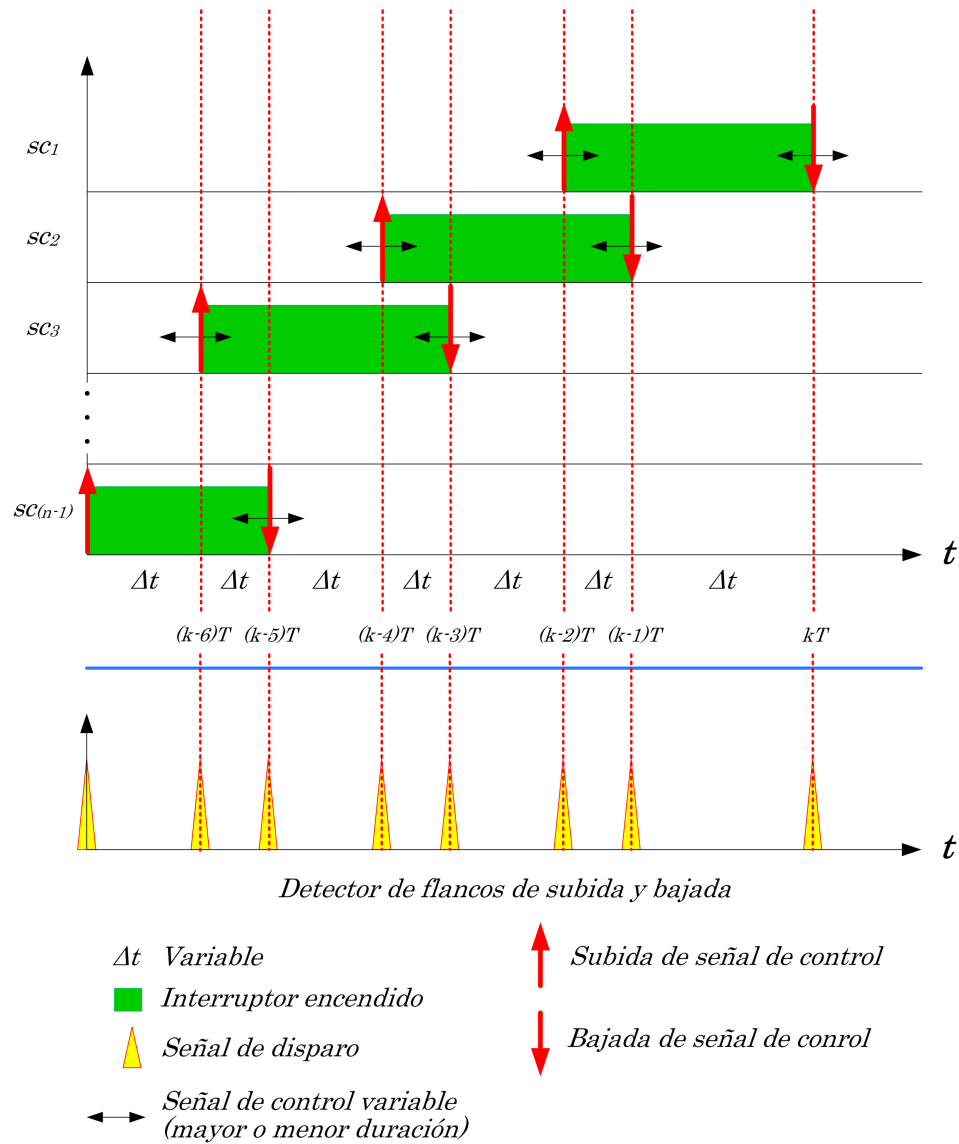


Figura 3.6: Representación gráfica de una modulación por ancho de pulso (PWM).

- Se ejecuta el control de corriente y se calcula el ciclo de trabajo, D , requerido para dar seguimiento a la corriente de referencia; se leen las estimaciones de las tensiones de los condensadores y posteriormente se realiza el control de tensión de los condensadores; finalmente se determina el ciclo de trabajo requerido tanto para el seguimiento de corriente como para el balance de tensión de los condensadores.
- Se envía el ciclo de trabajo hacia el modulador PWM, para que este genere las señales de control del convertidor.

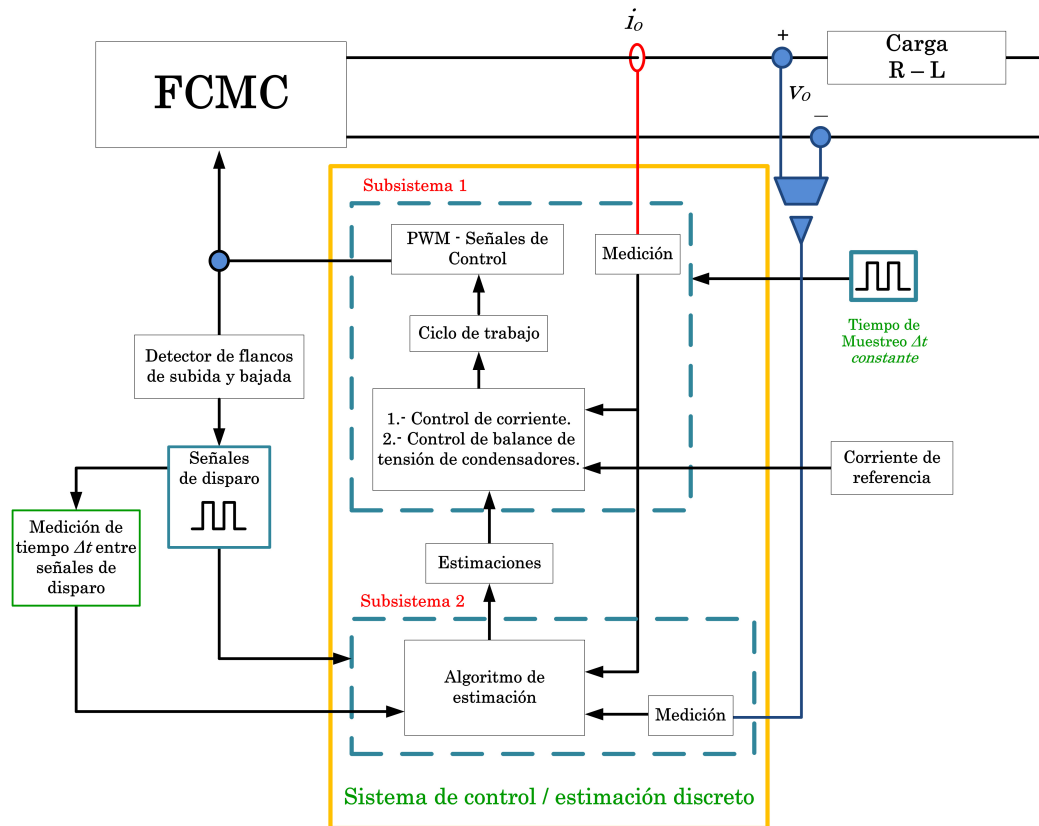


Figura 3.7: Diagrama de bloques de la implementación del estimador en un control con modulación PWM.

- Disparador para subsistema 2: Detecta los cambios en los estados de conmutación (detector de flancos), y genera un pulso para indicar que se inicie un nuevo ciclo de estimación:
 - Se monitorean las señales de control que salen del subsistema 1.
 - Se introducen a un detector de flancos de subida y bajada, dando un pulso cuando hay un cambio en el estado de conmutación, los cuales generan una señal de disparo para accionar el subsistema 2.
 - Se mide el tiempo entre las señales de disparo (duración de los estados de conmutación).
- Subsistema 2, se ejecuta de acuerdo a las señales de disparo, con un tiempo entre ejecuciones Δt que es variable:

- Se adquiere el tiempo Δt , la corriente de salida i_o y la tensión de salida v_o .
- Se hace la estimación.
- Se envían las estimaciones al subsistema 1; estas son usadas por el sistema de control de las tensiones de los condensadores.

La Fig. 3.8 muestra el diagrama de flujo para la implementación de la segunda propuesta de estimación en conjunto con una modulación PWM. Se incorpora la parte de detección de flancos y la señal de disparo para la activación del algoritmo de estimación, así como el cronómetro (timer) para medir el tiempo que dura cada estado de conmutación.

A diferencia del control directo, la modulación PWM presenta mayores dificultades a la hora de implementarse, ya que requiere de mayores recursos. Además, pueden presentarse situaciones en las que el tiempo entre 2 señales de disparo sea muy pequeño y no se pueda realizar la estimación. En este caso, se podría tomar como válida la estimación anterior.

Adicionalmente, es importante mencionar que el balance de las tensiones de los condensadores se podría realizar a partir del conocimiento del valor promedio de las mismas. Esto nos permitiría, de ser necesario, realizar alguna simplificación al sistema de estimación para poderlo aplicar sin muchas complicaciones cuando el control del convertidor sea a través de un modulador PWM.

3.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3

En este capítulo se presentaron dos propuestas de solución para estimar la tensión de los condensadores y la fuente de DC en un FCMC. Se parte de la idea de generar un sistema de ecuaciones lineales a partir de los estados de conmutación que se van presentando durante la operación del convertidor.

Ambas propuestas ofrecen una solución válida para el sistema, sin embargo, la primer propuesta presenta ciertas dificultades que repercuten en la complejidad del algoritmo. En cambio, la simplificación realizada para crear la segunda propuesta ofrece una solución más directa y simple, además de que cumple con los objetivos planteados:

- El sistema de ecuaciones planteado es muy simple.
- No requiere de ganancias o sintonización.
- Tiene una dependencia paramétrica muy baja ya que solo se necesita conocer la capacitancia de los condensadores.
- Es de bajo costo computacional ya que no se requiere de una gran cantidad de cálculos numéricos.
- Requiere únicamente de dos sensores: uno de tensión y otro de corriente.

Adicionalmente, se presentan los dos tipos de control que se utilizarán para probar el esquema propuesto, detallando las principales características de cada uno, así como diagramas que indican como debe ser implementada la estimación para obtener resultados satisfactorios, dependiendo del tipo de control aplicado al convertidor.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS DE SIMULACIÓN Y EXPERIMENTALES

En este capítulo se presentan las pruebas y resultados obtenidos en simulación y experimentales. Para las pruebas de simulación se utiliza el software *MATLAB / Simulink* y para las experimentales un prototipo de laboratorio de 5 y 9 niveles.

El sistema de prueba consta de un convertidor multinivel (troceador) alimentando una carga de tipo $R - L$. Para el control de la corriente de salida se utiliza un control predictivo basado en modelo con un conjunto finito de entradas (FCS-MPC) y para el balance de las tensiones de los condensadores se aplica un control basado en la redundancia de estados [18]. En el sistema de prueba, las tensiones estimadas son utilizadas por el controlador de la tensión de los condensadores, con lo cual se sustituye a las mediciones directas utilizando sensores.

En la primer sección se trabaja con un *control directo* del convertidor, es decir, no existe una modulación para generar las señales de control. Después, se trabaja con un control en ancho de pulsos, es decir, las señales de control del convertidor son generadas a través de una modulación en ancho de pulsos (*PWM*). Para este último se realiza una simplificación del método de estimación lo que permite su implementación de manera práctica.

Los resultados mostrados se enfocan principalmente en estudiar la precisión de las estimaciones en comparación con el valor real; además, se demuestra que el esquema de estimación puede usarse en un lazo de control para el balance de las tensiones de los condensadores y para el control de la corriente de salida del convertidor. Así mismo, los resultados obtenidos demuestran el buen desempeño del esquema de estimación propuesto bajo diferentes situaciones operativas así como la facilidad con la que puede extenderse a n número de niveles.

En este capítulo se hace uso de las abreviaturas que se definen en la Tabla 4.1. Esto se hace con el propósito de reducir y simplificar los títulos de las secciones y las descripciones de las figuras presentadas.

Abreviaturas utilizadas en el Capítulo 4	
5N	FCMC de 5 niveles
9N	FCMC de 9 niveles
CDir	Control Directo
CPWM	Control PWM
SED	Primer Propuesta de estimación: Sistema de Ecuaciones Dinámicas
SESD	Segunda Propuesta de estimación: Sistema de Ecuaciones Sobre-Determinado
CI	Condiciones Ideales
IP	Incertidumbre Paramétrica en condensadores flotantes
RMTCS	Ruido en la Medición de Tensión y Corriente de Salida

Tabla 4.1: Lista de abreviaturas utilizadas en el Capítulo 4.

4.1 ESTIMACIÓN Y CONTROL DIRECTO DEL CONVERTIDOR

La principal característica del control directo es que las señales de control se generan directamente a partir del algoritmo de control, sin pasar por una etapa de modulación. Los estados de conmutación aplicados al convertidor tienen una duración fija (conocida), y son generados por el algoritmo de control del convertidor, cuyo objetivo es dar seguimiento a una corriente de referencia y mantener el balance de las tensiones de los condensadores del convertidor [18]. En la Fig. 4.1 se muestra el diagrama a bloques del sistema de prueba utilizado. Como se observa, consiste de un convertidor multinivel (5 o 9 niveles) y un sistema de control / estimación que se ejecuta periódicamente, con un periodo de $\Delta t = T_s$.

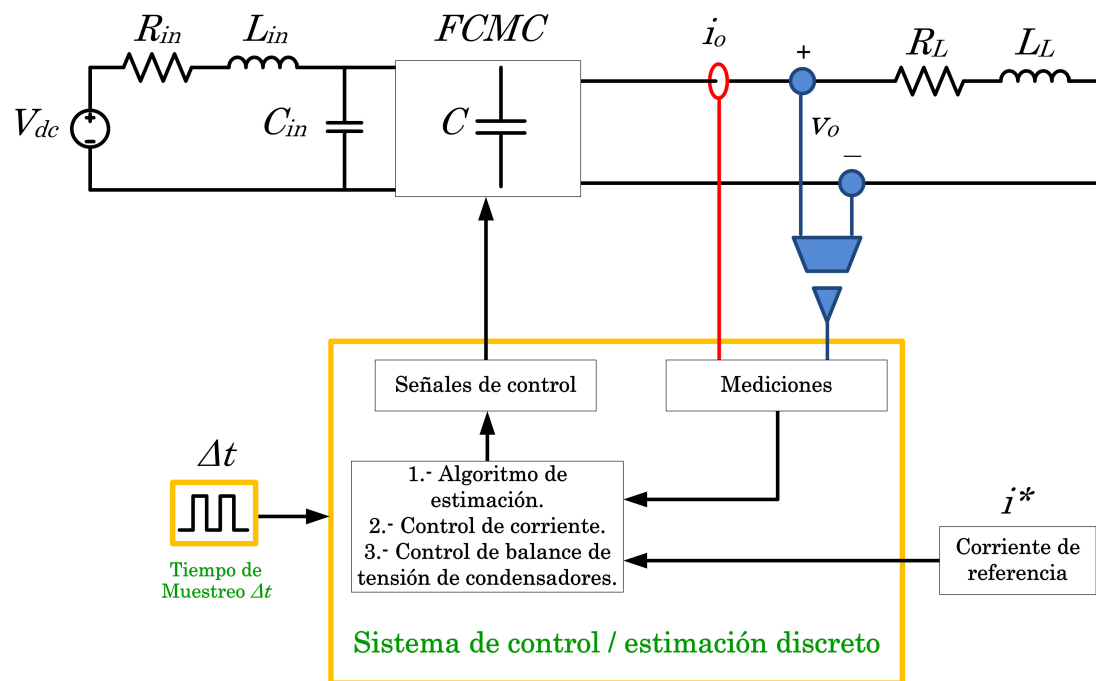


Figura 4.1: Diagrama a bloques del sistema de prueba - control directo del convertidor.

El algoritmo de control utiliza las estimaciones de las tensiones para mantener

balanceadas las tensiones de los condensadores; el algoritmo de balance de las tensiones de los condensadores utiliza la redundancia de estados y requiere conocer los valores instantáneos de las tensiones de los condensadores, por lo cual este modo de control requiere de estimaciones muy precisas para funcionar de manera correcta.

Dado que en el control directo los estados de conmutación tienen una duración fija (Δt), el esquema de estimación propuesto puede aplicarse tal como se ha presentado en el Capítulo 3, es decir, ejecutado con una periodicidad T_s . Para implementarlo se requiere conocer los estados de los interruptores (i.e. las señales de control), la corriente y la tensión de salida - en el Capítulo 3, sección 3.4, se presentan los detalles de la implementación del esquema de estimación en un control directo.

En las Tablas 4.2 y 4.3 se presenta la tensión nominal de operación de los condensadores flotantes en un FCMC de 5 y 9 niveles, respectivamente. Y en las Tablas 4.4 y 4.5 se resumen las diferentes pruebas que se realizaron y los parámetros del sistema de prueba.

Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Fuente de DC
25 V	50 V	75 V	100 V

Tabla 4.2: Tensión nominal de operación de los condensadores flotantes en un FCMC de 5 niveles.

Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Condensador 4
12.5 V	25 V	37.5 V	50 V
Condensador 5	Condensador 6	Condensador 7	Fuente de DC
62.5 V	75 V	87.5 V	100 V

Tabla 4.3: Tensión nominal de operación de los condensadores flotantes en un FCMC de 9 niveles.

Prueba	No. de niveles	Algoritmo	Contexto	Descripción
1	5 niveles	1er propuesta	Simulación	Seguimiento de corriente de referencia tipo seno, condiciones ideales.
2	5 niveles	2da propuesta	Simulación	Seguimiento de corriente de referencia tipo seno, condiciones ideales.
3 y 3.A	9 niveles	2da propuesta	Simulación	Seguimiento de corriente de referencia tipo seno, condiciones ideales. 3 se hace con estimaciones y 3.A con sensores de tensión.
4	9 niveles	2da propuesta	Simulación	Seguimiento de corriente de referencia tipo seno, con incertidumbre paramétrica en condensadores ($\pm 10\%$).
5	9 niveles	2da propuesta	Simulación	Seguimiento de corriente de referencia tipo seno, con ruido en la medición de tensión y corriente de salida.
6	9 niveles	2da propuesta	Simulación	Seguimiento de corriente de referencia tipo seno, con incertidumbre paramétrica en condensadores ($\pm 10\%$) y ruido en la medición de tensión y corriente de salida.
7	9 niveles	2da propuesta	Experimental	Seguimiento de corriente de referencia tipo seno con amplitud modulada.

Tabla 4.4: Resumen de pruebas simuladas y experimentales para un control directo.

Parámetro del sistema	Valor
V_{dc}	100 V
Filtro de entrada R_{in}, L_{in}, C_{in}	1 Ω , 30 mH, 19390 μF
Capacitancia de condensadores flotantes (C)	390 μF
Resistencia de carga R_L	12.63 Ω
Inductancia de carga L_L	3.6 mH
Periodo de muestreo Δt (T_s)	50 μs

Tabla 4.5: Parámetros del sistema para un control directo.

4.1.1 PRUEBAS CON SIMULACIONES NUMÉRICAS - CONTROL DIRECTO

En esta sección, se presentan pruebas en simulación de los métodos de estimación propuestos en el Capítulo 3, cuando se utiliza un control directo para el convertidor. Las pruebas se realizan considerando un convertidor de 5 y 9 niveles.

4.1.1.1 PRUEBA NO. 1: PRIMER PROPUESTA SED, CONVERTIDOR DE 5 NIVELES, CONDICIONES IDEALES

En esta prueba se evalúa la primer propuesta de estimación, realizándose en simulación con un FCMC de 5 niveles. El desarrollo del método de estimación se presenta en el Capítulo 3, sección 3.2. El diagrama de flujo del programa implementado se muestra en la Fig. 4.2 y el programa y código de MATLAB / simulink en el Apéndice A, sección A.1. Para las pruebas, la corriente de salida de referencia, $i^*(t)$, corresponde a una senoide con una componente de DC, $i^*(t) = 4 + 3.5 \cdot \sin(377 \cdot t)$ A. Adicionalmente, las tensiones nominales de operación de los condensadores flotantes para un FCMC de 5 niveles se presentan en la Tabla 4.2.

A continuación se presentan los resultados obtenidos. Primeramente, en la Fig. 4.3 se muestra la tensión y la corriente de salida del convertidor. Como se puede observar, la corriente de salida corresponde bien a la referencia dada, mientras que la tensión de salida esta definida por niveles discretos de tensión de igual magnitud, tal como se define en (2.2). Este primer resultado, nos muestra que tanto el sistema de control como el de estimación están funcionando de manera correcta; recordar que la definición de los niveles discretos de tensión, están directamente relacionados con las tensiones de los condensadores flotantes. Si las tensiones están balanceadas tal como lo define (2.6), entonces los niveles discretos de la tensión de salida corresponderán a niveles de igual magnitud, tal como se observa en la Fig. 4.3. Por lo tanto, las estimaciones usadas para el control de las tensiones de los condensadores, deben

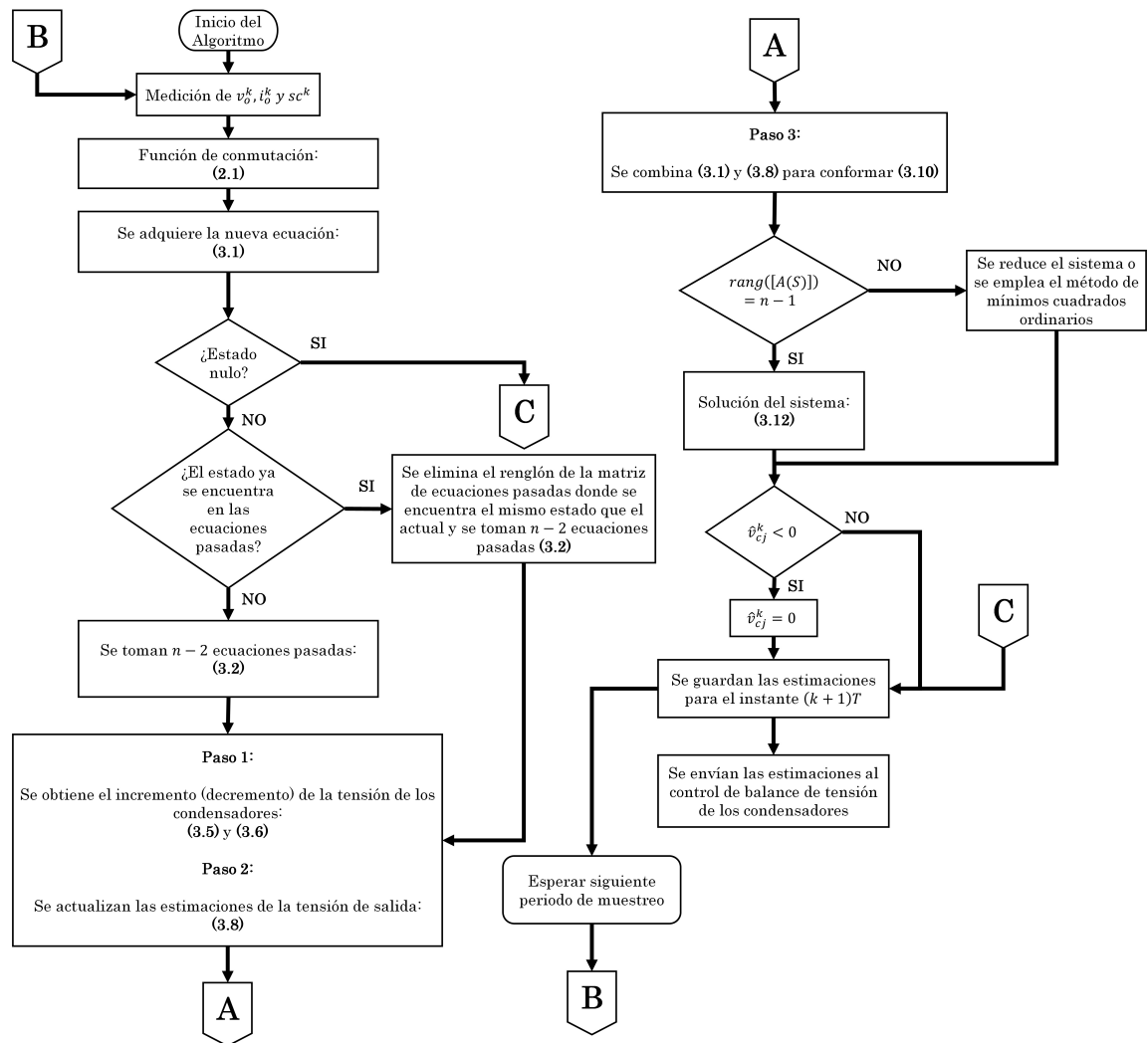


Figura 4.2: Diagrama de flujo de la primer propuesta de estimación aplicada a un control directo.

de tener un error pequeño, porque en caso contrario, el control de las tensiones no funcionaría de manera correcta. Para corroborar esto último, analicemos ahora el error de las estimaciones.

La Fig. 4.4 muestra las tensiones de los condensadores tanto medidas como estimadas; como se puede observar en los recuadros de acercamiento, la estimación es bastante precisa. En la Fig. 4.5 y Tabla 4.6 se muestran los errores de estimación; una vez que se alcanza el estado estable el error máximo de estimación es de 1.07

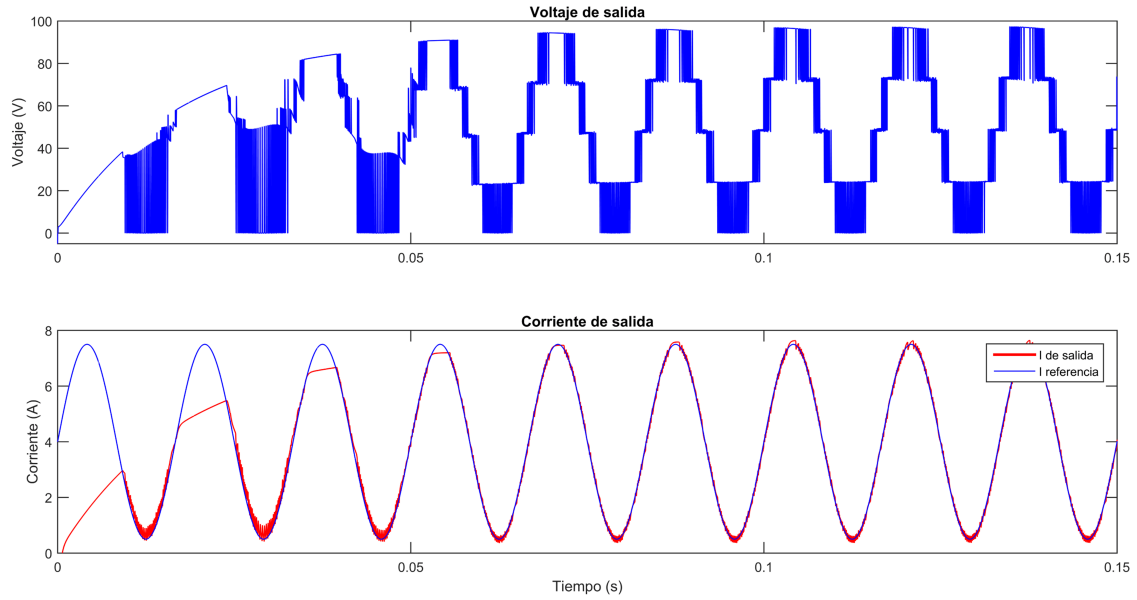


Figura 4.3: Prueba 1: Tensión y corriente de salida. SED, CDir, 5N, CI.

V. Recordar que el método de control de las tensiones de los condensadores requiere conocer el valor instantáneo de la tensión, debiendo ser este muy preciso. Como complemento, en la Tabla 4.7 se presenta el error RMS en estado estable de los estimados de las tensiones de los 3 condensadores y la fuente de DC, los cuales no son mayores a 0.22 V. En realidad, en los instantes de muestreo, los errores son mucho menores a los valores picos mostrados, ya que estos valores corresponden a los intervalos de tiempo entre estimaciones; lo correcto sería graficar únicamente los valores correspondientes a los instantes de muestreo (cuando se realiza y es válida la estimación); esto mismo aplica para las demás pruebas.

Es importante notar el rizo de la tensión en la fuente de entrada DC, como recordaremos, en ambos esquemas de estimación se considera que la tensión de entrada permanece constante entre conmutaciones. A pesar de ello, y dado que la variación presente es de baja frecuencia, se puede observar que el algoritmo puede estimar de manera correcta dicha tensión.

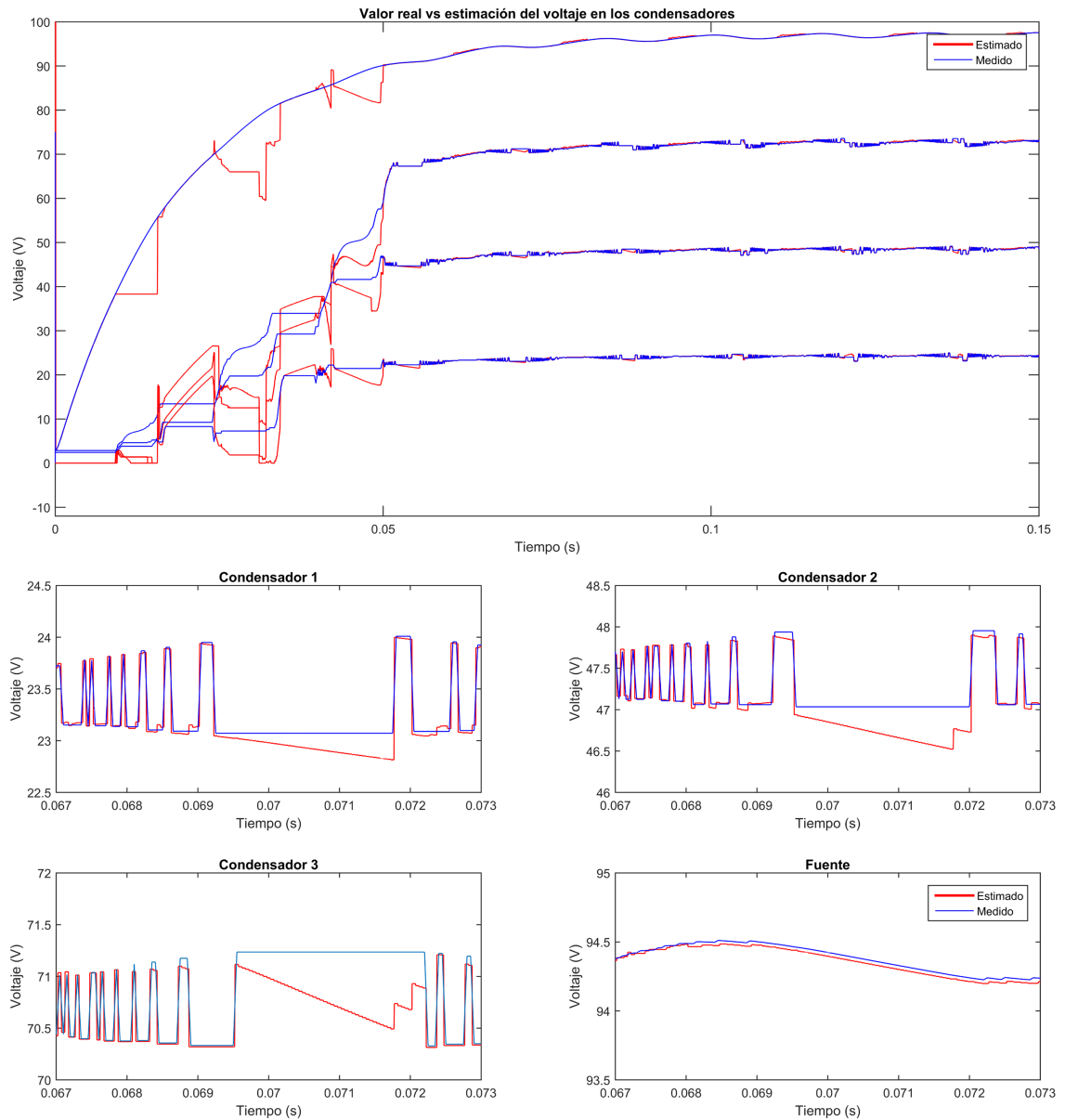


Figura 4.4: Prueba 1: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SED, CDir, 5N, CI.

Error instantáneo máximo en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Fuente de DC
1.0667 V	1.0060 V	0.8678 V	0.4997 V

Tabla 4.6: Prueba 1: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SED, CDir, 5N, CI.

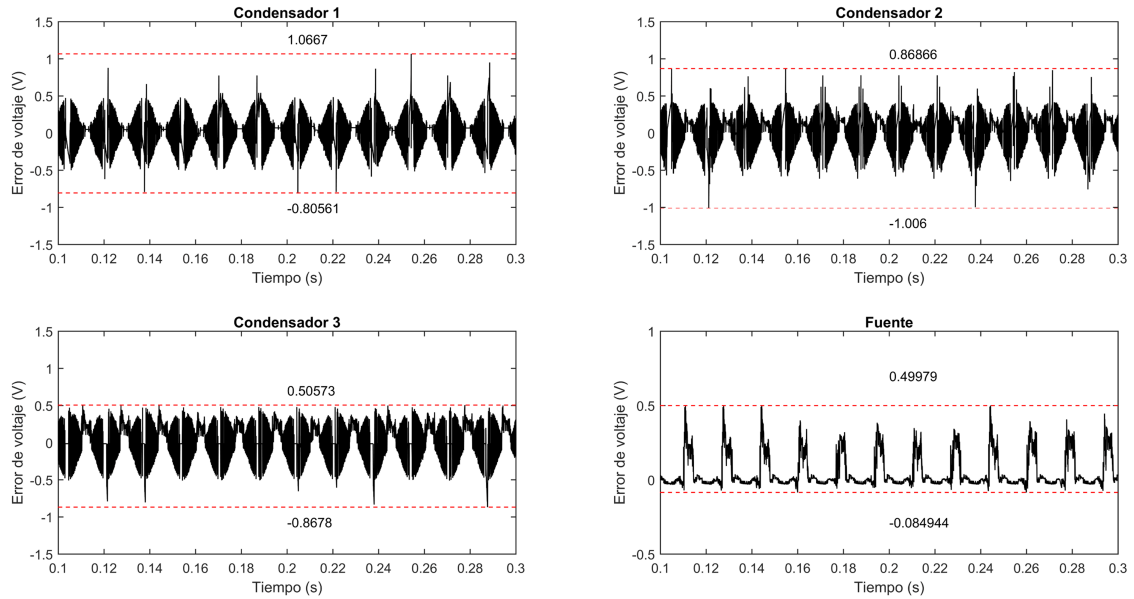


Figura 4.5: Prueba 1: Error en las estimaciones. SED, CDir, 5N, CI.

Error RMS en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Fuente de DC
0.1558 V	0.1771 V	0.2122 V	0.1317 V

Tabla 4.7: Prueba 1: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SED, CDir, 5N, CI.

Sin embargo, aunque las estimaciones de éste método son bastante buenas, este esquema presenta cierta complejidad para implementarse en tiempo real. La complejidad se da principalmente porque el sistema de ecuaciones dinámico sobre el cual se basa, $[Y] = [A(S)][X]$, puede presentar una matriz $[A(S)]$ que puede ser singular, por lo que requiere de rutinas adicionales para tratar cada uno de los casos que se pudieran presentar; esto implica que el tiempo de cálculo aumente, y pueda ser variable, ya que el programa tiene múltiples caminos. Por esta razón, esta es la única prueba que se presenta para esta propuesta; nos enfocamos en la segunda propuesta que es más sencilla y factible de ser implementada en tiempo real.

4.1.1.2 PRUEBA NO. 2: SEGUNDA PROPUESTA SESD, CONVERTIDOR DE 5 NIVELES, CONDICIONES IDEALES

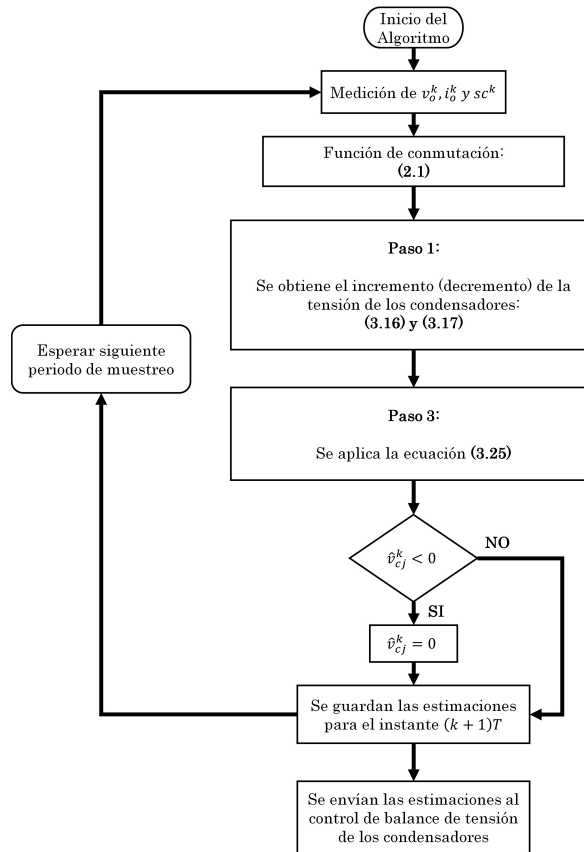


Figura 4.6: Diagrama de flujo de la segunda propuesta de estimación aplicado a un control directo.

En esta prueba se evalúa la segunda propuesta de estimación; se hace en simulación utilizando un FCMC de 5 niveles. Como se explica en el Capítulo 3, sección 3.3, este método es una simplificación de la primer propuesta, con lo que se busca reducir el número de cálculos. El diagrama de flujo del programa implementado se muestra en la Fig. 4.6 y el programa y código de MATLAB / simulink en el Apéndice A, sección A.2. Los parámetros del sistema se dieron en la Tabla 4.5 y la corriente de referencia para la salida sigue siendo la misma que la usada en la prueba anterior, $i^*(t) = 4 + 3.5 \cdot \sin(377 \cdot t) A$. Las tensiones nominales de operación de los condensadores flotantes para un FCMC de 5 niveles se presentan en la Tabla 4.2.

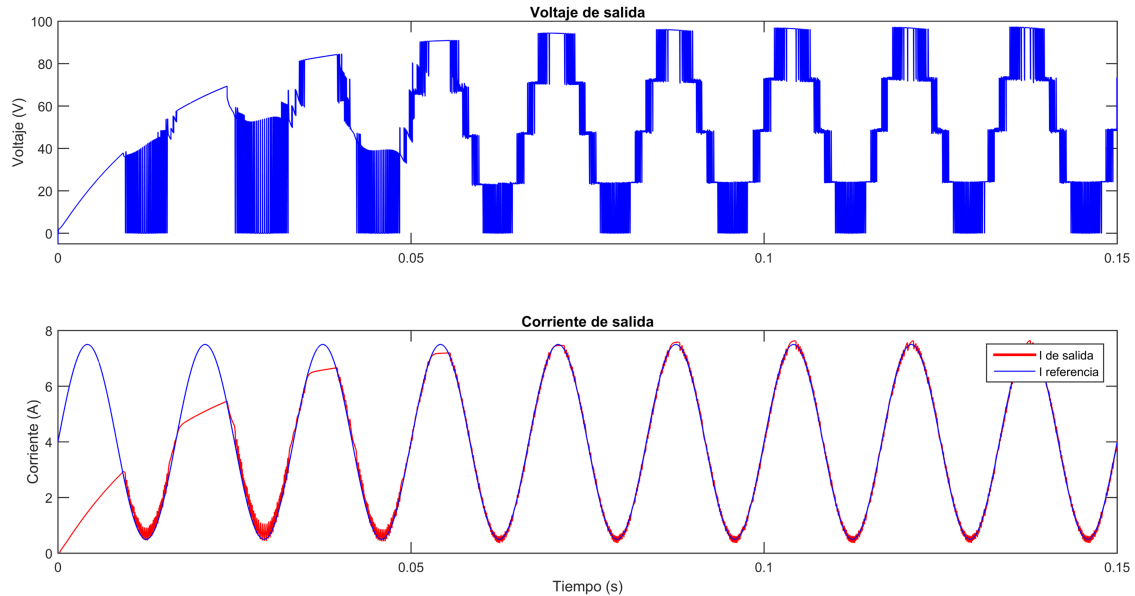


Figura 4.7: Prueba 2: Tensión y corriente de salida. SESD, CDir, 5N, CI.

Los resultados obtenidos en esta prueba se presentan a continuación. Primeramente, en la Fig. 4.7 se muestra la tensión y la corriente de salida del convertidor. Como se puede observar, la corriente de salida sigue bien a la referencia dada, mientras que la tensión de salida está definida por niveles discretos de tensión, tal como se define en (2.2). Este primer resultado, al igual que en la prueba de la propuesta 1, nos muestra que tanto el sistema de control como el de estimación están funcionando de manera correcta; recordar que la definición de los niveles discretos de tensión, están directamente relacionados con las tensiones de los condensadores flotantes. Si las tensiones están balanceadas tal como lo define (2.6), entonces los niveles discretos de la tensión de salida corresponderán a niveles de igual magnitud, tal como se observa en la Fig. 4.7. Por lo tanto, las estimaciones usadas para el control de las tensiones de los condensadores, deben de tener un error pequeño, porque en caso contrario, el control de las tensiones no funcionaría de manera correcta. Ahora, pasemos a ver con mayor detalle el desempeño del esquema de estimación propuesto.

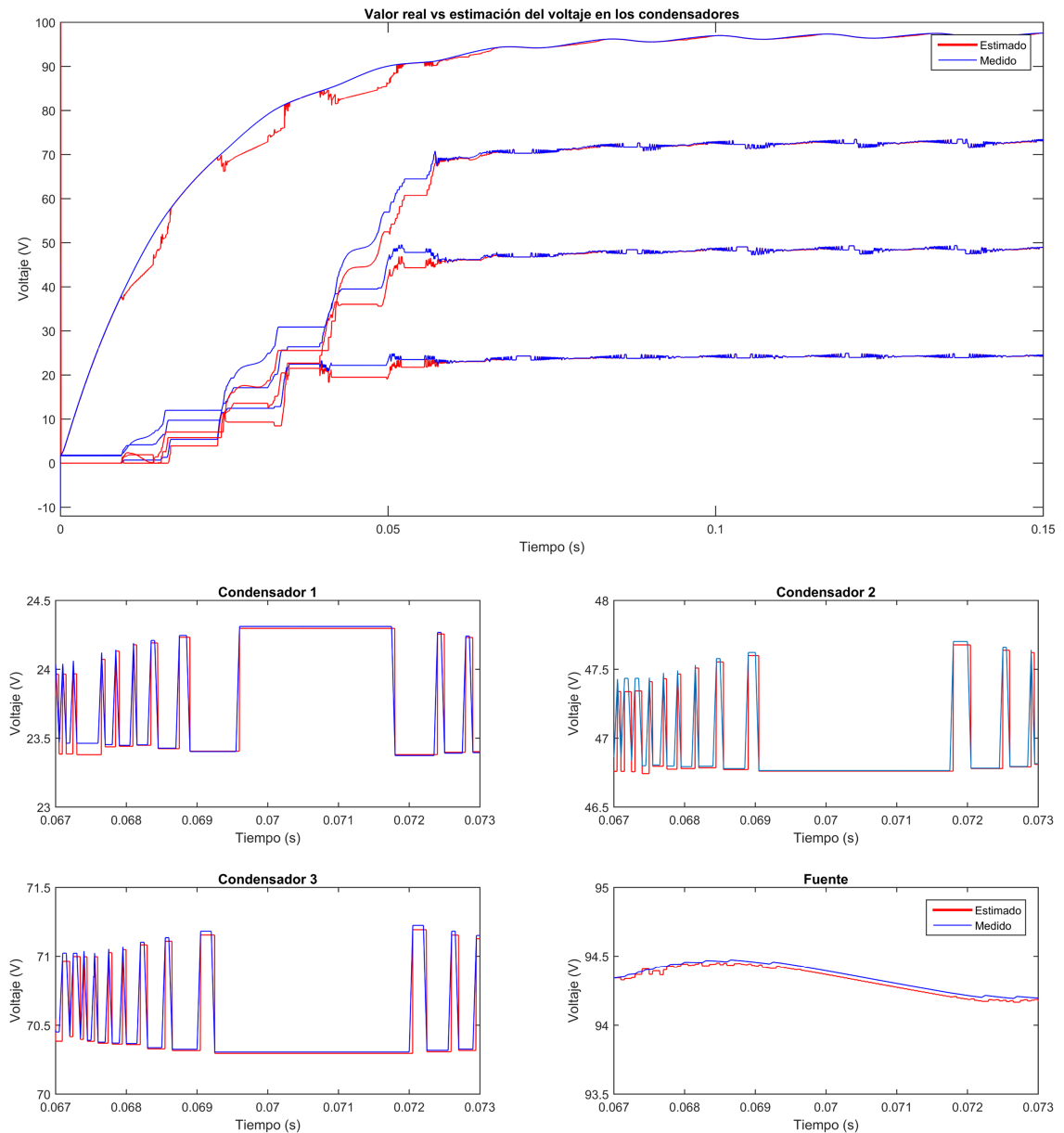


Figura 4.8: Prueba 2: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD, CDir, 5N, CI.

La Fig. 4.8 muestra las tensiones de los condensadores tanto medidas como estimadas; como se puede observar en los recuadros de acercamiento, la estimación es bastante precisa. En la Fig. 4.9 y Tabla 4.8 se muestran los errores de estimación; una vez que se alcanza el estado estable el error máximo de estimación es de 0.93 V.

Se recuerda que el desempeño del control directo depende de la precisión con que se conozca el valor instantáneo de la tensión de los condensadores.

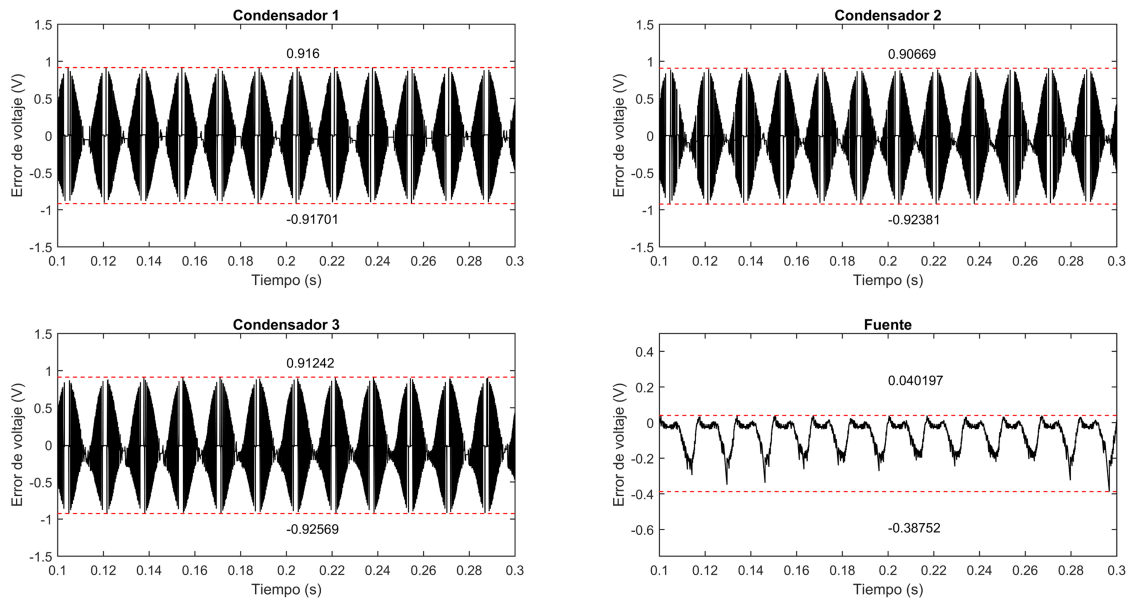


Figura 4.9: Prueba 2: Error en las estimaciones. SESD, CDir, 5N, CI.

Error instantáneo máximo en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Fuente de DC
0.9170 V	0.9238 V	0.9256 V	0.3875 V

Tabla 4.8: Prueba 2: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 5N, CI.

Error RMS en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Fuente de DC
0.1822 V	0.1800 V	0.2027 V	0.0984 V

Tabla 4.9: Prueba 2: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 5N, CI.

Adicionalmente, en la Tabla 4.9 se muestra el error RMS en estado estable de

los estimados de las tensiones de los 3 condensadores y la fuente de DC, los cuales no son mayores a 0.21 V.

4.1.1.3 COMPARACIÓN PROPUESTA 1 SED / PROPUESTA 2 SESD

Ahora se realizará una comparación de los resultados obtenidos en la primera y segunda propuesta de estimación. En primer lugar, es importante notar la diferencia entre el algoritmo de la propuesta 1 y 2 resumidos en las Figuras 4.2 y 4.6, respectivamente. La simplificación hecha al primer esquema de estimación tiene una repercusión importante en el segundo esquema ya que se eliminan los múltiples caminos para resolver el sistema de ecuaciones, además, se simplifican significativamente las operaciones en donde se tenían matrices y pasan a ser operaciones aritméticas. Todo esto hace posible que la propuesta 2 pueda ser fácilmente implementada en tiempo real, además, puede ser extendida a n niveles de una forma muy simple.

En las Figuras 4.3 y 4.7 se muestra la tensión y corriente de salida del convertidor de la propuesta 1 y 2 respectivamente. Como se puede observar, en ambos casos la corriente de salida sigue bien a la referencia dada, mientras que la tensión de salida esta definida por niveles discretos de tensión, tal como se define en (2.2). Este resultado, muestra que tanto el sistema de control como el de estimación están funcionando de manera correcta; recordemos que la definición de los niveles discretos de tensión, están directamente relacionados con las tensiones de los condensadores flotantes. Si las tensiones están balanceadas tal como lo define (2.6), entonces los niveles discretos de la tensión de salida corresponderán a niveles de igual magnitud, tal como se observa en las Figuras 4.3 y 4.7. Por lo tanto, las estimaciones usadas para el control de las tensiones de los condensadores, deben de tener un error pequeño, porque en caso contrario, el control de las tensiones no funcionaría de manera correcta.

Así, el detalle de los resultados de estimación, mostrados en las Figuras 4.4 y

4.8 muestran que las tensiones estimadas de las propuestas 1 y 2 son muy parecidas. Sin embargo, las estimaciones de la propuesta 2 son mas precisas en comparación con las de la propuesta 1. Además, durante la etapa transitoria, la respuesta de la propuesta 2 es mucho mejor ya que se no se tienen saltos en las estimaciones; la convergencia hacia los valores reales es mas suave.

Los errores máximos de estimación se encuentran en las Figuras 4.5 y 4.9, y Tablas 4.6 y 4.8, para la propuesta 1 y 2 respectivamente; la propuesta 1 tiene un error máximo de estimación en estado estable de 1.07 V, mientras que la propuesta 2 un error de 0.93 V. También, en las Tablas 4.7 y 4.9, se presenta el error RMS en estado estable de la propuesta 1 y 2 respectivamente; se tiene un error de 0.22 V para la propuesta 1 y 0.21 V para la propuesta 2. Aun cuando no se logra una reducción significativa de los valores de los errores entre ambos esquemas, es importante decir que la primer propuesta ya generaba estimaciones lo bastante buenas, por lo que el principal objetivo de la simplificación era reducir la complejidad del primer algoritmo de estimación.

Se puede concluir entonces, que con las comparaciones aquí mostradas, la propuesta 2 es superior en todos los aspectos a la propuesta 1. Por lo tanto, se utilizará para las próximas pruebas, y sera implementada en tiempo real en un prototipo de laboratorio.

4.1.1.4 PRUEBA NO. 3: SEGUNDA PROPUESTA SESD, CONVERTIDOR DE 9 NIVELES, CONDICIONES IDEALES

Para demostrar la facilidad con la que la segunda propuesta de estimación puede extenderse a n niveles, el esquema se probará en simulación ahora en un FCMC de 9 niveles. El desarrollo del método se presenta en el Capítulo 3, sección 3.3. El diagrama de flujo del programa implementado se muestra en la Fig. 4.6 y el programa y código de MATLAB / simulink en el Apéndice A, sección A.2. Los parámetros del sistema se definen en la Tabla 4.5 y la corriente de referencia para la salida sigue siendo la misma que la usada en las pruebas anteriores, es decir, $i^*(t) = 4 + 3.5 \cdot \sin(377 \cdot t)$ A. Adicionalmente, las tensiones nominales de operación de los condensadores flotantes para un FCMC de 9 niveles se presentan en la Tabla 4.3.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación. Primeramente, la Fig. 4.10 muestra la tensión y la corriente de salida del convertidor. Como se observa, la corriente de salida tiene un buen seguimiento de la referencia dada, mientras que la tensión de salida esta bien definida por 9 niveles discretos de tensión, tal como se define en (2.2). Este primer resultado, al igual que en la prueba anterior, muestra que tanto el sistema de control como el de estimación están funcionando de manera correcta; se recuerda que la definición de los niveles discretos de tensión, están directamente relacionados con las tensiones de los condensadores flotantes. Si las tensiones están balanceadas tal como lo define (2.6), entonces los niveles discretos de la tensión de salida corresponderán a niveles de igual magnitud, tal como se observa en la Fig. 4.10. Por lo tanto, las estimaciones, usadas para el control de las tensiones de los condensadores, deben de tener un error pequeño, porque en caso contrario, el control de las tensiones no funcionaría de manera correcta.

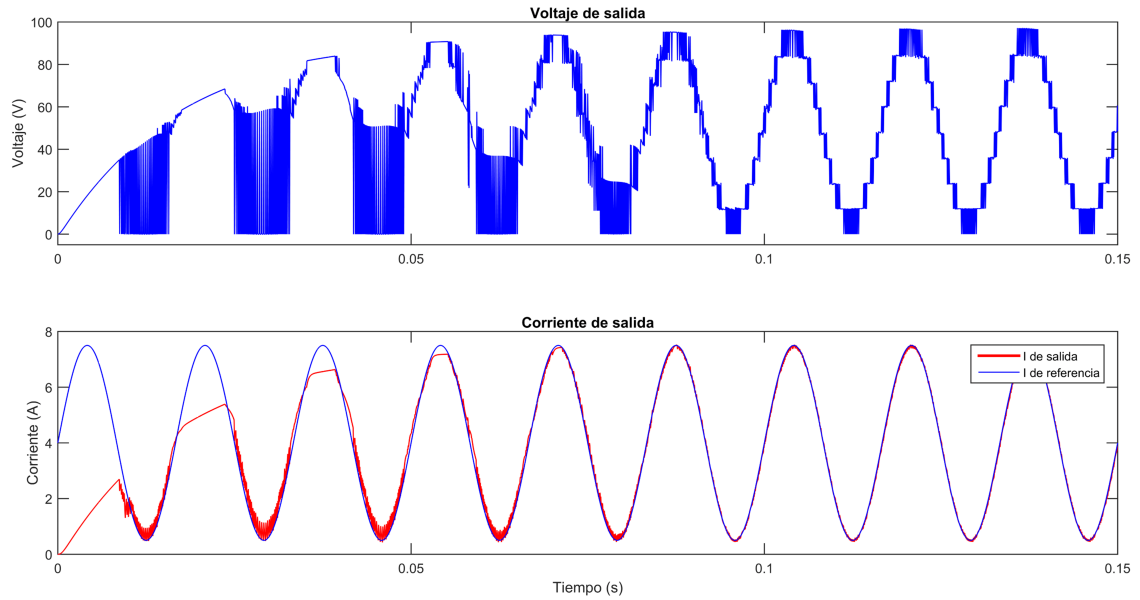


Figura 4.10: Prueba 3: Tensión y corriente de salida. SESD, CDir, 9N, CI.

Ahora, se presenta a detalle el desempeño del esquema de estimación. En la Fig. 4.11 se muestran las tensiones de los condensadores tanto medidas como estimadas; como se puede observar en los recuadros de acercamiento, las estimaciones son muy precisas. El hecho de haber aumentado el número de niveles no ha tenido repercusiones en las estimaciones. La Fig. 4.12 y Tabla 4.10 muestran los errores de estimación; una vez que se ha alcanzado el estado estable el error máximo de estimación es de 0.96 V. Adicionalmente, la Tabla 4.11 muestra el error RMS en estado estable de los estimados de los 7 condensadores y la fuente de entrada DC, los cuales no son mayores a 0.20 V. Se recuerda que el desempeño del control directo depende de la precisión con que se conozca el valor instantáneo de las tensiones de los condensadores.

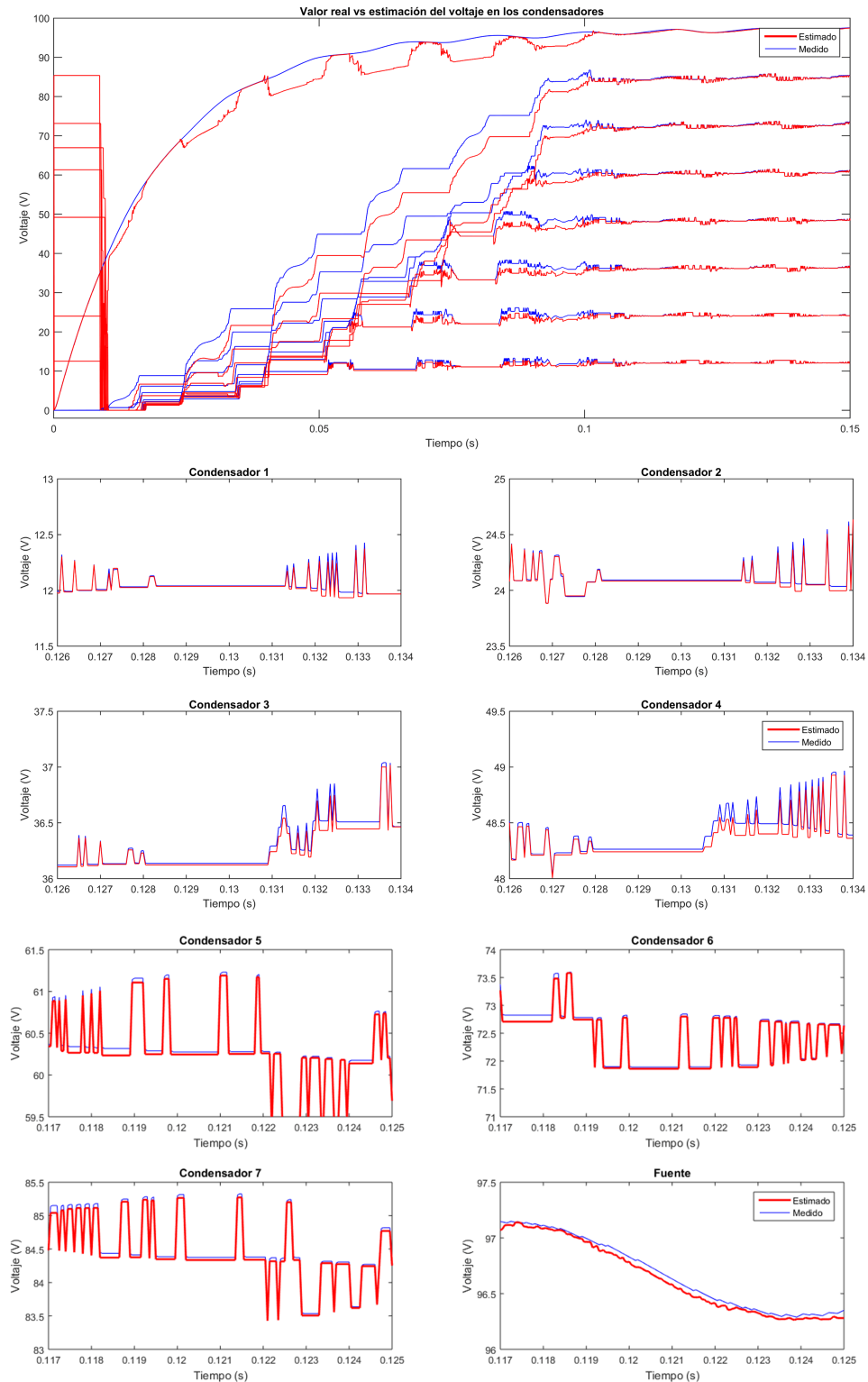


Figura 4.11: Prueba 3: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD, CDir, 9N, CI.

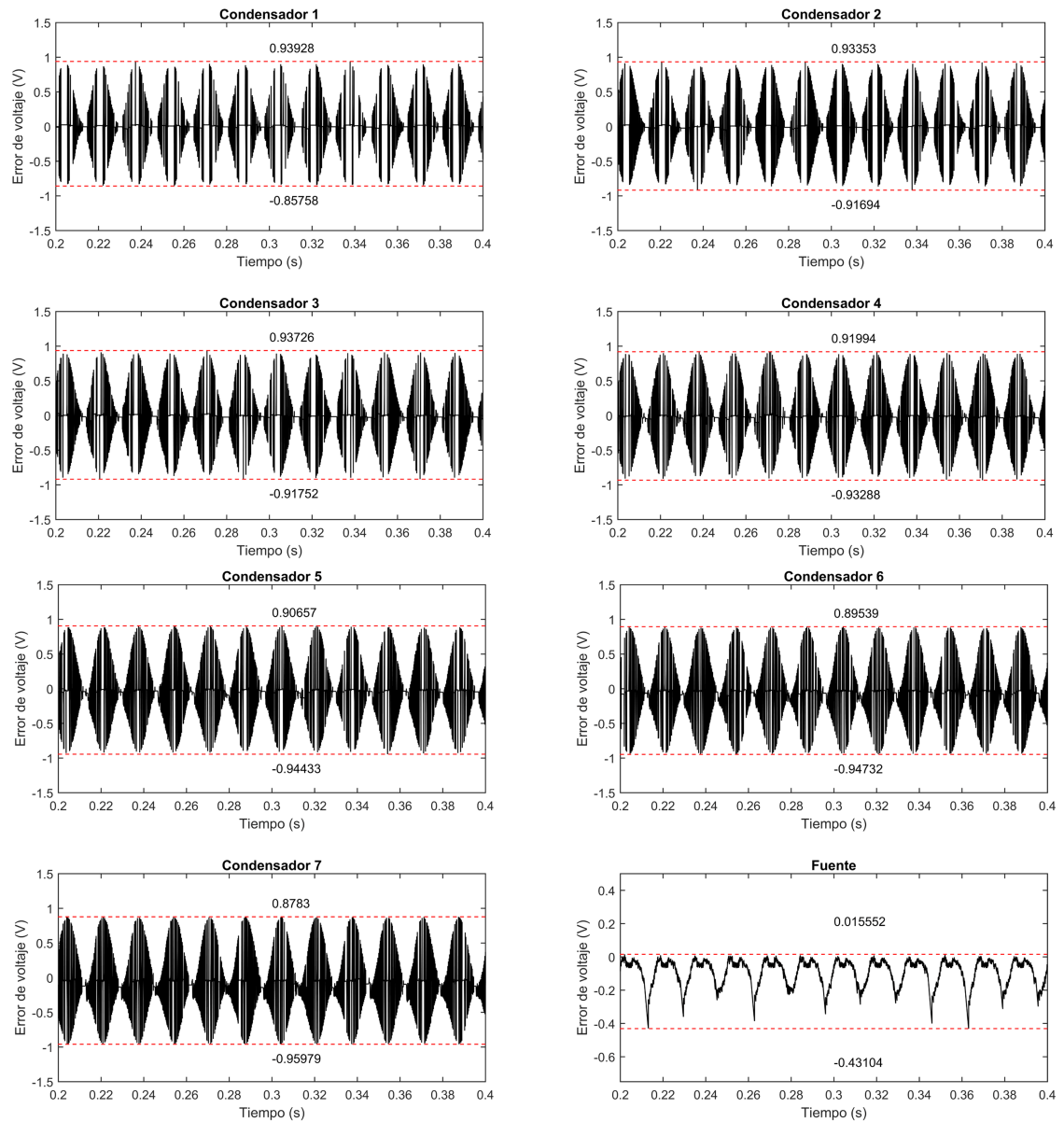


Figura 4.12: Prueba 3: Error en las estimaciones. SESD, CDir, 9N, CI.

Error instantáneo máximo en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Condensador 4
0.9392 V	0.9335 V	0.9372 V	0.9328 V
Condensador 5	Condensador 6	Condensador 7	Fuente de DC
0.9443 V	0.9473 V	0.9597 V	0.4310 V

Tabla 4.10: Prueba 3: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, CI.

Error RMS en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Condensador 4
0.1252 V	0.1446 V	0.1477 V	0.1574 V
Condensador 5	Condensador 6	Condensador 7	Fuente de DC
0.1669 V	0.1782 V	0.1864 V	0.1223 V

Tabla 4.11: Prueba 3: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, CI.

El haber aumentado el número de niveles no genera complicaciones en la implementación de la segunda propuesta de estimación; únicamente deben agregarse 4 ecuaciones más al algoritmo, en comparación con el de 5 niveles.

Hasta el momento, las 3 pruebas presentadas han demostrado lo siguiente:

- El método de estimación propuesto (propuestas 1 y 2) tienen un buen desempeño, presentando errores pequeños en las estimaciones.
- El esquema de estimación se puede integrar en un lazo de control de tensión de los condensadores obteniendo resultados muy satisfactorios; en realidad son similares a los obtenidos usando mediciones directas (Prueba 3.A).
- La extensión del método (propuesta 2) a un número mayor de estimaciones es muy sencilla, lo cual se probó en convertidores de 5 y 9 niveles.

4.1.1.5 PRUEBA NO. 3.A: UTILIZANDO SENSORES DE TENSIÓN, CONVERTIDOR DE 9 NIVELES, CONDICIONES IDEALES

En esta prueba, a diferencia de la anterior donde el control del convertidor utiliza las estimaciones obtenidas a partir de la segunda propuesta de estimación, se utilizarán sensores de tensión. Esto se hace para comprobar si existen diferencias significativas entre usar mediciones o estimaciones en el control del convertidor. Los parámetros del sistema se dieron en la Tabla 4.5 y la corriente de referencia para la salida sigue siendo la misma que la usada en la prueba anterior, $i^*(t) = 4 + 3.5 \cdot \sin(377 \cdot t) A$. Adicionalmente, las tensiones nominales de operación de los condensadores flotantes para un FCMC de 9 niveles se presentan en la Tabla 4.3.

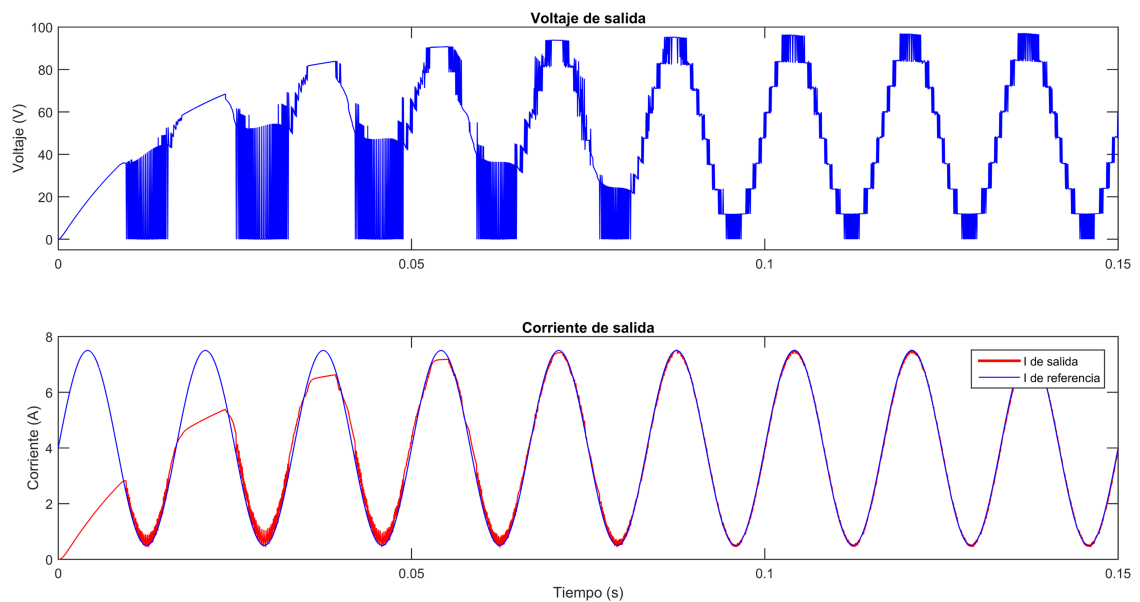


Figura 4.13: Prueba 3.A: Tensión y corriente de salida. Utilizando sensores de tensión, 9N, CI.

En primer lugar, comparando la tensión y corriente de salida del convertidor mostradas en las Figuras 4.10 y 4.13 utilizando estimaciones y sensores, respectivamente; se observa que en ambos casos la corriente de salida tiene un buen seguimiento de la referencia dada, mientras que la tensión de salida esta definida por niveles dis-

cretos de tensión, tal como se define en (2.2). Este resultado nos muestra que el esquema de estimación propuesto es muy preciso, tanto así, que los resultados en ambos casos son casi idénticos; se recuerda que la definición de los niveles discretos de tensión, están directamente relacionados con las tensiones de los condensadores flotantes. Si las tensiones están balanceadas tal como lo define (2.6), entonces los niveles discretos de la tensión de salida corresponderán a niveles de igual magnitud, tal como se observa en las Figuras 4.10 y 4.13.

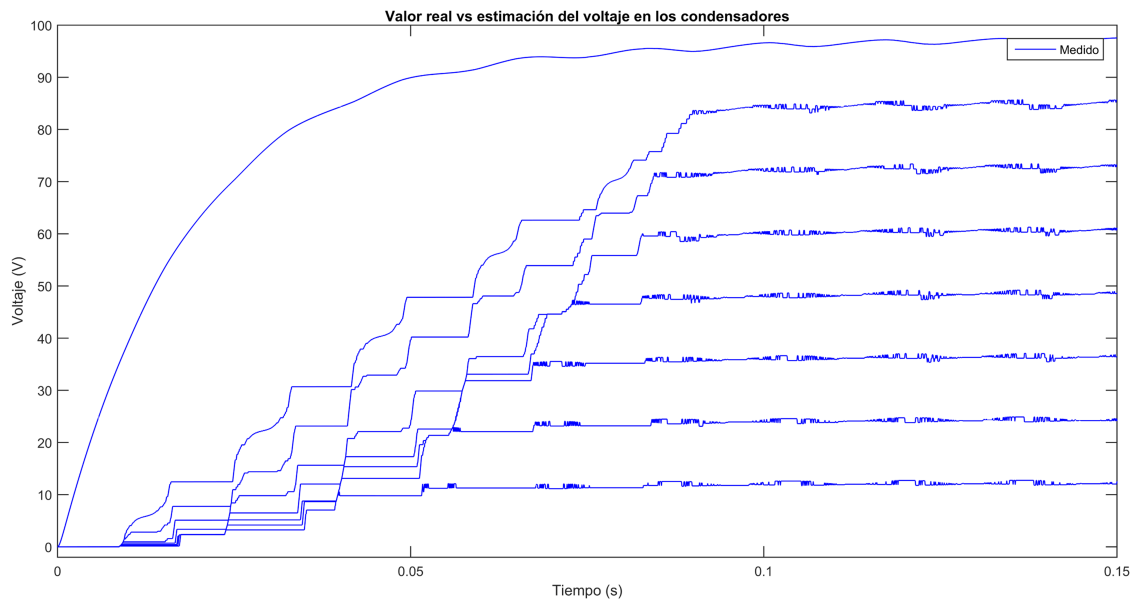


Figura 4.14: Prueba 3.A: Valor real de la tensión en los condensadores. Utilizando sensores de tensión, 9N, CI.

Ahora, detallando la regulación de la tensión en los condensadores, los cuales se muestran en las Figuras 4.11 y 4.14 utilizando estimaciones y sensores; se observa que en ambas situaciones, la evolución de estas tensiones hacia su estado estable tienen un comportamiento muy parecido, tanto en la etapa transitoria como en estado estable, también, la regulación de la tensión de los condensadores es muy similar; el control de regulación logra mantener balanceadas las tensiones en los condensadores en todo momento. Con la comparación de estos resultados, se puede asegurar que el esquema de estimación no compromete la operación correcta del convertidor, mas

aún, crea condiciones de mayor confiabilidad al no requerir de sensores de tensión.

A continuación se presentarán 3 pruebas adicionales (en simulación) para evaluar el desempeño del método de estimación propuesto en condiciones diferentes al caso ideal. Específicamente, nos interesamos a evaluar el desempeño ante incertidumbres en los parámetros del sistema y ruido en las mediciones de tensión y de corriente.

4.1.1.6 PRUEBA NO. 4: SEGUNDA PROPUESTA SESD, CONVERTIDOR DE 9 NIVELES, CONSIDERANDO INCERTIDUMBRE PARAMÉTRICA

En esta prueba se utiliza un convertidor de 9 niveles, considerando incertidumbre paramétrica en los condensadores flotantes de $\pm 10\%$: $C_1 = 0.94 \cdot C_{nom}$, $C_2 = 1.05 \cdot C_{nom}$, $C_3 = 0.90 \cdot C_{nom}$, $C_4 = 1.10 \cdot C_{nom}$, $C_5 = 0.93 \cdot C_{nom}$, $C_6 = 0.98 \cdot C_{nom}$ y $C_7 = 1.08 \cdot C_{nom}$, donde $C_{nom} = 390 \mu F$. El desarrollo del método se presenta en el Capítulo 3, sección 3.3. El diagrama de flujo del programa implementado se muestra en la Fig. 4.6 y el programa y código de MATLAB / simulink en el Apéndice A, sección A.2. Los parámetros del sistema se dieron en la Tabla 4.5 y la corriente de referencia para la salida sigue siendo la misma que la usada en las pruebas anteriores, $i^*(t) = 4 + 3.5 \cdot \sin(377 \cdot t) A$. Adicionalmente, las tensiones nominales de operación de los condensadores flotantes para un FCMC de 9 niveles se presentan en la Tabla 4.3.

Los resultados obtenidos se describen a continuación. Primeramente, en la Fig. 4.15 se muestra la tensión y la corriente de salida del convertidor. Se observa que la corriente de salida sigue bien a la referencia dada, mientras que la tensión de salida esta definida por 9 niveles discretos de tensión, tal como lo define (2.2); este resultado muestra que tanto el sistema de control como el de estimación están funcionando de manera correcta – se recuerda que la definición de los niveles discretos de tensión, están directamente relacionados con las tensiones de los condensadores flotantes. Si las tensiones están balanceadas tal como lo define (2.6), entonces los niveles discretos de la tensión de salida corresponderán a niveles de igual magnitud, tal como se observa en la Fig. 4.15. Por lo tanto, las estimaciones utilizadas en el control de las tensiones de los condensadores, deben de tener un error pequeño, porque en caso contrario, el control de las tensiones no funcionaría de manera correcta.

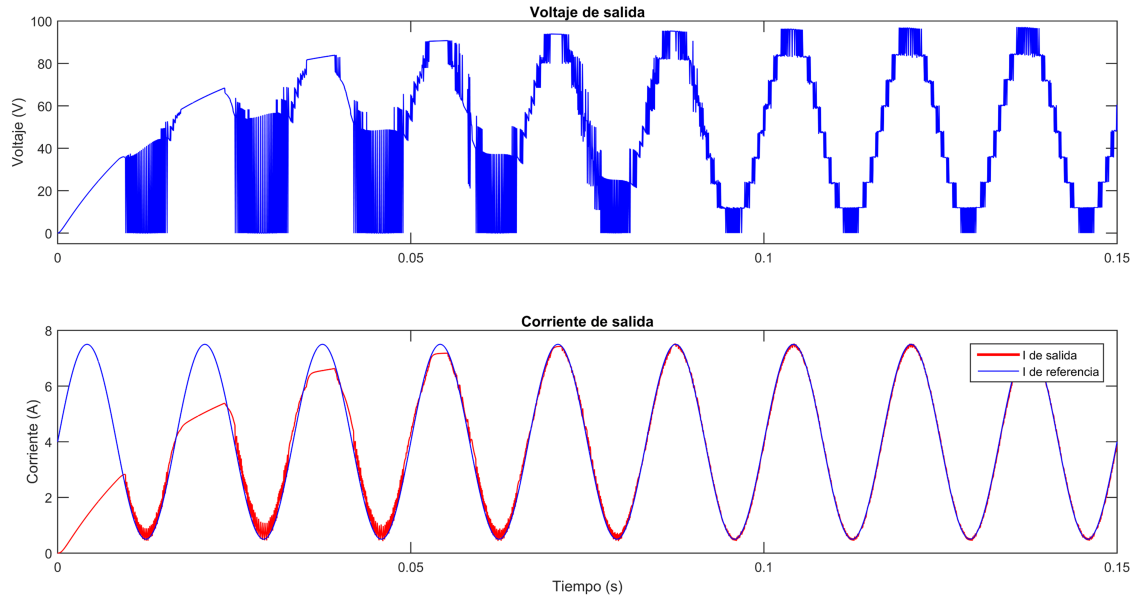


Figura 4.15: Prueba 4: Tensión y corriente de salida. SESD, CDir, 9N, IP.

Por otro lado, en la Fig. 4.16 se muestra un acercamiento de las tensiones de los condensadores tanto medidas como estimadas. Se aprecia claramente que la variación en la capacitancia de los condensadores flotantes no genera errores apreciables en las estimaciones. La Fig. 4.17 y Tabla 4.12 presentan los errores de estimación. El error máximo, en estado estable, es de 1.1 V. Este error es similar al obtenido en el caso nominal (ideal).

Adicionalmente, la Tabla 4.13 muestra los errores RMS en estado estable con un valor máximo de 0.20 V el cual es similar al obtenido en la prueba No. 3, lo que significa que el esquema de estimación es robusto ante las incertidumbres en los valores de la capacitancia de los condensadores.

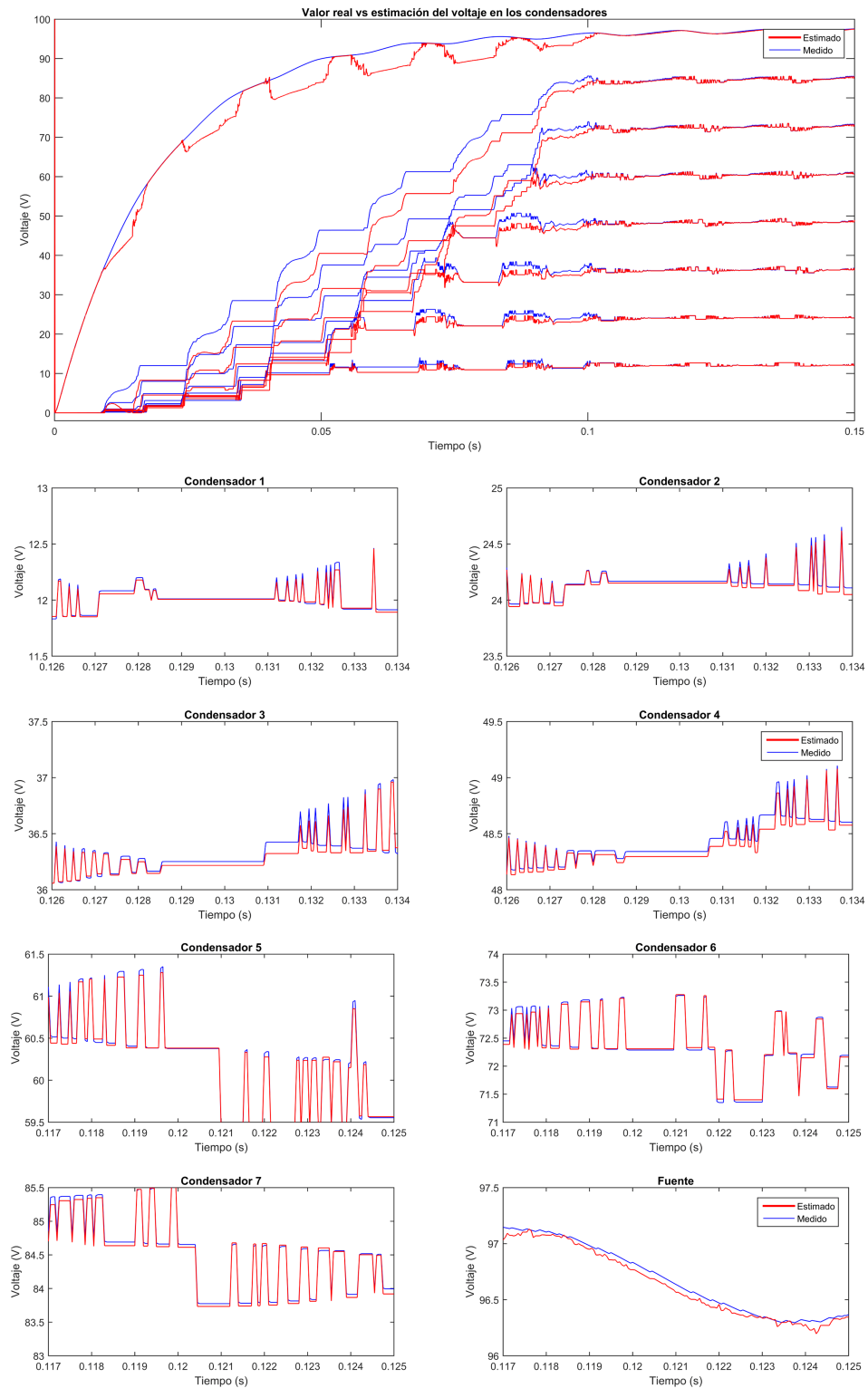


Figura 4.16: Prueba 4: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD, CDir, 9N, IP.

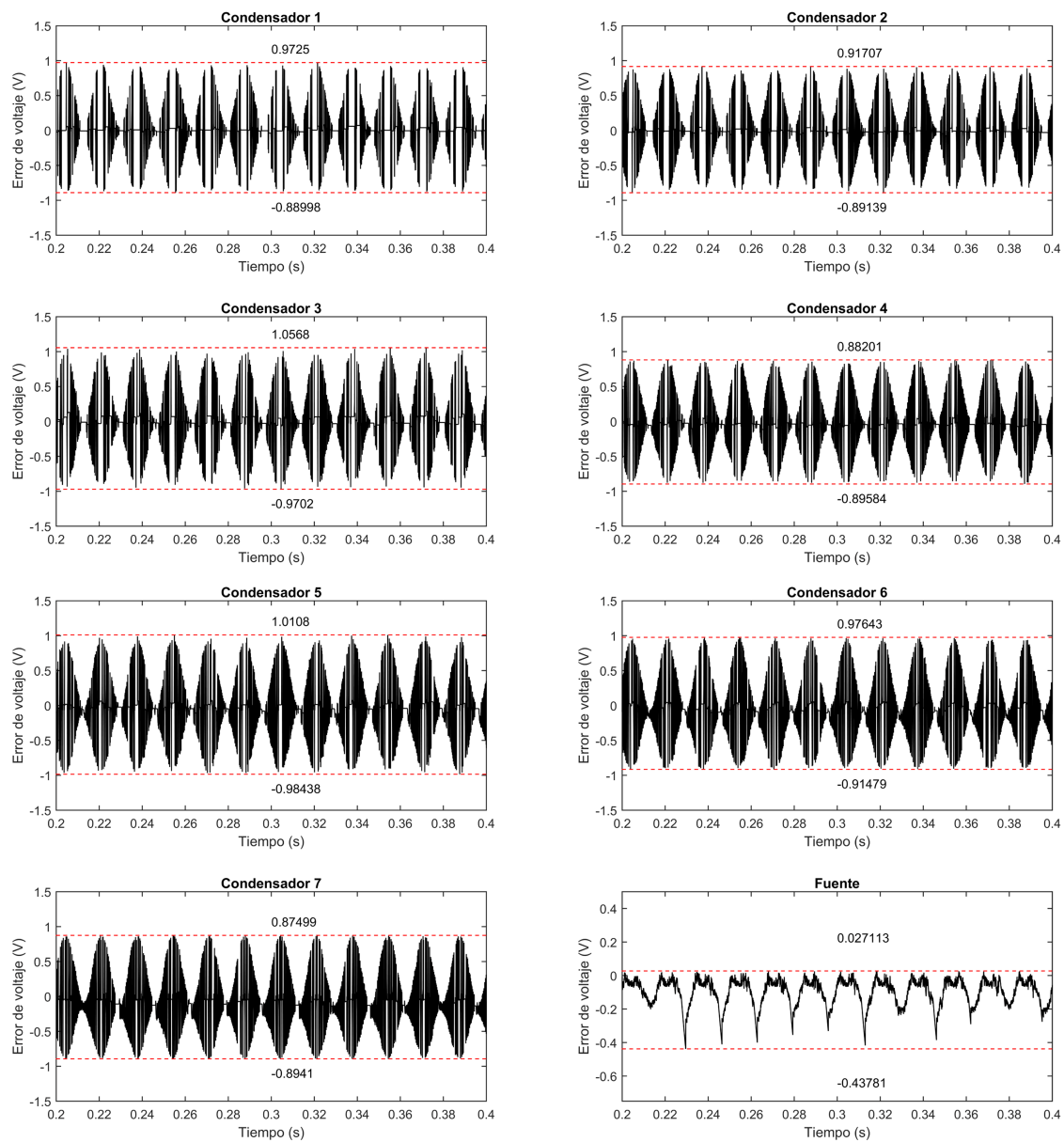


Figura 4.17: Prueba 4: Error en las estimaciones. SESD, CDir, 9N, IP.

Error instantáneo máximo en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Condensador 4
0.9725 V	0.9170 V	1.0568 V	0.8958 V
Condensador 5	Condensador 6	Condensador 7	Fuente de DC
1.0108 V	0.9764 V	0.8941 V	0.4378 V

Tabla 4.12: Prueba 4: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, IP.

Error RMS en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Condensador 4
0.1314 V	0.1424 V	0.1596 V	0.1567 V
Condensador 5	Condensador 6	Condensador 7	Fuente de DC
0.1752 V	0.1824 V	0.1841 V	0.1261 V

Tabla 4.13: Prueba 4: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, IP.

4.1.1.7 PRUEBA NO. 5: SEGUNDA PROPUESTA SESD, CONVERTIDOR DE 9 NIVELES, CON RUIDO EN LA MEDICIÓN DE TENSIÓN Y CORRIENTE DE SALIDA

En esta prueba se agrega de manera simultánea ruido blanco de amplitud máxima de $\pm 1V$ y $\pm 1A$ a la medición de tensión y corriente de salida.

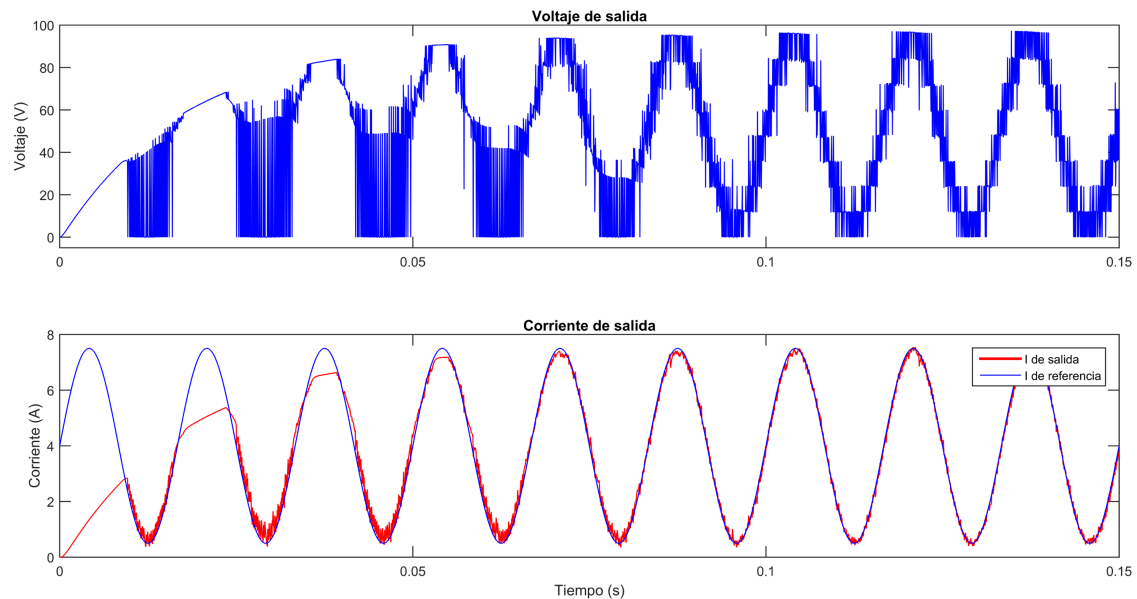


Figura 4.18: Prueba 5: Tensión y corriente de salida. SESD, CDir, 9N, RMTCS.

A continuación se presentan los resultados obtenidos. Primeramente, en la Fig. 4.18 se muestra la tensión y la corriente de salida del convertidor. Como se puede observar, la corriente de salida tiene un buen seguimiento de la referencia dada, por otro lado, la tensión de salida está definida por niveles discretos de tensión, tal como se define en (2.2), sin embargo, en algunos casos se presentan niveles de tensión que no aparecían en las pruebas anteriores; esto se debe a que el ruido introducido en las mediciones de tensión y corriente de salida, afecta al control de corriente, pero no a la estimación (los niveles de tensión están bien definidos). La definición de los niveles discretos de tensión, están directamente relacionados con las tensiones de los condensadores flotantes, que a su vez dependen de las estimaciones. Si las tensiones

están balanceadas tal como lo define (2.6), entonces los niveles discretos de la tensión de salida corresponderán a niveles de igual magnitud, tal como se observa en la Fig. 4.18. Por lo tanto, las estimaciones utilizadas para el control de las tensiones de los condensadores, deben tener un error pequeño, en caso contrario, el control de las tensiones no funcionaría de manera correcta.

En la Fig. 4.19 se muestra un acercamiento a las tensiones de los condensadores tanto medidas como estimadas; se observa que existe un pequeño error de estimación que no afecta de manera considerable el control de las tensiones de los condensadores del convertidor. También, en la Fig. 4.20 y Tabla 4.14 se muestran los errores de estimación; con un error máximo de estimación en estado estable de 1.2 V.

Adicionalmente, la Tabla 4.15 muestra los errores RMS en estado estable con un valor máximo de 0.24 V. Con estos resultados se puede concluir que cuando se tiene ruido en las mediciones de tensión y corriente de salida el esquema de estimación es robusto y continua trabajando de manera correcta.

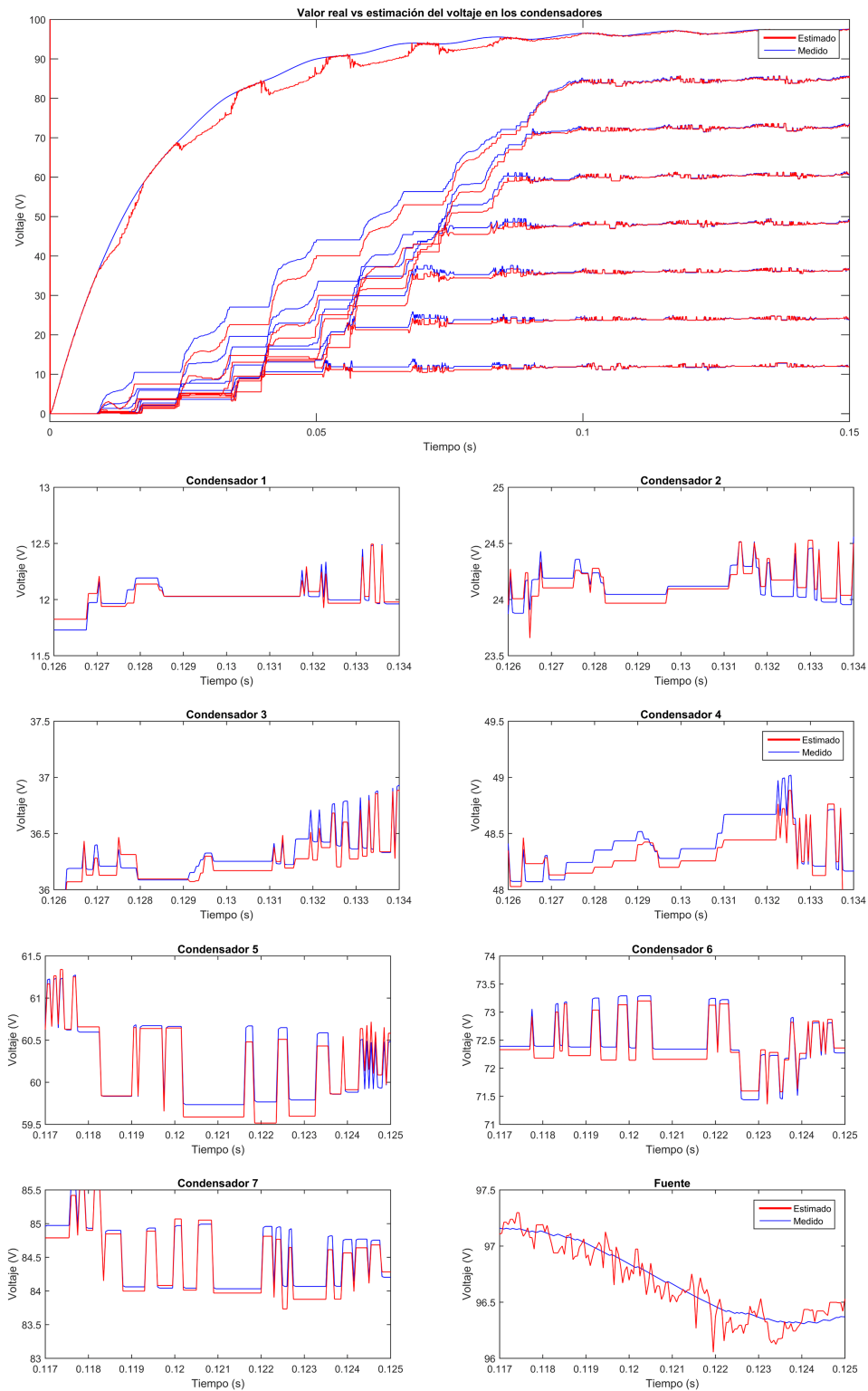


Figura 4.19: Prueba 5: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD, CDir, 9N, RMTCS.

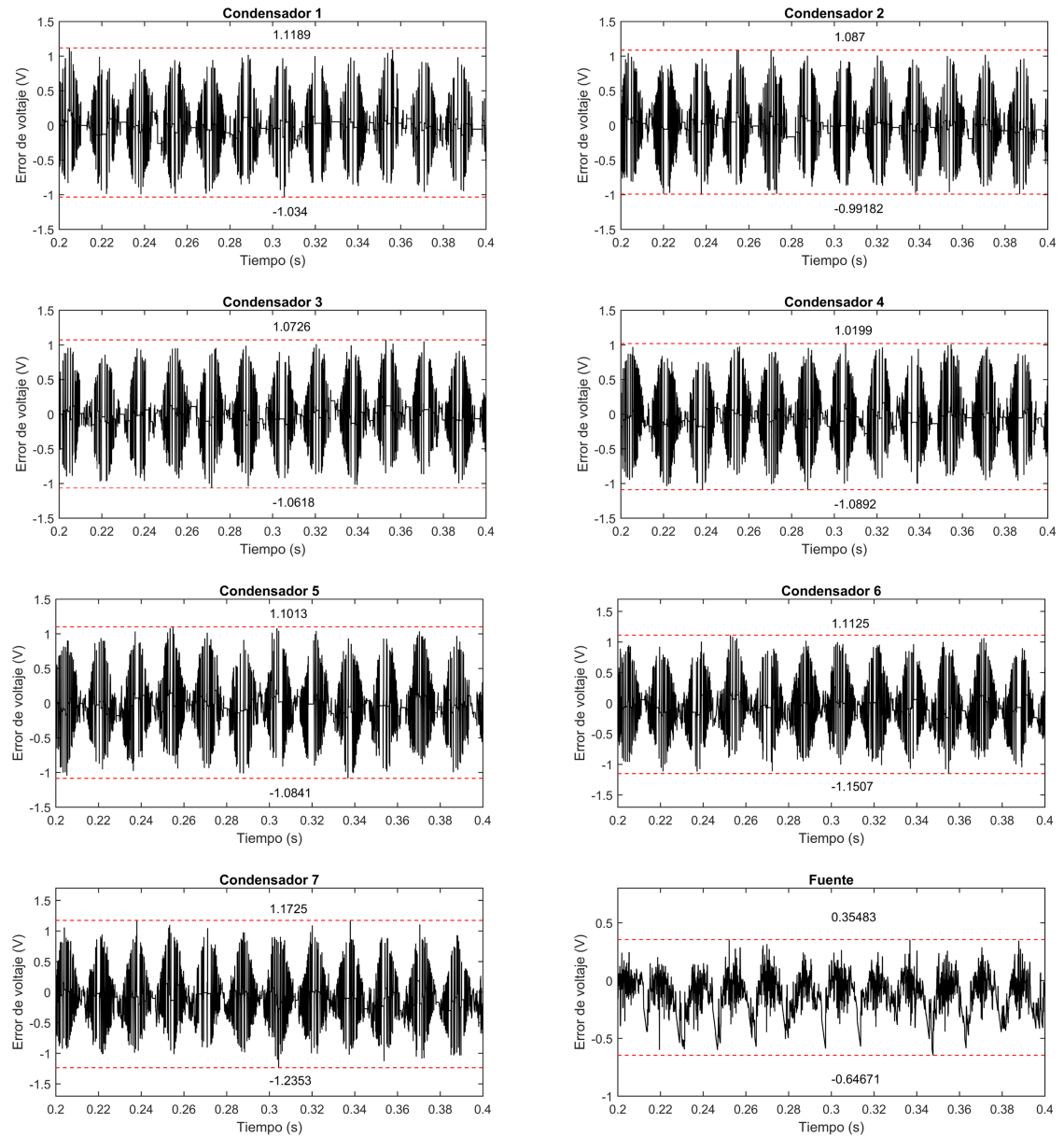


Figura 4.20: Prueba 5: Error en las estimaciones. SESD, CDir, 9N, RMTCS.

Error instantáneo máximo en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Condensador 4
1.1189 V	1.0870 V	1.0726 V	1.0892 V
Condensador 5	Condensador 6	Condensador 7	Fuente de DC
1.1013 V	1.1507 V	1.2353 V	0.6467 V

Tabla 4.14: Prueba 5: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, RMTCS.

Error RMS en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Condensador 4
0.1562 V	0.1701 V	0.1777 V	0.1883 V
Condensador 5	Condensador 6	Condensador 7	Fuente de DC
0.1891 V	0.2046 V	0.2307 V	0.2386 V

Tabla 4.15: Prueba 5: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, RMTCS.

4.1.1.8 PRUEBA NO. 6: SEGUNDA PROPUESTA SESD, CONVERTIDOR DE 9 NIVELES, CONSIDERANDO INCERTIDUMBRE PARAMÉTRICA Y RUIDO EN LAS MEDICIONES DE TENSIÓN Y CORRIENTE DE SALIDA

Ahora, se realizan en conjunto las pruebas 4 y 5: incertidumbre paramétrica y ruido en la medición de la tensión y corriente de salida, usando las mismas condiciones de que en las pruebas 4 y 5.

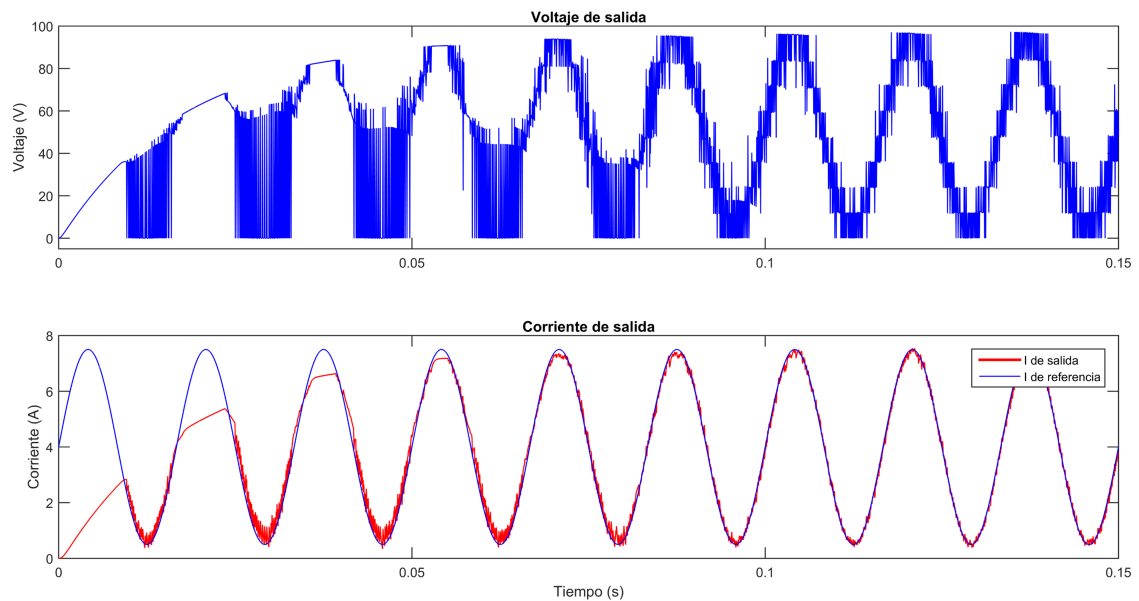


Figura 4.21: Prueba 6: Tensión y corriente de salida. SESD, CDir, 9N, IP, RMTCS.

A continuación se presentan los resultados obtenidos. En la Fig. 4.21 se muestra la tensión y corriente de salida del convertidor. Como se puede observar, la corriente de salida sigue bien a la referencia dada, mientras que la tensión de salida está definida por niveles discretos de tensión, tal como se define en (2.2). Sin embargo, existen situaciones en las que algunos niveles de tensión cambian, mientras que con las pruebas sin ruido estos cambios no se presentan. También se observa un rizo mayor en la corriente de salida. Ambas situaciones se pueden atribuir al algoritmo de control de corriente utilizado. Por otra parte, si las tensiones de los condensadores están balanceadas tal como lo define (2.6), entonces los niveles discretos de la tensión

de salida corresponderán a niveles de igual magnitud, tal como se observa en la Fig. 4.21. Por lo tanto, las estimaciones utilizadas para el control de las tensiones de los condensadores, deben de tener un error pequeño para que el control de la tensiones funcione de manera correcta.

Para apreciar la calidad de las estimaciones, en la Fig. 4.22 se muestra un acercamiento a las señales de la tensión de los condensadores tanto medida como estimada; se puede observar que la diferencia entre la estimación y la medición es pequeña.

Los errores de estimación se muestran en la Fig. 4.23 y Tabla 4.16; una vez que se ha alcanzado el estado estable, el error máximo es de 1.25 V. Por lo que se puede concluir que el esquema de estimación tiene la capacidad de responder de manera adecuada ante condiciones en las cuales de manera simultanea se tiene incertidumbre paramétrica y ruido en las mediciones.

De manera adicional, en la Tabla 4.17 se muestra el error RMS en estado estable, este es el mayor de los errores en las diferentes pruebas realizadas, siendo de 0.25 V. En comparación con las pruebas anteriores (4 y 5) los errores no tuvieron un aumento considerable.

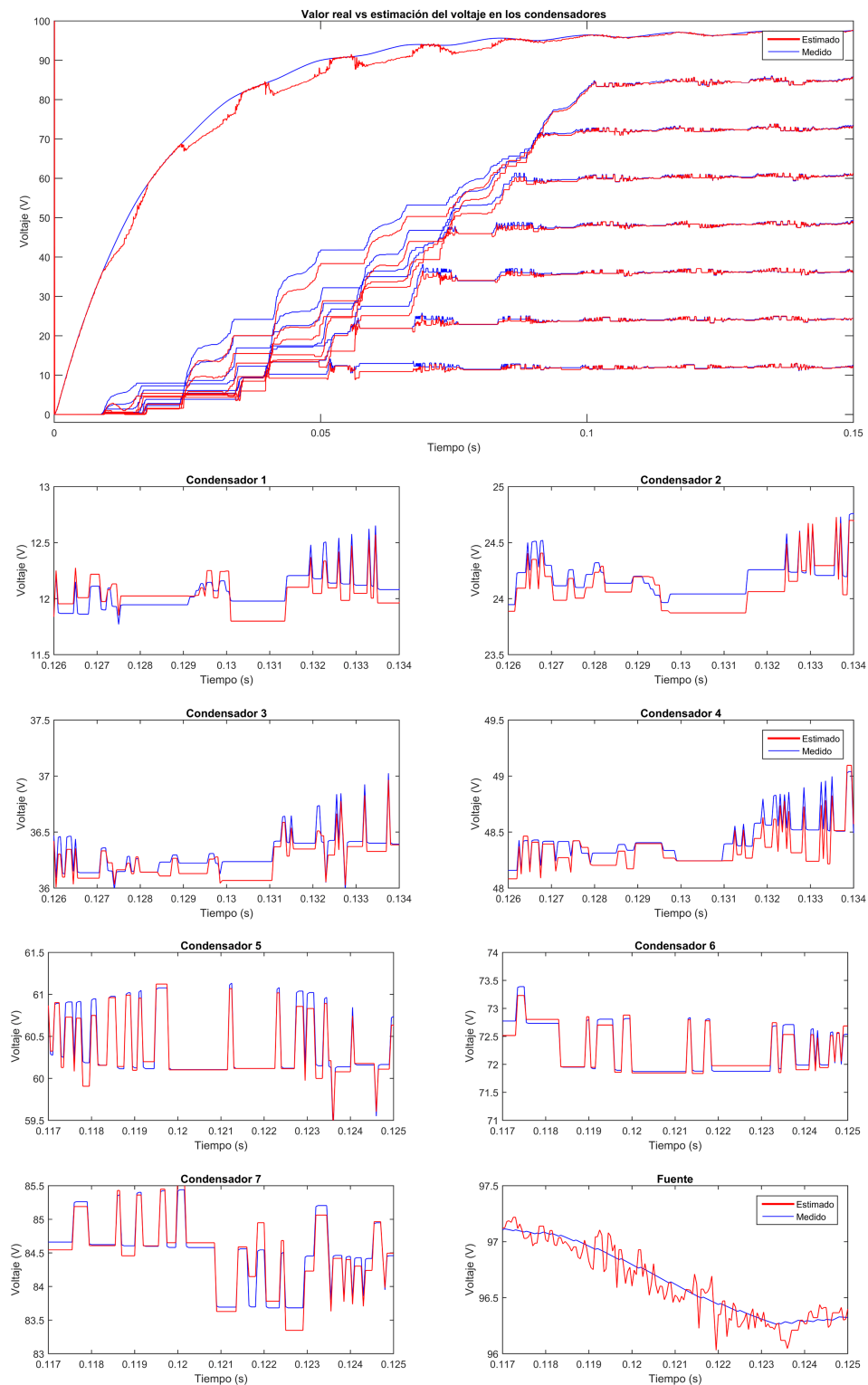


Figura 4.22: Prueba 6: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD, CDir, 9N, IP, RMTCS.

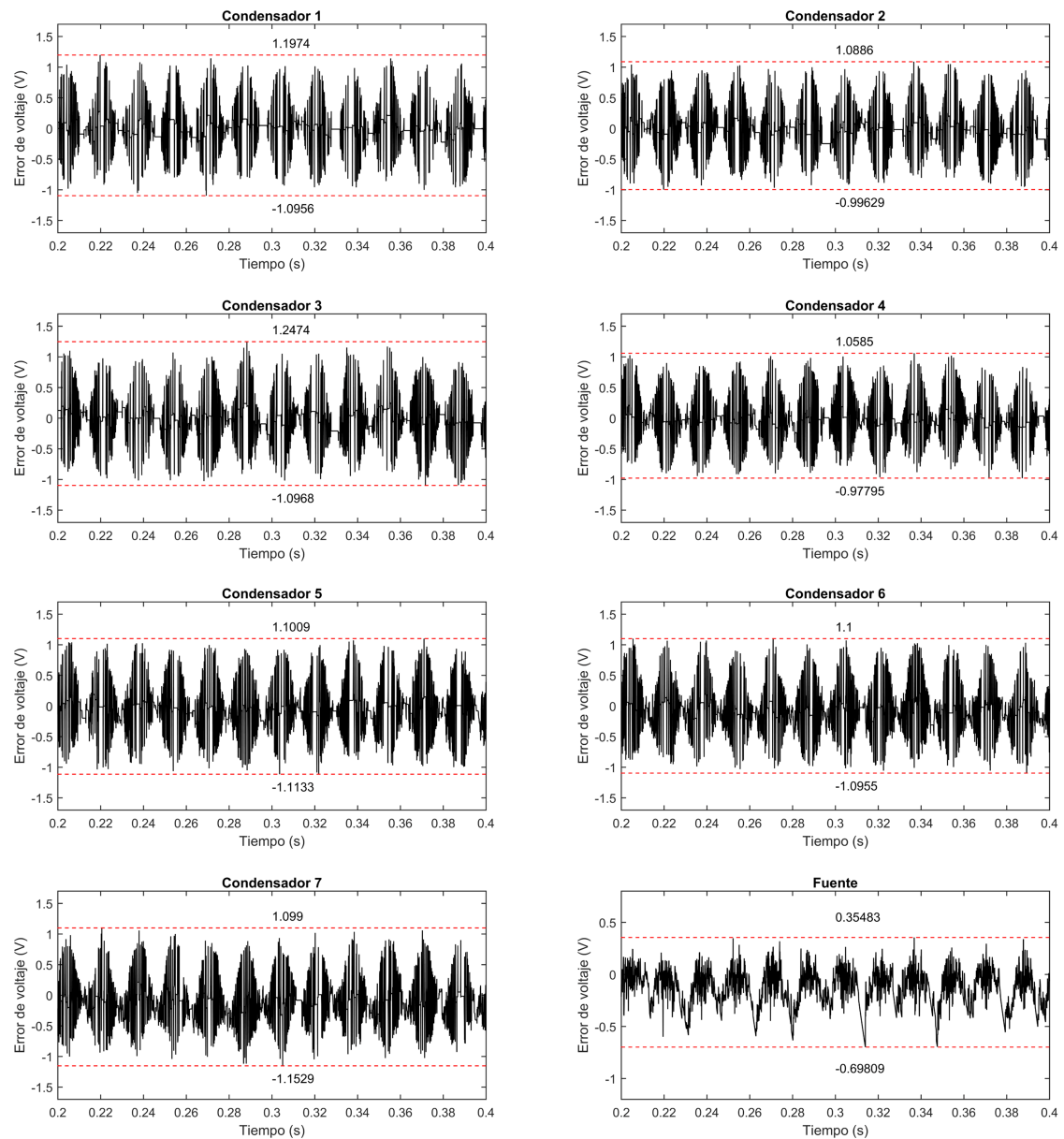


Figura 4.23: Prueba 6: Error en las estimaciones. SESD, CDir, 9N, IP, RMTCS.

Error instantáneo máximo en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Condensador 4
1.1974 V	1.0886 V	1.2474 V	1.0585 V
Condensador 5	Condensador 6	Condensador 7	Fuente de DC
1.1133 V	1.1000 V	1.1529 V	0.6980 V

Tabla 4.16: Prueba 6: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, IP, RMTCS.

Error RMS en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Condensador 4
0.1676 V	0.1654 V	0.1792 V	0.1777 V
Condensador 5	Condensador 6	Condensador 7	Fuente de DC
0.1932 V	0.2100 V	0.2230 V	0.2221 V

Tabla 4.17: Prueba 6: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, IP, RMTCS.

4.1.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES - CONTROL DIRECTO

En esta sección, se presentan las pruebas experimentales del método de estimación propuesto (segunda propuesta), cuando se utiliza un control directo para el convertidor. Las pruebas se realizan en un prototipo de laboratorio de 9 niveles.

4.1.2.1 PRUEBA NO. 7: SEGUNDA PROPUESTA SESD, CONVERTIDOR DE 9 NIVELES - PRUEBAS EXPERIMENTALES

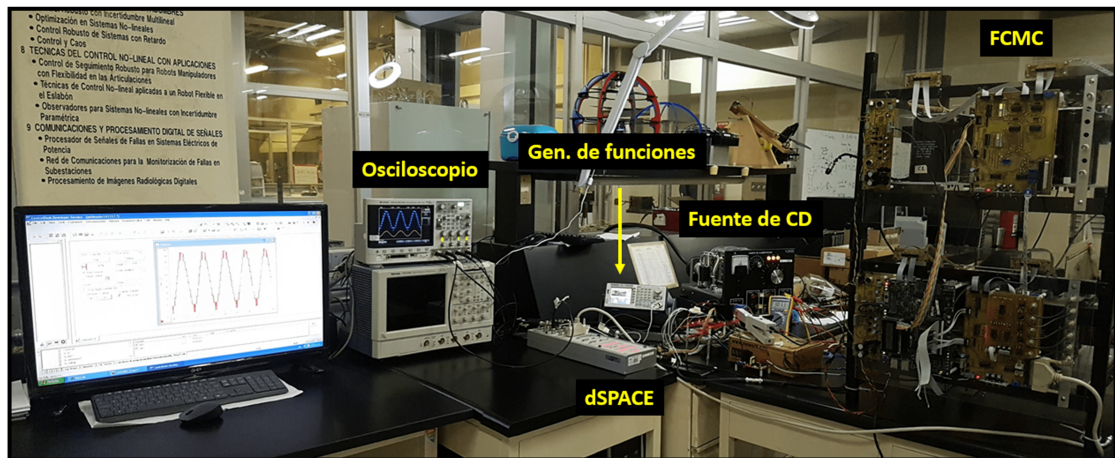


Figura 4.24: Prototipo de laboratorio, FCMC de 9 niveles.

En esta sección se presentan los resultados experimentales del método de estimación propuesto. Las pruebas se realizan en un prototipo de laboratorio con un convertidor de 9 niveles. Para implementar el control del convertidor se utiliza un sistema dSPACE 1104 y una tarjeta FPGA Actel ProAsic (Fig. 4.24). El método de estimación se presenta en el Capítulo 3, sección 3.3. El diagrama de flujo del programa implementado se muestra en la Fig. 4.6 y el programa y esquema de MATLAB / simulink en el Apéndice A, sección A.2. Los parámetros del sistema se definen en la Tabla 4.5 con la diferencia de que el Δt se incrementa de $50 \mu s$ a $65 \mu s$ y la corriente de referencia para la salida es una senoide con amplitud modulada, definida por

$i^*(t) = 4 + 1.9 \cdot (1 + \sin(18.85 \cdot t)) \cdot \sin(377 \cdot t) A^1$. Adicionalmente, las tensiones nominales de operación de los condensadores flotantes para un FCMC de 9 niveles se presentan en la Tabla 4.3.

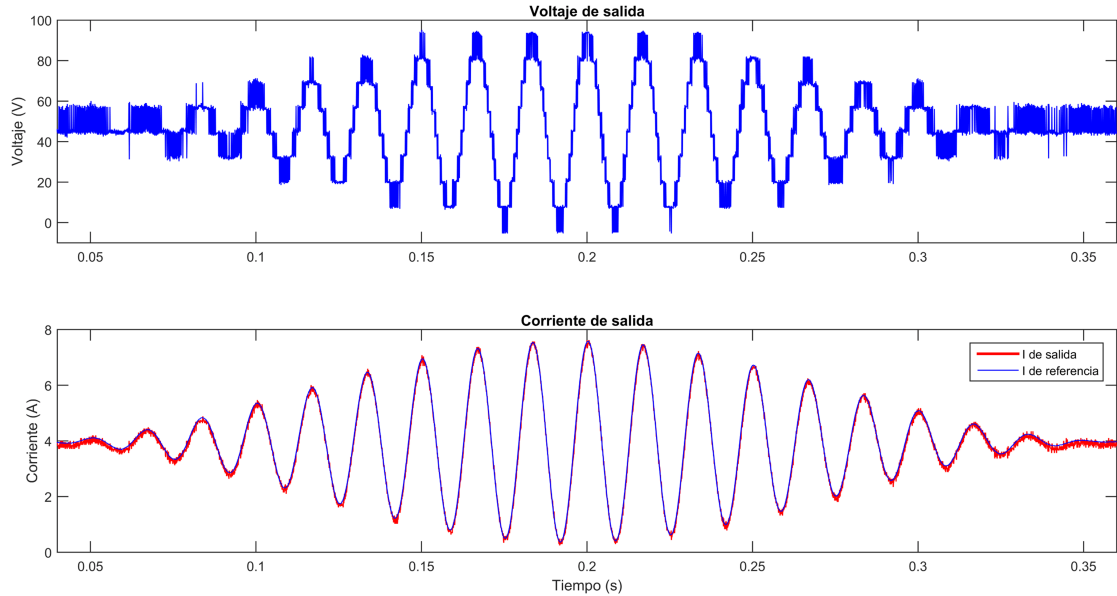


Figura 4.25: Prueba 7: Tensión y corriente de salida. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.

A continuación se presentan los resultados obtenidos. Primeramente, en la Fig. 4.25 se muestra la tensión y la corriente de salida del convertidor. Como se observa, la corriente de salida sigue bien a la referencia dada, mientras que la tensión de salida está definida por niveles discretos de tensión, tal como se define en (2.2). Este primer resultado, al igual que en las pruebas con simulaciones numéricas, nos muestra que tanto el sistema de control como el de estimación están funcionando de manera correcta; recordar que la definición de los niveles discretos de tensión, están directamente relacionados con las tensiones de los condensadores flotantes. Si las tensiones están balanceadas tal como se define en (2.6), entonces los niveles

¹Esta referencia permite probar el estimador considerando todos los estados del convertidor, además de subconjuntos de estos.

discretos de la tensión de salida corresponderán a niveles de igual magnitud, tal como se observa en la Fig. 4.25. Por lo tanto, las estimaciones usadas para el control de las tensiones de los condensadores, deben de tener un error pequeño, en caso contrario, el control de las tensiones no funcionaría de manera correcta.

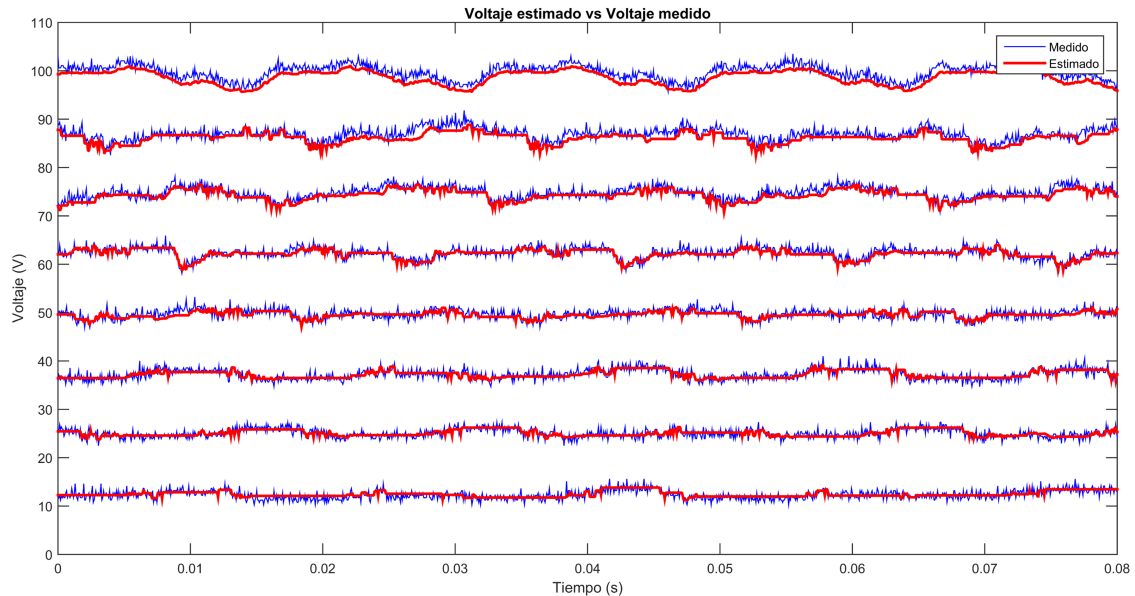


Figura 4.26: Prueba 7: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.

Ahora, pasemos a ver con mayor detalle el desempeño del esquema de estimación propuesto. En la Fig. 4.26 se muestran las tensiones de los condensadores medidos y estimados, los cuales fueron medidos en tiempos diferentes ya que no se cuentan con suficientes sensores de tensión. Se puede apreciar que las estimaciones son bastante cercanas al valor de las mediciones; en la Fig. 4.27 y Tabla 4.18 muestran los errores de estimación. En estado estable, el mayor error es de 4.2 V.

Adicionalmente, en la Tabla 4.19 se muestra el error RMS en estado estable de las estimaciones de las tensiones en los 7 condensadores y la fuente de DC, los cuales no son mayores a 1.4 V. También, en la Fig. 4.28 se muestra un acercamiento a la tensión de salida del convertidor, se observa claramente que los niveles de tensión

están bien definidos, por lo que el balance de tensión, realizado a partir de las estimaciones, es correcto.

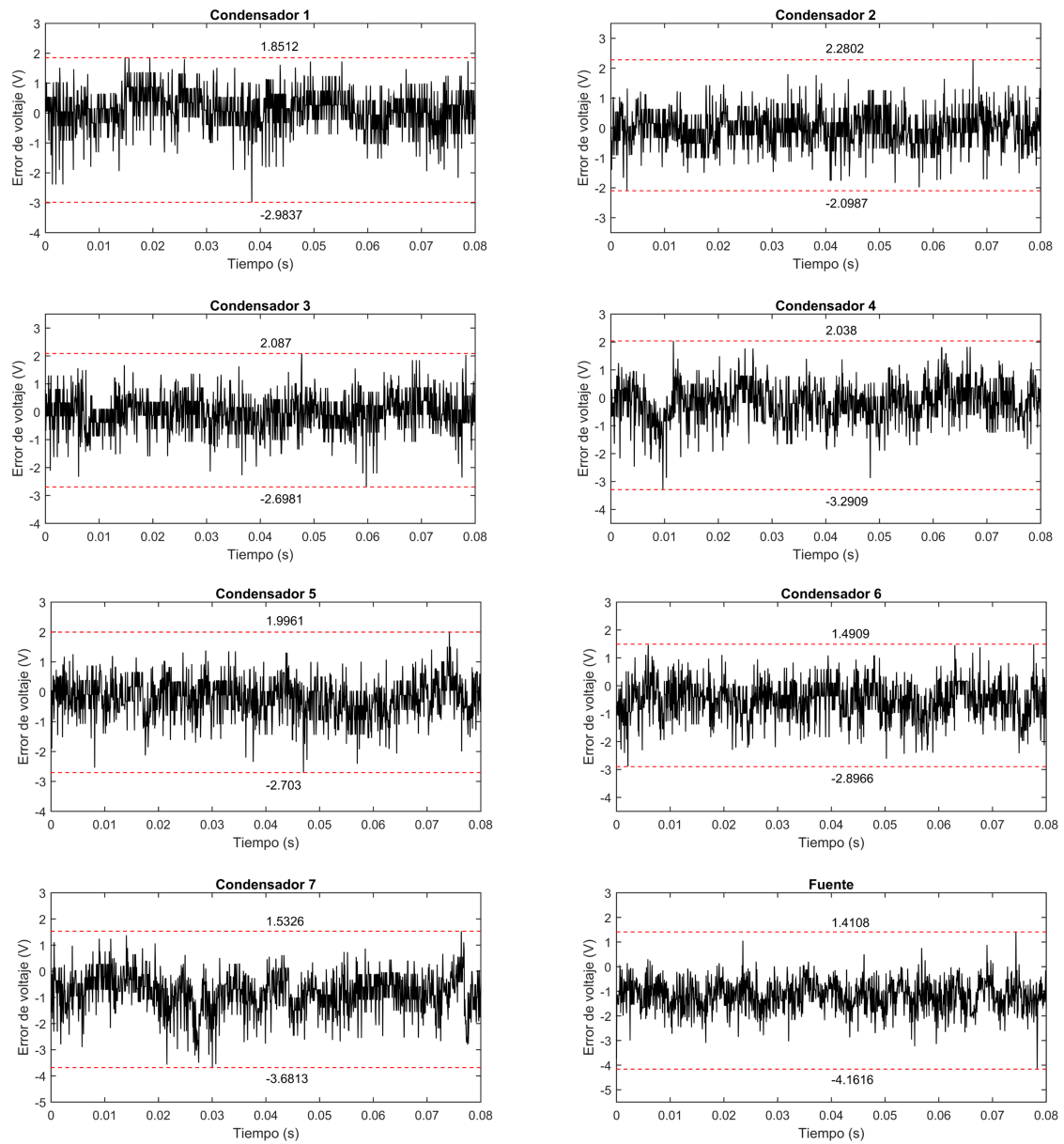


Figura 4.27: Prueba 7: Error en las estimaciones. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.

Error instantáneo máximo en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Condensador 4
2.9837 V	2.2802 V	2.6981 V	3.2909 V
Condensador 5	Condensador 6	Condensador 7	Fuente de DC
2.7030 V	2.8966 V	3.6813 V	4.1616 V

Tabla 4.18: Prueba 7: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.

Error RMS en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Condensador 4
0.6757 V	0.6140 V	0.6670 V	0.7255 V
Condensador 5	Condensador 6	Condensador 7	Fuente de DC
0.6833 V	0.8404 V	1.1243 V	1.3280 V

Tabla 4.19: Prueba 7: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.

Es importante remarcar que esta prueba al ser experimental, contempla todas las condiciones reales posibles, como: incertidumbre paramétrica, ruido en las mediciones, pérdidas en los conductores, pérdidas en los interruptores, entre otras, las cuales no fueron modeladas en el esquema de estimación ya que complicaría las ecuaciones utilizadas en el algoritmo.

Ahora se presentan pruebas adicionales que permitirán evaluar el desempeño del esquema de estimación ante condiciones transitorias. En la Fig. 4.29 se muestra el transitorio de arranque, cuando la tensión de entrada pasa de 0 V a 100 V. Se observa que la tensión de salida, a lo largo de todo el transitorio, mantiene una forma de onda multinivel, lo que corrobora que ante esta condición el esquema de estimación funciona de manera correcta y ofrece estimaciones precisas al control de balance de tensión. Finalmente, en la Fig. 4.30 se muestra un transitorio en la tensión de entrada

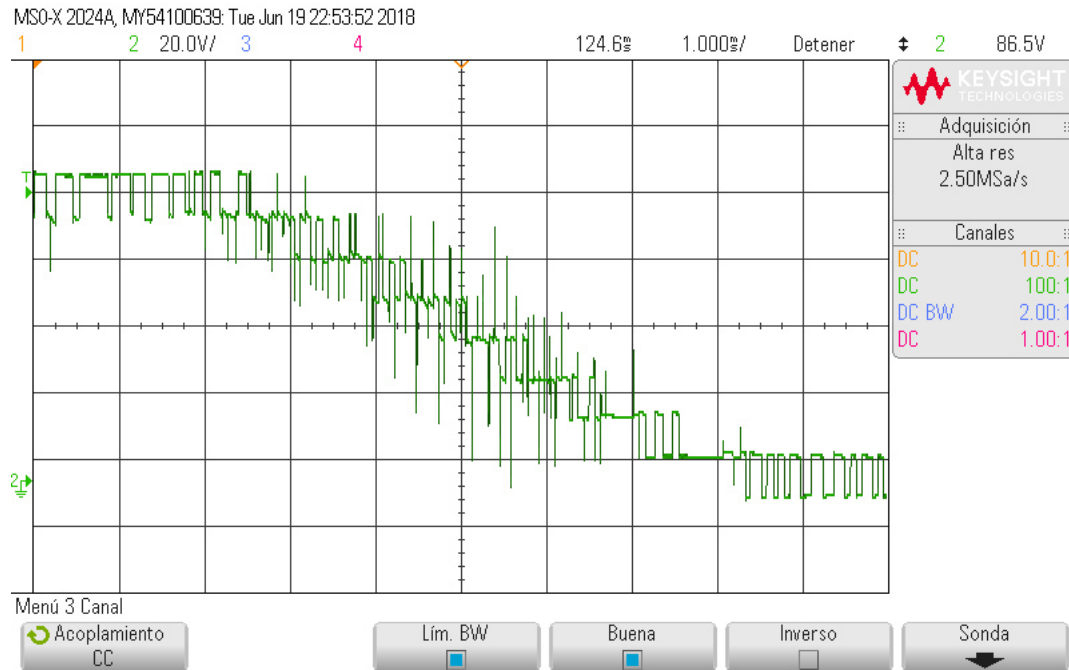


Figura 4.28: Prueba 7: Acercamiento a los niveles de la tensión de salida. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.

que pasa de 100 V a 150 V, aproximadamente. Se observa que las tensiones de los condensadores evolucionan de manera correcta, todos los condensadores mantienen la misma proporción en la tensión de operación. Así mismo, los niveles de tensión de la tensión de salida durante todo el transitorio están claramente definidos. Se puede concluir entonces, que bajo condiciones transitorias el esquema de estimación funciona bastante bien, proporcionando estimados que pueden integrarse al lazo de control de la tensión de los condensadores.

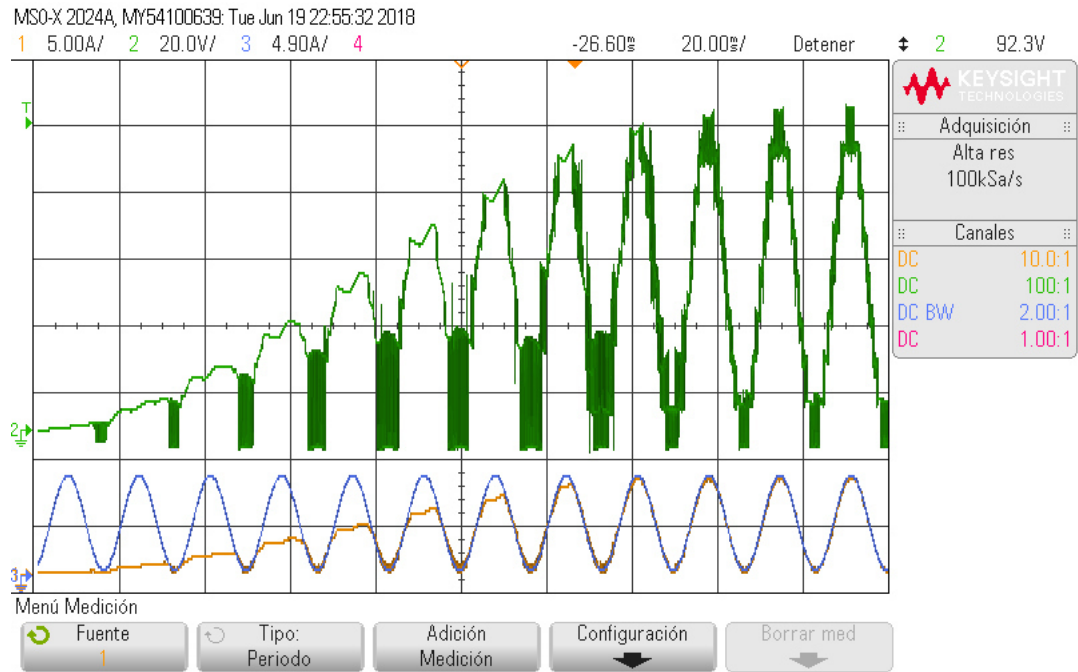


Figura 4.29: Prueba 7: Transitorio de encendido, variación de la fuente de DC de 0 V a 100 V. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.

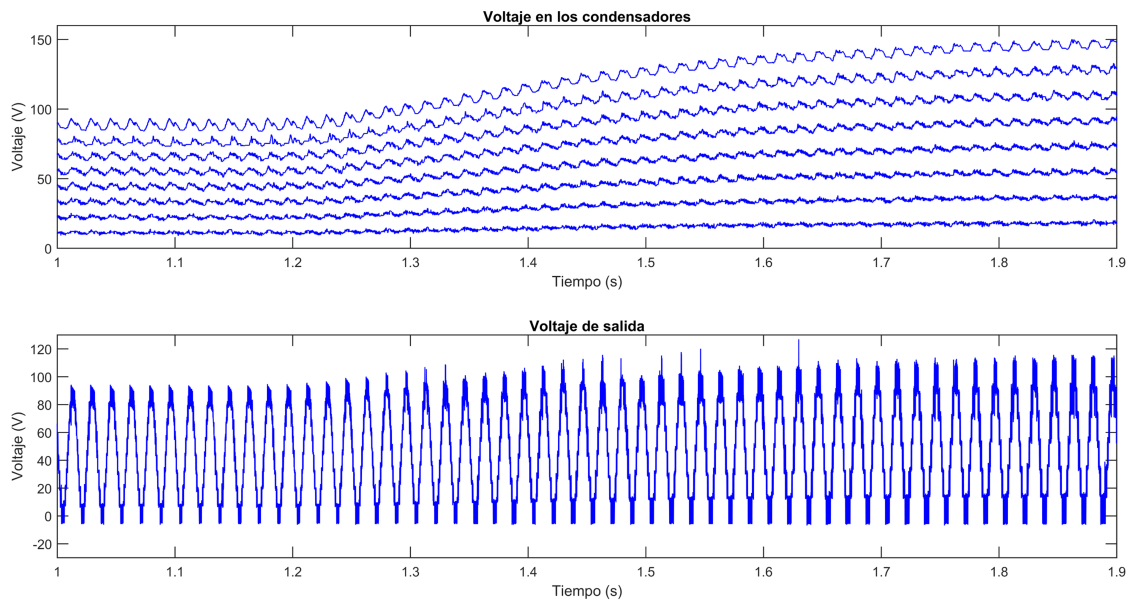


Figura 4.30: Prueba 7: Transitorio durante operación, variación de la fuente de DC de 100 V a 150 V. SESD, CDir, 9N, prueba experimental.

4.2 CONTROL DEL CONVERTIDOR CON MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO (PWM)

La principal característica de un control PWM es que las señales de control se generan a partir de un proceso de modulación y no directamente por el control del convertidor. Un esquema estándar para generar las señales de control moduladas en ancho de pulso, es a través de una comparación entre una señal de referencia (señal moduladora) y una señal(es) triangular(es) (señal portadora(s)) [52]. Los estados de conmutación aplicados al convertidor tienen una duración variable que depende del ciclo de trabajo; el ciclo de trabajo es generado por el algoritmo de control del convertidor, cuyo objetivo es dar seguimiento a una corriente de referencia, o generar una cierta tensión a la salida del convertidor, además de mantener el balance de las tensiones en los condensadores del convertidor. Así, a diferencia del control directo, en donde los estados de conmutación se actualizan periódicamente, cuando se utiliza una modulación PWM, la duración de los estados de conmutación es variable; esto impone algunas restricciones para el esquema de estimación propuesto. En teoría, lo único que se requiere es calcular o medir la duración de cada estado de conmutación, pero en la práctica esto puede ser un reto complicado. A continuación se presenta el esquema propuesto para implementar la estimación en conjunto con un control de tipo PWM.

En la Fig. 4.31 se muestra el diagrama a bloques del sistema de prueba utilizado cuando el estimador propuesto se integra con una modulación PWM. Como se observa, consiste de un convertidor multinivel (5 niveles) y un sistema de control / estimación que se divide en 2 subsistemas. Estos subsistemas trabajan de manera asíncrona. En el primer subsistema se realiza el control de corriente, el control de balance de tensión y la generación de las señales de control a través de una modulación multinivel de tipo PWM; en el segundo subsistema se implementa el esquema de estimación. Además, se tiene un detector de flancos que detecta cambios en las

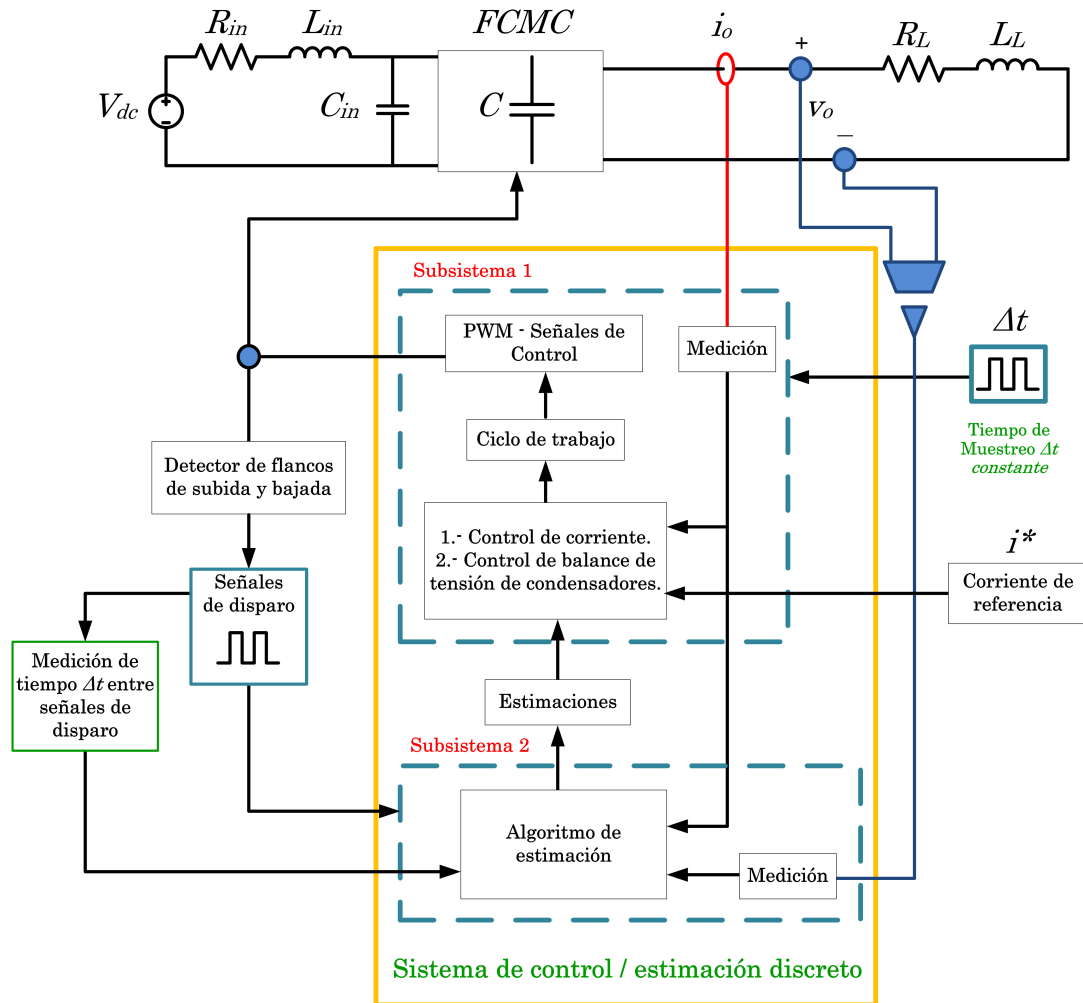


Figura 4.31: Sistema de prueba - control PWM del convertidor.

señales de control (cambio en los estados de conmutación) y mide la duración de cada estado de conmutación. Esto último es necesario para que el estimador conozca cuando se presenta un nuevo estado de conmutación así como su duración; el estimador se ejecuta cada vez que se detecta un nuevo estado de conmutación.

Luego, las estimaciones son usadas por el algoritmo de control para mantener balanceadas las tensiones en los condensadores. En este caso, a diferencia del control directo que necesita estimaciones del valor instantáneo, en un control PWM es suficiente con conocer el valor promedio de las tensiones de los condensadores. Este bloque se puede ejecutar periódicamente, a diferencia del estimador cuya ejecución,

en general será realizada a intervalos de tiempo irregulares. En el Capítulo 3, sección 3.5, se presentan los detalles de la implementación del esquema de estimación en un control PWM.

Los parámetros del sistema y las pruebas realizadas se resumen en las Tablas 4.20 y 4.21, respectivamente.

Parámetro del sistema	Valor
V_{dc}	100 V
Filtro de entrada R_{in}, L_{in}, C_{in}	1 Ω , 30 mH, 19390 μF
Capacitancia de condensadores flotantes (C)	390 μF
Resistencia de carga R_L	12.63 Ω
Inductancia de carga L_L	7.2 mH
Periodo de muestreo Δt (T_s) del subsistema 1	500 μs
Frecuencia de señal portadora (f_t)	2000 Hz

Tabla 4.20: Parámetros del sistema para una modulación PWM.

Prueba	No. de niveles	Algoritmo	Contexto	Descripción
8	5 niveles	2da propuesta	Simulación	Seguimiento de corriente de referencia tipo seno, condiciones ideales.
9	5 niveles	2da propuesta, modificada	Simulación	Seguimiento de corriente de referencia tipo seno, condiciones ideales; se elimina el Paso 1 del algoritmo de estimación para poder simplificar el esquema y ver la factibilidad de aplicarse en una prueba experimental.
10	5 niveles	2da propuesta, modificada	Simulación	Seguimiento de corriente de referencia tipo seno, con incertidumbre paramétrica en condensadores ($\pm 10\%$) y ruido en la medición de tensión y corriente de salida.
11	5 niveles	2da propuesta, modificada	Experimental	Seguimiento de corriente de referencia tipo seno.

Tabla 4.21: Resumen de pruebas simuladas y experimentales para una modulación PWM.

4.2.1 PRUEBAS CON SIMULACIONES NUMÉRICAS - CONTROL PWM

En esta sección, se presentan pruebas en simulación del método de estimación propuesto (segunda propuesta), cuando se utiliza una modulación de tipo PWM para el control del convertidor. Las pruebas se realizan considerando un convertidor de 5 niveles.

4.2.1.1 PRUEBA NO. 8: SEGUNDA PROPUESTA SESD, ESTIMACIÓN CON ESQUEMA DE MODULACIÓN DE TIPO PWM, CONDICIONES IDEALES

Como se ha mencionado, al existir una modulación PWM la implementación del esquema de estimación se complica. Sin embargo, en simulación se tienen las herramientas y recursos necesarios lo que facilita la incorporación del detector de flancos de subida y bajada, así como el cronómetro para medir el tiempo que duran los estados de conmutación, además no se tienen problemas con los tiempos de cálculo; el algoritmo de estimación puede aplicarse casi de manera directa, lo único que requiere es sincronizarse con la secuencia de los estados de conmutación y conocer su duración. El desarrollo del método de estimación se presentó en el Capítulo 3, sección 3.3. El diagrama de flujo del programa implementado se muestra en la Fig. 4.32 y el programa y esquema de MATLAB / simulink en el Apéndice A, sección A.3. Los parámetros del sistema se definen en la Tabla 4.20. Para las pruebas, la corriente de salida de referencia, $i^*(t)$, corresponde a una senoide con una componente de DC, $i^*(t) = 4 + 3.5 \cdot \sin(377 \cdot t) A$. Adicionalmente, las tensiones nominales de operación de los condensadores flotantes para un FCMC de 5 niveles se presentan en la Tabla 4.2.

A continuación se presentan los resultados obtenidos. Primeramente, en la Fig. 4.33 se muestra la tensión y la corriente de salida del convertidor. Como se observa, la corriente de salida corresponde bien con la referencia, mientras que la tensión de

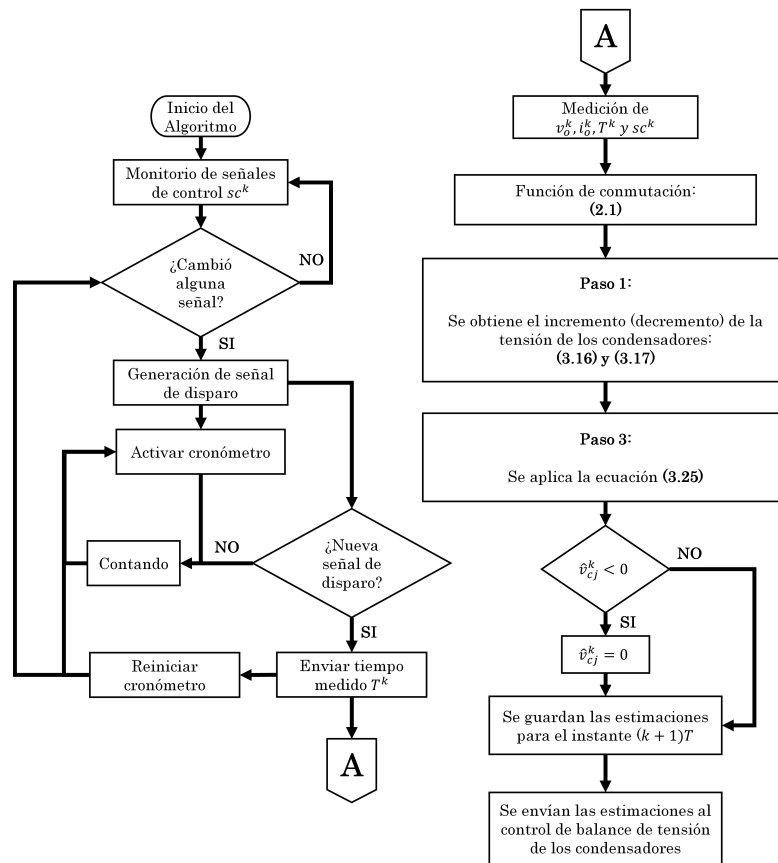


Figura 4.32: Diagrama de flujo de la segunda propuesta de estimación aplicada a un control PWM.

salida esta definida por niveles discretos de tensión de igual magnitud, tal y como se define en (2.2). Este primer resultado, muestra que tanto el sistema de control como el de estimación están funcionando de manera correcta; la definición de los niveles discretos de tensión, están directamente relacionados con las tensiones de los condensadores flotantes. Si las tensiones están balanceadas tal como lo define (2.6), entonces los niveles discretos de la tensión de salida corresponderán a niveles de igual magnitud, tal como se observa en la Fig. 4.33. Por lo tanto, las estimaciones usadas para el control de las tensiones de los condensadores, deben de tener un error pequeño, porque en caso contrario, el control de las tensiones no funcionaría de manera correcta. Para corroborar esto último, analicemos ahora el error de las estimaciones.

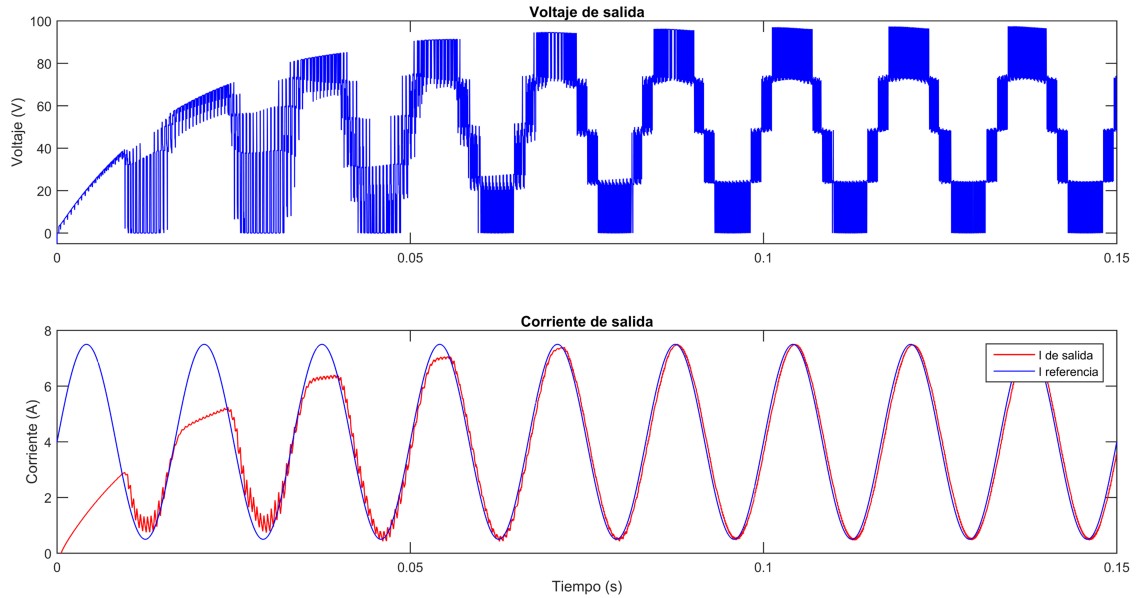


Figura 4.33: Prueba 8: Tensión y corriente de salida. SEDS, CPWM, 5N, CI.

La Fig. 4.34 muestra las tensiones de los condensadores tanto medidas como estimadas; como se observa en los recuadros de acercamiento, la estimación es bastante precisa. En la Fig. 4.35 y Tabla 4.22 se muestra el error de estimación y su valor RMS, respectivamente; una vez que se alcanza el estado estable el error RMS máximo es de 0.31 V. Los errores de estimación, se muestran en la Fig. 4.35 y sus valores máximos en la Tabla 4.23, siendo estos últimos de aproximadamente 2 V. En realidad, en los instantes de muestreo, los errores son mucho menores a los valores picos mostrados, ya que estos valores corresponden a los intervalos de tiempo entre estimaciones; lo correcto sería graficar únicamente los valores correspondientes a los instantes de muestreo (cuando se realiza y es válida la estimación); esto mismo aplica para las demás pruebas.

A partir de los resultados presentados, se puede observar que, al igual que en las pruebas realizadas con el control directo, las estimaciones son muy buenas y pueden usarse en el lazo de control para el balance de las tensiones de los condensadores. De hecho, el esquema de estimación solo requiere que se conozca el inicio y fin de

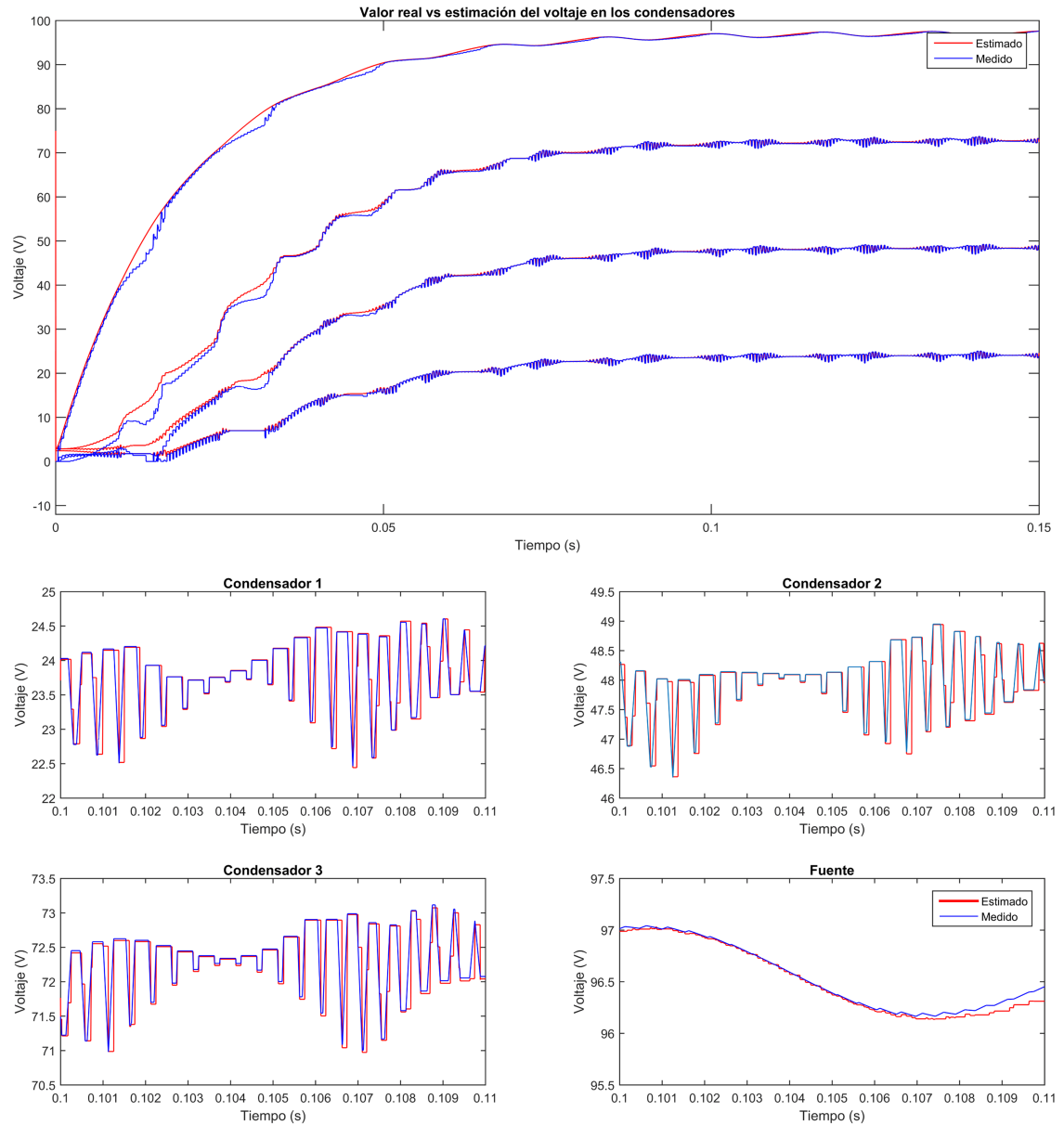


Figura 4.34: Prueba 8: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD, CPWM, 5N, CI.

cada estado de conmutación así como su duración, para que las estimaciones sean realizadas de manera correcta.

Por otra parte, es bueno recordar que en este caso, el método de control de las tensiones de los condensadores se puede implementar con el valor promedio de

las tensiones, por lo que la estimación de un valor instantáneo ya no es estrictamente necesario. En la siguiente sección, mostraremos como las estimaciones del valor promedio son suficientes para implementar una estrategia para el balance de las tensiones de los condensadores, cuando el convertidor es controlado por medio de una modulación en ancho de pulsos.

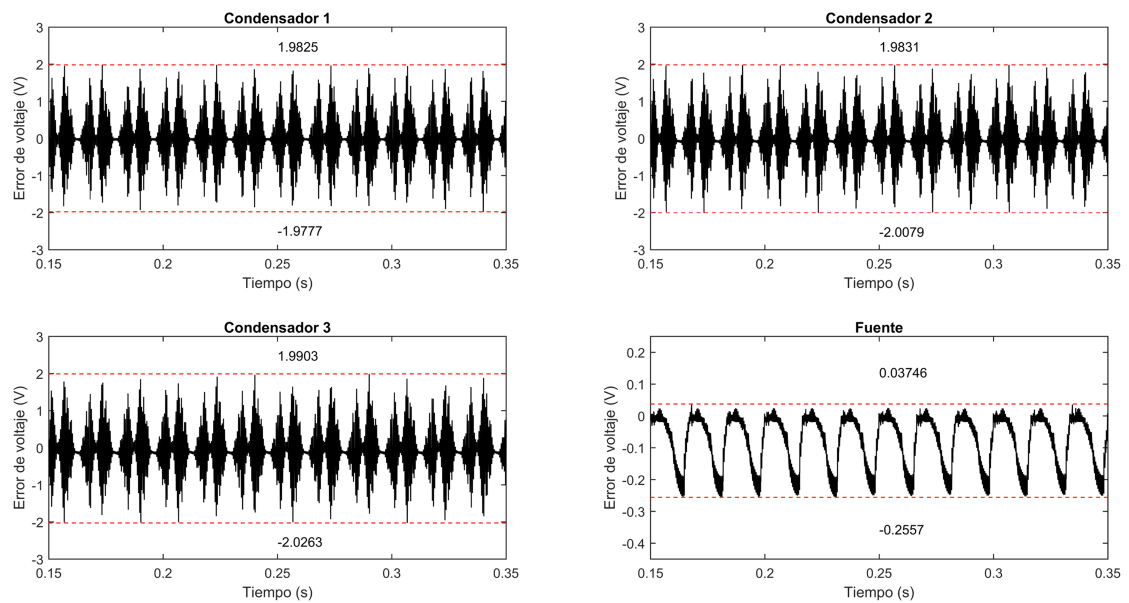


Figura 4.35: Prueba 8: Error en las estimaciones. SESD, CPWM, 5N, CI.

Error RMS en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Fuente de DC
0.3074 V	0.3104 V	0.3105 V	0.1146 V

Tabla 4.22: Prueba 8: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CPWM, 5N, CI.

Error instantáneo máximo en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Fuente de DC
1.9825 V	2.0079 V	2.0263 V	0.2557 V

Tabla 4.23: Prueba 8: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD, CPWM, 5N, CI.

4.2.1.2 PRUEBA NO. 9: SEGUNDA PROPUESTA SESD, ESTIMACIÓN DE VALORES PROMEDIO CON MODULACIÓN PWM, CONDICIONES IDEALES

En esta prueba se hará una modificación al esquema de estimación, de tal manera que se estime solo los valores promedio de las tensiones – cuando el convertidor se controla con una modulación PWM, el balance de las tensiones de los condensadores se puede implementar solo conociendo el valor promedio de estas.

Así, al no requerir estimar las evoluciones de las tensiones entre conmutaciones, no se requiere, por tanto, conocer la corriente de salida ni la duración de cada estado de conmutación, solo se requiere conocer la tensión de salida y el estado de conmutación. Esto reducirá la complejidad de la implementación y lo podremos probar experimentalmente con los recursos disponibles en el laboratorio. Partiendo de la idea anterior, se puede omitir el paso donde se actualizan / ajustan los valores de las tensiones pasadas (Paso 1) del esquema de estimación.

El diagrama a bloques para esta implementación se muestra en la Fig. 4.36, y el diagrama de flujo modificado en la Fig. 4.37. El programa y código de MATLAB / simulink se encuentra en el Apéndice A, sección A.4. Los parámetros del sistema se definen en la Tabla 4.20. La corriente de salida de referencia, $i^*(t)$, es la misma que en las pruebas anteriores, $i^*(t) = 4 + 3.5 \cdot \sin(377 \cdot t) A$. Adicionalmente, las tensiones nominales de operación de los condensadores flotantes para un FCMC de 5 niveles se presentan en la Tabla 4.2. Como se puede apreciar en el diagrama a bloques y el diagrama de flujo (Fig. 4.36 y Fig. 4.37) se ha omitido la medición de la corriente de salida, así como la medición de los tiempos de duración de los estados de conmutación.

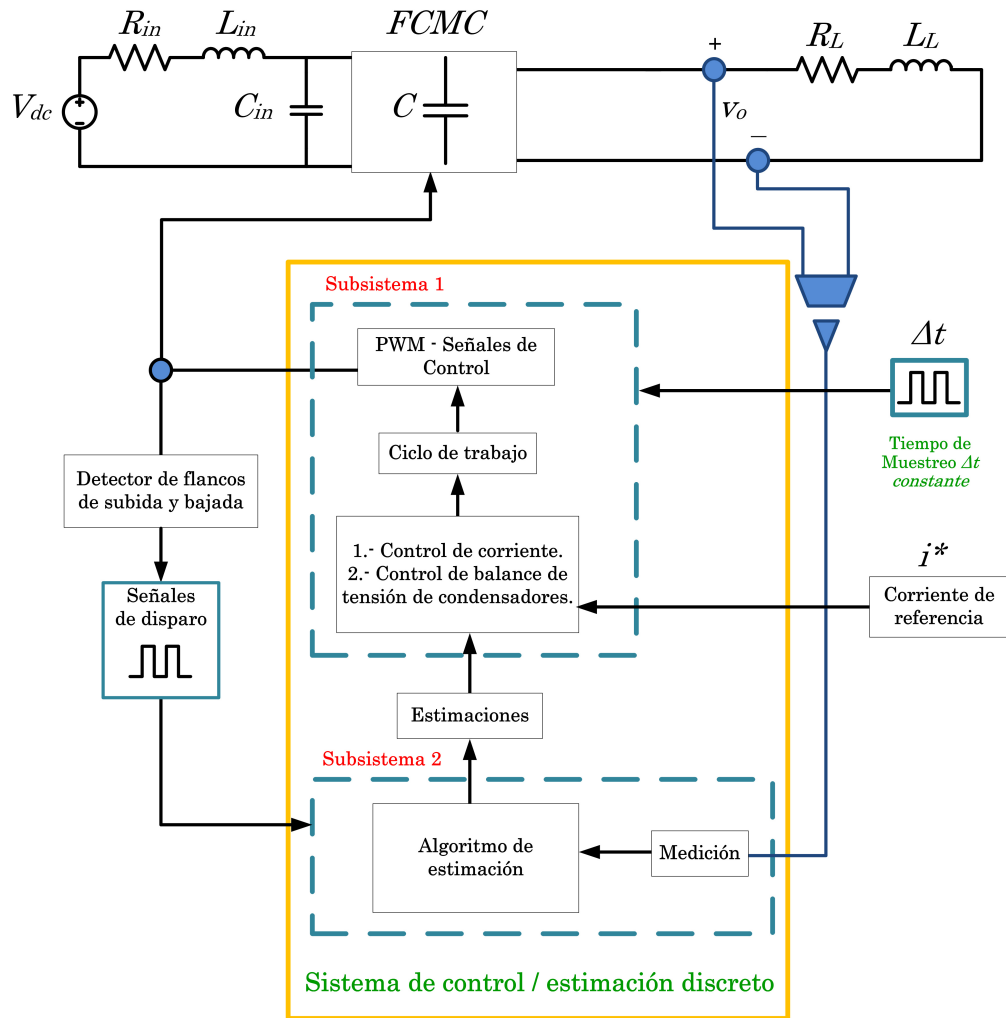


Figura 4.36: Sistema de prueba - control PWM del convertidor, para estimación de valores promedio.

A continuación se presentan los resultados obtenidos. En primer lugar, en la Fig. 4.38 se muestran las tensiones medidas y estimadas; como se observa en los recuadros de acercamiento, la simplificación hecha al esquema de estimación solo ofrece un valor promedio del valor de la tensión real. Sin embargo, a pesar de que la estimación ya no ofrece un valor instantáneo, se observa que todos los condensadores se regulan a su tensión nominal, con esto se corrobora que el esquema de balance de tensión de los condensadores funciona de manera correcta. El error correspondiente se muestra en la Fig. 4.39, y en la Tablas 4.25 - 4.24 se muestran los errores máximos

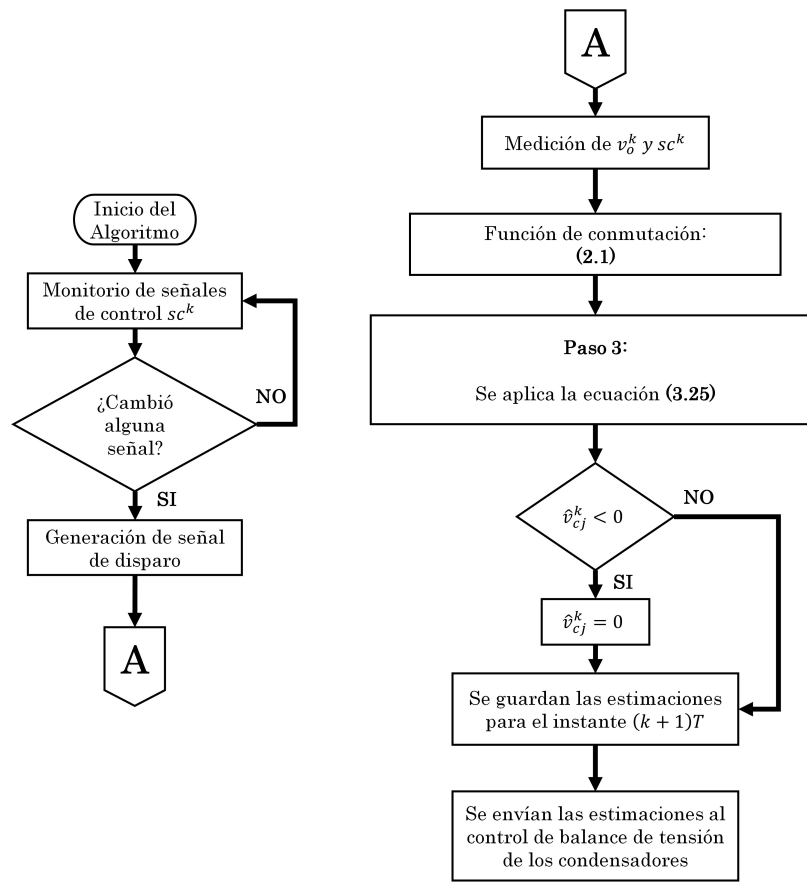


Figura 4.37: Diagrama de flujo para estimar los los valores promedio de las tensiones de los condensadores con un control PWM.

y RMS; una vez que se alcanza el estado estable el error RMS máximo es alrededor de 0.6 V y el máximo error instantáneo es de alrededor 2.3 V. En comparación con la prueba anterior, donde se tiene una estimación del valor instantáneo, el error RMS aumentó al doble. A pesar de ello, como ya se mencionó, este tipo de control puede funcionar solo con la estimación del valor promedio.

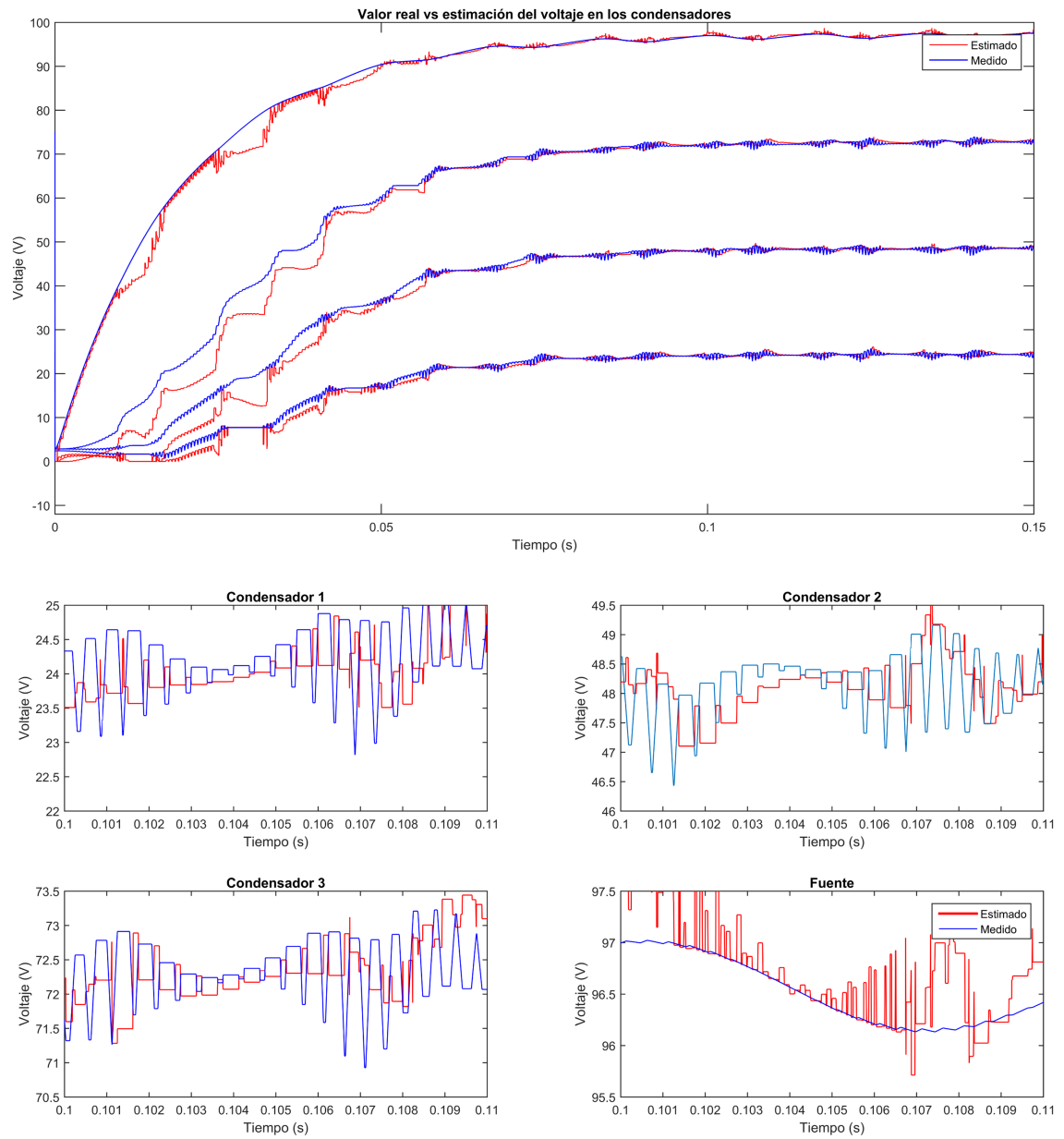


Figura 4.38: Prueba 9: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, CI.

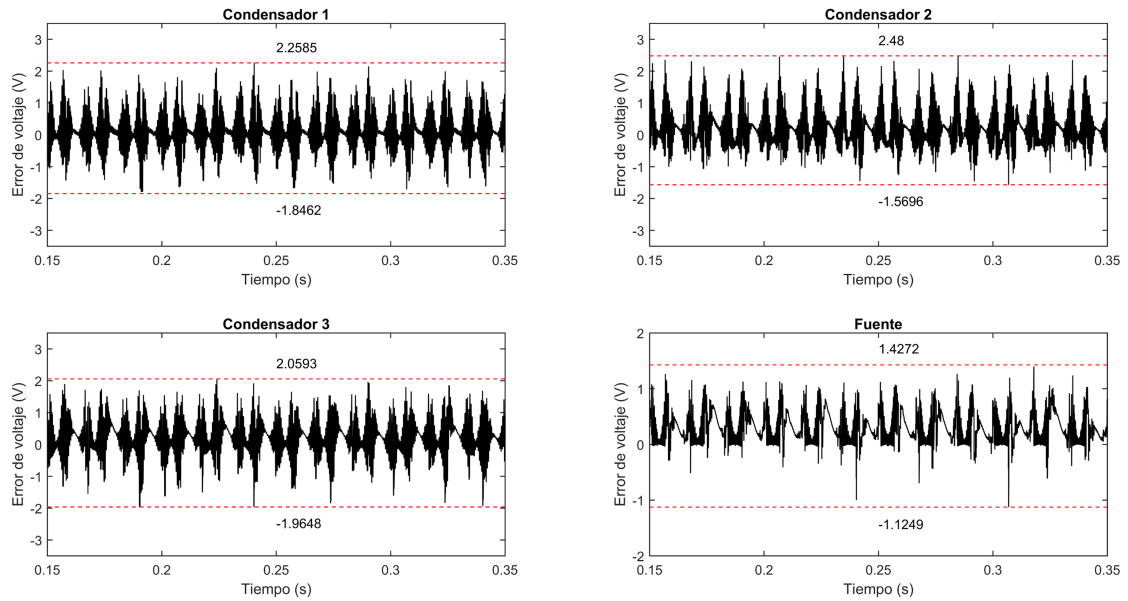


Figura 4.39: Prueba 9: Error en las estimaciones. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, CI.

Error RMS en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Fuente de DC
0.5960 V	0.5255 V	0.5812 V	0.3582 V

Tabla 4.24: Prueba 9: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, CI.

Error instantáneo máximo en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Fuente de DC
2.2585 V	2.4800 V	2.0593 V	1.4272 V

Tabla 4.25: Prueba 9: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, CI.

Finalmente, en la Fig. 4.40 se muestra la tensión y la corriente de salida del convertidor. Como se puede observar, la corriente de salida corresponde bien a la

referencia dada, notando un pequeño defasamiento que se origina por el retardo inducido por el modulador PWM; este efecto no fue tomado en cuenta en el esquema de control de la corriente por no interesar al objetivo principal de este trabajo. En lo referente a la tensión de salida, se aprecia que está definida por niveles discretos de tensión de igual magnitud, tal y como se define en (2.2). Esto último, corrobora la hipótesis de que el balance de tensiones se está realizando de manera correcta, a partir de los valores promedios estimados.

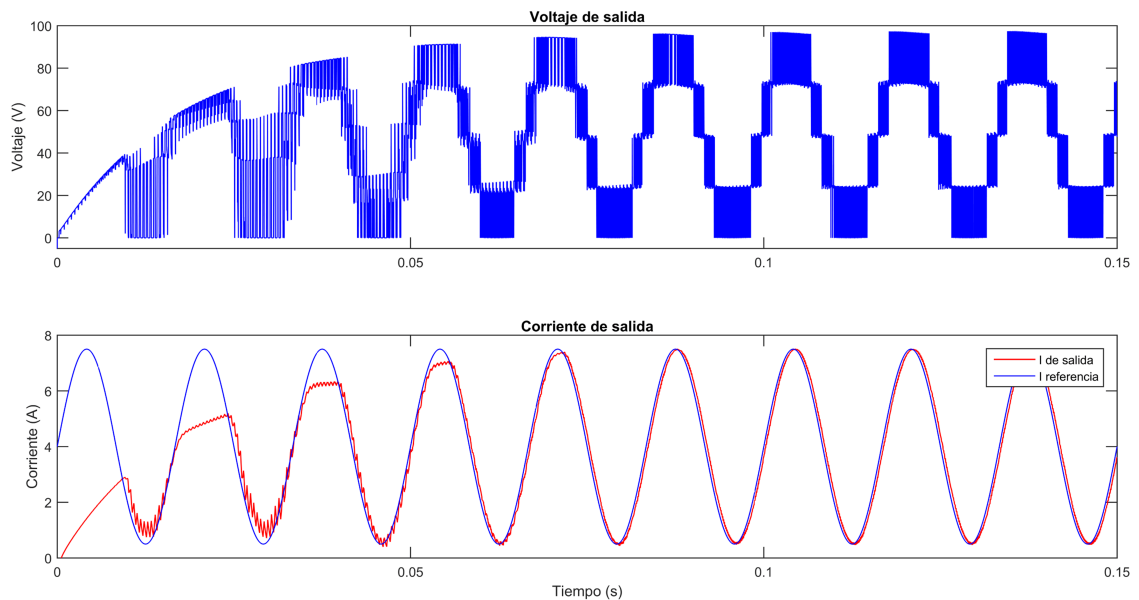


Figura 4.40: Prueba 9: Tensión y corriente de salida. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, CI.

Con esto se puede concluir que cuando el convertidor es controlado a través de un modulador de tipo PWM, las tensiones de los condensadores se pueden controlar a partir de una estimación de sus valores promedio. Además, y mas importante para el objeto de este trabajo, se comprueba que el estimador se puede adaptar y simplificar para estimar solo el valor promedio de las tensiones de los condensadores. Esto último lo hace mas simple y adaptable a situaciones operativas diversas del convertidor.

4.2.1.3 PRUEBA NO. 10: SEGUNDA PROPUESTA SESD, ESTIMACIÓN DE VALORES PROMEDIO CON MODULACIÓN PWM, CONSIDERANDO INCERTIDUMBRE PARAMÉTRICA Y RUIDO EN LAS MEDICIONES DE TENSIÓN Y CORRIENTE DE SALIDA

Con el fin de estudiar si la modificación hecha al esquema de estimación puede funcionar en condiciones reales, se hace una última prueba en simulación. Para ello, se incorpora incertidumbre paramétrica a los valores de capacitancia de los condensadores flotantes de $\pm 10\%$: $C_1 = 0.94 \cdot C_{nom}$, $C_2 = 1.05 \cdot C_{nom}$, $C_3 = 0.90 \cdot C_{nom}$, $C_4 = 1.10 \cdot C_{nom}$, $C_5 = 0.93 \cdot C_{nom}$, $C_6 = 0.98 \cdot C_{nom}$ y $C_7 = 1.08 \cdot C_{nom}$, donde $C_{nom} = 390 \mu F$, y ruido blanco de ± 1 V y ± 1 A en las mediciones de tensión y corriente. El diagrama de bloques se muestra en la Fig. 4.36, y el diagrama de flujo en la Fig. 4.37. El programa y diagrama de MATLAB / simulink se encuentra en el Apéndice A, sección A.4. Los parámetros del sistema se definen en la Tabla 4.20. La corriente de salida de referencia, $i^*(t)$, es la misma que en la prueba anterior, $i^*(t) = 4 + 3.5 \cdot \sin(377 \cdot t)$ A; las tensiones nominales de operación de los condensadores flotantes para un FCMC de 5 niveles se presentan en la Tabla 4.2.

A continuación se muestran los resultados obtenidos. En primer lugar, la Fig. 4.41 muestra las tensiones de los condensadores tanto medidas como estimadas; como se puede observar en los recuadros de acercamiento, se pueden percibir las afectaciones de haber incluido ruido en las mediciones e incertidumbre paramétrica, en comparación con la prueba anterior, se observa una mayor distancia entre el valor promedio y el valor real. En la Fig. 4.42 y Tabla 4.26 se muestra el error máximo de estimación y RMS respectivamente; una vez que se alcanza el estado estable el error RMS máximo es de 0.65 V. Recordar que en este caso, el método de control de las tensiones de los condensadores requiere conocer el valor promedio de las tensiones. Adicionalmente, la Tabla 4.27 muestra los errores máximos de estimación; una vez que se alcanza el estado estable es de 2.6 V.

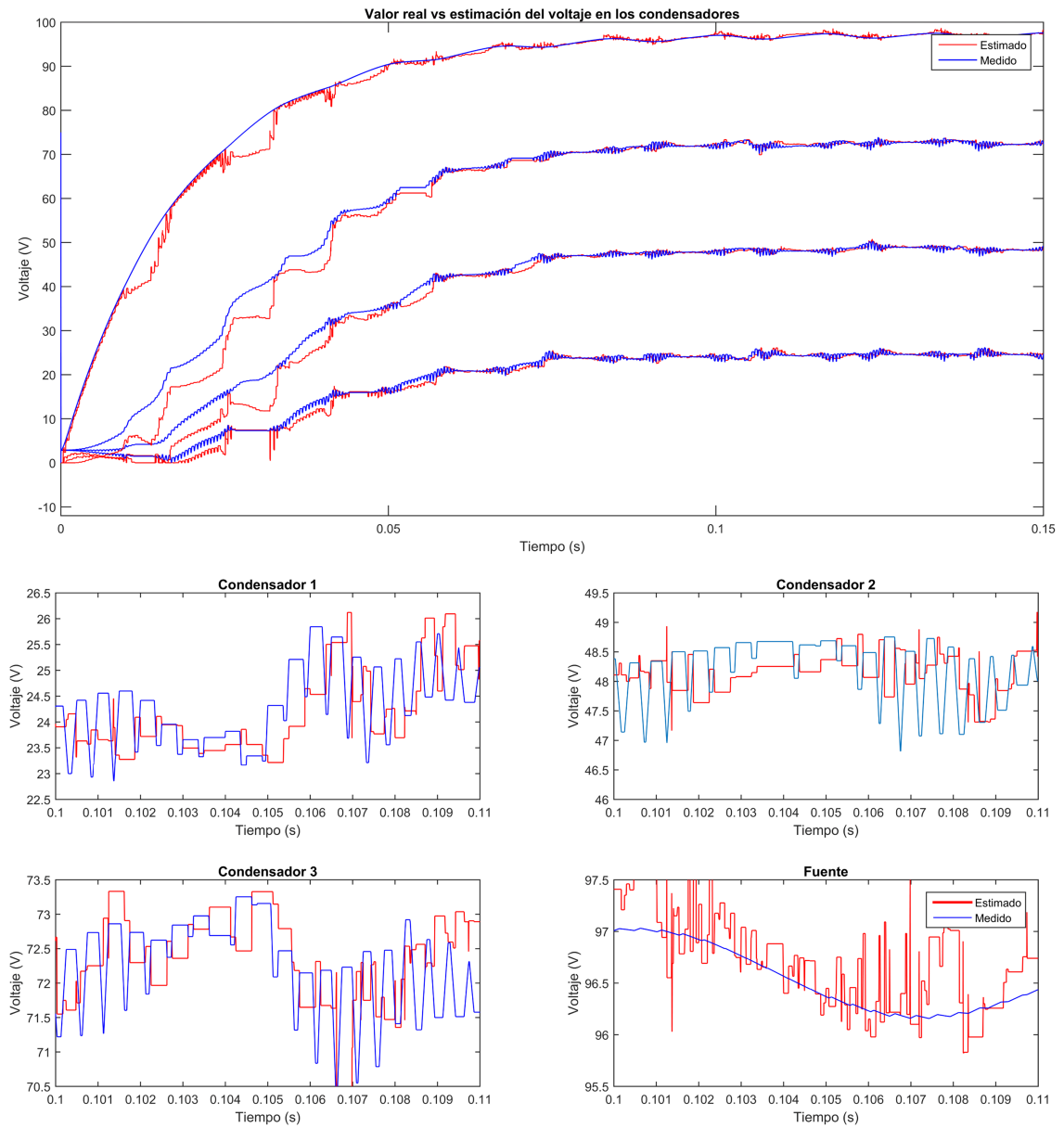


Figura 4.41: Prueba 10: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, IP, RMTCS.

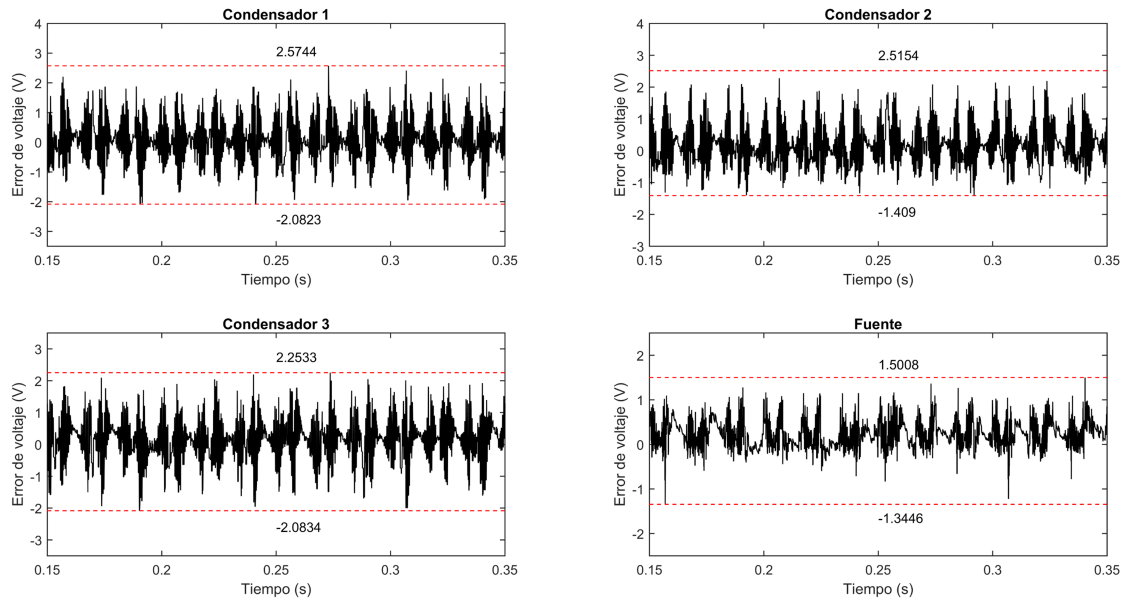


Figura 4.42: Prueba 10: Error en las estimaciones. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, IP, RMTCS.

Error RMS en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Fuente de DC
0.6541 V	0.5330 V	0.6231 V	0.3586 V

Tabla 4.26: Prueba 10: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, IP, RMTCS.

Error instantáneo máximo en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Fuente de DC
2.5744 V	2.5154 V	2.2533 V	1.5008 V

Tabla 4.27: Prueba 10: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, IP, RMTCS.

Finalmente, en la Fig. 4.43 se presenta la tensión y corriente de salida del convertidor. Como se puede observar, la corriente de salida corresponde bien a la

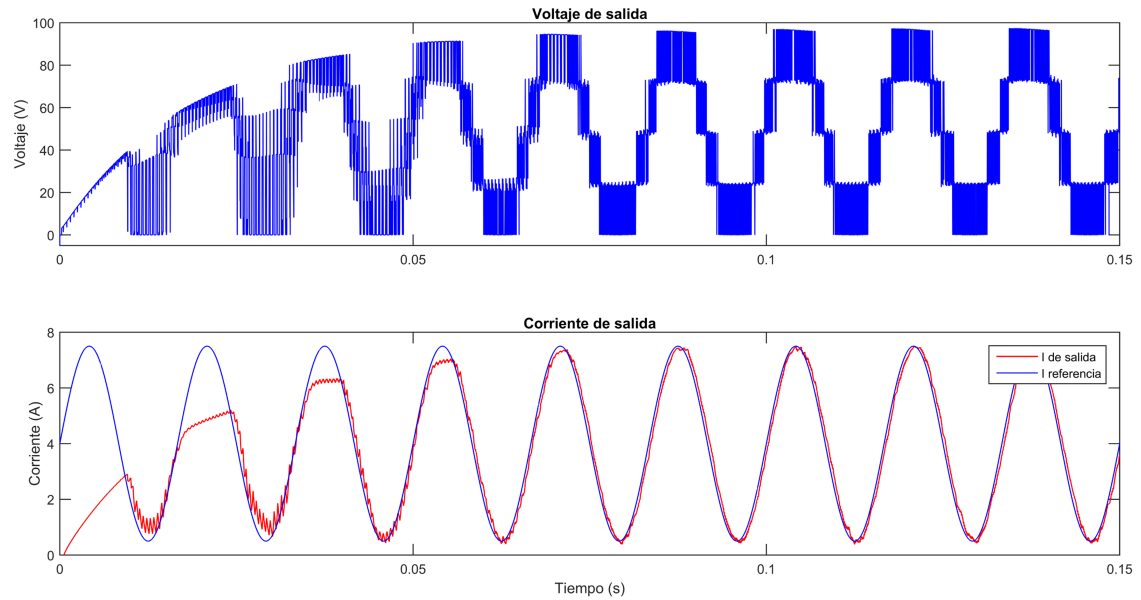


Figura 4.43: Prueba 10: Tensión y corriente de salida. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, IP, RMTCS.

referencia dada, mientras que la tensión de salida esta definida por niveles discretos de tensión, tal y como se define en (2.2). A simple vista, no se logran apreciar afectaciones a la tensión y corriente de salida dada la modificación hecha al esquema de estimación y la inclusión del ruido en las mediciones y la incertidumbre paramétrica de los condensadores. Este resultado muestra que tanto el sistema de control como el de estimación están funcionando de manera correcta; recordar que la definición de los niveles discretos de tensión, están directamente relacionados con las tensiones de los condensadores flotantes. Si las tensiones están balanceadas tal como lo define (2.6), entonces los niveles discretos de la tensión de salida corresponderán a niveles de igual magnitud, tal como se observa en la Fig. 4.43. Por lo tanto, las estimaciones utilizadas para el control de las tensiones de los condensadores deben tener un error relativamente pequeño, porque en caso contrario, el control de las tensiones no funcionaría de manera correcta.

4.2.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES - CONTROL PWM

En esta sección se presentan los resultados experimentales correspondientes a la estimación de valores promedio en conjunto con una modulación de tipo PWM. Las pruebas se realizan en un prototipo de laboratorio de 5 niveles.

4.2.2.1 PRUEBA NO. 11: SEGUNDA PROPUESTA SESD, ESTIMACIÓN DE VALORES PROMEDIO CON MODULACIÓN PWM - PRUEBAS EXPERIMENTALES

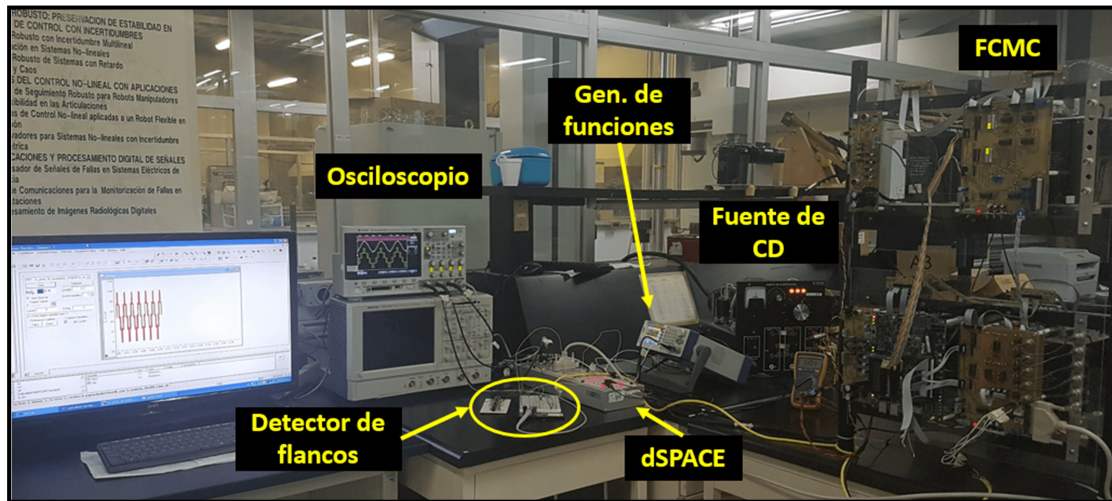


Figura 4.44: Prototipo de laboratorio, FCMC de 5 niveles usando una modulación PWM.

Esta prueba se realiza con un prototipo de laboratorio de 5 niveles, cuya fotografía se muestra en la Fig. 4.44. Adicionalmente al sistema de base, se diseñó un detector de flancos para sincronizar el proceso de estimación con los cambios en los estados de conmutación. La Fig. 4.45 muestra una fotografía del circuito detector de flancos y una imagen de osciloscopio que muestra una señal de control, sc , y los pulsos de disparo que se generan a partir de esta señal, correspondiendo a la idea presentada en la Fig. 3.6. El sistema se compone de 4 circuitos monoestables (SN74LS221N); cada uno monitorea la subida y bajada de cada una de las cua-

tro señales de control. En total se tienen 8 señales de disparo que se introducen a compuertas *OR* para tener una señal única de disparo. Posteriormente, la señal de disparo se procesa en un generador de funciones para añadirle un retardo de tiempo, con el fin de esperar a que se produzca el cambio de nivel en la tensión de salida (aplicado por el nuevo estado de conmutación) y realizar una medición correcta, la señal resultante se conecta a una entrada de interrupción del sistema dSPACE para que inicie la ejecución del esquema de estimación cada vez que llegue un nuevo pulso (subsistema 2 de la Fig. 4.36). El esquemático del circuito de detector de flancos se muestra en la Fig. 4.46.

El diagrama de flujo del programa implementado se muestra en la Fig. 4.37 y el programa y esquema de MATLAB / simulink se dan en el Apéndice A, sección A.4. Los parámetros del sistema se definen en la Tabla 4.20. Para las pruebas, la corriente de salida de referencia, $i^*(t)$, corresponde a una senoide con una componente de DC, $i^*(t) = 4 + 2.5 \cdot \sin(377 \cdot t) A$. Adicionalmente, las tensiones nominales de operación de los condensadores flotantes para un FCMC de 5 niveles se presentan en la Tabla 4.2.

También, cabe señalar que en comparación con un control directo, resulta mas difícil crear el sistema de control para una modulación PWM ya que se necesitan generar las señales portadoras lo que requiere gran esfuerzo computacional.

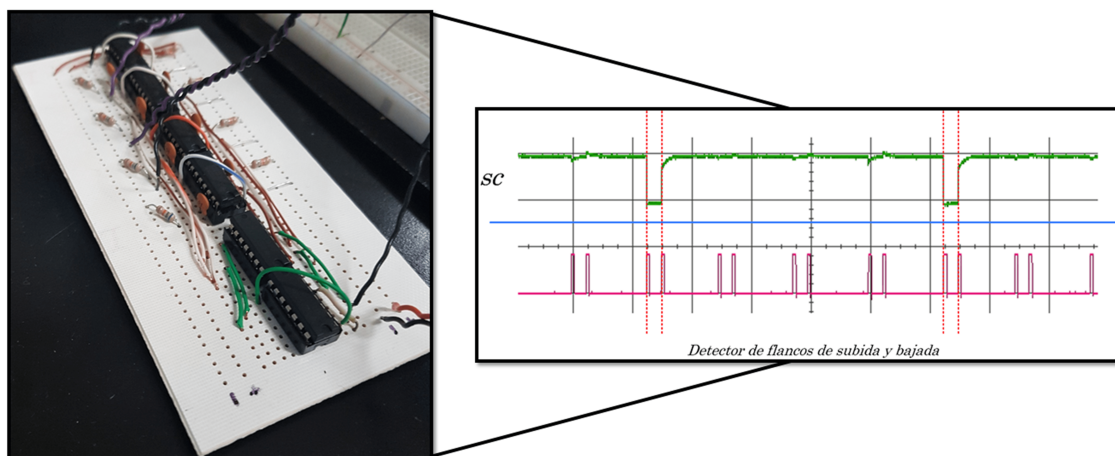


Figura 4.45: Detector de flancos de subida y bajada, en las señales de control.

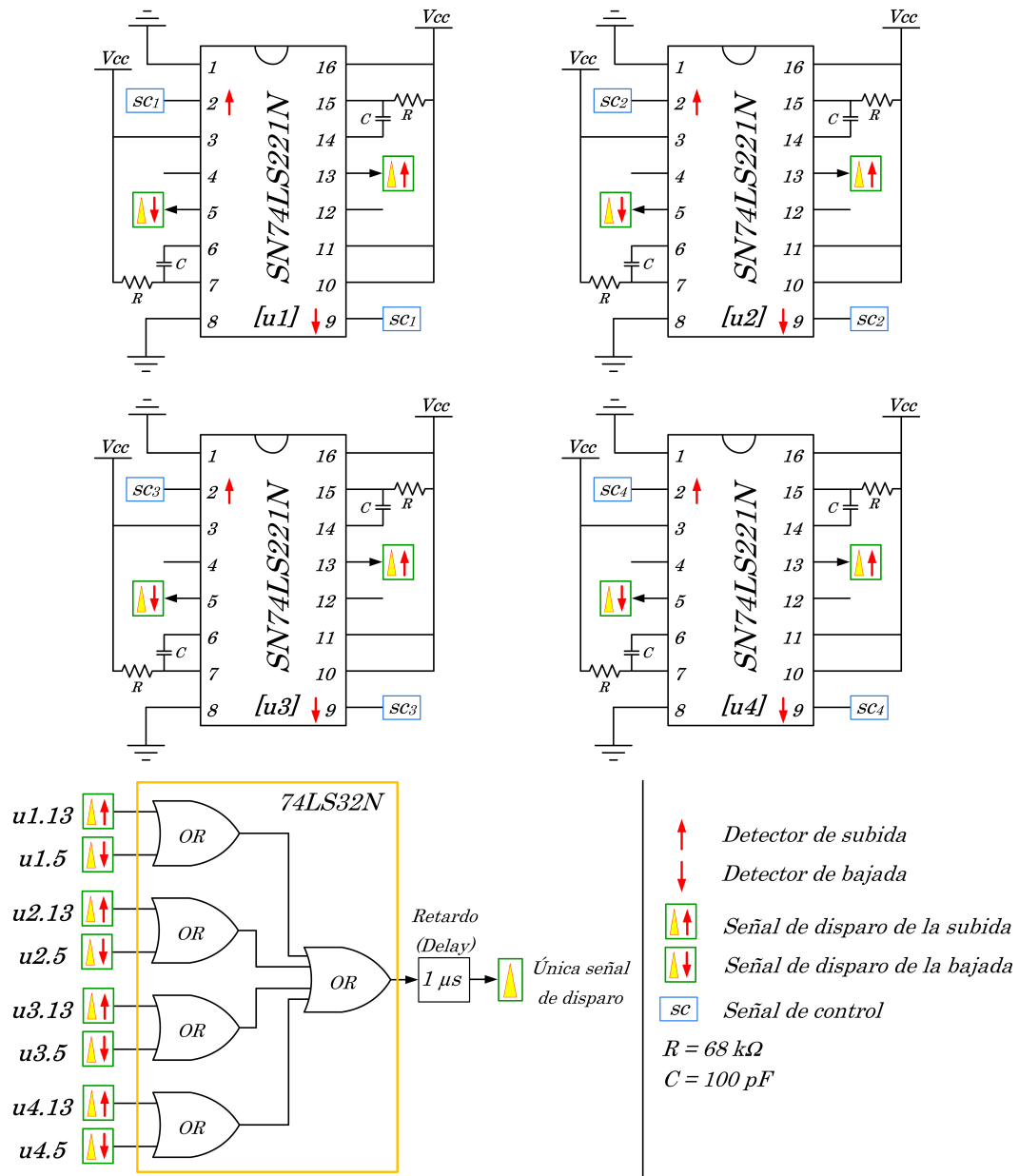


Figura 4.46: Esquemático del circuito de detector de flancos para un FCMC de 5 niveles.

A continuación se presentan los resultados obtenidos. En la Fig. 4.47 se presenta la tensión y corriente de salida del convertidor. La corriente de salida corresponde a la referencia dada, mientras que la tensión de salida esta definida por niveles discretos de tensión, tal y como se define en (2.2). Como ya se ha mencionado, la corriente está defasada con respecto a la referencia debido al retraso introducido por el modulador

PWM. Sin embargo, como las tensiones están bien definidas por niveles discretos de tensión, se puede adelantar que la estimación de las tensiones es correcta, dado que es usada para el balance de las tensiones; si la estimación no fuera correcta, el balance no se podría llevar a cabo y la tensión de salida presentaría irregularidades en sus diferentes niveles.

El desempeño del esquema de estimación se puede juzgar a partir de la Fig. 4.48, donde se muestran las tensiones de los condensadores tanto medidas como estimadas; como se observa, existen fluctuaciones en las estimaciones lo cual podría atribuirse a la simplificación del esquema de estimación y a los elementos parásitos (pérdidas en semiconductores, cableado, entre otras) no tomadas en cuenta en el modelo del convertidor usado para el esquema de estimación. Sin embargo, como lo muestra la gráfica de las tensiones medidas, estas están balanceadas, por lo que se concluye que los valores estimados son suficientemente buenos como para ser usados para el control de las tensiones de los condensadores.

En la Fig. 4.49 y Tabla 4.28 se muestra el error máximo de estimación y el valor RMS del error, respectivamente; una vez que se alcanza el estado estable, el error RMS máximo es de 3.65 V. Adicionalmente, la Tabla 4.29 muestra los errores de estimación; una vez que se alcanza el estado estable el error máximo es de 9 V. También, en la Fig. 4.50 se muestra un acercamiento a la tensión de salida del convertidor, se observa claramente que los niveles de tensión, ofrecidos por los condensadores flotantes, están bien definidos. Este resultado corrobora que el esquema de estimación esta funcionando de manera correcta y por lo tanto, el control de balance de tensión regula los condensadores a su valor nominal de operación.

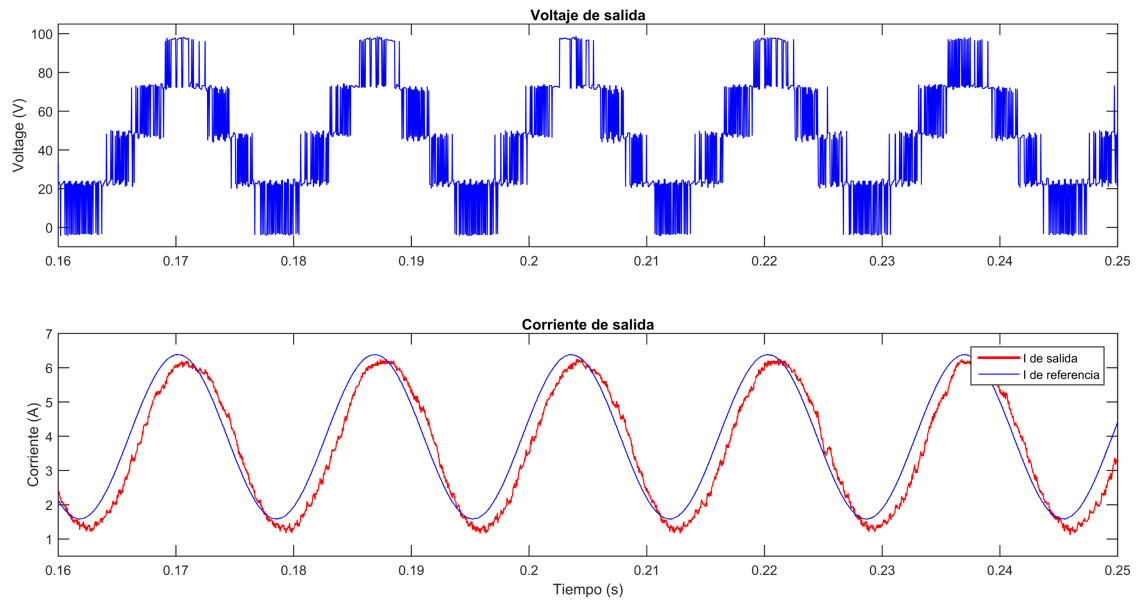


Figura 4.47: Prueba 11: Tensión y corriente de salida. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.

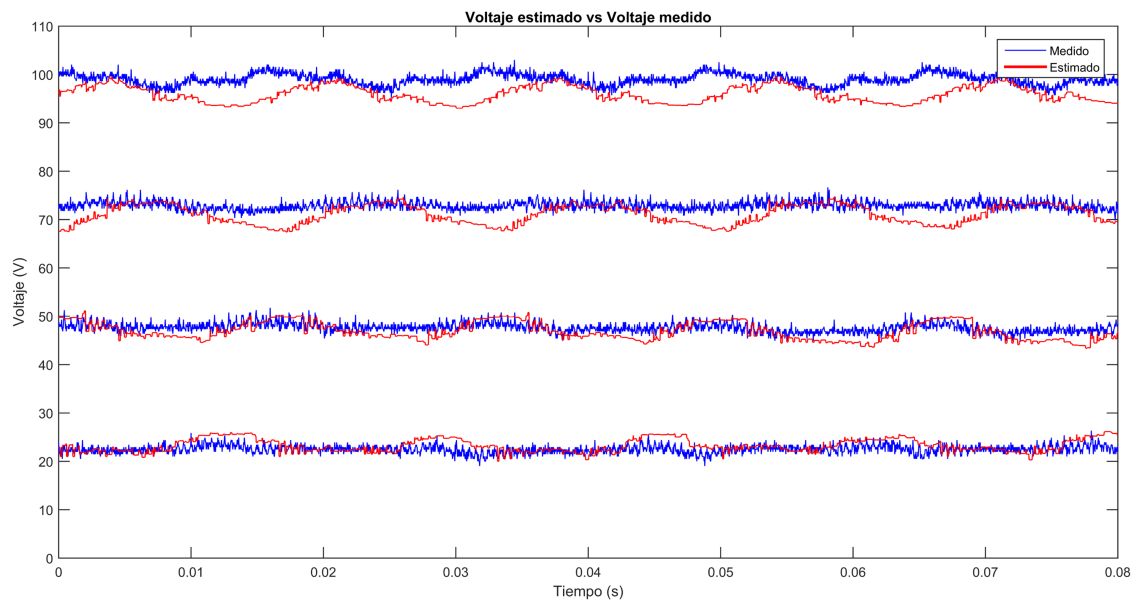


Figura 4.48: Prueba 11: Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.

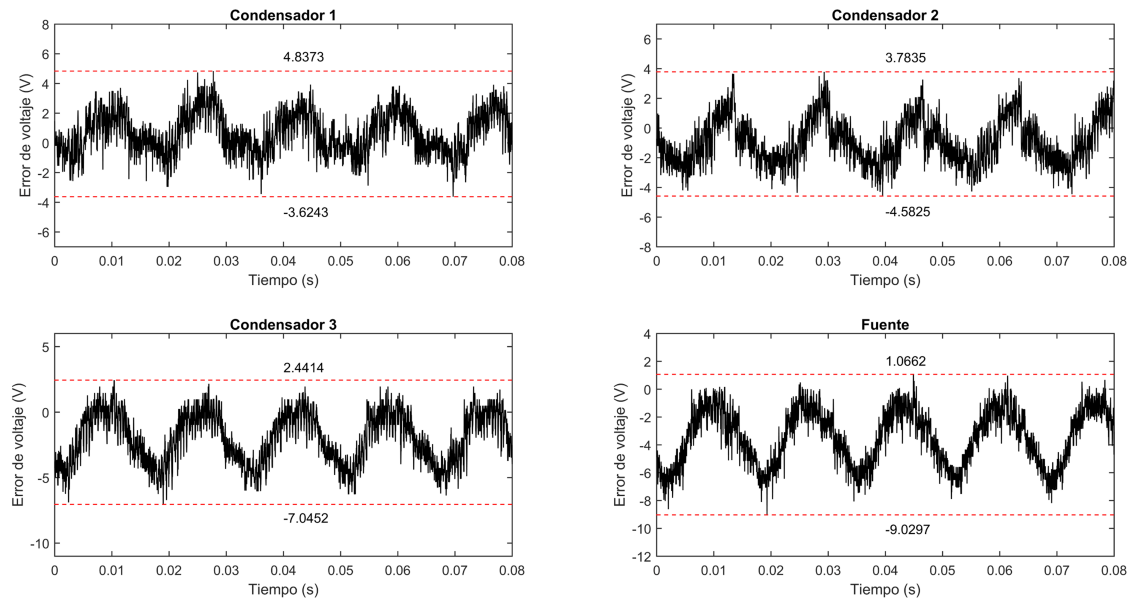


Figura 4.49: Prueba 11: Error en las estimaciones. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.

Error RMS en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Fuente de DC
1.6324 V	1.6719 V	2.6326 V	3.6509 V

Tabla 4.28: Prueba 11: Error RMS en estado estable entre medición y valor estimado. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.

Error instantáneo máximo en estado estable			
Condensador 1	Condensador 2	Condensador 3	Fuente de DC
4.8373 V	4.5825 V	7.0452 V	9.0297 V

Tabla 4.29: Prueba 11: Error instantáneo máximo en estado estable entre medición y valor estimado. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.

Ahora se presentan pruebas adicionales que permitirán evaluar el desempeño del esquema de estimación ante condiciones transitorias. En la Fig. 4.51 se mues-

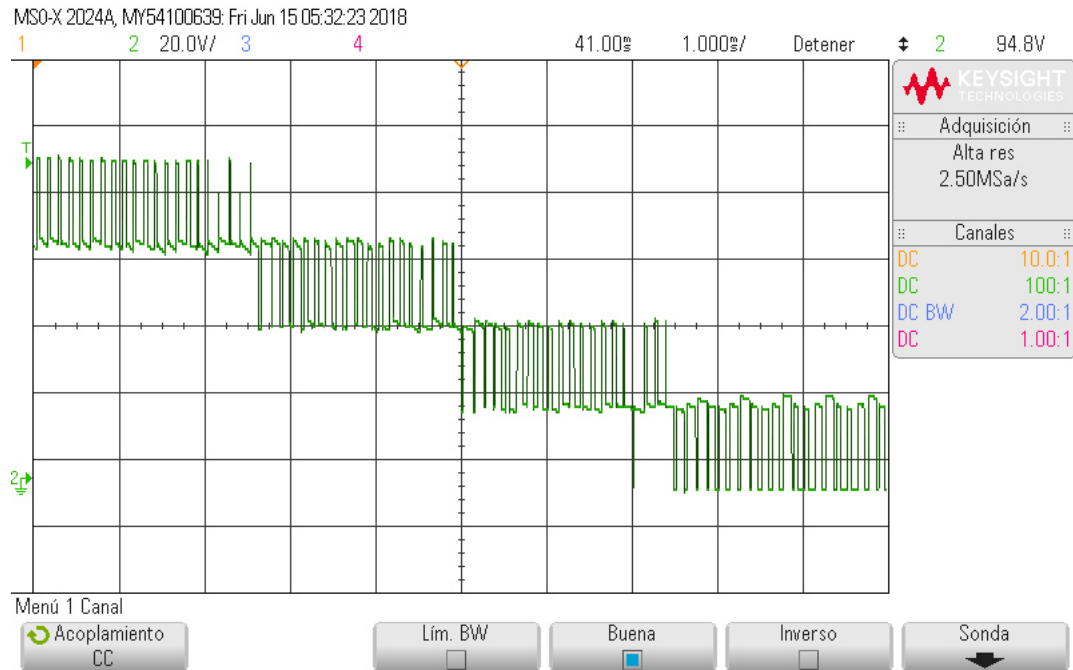


Figura 4.50: Prueba 11: Acercamiento a los niveles de la tensión de salida. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.

tra un transitorio de arranque donde la tensión de entrada pasa de 0 V a 100 V. Se observa que la tensión de salida, a lo largo de todo el transitorio, mantiene una forma de onda multinivel, lo que corrobora que ante esta condición el esquema de estimación funciona de manera correcta y ofrece estimaciones precisas para el control de balance de tensión. Finalmente, en la Fig. 4.52 se muestra un transitorio en la tensión de entrada que pasa de 100 V a 150 V, aproximadamente. Se observa que las tensiones de los condensadores evolucionan de manera correcta, todos los condensadores mantiene la misma proporción en la tensión de operación. Así mismo, los niveles de tensión de la tensión de salida durante todo el transitorio están claramente definidos. Se puede concluir entonces, que bajo condiciones transitorias el esquema de estimación funciona correctamente, dado que se mantienen balanceadas las tensiones de los condensadores - el balance depende de la estimaciones.

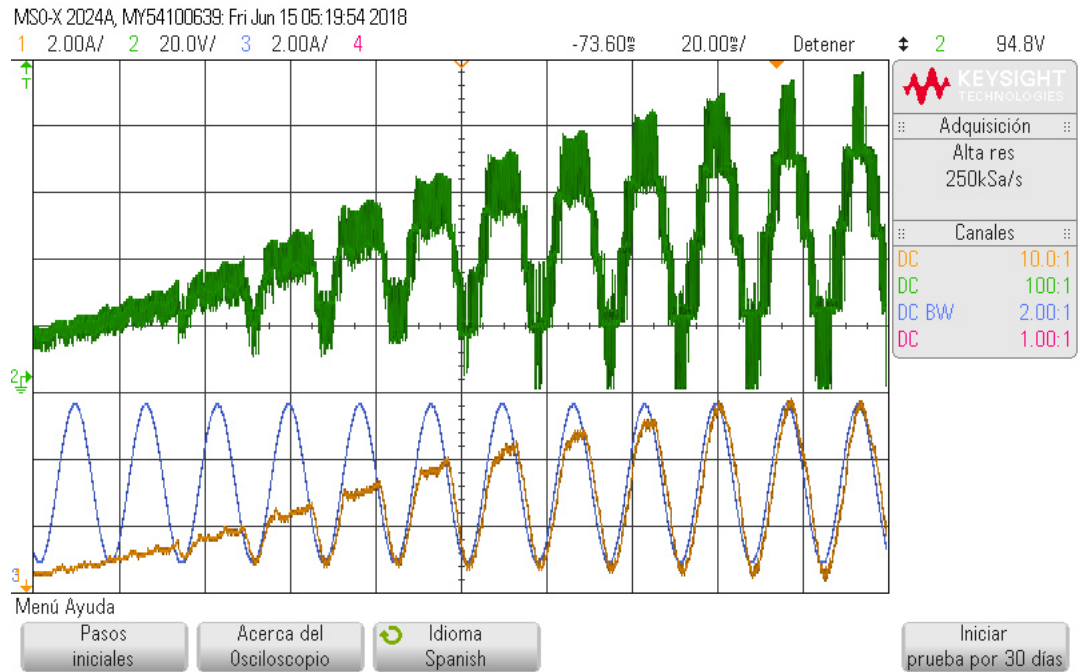


Figura 4.51: Prueba 11: Transitorio de encendido, variación de la fuente de DC de 0 V a 100 V. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.

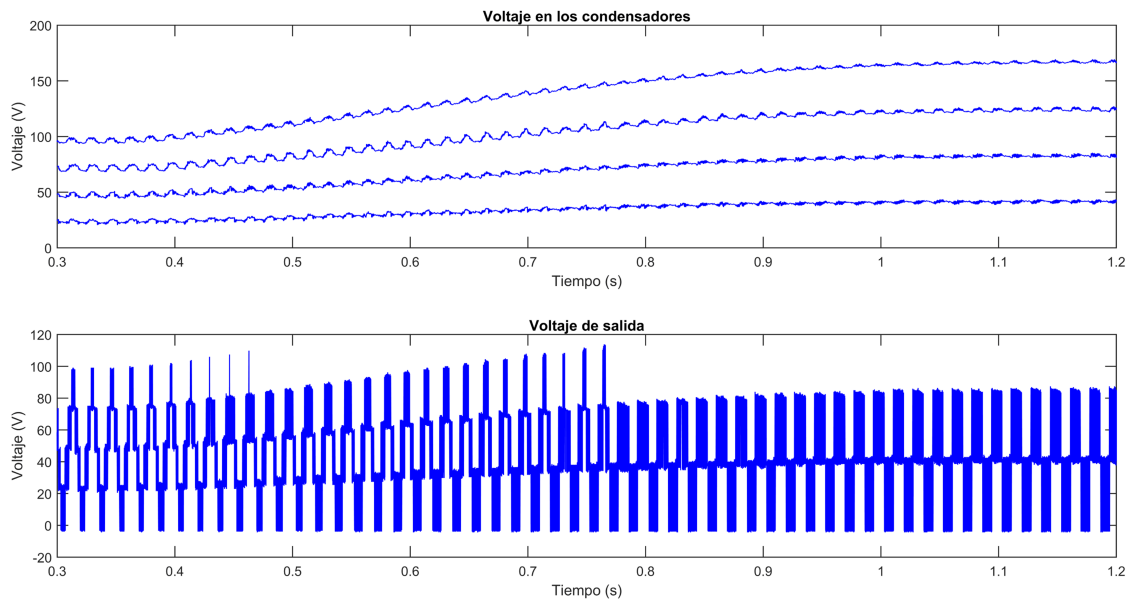


Figura 4.52: Prueba 11: Transitorio durante operación, variación de la fuente de DC de 100 V a 150 V. SESD - valores promedio, CPWM, 5N, prueba experimental.

4.3 SINGULARIDADES DEL ESQUEMA DE ESTIMACIÓN PROPUESTO

En esta sección se exponen algunas condiciones operativas bajo las cuales el algoritmo de estimación pudiera tener dificultades para realizar correctamente las estimaciones. Principalmente, estas condiciones se presentan cuando la secuencia de estados no llegan a contener información de las tensiones de todos los condensadores. Esto depende, fundamentalmente, del algoritmo de control usado. Si se asegura que todos los estados serán utilizados, entonces la estimación será realizada de manera correcta. Pero si por alguna razón se llega a presentar una secuencia de estados en donde alguno de los condensadores no participe pues no será posible estimar su tensión. Además, cuando la secuencia de estados corresponde a un solo nivel, se pudieran presentar tiempos grandes de convergencia. En este trabajo no se presentan las soluciones a estos problemas debido a la falta de tiempo. Pero se decidió crear esta sección como un preámbulo general para ofrecer al lector información de utilidad y que en trabajos futuros puedan ser resueltos.

Particularmente, se encontró un error que se definió como *error de convergencia*, tanto para un control directo como para una modulación PWM. A continuación se presenta una descripción más detallada así como pruebas en simulación que evidencian este problema utilizando un FCMC de 5 niveles.

4.3.1 CONTROL DIRECTO

La velocidad de convergencia del control de balance de tensión de los condensadores depende de (2.5) y más específicamente de la corriente de salida i_o , es decir, la velocidad con la que los condensadores llegarán a su tensión de operación depende de la cantidad de corriente que el convertidor este manejando.

Para corrientes de referencia pequeñas, el convertidor requeriría aplicar una baja tensión, lo que se traduce en utilizar un nivel de tensión bajo. Tomando como referencia la Tabla 3.1, si el nivel requerido por la corriente de referencia es 1, el control del convertidor únicamente utilizaría estados para el nivel 1, que en este caso son 4 estados redundantes, pero la corriente sería muy pequeña por lo que los condensadores tardarían mas tiempo en balancearse. La Fig. 4.53 muestra la tensión y corriente de salida bajo esta condición, se observa que las señales alcanzan su estado estable a los 0.15 s (línea verde).

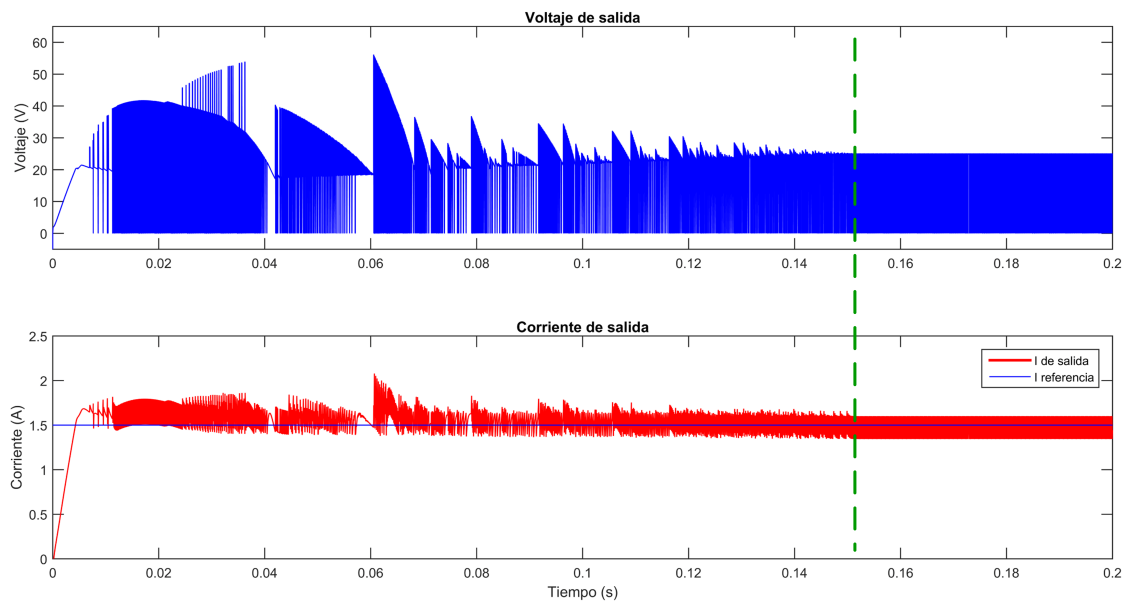


Figura 4.53: Error de convergencia en un control directo. Tensión y corriente de salida.

Por su lado en la Fig. 4.54 se muestran las tensiones en los condensadores donde a simple vista se puede observar algo interesante. Al requerir del nivel de tensión 1, se cuenta con la posibilidad de obtener el estado de conmutación 1, que es precisamente la medición directa del condensador 1 - en la imagen se realizan estos casos con un círculo verde. Son numerosas las ocasiones en las que se presenta ese estado de conmutación.

Se aprecia claramente que una vez que el estado 1 se presenta, durante un lapso

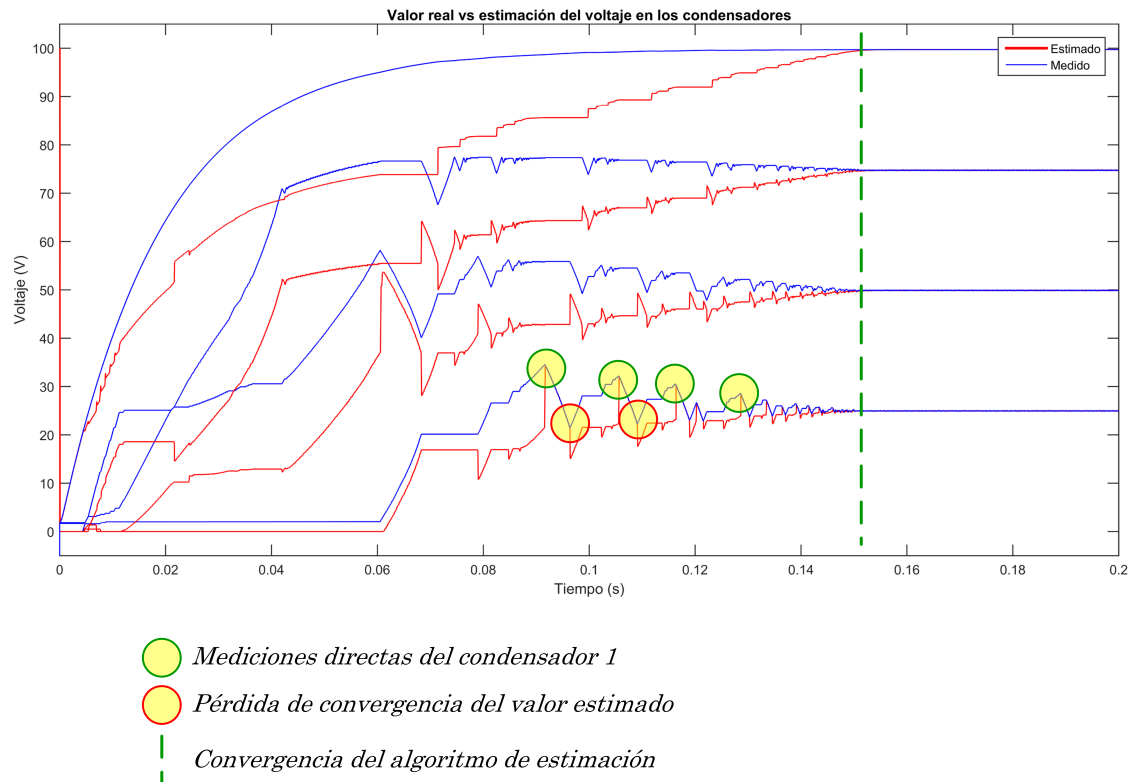


Figura 4.54: Error de convergencia en un control directo. Valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores.

de tiempo la estimación del condensador permanece correcta (ya que el estado de conmutación aplicado sigue siendo el 1), sin embargo la estimación se pierde (círculo rojo), y el proceso se repite en varias ocasiones, hasta que el valor estimado converge al valor medido.

Este error es debido a que se ha presentado un estado de conmutación que involucra a más de un condensador, por lo que la estimación reparte ese error, incluyendo al condensador 1 (cuando ya no debería hacerlo porque su valor estimado ya era correcto). Sin embargo, la ec. (3.25) únicamente utiliza la tensión de salida, sustrae las estimaciones y continua repartiendo el error de forma igualitaria entre los condensadores que participan al presentarse dicho estado de conmutación.

Se concluye entonces que se pudiera añadir al esquema de estimación un factor

que permita saber si se ha presentado una medición directa para que durante cierto tiempo ese condensador no sea tomado en cuenta en la repartición del error, es decir, incluir una ganancia o un *factor de olvido* que ayude a la convergencia de las estimaciones. Sin embargo, este comportamiento será notorio únicamente durante periodos transitorios y especialmente al encendido del convertidor.

Por cuestiones de tiempo, no se realizaron más estudios para encontrar la solución a este problema, además de que implicaría una mayor complejidad que requeriría una mayor cantidad de tiempo computacional, dejando de lado lo atractivo del esquema propuesto en este trabajo.

Sin embargo, esta situación se presentará rara vez, ya que en general se utilizan todos los estados del convertidor, con lo cual se evita caer en esta situación.

4.3.2 MODULACIÓN PWM

Para el caso de la modulación PWM se pueden presentar errores si se presenta un ciclo de trabajo en el cual la secuencia de estados de conmutación limite la participación a solo alguno(s) de los condensadores. En particular, durante las pruebas se observó que para un índice de modulación de 0.5, el algoritmo de estimación puede fallar.

La Fig. 4.55 muestra que las estimaciones de los condensadores 1 y 3 son erróneas; mientras que el condensador 2 y la fuente de DC han convergido de manera correcta. Estudiando los estados de conmutación, Tabla 3.2, se encuentra que para un índice de modulación de 0.5 la secuencia de estados de conmutación que se presentan son 9, 12, 6 y 3. Así, encontrando el rango de las ecuaciones conformadas por esta secuencia de estados se encuentra que es inferior a 4, por lo que se concluye que no hay suficiente información para que las estimaciones sean correctas.

Para estudiar la secuencia de estados, se puede formar una matriz A formada

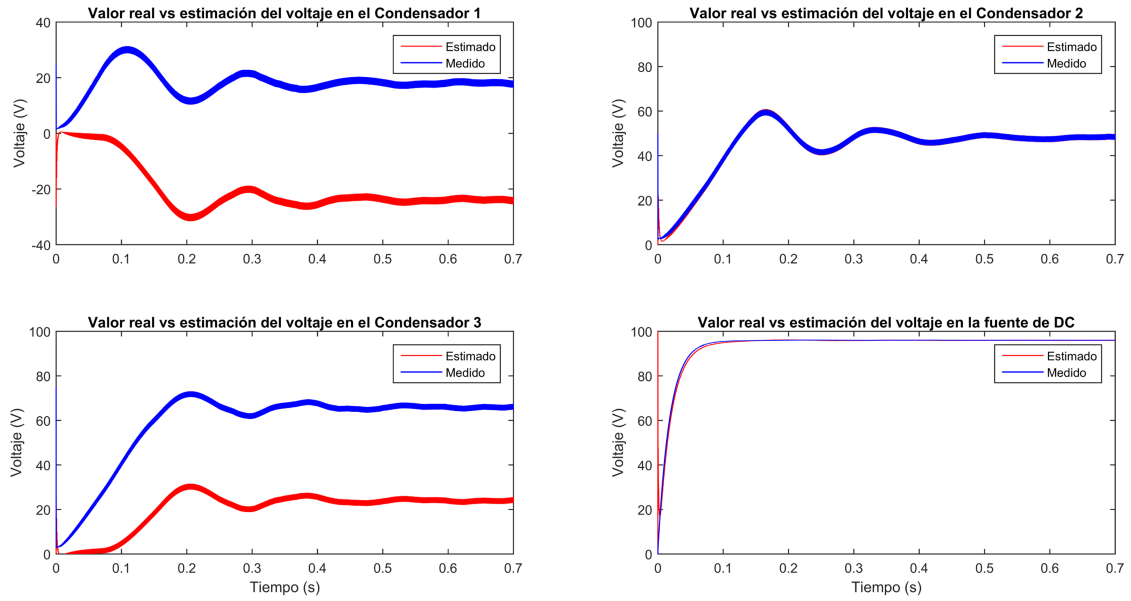


Figura 4.55: Error de convergencia en una modulación PWM, valor real (azul) vs valor estimado (rojo) de la tensión en los condensadores.

por las señales de control que definen los estados, es decir:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \textit{Estado 9} \\ \textit{Estado 12} \\ \textit{Estado 6} \\ \textit{Estado 3} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Y se obtiene el rango de la matriz A:

$$\text{rang}(A) = \text{rang} \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \right) = 3 \quad (4.2)$$

El rango que se obtiene es de 3, cuando debería ser de 4 ya que se tiene un sistema de 4 incógnitas. Se concluye entonces que para que el algoritmo de estimación en una modulación PWM converja de manera correcta, se necesita que la secuencia

de estados complete un sistema de rango completo², y para el caso de un índice de modulación de 0.5 el conjunto de ecuaciones no lo cumple; esta misma condición se repite en el caso de que el índice de modulación sea de 0 o de 1. Por lo tanto, una solución simple sería omitir el uso de estos índices de modulación en el control del sistema.

²Esto mismo es apreciable cuando la secuencia se genera en un control directo del convertidor.

4.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4

En este capítulo se han presentado las diferentes pruebas realizadas al esquema de estimación propuesto. Se hacen pruebas a la primer propuesta dejando en claro que las estimaciones son muy precisas, los errores en estado estable son muy bajos y se puede concluir que teóricamente el esquema está bien fundamentado y resuelve el problema planteado. Sin embargo, como se ha mencionado, el algoritmo es mas complejo, por lo tanto en una implementación real se requeriría de un *hardware* muy rápido lo que implicaría un aumentar el costo y la complejidad del sistema.

Por otra parte, las pruebas realizadas a la segunda propuesta de estimación demuestran ser mejores: las estimaciones son más precisas y se logra reducir el esfuerzo computacional requerido. Todo esto fue corroborado tanto por simulaciones numéricas como por experimentación en un prototipo de laboratorio.

Primeramente, se utiliza un control directo del convertidor y se crean múltiples escenarios para poner a prueba la capacidad de respuesta del esquema de estimación propuesto. Tanto los resultados por simulación como los experimentales confirman el buen desempeño, además de que las pruebas por simulación y experimentales arrijan resultados similares.

Posteriormente, se utiliza un sistema que integra un control de tipo PWM. El desempeño del esquema es igual de preciso, aunque se necesitan incorporar elementos extra que incrementan el costo en cuanto a utilización de recursos en comparación con el control directo. También, para la prueba experimental se requiere llevar a cabo una simplificación que repercute en las estimaciones, sin embargo, continúan siendo lo suficientemente precisas para que el control de corriente y de balance de tensión funcionen de manera correcta.

En ambas pruebas experimentales (7 y 11), se aprecia que las estimaciones tienen un offset en comparación con las mediciones. Estas pequeñas discrepancias

se atribuyen a que en el modelado matemático del convertidor visto en el Capítulo 2 no se contemplan pérdidas en el sistema, principalmente de los dispositivos semi-conductores, por conducción, por conmutación, entre otras. Sin embargo, también se podría atribuir a que algunas mediciones se hicieron de manera diferida, dado que no se cuenta con el número suficiente de sensores; sin embargo, como lo demuestran los resultados mostrados, esto parece no tener repercusión en el desempeño del sistema.

Por otra parte, como casi todo algoritmo, el esquema de estimación propuesto presenta singularidades que pudieran afectar la operación del esquema de estimación. Estos escenarios han sido descritas de manera amplia sin dar una solución definitiva. Se ofrece información de relevancia que permitiría en un momento dado, tomar una decisión de como evitar tales escenarios.

Finalmente, se puede concluir que ambos esquemas de estimación presentan robustez ante condiciones adversas como: transitorios, incertidumbre paramétrica y ruido en las mediciones de tensión y corriente, sin importar el tipo de control utilizado. Sin embargo, la simplicidad de la segunda propuesta sería la opción a utilizar para aplicaciones de estimación en tiempo real; la primer propuesta sigue teniendo un valor, ya que fue a partir de esta que surgieron las ideas para hacer una simplificación y llegar a la segunda propuesta.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En años recientes la Electrónica de Potencia ha tenido una gran penetración en los SEPs debido a las extensas aplicaciones que puede ofrecer, especialmente en compensación de redes, transmisión en HVDC e interconexión de energías renovables a la red eléctrica. Específicamente los convertidores multinivel han dado la pauta para que todas estas aplicaciones puedan ser llevadas a cabo.

Como se ha descrito a lo largo de este trabajo, los convertidores multinivel ofrecen características que favorecen el manejo de potencia en media y alta tensión, ya que la estructura interna maneja niveles discretos, lo que permite que los semiconductores soporten una fracción de la tensión total acorde a sus capacidades. De esta forma, se puede obtener una mayor calidad de la energía eléctrica proporcionada, ya que provee tensiones y corrientes de bajo contenido armónico.

Así mismo, el uso de estos convertidores, además de aumentar la eficiencia del sistema y ofrecer una mejor calidad de la energía eléctrica procesada, también favorecen a la instalación del sistema, ya que operan a niveles de tensión elevados y se podría evitar el uso de un transformador de acoplamiento a la red eléctrica.

El principio de operación de este tipo de convertidores es simple, sin embargo, para poder realizar tales tareas requieren de sistemas de control que aseguren el correcto funcionamiento del sistema en todo momento. Además, estos controles

requieren de datos (mediciones) del mismo sistema que en ciertas circunstancias compromete su operación, confiabilidad y adicionalmente generarían un costo monetario más elevado. Por esta razón es deseable contar con esquemas de estimación que permitan la medición indirecta de estos datos.

En esta tesis se propuso un estimador para las tensiones de los condensadores de un convertidor multinivel de tipo condensadores flotantes (FCMC) debido a que en el laboratorio de posgrado se cuenta con un prototipo experimental. Se emplearon dos tipos de control: directo y PWM. Se comprobó en simulación que el esquema de estimación propuesto tiene el mismo desempeño en ambos casos, aunque en una modulación PWM presenta mayor complejidad en cuando a la cantidad de recursos que deben utilizarse.

En la parte experimental, para un control directo se obtuvieron resultados muy similares a los de simulación. Por otro lado, el esquema de estimación no se pudo implementar de manera directa en un control con modulación PWM, por lo que se propuso una simplificación del esquema de estimación; ya que el control de balance de tensión solo requiere conocer el valor promedio de la tensión de los condensadores. De esta forma, se pudo llevar a cabo el control del convertidor de manera experimental y se obtuvieron resultados muy satisfactorios.

De manera adicional, se mostraron las fallas que presenta el esquema de estimación en condiciones muy particulares y aisladas; tanto en un control directo como en un control con modulación PWM, y las posibles soluciones que pueden ser aplicadas.

A continuación se detallan las principales aportaciones de este trabajo y recomendaciones para trabajos futuros.

5.1 APORTACIONES

Por consiguiente, con la realización de este trabajo de investigación, la principal aportación es el: Desarrollo de un algoritmo de estimación de la tensión de los condensadores flotantes en un FCMC utilizando un número reducido de sensores con las siguientes características:

- El esquema es de bajo costo computacional, ya que depende de operaciones aritméticas básicas.
- Se presenta una deducción matemática clara y justificada del método.
- Se utiliza un número reducido de sensores (dos sensores), ya que solo se necesita la medición de la tensión y corriente de salida.
- No requiere de ganancias o sintonización alguna.
- Paramétricamente, solo depende de la capacitancia de los condensadores y es robusto ante variaciones.
- Se puede escalar fácilmente cuando se tiene un gran número de niveles.
- Las estimaciones permiten el correcto funcionamiento del control de corriente y balance de tensión de los condensadores, por lo que podemos asegurar que son muy precisas.
- Se puede aplicar tanto para un control directo como para un control con una modulación PWM.

5.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

A partir de los resultados obtenidos con el desarrollo de este trabajo, las recomendaciones para trabajos futuros son:

- Aplicar el algoritmo a otras topologías.
- En las pruebas experimentales para un control con modulación PWM se puede realizar una mejora en la estimación; midiendo los tiempos entre conmutaciones, como se ha hecho en simulación.
- Profundizar más en el planteamiento matemático del método para determinar una mayor velocidad y precisión de convergencia.
- Encontrar una solución a las singularidades descritas en el Capítulo 4, sección 4.3.

APÉNDICE A

CÓDIGOS DE MATLAB DE LOS ESQUEMAS DE ESTIMACIÓN

A.1 PRIMER PROPUESTA SED - CONTROL DIRECTO

```
function y = fcn(u1, u2, u3, u4, io, vo)
% Primer Propuesta: Sistema de ecuaciones dinámicas aplicado a un control
% directo

% Condiciones iniciales
if isempty(mEC)
    vEC=4; % Número de ecuaciones de la ventana móvil
    lev=4; % Número de niveles - 1
    mEC=zeros(vEC,7);
    Vdir=[0 0 0 100]';
    vg=[0 0 0 0]';
    sol=0;
    solin=0;
    count=0;
end
```

```
% Delta t = 50e-6
dT = 25e-6; % La mitad, porque se ejecuta a la mitad del periodo de
% muestreo

% Capacitancia de condensadores flotantes C
C = 390e-6;

% Función de conmutación S
s1 = u1-u2;
s2 = u2-u3;
s3 = u3-u4;
s4 = u4;
q1 = -s1;
q2 = -s2;
q3 = -s3;
q4 = -s4;

% Cálculo de Delta vc
dVc = (1/C)*io*dT;

% Ecuación del instante k
EC1=[s1 s2 s3 s4 vo io dVc];
as=abs(s1)+abs(s2)+abs(s3)+abs(s4);
count=count+1;
if count==185
    as;
    count;
end
```

```

% Cálculo de la dinámica interna en los condensadores
dVc = (1/C)*io*dT;
ECi=[-s1*dVc -s2*dVc -s3*dVc -s4];
st=abs(s1)+abs(s2)+abs(s3)+abs(s4);

% Ecuaciones pasadas (3.2)
neq=0;
if (s1==0 & s2==0 & s3==0 & s4==0) % No tomar en cuenta estados 0
else % Para los demás estados, si es nuevo y no se encuentra dentro la
    %ventana se AGREGA, si ya esta se actualiza vo
    % -- Evitar ecuaciones repetidas
    for i = 1:vEC
        if all(EC1(1:lev) == mEC(i,1:lev));
            neq=i;
        end
    end
    if neq == 0
        mEC=[EC1;mEC(1:vEC-1,1:7)];
    else
        mEC(neq,:)=[];
        mEC=[EC1;mEC];
    end
end

end

% Matriz A
mA=mEC(1:vEC,1:4);
rangomA=rank(mA);

% Actualización de las estimaciones de los voltajes de salida
yv=[0 0 0 0]';

```

```

yv=[vg(1,1)+q1*dVc vg(2,1)+q2*dVc vg(3,1)+q3*dVc vg(4,1)]';
bmA=mEC(2:vEC,1:4)*yv;
mEC(2:4,5)=bmA;
yvolt=mEC(1:vEC,lev+1);

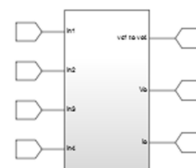
% Solución del sistema de ecuaciones
if rangomA==4
    sol=sol+1;
    Vdir=inv(mA)*yvolt;
    Vdir(1,1)=Vdir(1,1)+q1*dVc;
    Vdir(2,1)=Vdir(2,1)+q2*dVc;
    Vdir(3,1)=Vdir(3,1)+q3*dVc;
elseif rangomA == 2 || rangomA == 3 % -- Eliminar renglones y columnas con 0
    nmA=mA; % Matriz temporal mA
    nmA=nmA(any(nmA,2),:); % Eliminar renglones con 0
    nmA=nmA(:,any(nmA)); % Eliminar columnas con 0
    nyvolt=yvolt; % Matriz temporal yvolt
    nyvolt=nyvolt(any(nyvolt,2),:); % Eliminar renglones con 0
    % -- Casos especiales en los que mA sea singular
    [ren col]=size(nmA);
    rangonmA=rank(nmA);
    if col ~= rangonmA % Ninguna ecuación se repite,
pero la ventana tiene dependencia por azar
        sol=sol+1;
        Vdir(1,1)=yv(1,1)+q1*dVc;
        Vdir(2,1)=yv(2,1)+q2*dVc;
        Vdir(3,1)=yv(3,1)+q3*dVc;
    else
        sol=sol+1;
        % -- Mínimos cuadrados

```

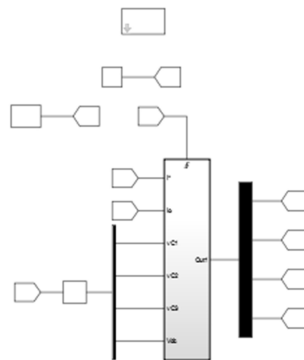
```
nVdir=inv(nmA'*nmA)*(nmA'*nyvolt);
snmA=sum(abs(mA));
ind=find(snmA);
nind=0; % Inicializar variable de conteo
for i=1:lev % Acomoda las variables encontradas en el vector Vdir
    if snmA(i)~=0
        nind=nind+1;
        Vdir(ind(nind),1)=nVdir(nind,1);
    end
end
if snmA(1)~=0
    Vdir(1,1)=Vdir(1,1)+q1*dVc;
end
if snmA(2)~=0
    Vdir(2,1)=Vdir(2,1)+q2*dVc;
end
if snmA(3)~=0
    Vdir(3,1)=Vdir(3,1)+q3*dVc;
end
end
elseif rangomA == 1
    sol=sol+1;
    snmA=sum(abs(mA));
    ind=find(snmA);
    Vdir(ind,1)=vo;
elseif rangomA == 0
    sol=sol+1;
    Vdir=Vdir;
end
```

```
% Voltajes estimados en los condensadores
y=[Vdir(1,1) Vdir(2,1) Vdir(3,1) Vdir(4,1)]';
vg=y;
sol;
```

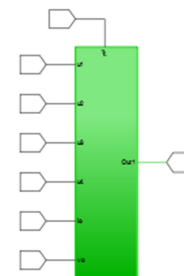
1 FCMC



Control directo



Primer propuesta estimación



1.- FCMC

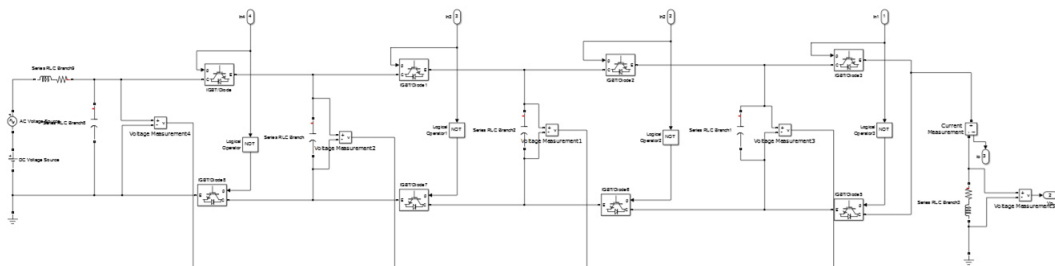


Figura A.1: Diagrama en simulink de la Primer Propuesta de Estimación, aplicada a un control directo.

A.2 SEGUNDA PROPUESTA SESD - CONTROL

DIRECTO

```
function y = fcn(Iref, io, vo)

% Segunda Propuesta: Sistema de ecuaciones estáticas aplicado a un control
% directo
% Condiciones iniciales
if isempty(v1)
    v1=0;
    v2=0;
    v3=0;
    v4=100;
    sc1=0;
    sc2=0;
    sc3=0;
    sc4=0;
    C = 390e-6; % Capacitancia de capacitores flotantes
    dT = 50e-6; % Tiempo de muestreo
    k=dT/C;
end

% Función de conmutación S
s1 = sc1-sc2;
s2 = sc2-sc3;
s3 = sc3-sc4;
s4 = sc4;

% Cálculo de Delta vc
```

```
dV = k*io;

% Cálculo de la dinámica interna en los condensadores
y1=v1-s1*dV;
y2=v2-s2*dV;
y3=v3-s3*dV;
y4=v4;

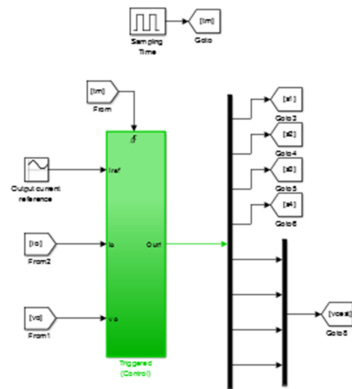
% Voltajes estimados en los condensadores
vosy=vo-(s1*y1+s2*y2+s3*y3+s4*y4)
fac=s1*s1+s2*s2+s3*s3+s4*s4

if fac~=0
    k2 = vosy/fac
    v1 = k2*s1+y1
    v2 = k2*s2+y2
    v3 = k2*s3+y3
    v4 = k2*s4+y4
end

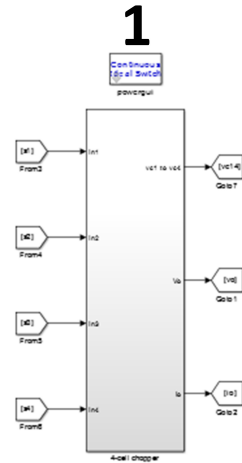
if v1<0
    v1=0;
end
if v2<0
    v2=0;
end
if v3<0
    v3=0;
end
if v4<0
```

```
v4=0;
end
```

Control directo y segunda propuesta de estimación



FCMC



1.- FCMC

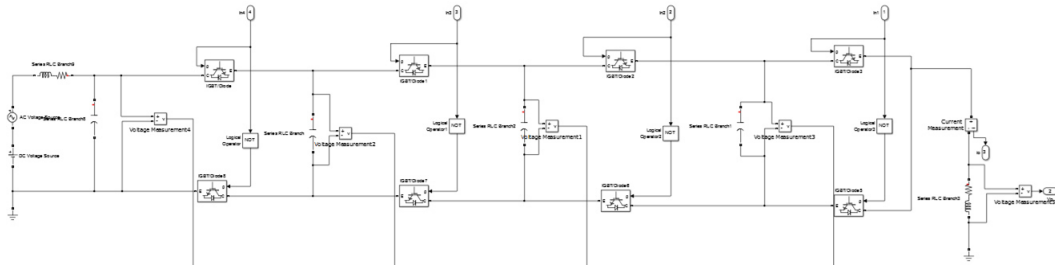


Figura A.2: Diagrama en simulink de la Segunda Propuesta de Estimación, aplicada a un control directo.

A.3 SEGUNDA PROPUESTA SESD - CONTROL CON MODULACIÓN PWM

```
function y = fcn(u1, u2, u3, u4, io, E, vo, ti)

% Primer Propuesta: Sistema de ecuaciones dinámicas aplicado a un control
% directo
% Condiciones iniciales
if isempty(Vh)
    lev=5; % Número de niveles
    cel=lev-1; % Número de niveles - 1
    Vh=[0 0 0 100]'; % Inicializar variables
    C = 390e-6; % Capacitancia de capacitores flotantes
    ft=1e3;
    voA=0;
    ioA=0;
    sA=[0 0 0 0];
    DVA=[0 0 0 0];
    v1=0;
    v2=0;
    v3=0;
    v4=0;
end

% Función de conmutación S
s1 = u1-u2;
s2 = u2-u3;
s3 = u3-u4;
s4 = u4;
```

```
% Cálculo de Delta vc
dV = (1/C)*ioA*ti; % ti es el tiempo medido
y1=v1;
y2=v2;
y3=v3;
y4=v4;

% Voltajes estimados en los condensadores
vosy=voA-(sA(1)*y1+sA(2)*y2+sA(3)*y3+sA(4)*y4);
fac=sA(1)*sA(1)+sA(2)*sA(2)+sA(3)*sA(3)+sA(4)*sA(4);

if fac~=0
    k2 = vosy/fac;
    v1 = k2*sA(1)+y1;
    v2 = k2*sA(2)+y2;
    v3 = k2*sA(3)+y3;
    v4 = k2*sA(4)+y4;
end

v1=v1-sA(1)*dV;
v2=v2-sA(2)*dV;
v3=v3-sA(3)*dV;
v4=v4;

if v1<0
    v1=0;
end
if v2<0
    v2=0;
```

```
end
if v3<0
    v3=0;
end
if v4<0
    v4=0;
end

y=[v1 v2 v3 v4]';
voA=vo;
ioA=io;
sA=[s1 s2 s3 s4];
```

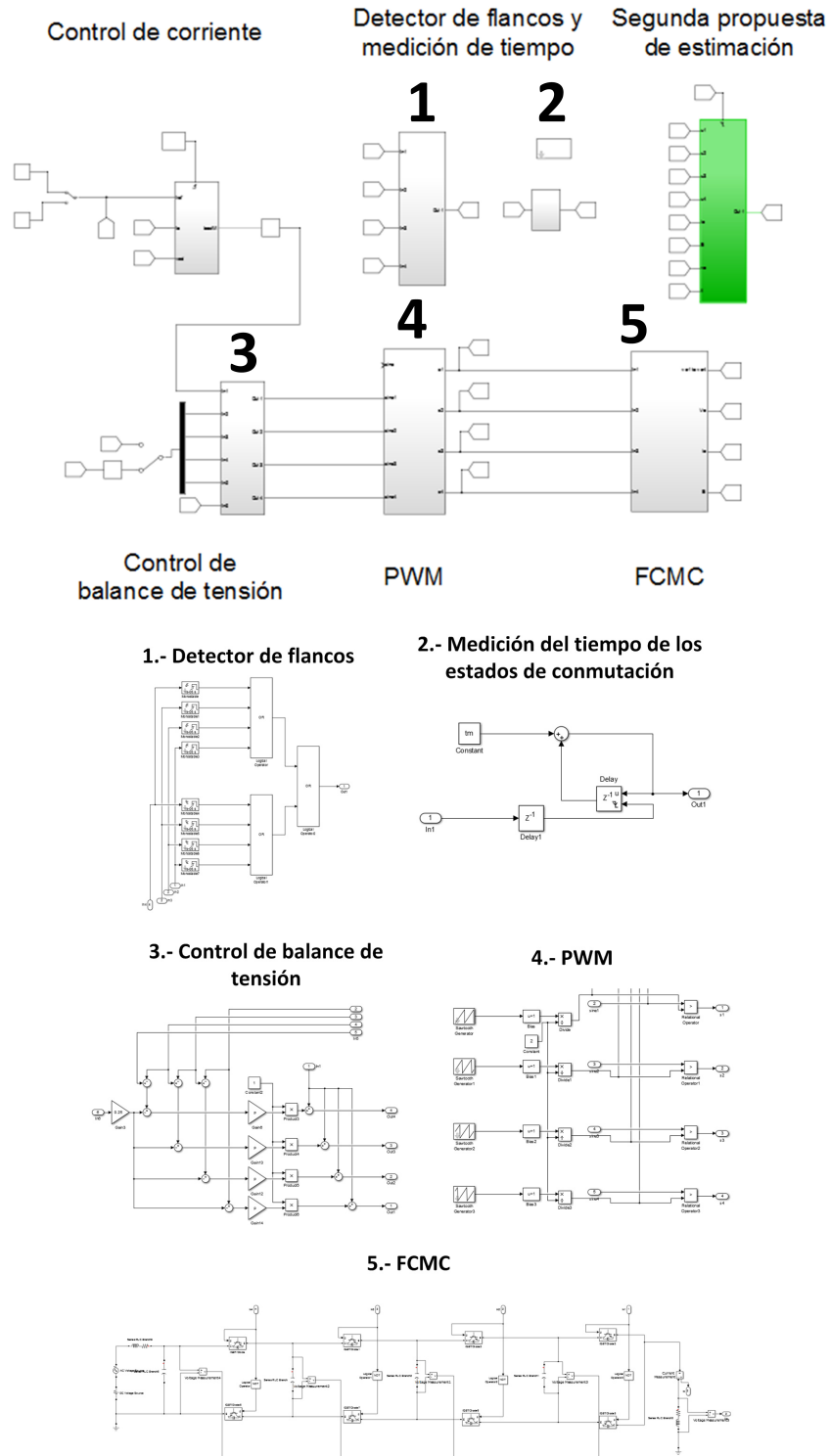


Figura A.3: Diagrama en simulink de la Segunda Propuesta de Estimación, aplicada a un control PWM.

A.4 SEGUNDA PROPUESTA SESD - CONTROL CON MODULACIÓN PWM, ESTIMACIÓN DE VALORES

PROMEDIO

```
function y = fcn(u1, u2, u3, u4, io, E, vo, ti)

% Primer Propuesta: Sistema de ecuaciones dinámicas aplicado a un control
% directo
% Condiciones iniciales
if isempty(Vh)
    lev=5; % Número de niveles
    cel=lev-1; % Número de niveles - 1
    Vh=[0 0 0 100]'; % Inicializar variables
    C = 390e-6; % Capacitancia de capacitores flotantes
    ft=1e3;
    voA=0;
    ioA=0;
    sA=[0 0 0 0];
    DVA=[0 0 0 0];
    v1=0;
    v2=0;
    v3=0;
    v4=0;
end

% Función de conmutación S
s1 = u1-u2;
s2 = u2-u3;
```



```
s3 = u3-u4;
s4 = u4;

y1=v1;
y2=v2;
y3=v3;
y4=v4;

% Voltajes estimados en los condensadores
vosy=voA-(sA(1)*y1+sA(2)*y2+sA(3)*y3+sA(4)*y4);
fac=sA(1)*sA(1)+sA(2)*sA(2)+sA(3)*sA(3)+sA(4)*sA(4);

if fac~=0
    k2 = vosy/fac;
    v1 = k2*sA(1)+y1;
    v2 = k2*sA(2)+y2;
    v3 = k2*sA(3)+y3;
    v4 = k2*sA(4)+y4;

end

if v1<0
    v1=0;
end
if v2<0
    v2=0;
end
if v3<0
    v3=0;
end
end
```

```
if v4<0
    v4=0;
end
```

```
% Salidas
y=[v1 v2 v3 v4]';
voA=vo;
ioA=io;
sA=[s1 s2 s3 s4];
```

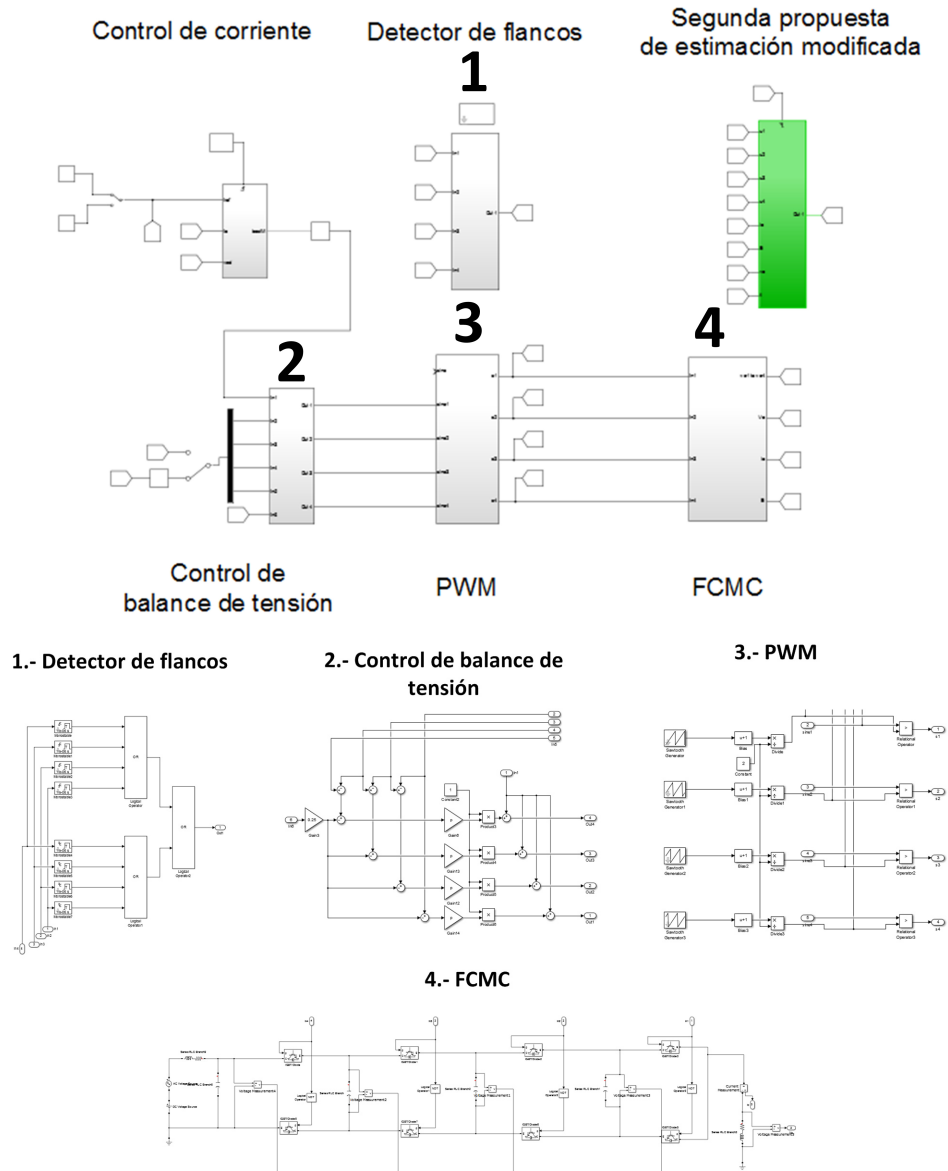


Figura A.4: Diagrama en simulink de la Segunda Propuesta de Estimación modificada, aplicada a un control PWM.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. de Energía (SENER), “Reporte de avances de energías limpias en la matriz energética.” <https://www.gob.mx/sener/documentos/informe-sobre-la-participacion-de-las-energias-renovables-en-la-generacion-de-electricidad-en-mexico-al-30-de-junio>, 2017.
- [2] I. E. Q. Quiñonez, *Desarrollo de un controlador predictivo para la interconexión a la red eléctrica de un sistema de generación distribuida utilizando convertidores multinivel*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), 2016.
- [3] P. Suarez Velázquez, “Impacto de la generación eólica y solar en el sistema eléctrico de baja california norte,” 2010.
- [4] F. Shahnia, S. Rajakaruna, and A. Ghosh, *Static compensators (STATCOMs) in power systems*. Springer, 2015.
- [5] A. Moeini and S. Wang, “The state of charge balancing techniques for electrical vehicle charging stations with cascaded h-bridge multilevel converters,” in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2018 IEEE*, pp. 637–644, IEEE, 2018.
- [6] I. Kirchner, T.-M. Plötz, and H.-G. Eckel, “Control of a cascaded hybrid multilevel converter for the use in rail vehicles,” in *Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), 2017 19th European Conference on*, pp. P–1, IEEE, 2017.

-
- [7] B. Tai, C. Gao, X. Liu, and J. Lv, “Combination system of var compensation and photovoltaic power generation based on modular multilevel converter,” in *Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE*, pp. 002932–002937, IEEE, 2015.
- [8] V. Daraghi, A. K. Sadigh, S. Eskandari, and K. Corzine, “Active voltage balancing of reduced stacked multicell multilevel power converter and its application in static var compensation,” in *Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE*, pp. 1181–1187, IEEE, 2014.
- [9] S. Rivera, S. Kouro, B. Wu, S. Alepuz, M. Malinowski, P. Cortes, and J. Rodriguez, “Multilevel direct power control—a generalized approach for grid-tied multilevel converter applications,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 10, pp. 5592–5604, 2014.
- [10] M. Zhang, J. Li, B. Chi, Q. Wang, G. Li, and Q. Ye, “A novel generalized multilevel converter with the application in d-statcom,” in *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2017 12th IEEE Conference on*, pp. 871–875, IEEE, 2017.
- [11] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, “A new neutral-point-clamped pwm inverter,” *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 5, pp. 518–523, 1981.
- [12] P. Qashqai, A. Sheikholeslami, H. Vahedi, and K. Al-Haddad, “A review on multilevel converter topologies for electric transportation applications,” in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2015 IEEE*, pp. 1–6, IEEE, 2015.
- [13] S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M. A. Pérez, and J. I. Leon, “Recent advances and industrial applications of multilevel converters,” *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 57, no. 8, pp. 2553–2580, 2010.

-
- [14] J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F. Z. Peng, “Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications,” *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, 2002.
- [15] I. Colak, E. Kabalci, and R. Bayindir, “Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes,” *Energy conversion and management*, vol. 52, no. 2, pp. 1114–1128, 2011.
- [16] J. D. L. Morales, M. Escalante, and M. Mata-Jimenez, “Observer for dc voltages in a cascaded h-bridge multilevel statcom,” *IET Electric Power Applications*, vol. 1, no. 6, pp. 879–889, 2007.
- [17] M. Escalante, “Least-squares estimation of capacitor voltages in flying capacitor multilevel converters,” *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 9, pp. 1741–1747, 2012.
- [18] F. Salinas, M. A. González, and M. F. Escalante, “Finite control set-model predictive control of a flying capacitor multilevel chopper using petri nets,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 9, pp. 5891–5899, 2016.
- [19] G. Farivar, A. M. Ghias, B. Hredzak, J. Pou, and V. G. Agelidis, “Capacitor voltages measurement and balancing in flying capacitor multilevel converters utilizing a single voltage sensor,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 10, pp. 8115–8123, 2017.
- [20] S. Hosseini, A. K. Sadig, and A. Sharifi, “Estimation of flying capacitors voltages in multicell converters,” in *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2009. ECTI-CON 2009. 6th International Conference on*, vol. 1, pp. 110–113, IEEE, 2009.
- [21] R. P. Aguilera and D. E. Quevedo, “Capacitor voltage estimation for predictive control algorithm of flying capacitor converters,” in *Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. IEEE International Conference on*, pp. 1–6, IEEE, 2009.

-
- [22] K. Corzine, “Operation and design of multilevel inverters,” *Developed for the office of Naval research*, pp. 1–79, 2003.
- [23] G. Farivar, V. G. Agelidis, and B. Hredzak, “A generalized capacitors voltage estimation scheme for multilevel converters,” in *Power Electronics and Applications (EPE’14-ECCE Europe), 2014 16th European Conference on*, pp. 1–5, IEEE, 2014.
- [24] G. Farivar, B. Hredzak, and V. G. Agelidis, “A dc-side sensorless cascaded h-bridge multilevel converter-based photovoltaic system,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 7, pp. 4233–4241, 2016.
- [25] S. D’Arco and J. A. Suul, “Estimation of sub-module capacitor voltages in modular multilevel converters,” in *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*, pp. 1–10, IEEE, 2013.
- [26] R. Picas, J. Zaragoza, J. Pou, S. Ceballos, and J. Balcells, “New measuring technique for reducing the number of voltage sensors in modular multilevel converters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 1, pp. 177–187, 2016.
- [27] M. Almaleki, P. Wheeler, and J. Clare, “Sliding mode observation of capacitor voltage in multilevel power converters,” 2010.
- [28] M. Glinka and R. Marquardt, “A new ac/ac-multilevel converter family applied to a single-phase converter,” in *Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. The Fifth International Conference on*, vol. 1, pp. 16–23, IEEE, 2003.
- [29] A. Lesnicar and R. Marquardt, “An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range,” in *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*, vol. 3, pp. 6–pp, IEEE, 2003.
- [30] M. Abdelsalam, S. Tennakoon, H. Diab, and M. I. Marei, “An adaline based capacitor voltage estimation algorithm for modular multilevel converters,” in

- Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), 2016 19th International Symposium on*, pp. 1–4, IEEE, 2016.
- [31] L. Bessegato, L. Harnefors, K. Ilves, S. Norrga, and S. Östlund, “Control of direct ac/ac modular multilevel converters using capacitor voltage estimation,” in *Power Electronics and Applications (EPE’16 ECCE Europe), 2016 18th European Conference on*, pp. 1–9, IEEE, 2016.
- [32] O. S. M. Abushafa, M. S. Dahidah, S. M. Gadoue, and D. J. Atkinson, “Submodule voltage estimation scheme in modular multilevel converters with reduced voltage sensors based on kalman filter approach,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 9, pp. 7025–7035, 2018.
- [33] B. Ruccius, B. Preller, M. März, and B. Wagner, “An advanced control concept for modular multilevel converter using capacitor voltage estimation,” in *Power Electronics Conference (SPEC), 2017 IEEE Southern*, pp. 1–8, IEEE, 2017.
- [34] M. N. I. Sarkar, L. G. Meegahapola, and M. Datta, “Reactive power management in renewable rich power grids: A review of grid-codes, renewable generators, support devices, control strategies and optimization algorithms,” *IEEE Access*, pp. 1–1, 2018.
- [35] H. Weber, P. Baskar, and N. Ahmed, “Power system control with renewable sources, storages and power electronic converters,” in *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pp. 1272–1278, Feb 2018.
- [36] I. Askarian, S. Eren, M. Pahlevani, and A. Knight, “Digital real-time harmonic estimator for power converters in future micro-grids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017.
- [37] M. Cheng, P. Han, G. Buja, and M. G. Jovanović, “Emerging multiport electrical machines and systems: Past developments, current challenges, and future prospects,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 7, pp. 5422–5435, 2018.

-
- [38] E. Kontos, G. Tsolaridis, R. Teodorescu, and P. Bauer, “High order voltage and current harmonic mitigation using the modular multilevel converter statcom,” *Ieee Access*, vol. 5, pp. 16684–16692, 2017.
- [39] S. Rivera, S. Kouro, B. Wu, S. Alepuz, M. Malinowski, P. Cortes, and J. Rodriguez, “Multilevel direct power control a generalized approach for grid-tied multilevel converter applications,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 10, pp. 5592–5604, 2014.
- [40] J. I. Leon, S. Vazquez, and L. G. Franquelo, “Multilevel converters: Control and modulation techniques for their operation and industrial applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2066–2081, 2017.
- [41] H. Akagi, “Multilevel converters: Fundamental circuits and systems,” *Proceedings of the IEEE*, 2017.
- [42] Y. Li and Z. Quan, “Derivation of multilevel voltage source converter topologies for medium voltage drives,” *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 24–31, 2017.
- [43] A. Dekka, B. Wu, R. L. Fuentes, M. Perez, and N. R. Zargari, “Evolution of topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 4, pp. 1631–1656, 2017.
- [44] V. Yaramasu, B. Wu, and J. Chen, “Model-predictive control of grid-tied four-level diode-clamped inverters for high-power wind energy conversion systems,” *IEEE transactions on power electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 2861–2873, 2014.
- [45] M. Alharbi and S. Bhattacharya, “Scale-up methodology of a modular multilevel converter for hvdc applications,” in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2018 IEEE*, pp. 2379–2386, IEEE, 2018.
- [46] B. Baroni, M. S. Mendes, P. Cortizo, A. Lisboa, and R. Saldanha, “Application of modular multilevel converter for hvdc transmission with selective harmonics,”

- in *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*, pp. 6195–6200, IEEE, 2013.
- [47] M. Abdel-Moamen, S. Shaaban, and F. Jurado, “France-spain hvdc transmission system with hybrid modular multilevel converter and alternate-arm converter,” in *Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), 2017 Innovations in*, pp. 1–6, IEEE, 2017.
- [48] L. Zhang, S. Watkins, and W. Shepherd, “Analysis and control of a multi-level flying capacitor inverter,” in *Power Electronics Congress, 2002. Technical Proceedings. CIEP 2002. VIII IEEE International*, pp. 66–71, IEEE, 2002.
- [49] T. Meynard and H. Foch, “Dispositif électronique de conversion d’énergie électrique,” *French Patent*, vol. 267, p. 971, 1991.
- [50] T. Meynard and H. Foch, “Multi-level choppers for high voltage applications,” *EPE journal*, vol. 2, no. 1, pp. 45–50, 1992.
- [51] T. A. Meynard, M. Fadel, and N. Aouda, “Modeling of multilevel converters,” *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 44, no. 3, pp. 356–364, 1997.
- [52] D. G. Holmes and T. A. Lipo, *Pulse width modulation for power converters: principles and practice*, vol. 18. John Wiley & Sons, 2003.