

Índice

1	Introducción	1
1.1	Introducción general	1
1.2	Estado del arte	5
1.2.1	Filtros LC en distintas topologías del convertidor VSI	5
1.2.2	Control MPC	7
1.2.3	Sistemas de poder ininterrumpido (UPS)	9
1.3	Objetivos	12
1.3.1	Objetivo general	12
1.3.2	Objetivos específicos	12
1.4	Alcances y limitaciones	12
1.4.1	Alcances	12
1.4.2	Limitaciones	12
1.5	Metodología	13
2	Marco teórico	14
2.1	Inversor fuente de voltaje VSI	14
2.1.1	Descripción de la topología en estudio	14
2.1.2	Estados del inversor	15
2.1.3	Modelo matemático del convertidor	16
2.2	Filtros	18
2.2.1	Filtros pasivos	18
2.2.2	Filtro LC	19
2.3	Métodos de evaluación de señales	20
2.3.1	Distorsión armónica total	20
2.3.2	Error en estado estacionario	21
2.4	Control predictivo	21
2.4.1	Control predictivo de estados finitos	22
2.4.2	Marcos de referencia	23
3	Estrategia de control predictivo de voltaje operando a frecuencia variable	24
3.1	Modelo discretizado del convertidor VSI	24
3.2	Propuesta de control	25
3.3	Resultados de simulación	26
3.3.1	Cambio escalón de referencia de voltaje	27
3.3.2	Cargas lineales	28
3.3.3	Cargas no lineales	30
3.3.4	Cargas desbalanceadas	32
3.3.5	Efecto de la variación de parámetros del filtro LC para propuesta de control operando a frecuencia variable	34
3.3.6	Efecto en la variación del tiempo de muestreo del algoritmo operando a frecuencia variable	42
3.4	Análisis de la propuesta	44
4	Estrategia de control predictivo de voltaje operando a frecuencia fija	46

4.1	Propuesta de control	46
4.2	Resultados de simulación	50
4.2.1	Cambio escalón de referencia de voltaje	50
4.2.2	Cargas lineales	51
4.2.3	Cargas no lineales	53
4.2.4	Carga desbalanceada	55
4.2.5	Efecto de la variación de parámetros del filtro LC para propuesta de control operando a frecuencia fija	57
4.2.6	Efecto en la variación del tiempo de muestreo del algoritmo operando a frecuencia fija	64
4.3	Análisis de la propuesta	66
5	Propuestas de mejora, desarrollo y evaluación de algoritmos	69
5.1	Integración de nuevos términos en la función de costo para objetivos secundarios de control	69
5.1.1	Función de costo con objetivo de seguimiento de referencia	69
5.1.2	Función de costo con objetivo en la minimización de la frecuencia de conmutación	70
5.1.3	Función de costo con objetivo de minimización de voltaje en modo común	73
5.1.4	Función de costo con restricciones operacionales	75
5.1.5	Función de costo con restricción de contenido armónico	77
5.1.6	Discusión sobre funciones de costo	80
5.2	Control predictivo secuencial	82
5.2.1	Control mediante funciones multi-objetivo	82
5.2.2	Implementación de control predictivo secuencial	82
5.2.3	Discusión de control SMPC	86
5.3	Observador de estados	87
5.3.1	Diseño de observador de estados para el convertidor VSI	88
5.3.2	Implementación del observador de estados en propuestas de control predictivo	90
5.3.3	Evaluación del observador de estados en algoritmo operando a frecuencia variable	94
5.3.4	Evaluación del observador de estados en algoritmo operando a frecuencia fija	99
5.3.5	Evaluación del observador de estados en algoritmo con nuevos términos de función de costo y algoritmo SMPC	104
5.3.6	Discusión de la implementación del observador de estados	107
5.4	Algoritmo adaptativo para la actualización de parámetros del sistema en tiempo real	109
5.4.1	Red neuronal ADALINE	109
5.4.2	Resultados de simulación ante carga lineal	116
5.4.3	Resultados de simulación ante carga no lineal	130
5.4.4	Discusión de la propuesta para estimación de parámetros del convertidor	137
6	Conclusión	139

6.1	Conclusión general	139
6.2	Trabajos futuros	141
	Acrónimos	143
	Referencias	144

Índice de figuras

2.1	Circuito convertidor VSI de 2 niveles y 3 fases con filtro LC	15
2.2	Configuraciones de filtros pasivos conectados a un convertidor VSI.	15
2.3	Modelo del convertidor VSI simplificado.	16
2.4	Configuraciones de filtros pasivos conectados a un convertidor VSI.	19
2.5	Diagrama de bode de un filtro LC genérico.	20
2.6	Diagrama de bloques del esquema de control MPC-FCS.	22
3.1	Esquema de control predictivo propuesto.	26
3.2	Topología en estudio simulada.	27
3.3	Respuesta ante cambio escalón de referencia de voltaje con control operando a frecuencia variable.	27
3.4	Conmutación del transistor S_{a1} con control predictivo operando a frecuencia variable de conmutación.	28
3.5	Respuesta ante escalón de carga lineal en convertidor VSI con control operando a frecuencia variable.	29
3.6	Respuesta dinámica del error ante la aplicación de 0 % a 100 % de una carga lineal.	30
3.7	Respuesta ante escalón de carga no lineal en convertidor VSI con control operando a frecuencia variable.	31
3.8	Respuesta dinámica del error ante la aplicación de 0 % a 100 % de una carga no lineal.	32
3.9	Respuesta ante escalón de carga desbalanceada en convertidor VSI con control operando a frecuencia variable.	33
3.10	Respuesta dinámica del error ante la aplicación de 0 % a 100 % de una carga desbalanceada.	34
3.11	Respuesta ante variación del valor en el condensador del convertidor VSI con carga lineal.	35
3.12	Respuesta ante variación del valor en el inductor del convertidor VSI con carga lineal.	36
3.13	Respuesta ante variación del valor en el condensador del convertidor VSI con carga no lineal.	38
3.14	Respuesta ante variación del valor en el inductor del convertidor VSI con carga no lineal.	38
3.15	Respuesta ante variación del valor en el condensador del convertidor VSI con carga desbalanceada.	40
3.16	Respuesta ante variación del valor en el inductor del convertidor VSI con carga desbalanceada.	41
3.17	Variación en el valor de THD según frecuencia de muestreo para control operando a frecuencia variable.	43
4.1	Representación de vectores de estados posibles del VSI en coordenadas $\alpha\beta$	47
4.2	Patrón de conmutación de control predictivo a frecuencia fija.	49
4.3	Diagrama de bloques de la propuesta de control predictivo a frecuencia fija.	50
4.4	Respuesta ante cambio escalón de referencia de voltaje con control operando a frecuencia fija.	51

4.5	Comparativa del patrón de conmutación del transistor S_{a1} ante control operando a frecuencia variable y fija de conmutación para una carga lineal.	51
4.6	Respuesta ante escalón de carga lineal en convertidor VSI con control operando a frecuencia fija.	52
4.7	Respuesta dinámica del error ante la aplicación de 0 % a 100 % de una carga lineal.	53
4.8	Respuesta ante escalón de carga no lineal en convertidor VSI con control operando a frecuencia fija.	54
4.9	Respuesta dinámica del error ante la aplicación de 0 % a 100 % de una carga no lineal.	55
4.10	Respuesta ante escalón de carga desbalanceada en convertidor VSI con control operando a frecuencia fija.	56
4.11	Respuesta dinámica del error ante la aplicación de 0 % a 100 % de una carga desbalanceada.	56
4.12	Respuesta ante variación del valor en el condensador del convertidor VSI con carga lineal con control operando a frecuencia fija.	58
4.13	Respuesta ante variación del valor en el inductor del convertidor VSI con carga lineal con control operando a frecuencia fija.	58
4.14	Respuesta ante variación del valor en el condensador del convertidor VSI con carga no lineal con control operando a frecuencia fija.	60
4.15	Respuesta ante variación del valor en el inductor del convertidor VSI con carga no lineal con control operando a frecuencia fija.	61
4.16	Respuesta ante variación del valor en el condensador del convertidor VSI con carga desbalanceada con control operando a frecuencia fija.	63
4.17	Respuesta ante variación del valor en el inductor del convertidor VSI con carga desbalanceada con control operando a frecuencia fija.	63
4.18	Variación en el valor de THD según frecuencia de muestreo para control operando a frecuencia fija.	65
5.1	Respuesta de voltajes en la carga con función de costo con minimización de frecuencia de conmutación para distintos valores de λ	72
5.2	Respuesta del voltaje en modo común para distintos valores de λ_{vmc}	74
5.3	Respuesta ante restricción estricta de corriente de filtro en algoritmo operando a frecuencia variable.	76
5.4	Respuesta ante restricción estricta de corriente de filtro en algoritmo operando a frecuencia fija.	77
5.5	Voltaje en la carga lineal con restricción de contenido armónico.	79
5.6	Espectro armónico del voltaje en la carga.	79
5.7	Diagrama de bode de filtro Butterworth implementado.	80
5.8	Esquema de control predictivo secuencial propuesto.	83
5.9	Respuesta de voltaje en la carga con control secuencial de referencia de voltaje y minimización frecuencia de conmutación.	85
5.10	Respuesta en voltaje de carga y modo común con control secuencial de referencia de voltaje y minimización voltaje modo común.	85
5.11	Voltaje en la carga con control secuencial de referencia de voltaje y filtrado de contenido armónico.	86
5.12	Esquema general observador de estados de Luenberger.	88

5.13	Esquema de implementación del observador de estados en algoritmo de control predictivo.	91
5.14	Comparación corrientes en la carga estimadas por algoritmo predictivo y observador de estados en algoritmo operando a frecuencia variable.	92
5.15	Comparación corrientes en la carga estimadas por algoritmo predictivo y observador de estados en algoritmo operando a frecuencia fija.	93
5.16	Corriente estimada de fase 'a' por medio de observador de estado con aplicación de filtro pasa bajos.	94
5.17	Simulación para escalón de carga lineal en convertidor VSI con observador de estados implementado.	95
5.18	Respuesta dinámica del error ante la aplicación de 0 % a 100 % de una carga lineal con observador de estados implementado.	95
5.19	Simulación para escalón de carga no lineal en convertidor VSI con observador de estados implementado.	96
5.20	Respuesta dinámica del error ante la aplicación de 0 % a 100 % de una carga no lineal con observador de estados implementado.	97
5.21	Simulación para escalón de carga desbalanceada en convertidor VSI con observador de estados implementado.	98
5.22	Respuesta dinámica del error ante la aplicación de 0 % a 100 % de una carga desbalanceada con observador de estados implementado.	98
5.23	Simulación para escalón de carga lineal en convertidor VSI con observador de estados implementado.	100
5.24	Respuesta dinámica del error ante la aplicación de 0 % a 100 % de una carga lineal con observador de estados implementado.	100
5.25	Simulación para escalón de carga no lineal en convertidor VSI con observador de estados implementado.	101
5.26	Respuesta dinámica del error ante la aplicación de 0 % a 100 % de una carga no lineal con observador de estados implementado.	102
5.27	Simulación para escalón de carga desbalanceada en convertidor VSI con observador de estados implementado.	103
5.28	Respuesta dinámica del error ante la aplicación de 0 % a 100 % de una carga desbalanceada con observador de estados implementado.	103
5.29	Simulación de voltajes en la carga con función de costo con minimización de frecuencia de conmutación para distintos valores de λ y con implementación de observador de estados.	104
5.30	Simulación de voltajes en la carga con función de costo con minimización de frecuencia de conmutación para distintos valores de λ y con implementación de observador de estados.	105
5.31	Respuesta de voltaje en la carga con control secuencial de referencia de voltaje y minimización frecuencia de conmutación	107
5.32	Respuesta en voltaje de carga y modo común con control secuencial de referencia de voltaje y minimización voltaje modo común.	107
5.33	Esquema del proceso del algoritmo ADALINE	110
5.34	Efecto de la selección del factor de aprendizaje α	113
5.35	Diagrama de flujo de control predictivo de voltaje con estimador de parámetros ADALINE.	116

5.36	Evolución factor de aprendizaje a lo largo del tiempo de operación del algoritmo.	117
5.37	Comparación de dinámica de voltaje medido y estimado mediante algoritmo ADALINE y error asociado sin cambios en los parámetros del sistema con carga lineal.	118
5.38	Evolución de los factores de peso estimados por algoritmo ADALINE sin cambios en los parámetros del sistema con carga lineal.	119
5.39	Estimación de valores de parámetros de filtro <i>LC</i> mediante algoritmo ADALINE sin cambios en los parámetros del sistema con carga lineal.	120
5.40	Error en estimación de parámetros del filtro <i>LC</i> sin cambios en los parámetros del sistema con carga lineal.	120
5.41	Comparación de dinámica de voltaje medido y estimado mediante algoritmo ADALINE y error asociado ante cambio escalón de 150 % en valor de capacitancia con carga lineal.	121
5.42	Evolución de los factores de peso estimados por algoritmo ADALINE ante cambio escalón de 150 % en valor de capacitancia con carga lineal.	122
5.43	Estimación de valores de parámetros de filtro <i>LC</i> mediante algoritmo ADALINE ante cambio escalón de 150 % en valor de capacitancia con carga lineal.	123
5.44	Error en estimación de parámetros del filtro <i>LC</i> ante cambio escalón de 150 % en valor de capacitancia con carga lineal.	123
5.45	Comparación de dinámica de voltaje medido y estimado mediante algoritmo ADALINE y error asociado ante cambio escalón de 50 % en valor de capacitancia con carga lineal.	124
5.46	Evolución de los factores de peso estimados por algoritmo ADALINE ante cambio escalón de 50 % en valor de capacitancia con carga lineal.	125
5.47	Estimación de valores de parámetros de filtro <i>LC</i> mediante algoritmo ADALINE ante cambio escalón de 50 % en valor de capacitancia con carga lineal.	126
5.48	Error en estimación de parámetros del filtro <i>LC</i> ante cambio escalón de 50 % en valor de capacitancia con carga lineal.	126
5.49	Comparación de dinámica de voltaje medido y estimado mediante algoritmo ADALINE y error asociado ante cambio escalón de 50 % en valor de inductancia con carga lineal.	127
5.50	Evolución de los factores de peso estimados por algoritmo ADALINE ante cambio escalón de 50 % en valor de inductancia con carga lineal.	127
5.51	Estimación de valores de parámetros de filtro <i>LC</i> mediante algoritmo ADALINE ante cambio escalón de 50 % en valor de inductancia con carga lineal.	128
5.52	Error en estimación de parámetros del filtro <i>LC</i> ante cambio escalón de 50 % en valor de inductancia con carga lineal.	128
5.53	Estimación de valores de parámetros de filtro <i>LC</i> mediante algoritmo ADALINE ante cambio escalón de 150 % en valor de inductancia con carga lineal.	129
5.54	Evolución de los factores de peso estimados por algoritmo ADALINE ante cambio escalón de 150 % en valor de inductancia con carga lineal.	129
5.55	Comparación de dinámica de voltaje medido y estimado mediante algoritmo ADALINE y error asociado ante cambio escalón de 150 % en valor de inductancia con carga lineal.	130

5.56	Comparación de dinámica de voltaje medido y estimado mediante algoritmo ADALINE y error asociado sin cambios en los parámetros del sistema con carga no lineal.	131
5.57	Evolución de los factores de peso estimados por algoritmo ADALINE sin cambios en los parámetros del sistema con carga no lineal.	131
5.58	Estimación de valores de parámetros de filtro LC mediante algoritmo ADALINE sin cambios en los parámetros del sistema con carga no lineal.	132
5.59	Error en estimación de parámetros del filtro LC sin cambios en los parámetros del sistema con carga no lineal.	132
5.60	Estimación de valores de parámetros de filtro LC mediante algoritmo ADALINE ante cambio escalón de 150 % en valor de capacitancia con carga no lineal.	133
5.61	Error en estimación de parámetros del filtro LC ante cambio escalón de 150 % en valor de capacitancia con carga no lineal.	134
5.62	Estimación de valores de parámetros de filtro LC mediante algoritmo ADALINE ante cambio escalón de 50 % en valor de capacitancia con carga no lineal.	134
5.63	Error en estimación de parámetros del filtro LC ante cambio escalón de 50 % en valor de capacitancia con carga no lineal.	135
5.64	Estimación de valores de parámetros de filtro LC mediante algoritmo ADALINE ante cambio escalón de 50 % en valor de inductancia con carga no lineal.	135
5.65	Error en estimación de parámetros del filtro LC ante cambio escalón de 50 % en valor de inductancia con carga no lineal.	136
5.66	Estimación de valores de parámetros de filtro LC mediante algoritmo ADALINE ante cambio escalón de 150 % en valor de inductancia con carga no lineal.	136
5.67	Error en estimación de parámetros del filtro LC ante cambio escalón de 150 % en valor de inductancia con carga no lineal.	137

Índice de cuadros

2.1	Vectores de estado del convertidor VSI de 2 niveles.	16
2.2	Estados posibles y vector de voltaje v_i en el marco $\alpha\beta$	18
3.1	Parámetros utilizados en simulación del sistema VSI con filtro LC para el algoritmo operando a frecuencia variable.	26
3.2	Valores THD y error en estado estacionario de voltajes de fase con carga lineal para control operando a frecuencia variable.	29
3.3	Valores THD y error en estado estacionario de voltajes de fase con carga no lineal para control operando a frecuencia variable.	31
3.4	Valores THD y error en estado estacionario de voltajes de fase con carga desbalanceada para control operando a frecuencia variable.	33
3.5	Valores de THD para carga lineal ante variaciones en los valores de capacitancia e inductancia del filtro LC para control operando a frecuencia variable.	37

3.6	Valores de error en estado estacionario para carga lineal ante variaciones en los valores de capacitancia e inductancia del filtro LC para control operando a frecuencia variable.	37
3.7	Valores de THD para carga no lineal ante variaciones en los valores de capacitancia e inductancia del filtro LC para control operando a frecuencia variable.	39
3.8	Valores de error en estado estacionario para carga no lineal ante variaciones en los valores de capacitancia e inductancia del filtro LC para control operando a frecuencia variable.	39
3.9	Valores de THD para carga desbalanceada ante variaciones en los valores de capacitancia e inductancia del filtro LC para control operando a frecuencia variable.	41
3.10	Valores de error en estado estacionario para carga desbalanceada ante variaciones en los valores de capacitancia e inductancia del filtro LC para control operando a frecuencia variable.	42
4.1	Parámetros utilizados en simulación del sistema VSI con filtro LC para el algoritmo operando a frecuencia fija.	50
4.2	Valores THD y error en estado estacionario de voltajes de fase con carga lineal para control operando a frecuencia fija.	53
4.3	Valores THD y error en estado estacionario de voltajes de fase con carga no lineal para control operando a frecuencia fija.	54
4.4	Valores THD y error en estado estacionario de voltajes de fase con carga desbalanceada para control operando a frecuencia fija.	56
4.5	Valores de THD para carga lineal ante variaciones en los valores de capacitancia e inductancia del filtro LC para control operando a frecuencia fija.	59
4.6	Valores de error en estado estacionario para carga lineal ante variaciones en los valores de capacitancia e inductancia del filtro LC para control operando a frecuencia fija.	59
4.7	Valores de THD para carga no lineal ante variaciones en los valores de capacitancia e inductancia del filtro LC para control operando a frecuencia fija.	62
4.8	Valores de error en estado estacionario para carga no lineal ante variaciones en los valores de capacitancia e inductancia del filtro LC para control operando a frecuencia fija.	62
4.9	Valores de THD para carga desbalanceada ante variaciones en los valores de capacitancia e inductancia del filtro LC para control operando a frecuencia fija.	64
4.10	Valores de error en estado estacionario para carga desbalanceada ante variaciones en los valores de capacitancia e inductancia del filtro LC para control operando a frecuencia fija.	64
5.1	Valores de THD, error y frecuencia de conmutación promedio para distintos valores de λ_{min}	72
5.2	Valores de THD, error y frecuencia de conmutación promedio para distintos valores de λ_{vmc}	75
5.3	Parámetros de filtro Butterworth.	78
5.4	Valores de THD y error para algoritmo operando a frecuencia variable con implementación de observador de estados evaluado para distintas cargas.	98
5.5	Valores de THD y error para algoritmo operando a frecuencia fija con implementación de observador de estados evaluado para distintas cargas.	103

5.6	Valores de THD error y frecuencia de conmutación promedio para distintos valores de λ_{min} con implementación de observador de estados.	105
5.7	Valores de THD, error y frecuencia de conmutación promedio para distintos valores de λ_{vmc} con implementación de observador de estados.	106