

Índice

1. Introducción General	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Alcances del Proyecto	4
1.4. Metodología	5
1.5. Revisión Bibliográfica	7
2. Inversor Fuente de Voltaje	10
2.1. Marco Teórico	10
2.2. Topología del Inversor Fuente de Voltaje	11
2.2.1. Circuito de Potencia	12
2.2.2. Enlace DC	12
2.2.3. Conmutación del Inversor	12
2.3. Estados Válidos de Conmutación del Inversor Fuente de Voltaje	13
2.4. Modelo Matemático del Inversor Fuente de Voltaje	14
2.5. Modulación del Inversor Fuente de Voltaje	16
2.6. Simulación de Técnica de Modulación Aplicada al VSI en Estado Estacionario	17
2.7. Análisis de Resultados Obtenidos por Simulación	19
2.7.1. THD	19
2.8. Resultados de Simulación en Estado Transientes	20
2.9. Implementación Experimental de Técnica de Modulación en el VSI en Estado Estacionario	21
2.10. Análisis de Resultados Obtenidos Experimentalmente	22
2.10.1. THD	22
2.11. Resultados Experimentales en Estado Transientes	24
2.12. Aplicaciones	25
3. Esquema de Control Propuesto para el Inversor Fuente de Voltaje	27
3.1. Principios del Control Predictivo en Convertidores de Potencia	27
3.2. Esquema de Control Propuesto para el Inversor Fuente de Voltaje	27
3.2.1. Esquema de Control	28
3.2.2. Modelo de Predicción	28
3.2.3. Función de Costos (g)	30
3.3. Resultados de Simulación en Estado Estacionario	32

3.4.	Análisis de Resultados	35
3.4.1.	THD	35
3.4.2.	Error	37
3.5.	Resultados de Simulación en Estado Transientes	38
4.	Propuesta de Modulación para el Control Predictivo en el VSI	40
4.1.	Propuesta de Modulación para el Control Predictivo	40
4.2.	Esquema de la Técnica de Control a Frecuencia Fija de Conmutación .	41
4.3.	Resultados de Simulación en Estado Estacionario	44
4.4.	Análisis de Resultados	47
4.4.1.	THD	47
4.4.2.	Error	49
4.5.	Resultados Obtenidos por Simulación en Estado Transientes	50
5.	Implementación Experimental	52
5.1.	Armado y Montaje del Convertidor	52
5.2.	Implementación de Estrategia de Conmutación	54
5.3.	Mediciones y Acondicionamiento de Señales	55
5.3.1.	Sensor de Voltaje	55
5.3.2.	Sensor de Corriente	56
5.3.3.	Acondicionador de Señales	58
5.4.	Descripción Circuito de Disparo	59
5.5.	Descripción de Switch de Conmutación IGBT	60
5.6.	Programación del DSP	61
5.6.1.	Manejo de Interrupciones	61
5.6.2.	Comunicación con FPGA	61
5.6.3.	Lectura de Sensores	62
5.6.4.	Algoritmo de Control	64
5.6.5.	Compensación del Retardo	65
5.7.	Resultados Experimentales en Estado Estacionario	67
5.7.1.	THD	69
5.7.2.	Error	72
5.8.	Resultados Experimentales en Estado Transientes	73
6.	Comparación de Resultados	76
6.1.	Comparación de Resultados Obtenidos de la Modulación Simulada e Implementada Experimentalmente	76
6.2.	Comparación de Resultados Obtenidos del Control Predictivo Simulado e Implementado Experimentalmente	76

6.3. Comparación de Resultados Obtenidos de la Simulación del Control Predictivo Conmutando a Frecuencia Variable y a Frecuencia Fija	78
7. Conclusiones	80
7.1. Trabajo Futuro a Realizar en el VSI	82
8. Anexos	83
8.1. Código de FPGA	83
8.2. Código de DSP	89
8.2.1. Algoritmo Modulación	89
8.2.2. Algoritmo Control Predictivo	91
8.3. Esquemático del Circuito Acondicionador de Señales	95
8.4. Esquemático del Circuito Sensor de Voltaje	96
8.5. Esquemático del Circuito Sensor de Corriente	97
8.6. Esquemático del Circuito Switch IGBT	98

Índice de Figuras

1.	Diagrama de bloques del trabajo del inversor fuente de voltaje.	10
2.	Inversor fuente de voltaje y carga $R-L$ en su salida.	11
3.	Topología del inversor fuente de voltaje abordada en esta memoria.	11
4.	Modelo matemático simplificado de la carga en el inversor fuente de voltaje.	14
5.	Señal de modulación para el inversor fuente de voltaje de 2 niveles.	16
6.	Modulación aplicada a las 3 señales de referencia y voltaje en la carga (v_{aN}).	17
7.	Resultados de simulación técnica de modulación aplicado al VSI con $m=0,4$. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace DC (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	18
8.	Resultados de simulación técnica de modulación aplicado al VSI con $m=0,8$. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace DC (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	18
9.	Espectros de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido al simular un índice de modulación de $m=0,4$ en el VSI.	19
10.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido al simular un índice de modulación de $m=0,8$ en el VSI.	19
11.	Resultados obtenidos por simulación técnica de modulación aplicado al VSI con un cambio de índice de modulación 0,4 a 0,8 y con una frecuencia de 50[H]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace DC (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	20
12.	Resultados experimentales técnica de modulación aplicado al VSI con $m=0,4$. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace DC (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	21
13.	Resultados experimentales técnica de modulación aplicado al VSI con $m=0,8$. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace DC (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	22
14.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido al aplicar experimen- talmente un índice de modulación de $m=0,4$ en el VSI.	23
15.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido al aplicar experimen- talmente un índice de modulación de $m=0,8$ en el VSI.	23
16.	Resultados experimentales técnica de modulación aplicado al VSI con un cambio de índice de modulación 0,4 a 0,8 y con una frecuencia de 50[H]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace DC (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	24
17.	Aplicación del VSI en la inserción de energías renovables a una micro-red.	25
18.	Aplicación del VSI en el control de motores trifásicos.	26
19.	Diagrama de bloques del control predictivo de corriente.	28

20.	Resultados de simulación control predictivo de corriente aplicado al VSI con una referencia de 2[A] y 25[Hz]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	32
21.	Resultados de simulación control predictivo de corriente aplicado al VSI con una referencia de 2[A] y 50[Hz]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	33
22.	Resultados de simulación control predictivo de corriente aplicado al VSI con una referencia de 4[A] y 25[Hz]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	33
23.	Resultados de simulación control predictivo de corriente aplicado al VSI con una referencia de 4[A] y 50[Hz]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	34
24.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido al simular el control predictivo de corriente con una referencia de 2[A] y 25[Hz].	35
25.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido al simular el control predictivo de corriente con una referencia de 2[A] y 50[Hz].	35
26.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido al simular el control predictivo de corriente con una referencia de 4[A] y 25[Hz].	36
27.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido al simular el control predictivo de corriente con una referencia de 4[A] y 50[Hz].	36
28.	Resultados obtenidos por simulación del control predictivo de corriente aplicado al VSI con un cambio de referencia de 2[A] a 4[A] y con una frecuencia de 50[Hz]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	38
29.	Resultados obtenidos por simulación del control predictivo de corriente aplicado al VSI con un cambio de referencia de 4[A] a 2[A] y con una frecuencia de 50[Hz]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	38
30.	Resultados obtenidos por simulación del control predictivo de corriente aplicado al VSI con un cambio de referencia de 25[Hz] a 50[Hz] y con una amplitud de 4[A]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	39
31.	Resultados obtenidos por simulación del control predictivo de corriente aplicado al VSI con un cambio de referencia de 50[Hz] a 25[Hz] y con una amplitud de 2[A]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	39
32.	Sector disponible para el inversor fuente de voltaje.	40

33.	Diagrama de bloques del control predictivo de corriente con una frecuencia fija de conmutación.	41
34.	Patrón de conmutación para los vectores óptimos.	43
35.	Resultados de simulación control predictivo de corriente aplicado al VSI con una referencia de 2[A] y 25[Hz]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	44
36.	Resultados de simulación control predictivo de corriente aplicado al VSI con una referencia de 2[A] y 50[Hz]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	45
37.	Resultados de simulación control predictivo de corriente aplicado al VSI con una referencia de 4[A] y 45[Hz]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	45
38.	Resultados de simulación control predictivo de corriente aplicado al VSI con una referencia de 4[A] y 50[Hz]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	46
39.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido al simular el control predictivo de frecuencia fija de conmutación, con una referencia de 2[A] y 25[Hz].	47
40.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido al simular el control predictivo de frecuencia fija de conmutación, con una referencia de 2[A] y 50[Hz].. . . .	47
41.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido al simular el control predictivo de frecuencia fija de conmutación, con una referencia de 4[A] y 25[Hz].	48
42.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido al simular el control predictivo de frecuencia fija de conmutación, con una referencia de 4[A] y 50[Hz].	48
43.	Resultados obtenidos por simulación del control predictivo de corriente aplicado al VSI con un cambio de referencia de 2[A] a 4[A] y con una frecuencia de 50[H]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	50
44.	Resultados obtenidos por simulación del control predictivo de corriente aplicado al VSI con un cambio de referencia de 4[A] a 2[A] y con una frecuencia de 50[H]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	50
45.	Resultados obtenidos por simulación del control predictivo de corriente aplicado al VSI con un cambio de referencia de 25[Hz] a 50[Hz] y con una amplitud de 4[A]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	51

46.	Resultados obtenidos por simulación del control predictivo de corriente aplicado al VSI con un cambio de referencia de 50[Hz] a 25[Hz] y con una amplitud de 2[A]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace DC (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	51
47.	Estructura diseñada en Autodesk Inventor para el soporte del VSI.	52
48.	Estructura que soportará al inversor fuente de voltaje.	53
49.	Tiempo muerto aplicado a la conmutación de la primera pierna del VSI.	54
50.	Circuito del sensor de voltaje.	55
51.	Esquema de señales sensor de voltaje.	56
52.	Circuito del sensor de Corriente.	57
53.	Esquema de señales sensores de corrientes.	57
54.	Circuito acondicionador de señales.	58
55.	Esquema de señales acondicionador de señales.	58
56.	Circuito de disparo para activar switches IGBTs.	59
57.	Señales de comunicación entre FPGA y circuito de disparo.	60
58.	Circuito utilizado para activar y desactivar el IGBT.	60
59.	Señales de comunicación entre FPGA y DSP.	61
60.	Gráfica voltajes medidos v/s voltaje leído por la DSP.	62
61.	Gráfica corrientes medidas v/s voltaje leído por la DSP.	63
62.	Secuencia que sigue el algoritmo de control.	64
63.	Compensación del retardo.	65
64.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al VSI con una referencia de 2[A] y 25[Hz]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace DC (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	67
65.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al VSI con una referencia de 2[A] y 50[Hz]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace DC (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	68
66.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al VSI con una referencia de 4[A] y 25[Hz]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace DC (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	68
67.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al VSI con una referencia de 4[A] y 50[Hz]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace DC (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	69
68.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido experimentalmente al aplicar el control predictivo, con una referencia de 2[A] y 25[Hz].	70
69.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido experimentalmente al aplicar el control predictivo, con una referencia de 2[A] y 50[Hz].	70

70.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido experimentalmente al aplicar el control predictivo, con una referencia de 4[A] y 25[Hz].	71
71.	Espectro de los armónicos presentes en el voltaje v_{an} obtenido experimentalmente al aplicar el control predictivo, con una referencia de 4[A] y 50[Hz].	71
72.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al VSI con un cambio de referencia de 2[A] a 4[A] y con una frecuencia de 50[H]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	73
73.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al VSI con un cambio de referencia de 4[A] a 2[A] y con una frecuencia de 50[H]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	74
74.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al VSI con un cambio de referencia de 25[Hz] a 50[Hz] y con una amplitud de 4[A]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	74
75.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al VSI con un cambio de referencia de 50[Hz] a 25[Hz] y con una amplitud de 2[A]. <i>Ch1</i> : Voltaje en el enlace <i>DC</i> (v_{DC}); <i>Ch2</i> : Corriente de carga i_a ; <i>Ch3</i> : Corriente de carga i_b ; <i>Ch4</i> : Voltaje v_{an}	75
76.	Esquemático circuito acondicionador de señales.	95
77.	Esquemático circuito sensor de voltaje.	96
78.	Esquemático circuito sensor de corriente.	97
79.	Esquemático circuito Switch IGBT.	98

Índice de Tablas

1.	Estados válidos de conmutación, voltajes entre líneas de salida y corrientes en el enlace DC	13
2.	Tabla de parámetros utilizados en la simulación de la modulación.	17
3.	Porcentaje de distorsión armónica obtenida de los datos arrojados por la simulación.	20
4.	Porcentaje de distorsión armónica obtenida de los datos experimentales.	23
5.	Tabla de parámetros utilizados en la simulación del control predictivo.	32
6.	Porcentaje de distorsión armónica obtenida de los datos arrojados por la simulación.	36
7.	Porcentaje de error de la corriente i_a obtenido por simulación al evaluar el control predictivo.	37
8.	Tabla de parámetros utilizados en la simulación del control predictivo operando a frecuencia fija de conmutación.	44
9.	Porcentaje de distorsión armónica obtenida de los datos arrojados por la simulación.	48
10.	Porcentaje de error obtenido por simulación al evaluar el control predictivo con una frecuencia fija de conmutación.	49
11.	Tabla de parámetros utilizados en la implementación experimental del control predictivo.	67
12.	Porcentaje de distorsión armónica presentes en el voltaje v_{an} obtenidos al aplicar experimentalmente el control predictivo.	72
13.	Porcentaje de error de la corriente de salida i_a obtenido experimentalmente al evaluar el control predictivo.	72
14.	Porcentaje de distorsión armónica del voltaje v_{an} . Los datos arrojados por simulación e implementación experimental de la modulación.	76
15.	Porcentaje de distorsión armónica del voltaje v_{an} . Los datos fueron obtenidos de la simulación e implementación experimental del control predictivo.	76
16.	Porcentaje de distorsión armónica de la corriente i_a . Los datos fueron obtenidos de la simulación e implementación experimental del control predictivo.	77
17.	Porcentaje de error de la corriente i_a . Los datos fueron obtenidos de la simulación e implementación experimental del control predictivo.	77
18.	Porcentaje de distorsión armónica del voltaje v_{an} . Los datos fueron obtenidos de la simulación del control predictivo clásico y del control predictivo conmutando a frecuencia fija.	78
19.	Porcentaje de distorsión armónica de la corriente i_a . Los datos fueron obtenidos de la simulación del control predictivo clásico y del control predictivo conmutando a frecuencia fija.	78
20.	Porcentaje de error de la corriente i_a . Los datos fueron obtenidos de la simulación del control predictivo clásico y del control predictivo conmutando a frecuencia fija.	79

Nomenclatura

- i_a, i_b, i_c : Corrientes de salida del inversor.
- i_α^*, i_β^* : Corrientes de referencia para el control predictivo en coordenadas $\alpha \beta$.
- i_α^p, i_β^p : Corrientes predichas por el control predictivo.
- v_{an} : Voltaje entre el punto a y el punto n del inversor.
- v_{DC} : Voltaje en el enlace de entrada del inversor.
- $R-L$: Circuito compuesto de una resistencia en serie a un inductor.
- v_L : Voltaje en el inductor.
- L : Inductancia de carga.
- v_R : Voltaje en la resistencia.
- T_s : Tiempo de muestreo del control predictivo.
- R : Resistencia de carga.
- v_{cr} : Señal triangular utilizada en la modulación.
- v_a^*, v_b^*, v_c^* : Señal sinusoidal utilizada en la modulación.

Abreviaciones

- VSI: Inversor fuente de voltaje (Voltage Source Inverter).
- DSP: Procesador digital de señales (Digital Signal Processor).
- LCEEP: Laboratorio de Conversión de Energías y Electrónica de Potencia.
- IGBT: Transistor bipolar de compuerta aislada (Insulated-Gate Bipolar Transistor).
- PWM: Modulación por ancho de pulso (Pulse Width Modulation).
- FPGA: Arreglo de compuertas lógicas programables (Field Programmable Gate Array).