

# Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción General</b>	<b>1</b>
1.1	Descripción de la problemática . . . . .	4
1.2	Marco teórico . . . . .	9
1.2.1	Convertidores DC-DC . . . . .	9
1.2.1.1	Regulador de tensión básico . . . . .	10
1.2.1.2	El convertidor conmutado básico . . . . .	10
1.2.1.3	El convertidor reductor o buck . . . . .	12
1.2.1.4	El convertidor elevador o boost . . . . .	13
1.2.1.5	El convertidor reductor-elevador o buck-boost . . . . .	14
1.2.1.6	El convertidor Ćuk . . . . .	15
1.2.1.7	El convertidor SEPIC . . . . .	16
1.2.2	El convertidor versátil buck-boost . . . . .	17
1.2.2.1	Obtención del modelo del convertidor . . . . .	19
1.2.3	Clases de frecuencia de conmutación . . . . .	25
1.2.4	Algoritmos MPPT . . . . .	28
1.2.4.1	Algoritmo de Perturbar & Observar (P&O) . . . . .	29
1.2.4.2	Algoritmo de Conductancia Incremental . . . . .	32
1.2.4.3	Voltaje fraccional de circuito abierto . . . . .	34
1.2.4.4	Corriente fraccionaria de cortocircuito . . . . .	35
1.3	Objetivos . . . . .	37
1.3.1	Objetivo general . . . . .	37
1.3.2	Objetivos específicos . . . . .	37
1.4	Alcances y limitaciones . . . . .	37

1.5	Metodología . . . . .	39
1.5.1	Etapa I: Investigación y simulación de algoritmos MPPT . . . . .	39
1.5.2	Etapa II: Modelamiento del convertidor versátil buck-boost . . . . .	39
1.5.3	Etapa III: Conceptos de control predictivo . . . . .	39
<b>2</b>	<b>Algoritmos MPPT</b>	<b>42</b>
2.1	Características del panel fotovoltaico . . . . .	42
2.2	Circuitos de simulación de algoritmos MPPT . . . . .	45
2.3	Simulación método P&O . . . . .	47
2.4	Simulación método conductancia incremental . . . . .	49
2.5	Simulación voltaje fraccionario de circuito abierto . . . . .	50
2.6	Simulación corriente fraccionaria de cortocircuito . . . . .	51
<b>3</b>	<b>Diseño del controlador</b>	<b>54</b>
3.1	El control predictivo de estados finitos basado en modelo . . . . .	54
3.1.1	El principio del control FCS-MPC . . . . .	55
3.1.2	Tipos de control en modo corriente . . . . .	56
3.1.2.1	Control de corriente de valor valle . . . . .	57
3.1.2.2	Control de corriente de valor peak . . . . .	58
3.1.2.3	Control de corriente de valor promedio . . . . .	58
3.2	Implementación de una estrategia de control FCS-MPC para un MPPT . . . . .	59
3.2.1	Estrategia de control multilazo para el MPPT . . . . .	59
3.2.2	Control FCS-MPC . . . . .	61
3.3	Control FCS-MPC de frecuencia cuasi-constante . . . . .	63
3.3.1	Estados definidos para el controlador . . . . .	64
3.3.2	Funcionamiento y modos de operación del controlador . . . . .	64
3.3.3	Banda de histéresis de ancho fijo . . . . .	71
3.3.4	El controlador PI digital . . . . .	72
3.3.5	Estabilidad y ancho de banda de los controladores . . . . .	73
3.3.6	El controlador digital de señales DSC . . . . .	78
3.3.7	Implementación digital del controlador del lazo interno de corriente . . . . .	78

3.3.7.1	Programa principal sin prioridad de interrupción . . . . .	79
3.3.7.2	Subfunción A con prioridad de interrupción . . . . .	80
3.3.7.3	Subfunción B con prioridad de interrupción . . . . .	81
3.3.8	Implementación digital del lazo interno de corriente, lazo externo de tensión y algoritmo MPPT . . . . .	82
3.3.8.1	Programa principal sin rutina de interrupción . . . . .	83
3.3.8.2	Algoritmo MPPT P&O . . . . .	83
3.3.8.3	Controlador PI . . . . .	83
3.3.8.4	Subfunciones con prioridad de interrupción . . . . .	83
<b>4</b>	<b>Resultados de simulación y experimentales</b>	<b>84</b>
4.1	Resultados control FCS-MPC . . . . .	84
4.1.1	Resultados del lazo interno de corriente . . . . .	85
4.1.2	Resultados del lazo externo de tensión y el lazo interno de corriente . . . . .	90
4.1.3	Resultados de simulación incorporando un algoritmo MPPT . . . . .	93
4.2	Resultados control FCS-MPC a frecuencia cuasi-constante . . . . .	96
4.2.1	Lazo interno de corriente . . . . .	98
4.2.1.1	Lazo interno de corriente modo buck . . . . .	99
4.2.1.2	Lazo interno de corriente modo boost . . . . .	102
4.2.2	Banda de histéresis . . . . .	107
4.2.2.1	Banda de histéresis modo buck . . . . .	107
4.2.2.2	Banda de histéresis modo boost . . . . .	109
4.2.3	Lazo externo de tensión . . . . .	110
4.2.3.1	Lazo externo de tensión modo buck . . . . .	111
4.2.3.2	Lazo externo de tensión modo boost . . . . .	114
4.2.4	Resultados del seguimiento del máximo punto de potencia . . . . .	117
4.2.4.1	Comportamiento del sistema ante cambios de irradiancia . . . . .	118
4.2.4.2	Comportamiento del sistema ante condiciones de sombreado parcial . . . . .	119
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>121</b>

<b>Bibliografía</b>	<b>123</b>
<b>Anexos</b>	<b>128</b>



# Índice de figuras

Figura 1.1	Clasificación de los métodos de control predictivo utilizados en la electrónica de potencia [1]. . . . .	2
Figura 1.2	Curvas características I-V de un panel solar para diferentes niveles de irradiación [5]. . . . .	5
Figura 1.3	Curvas características P-V de un panel fotovoltaico para diferentes niveles de irradiación [5]. . . . .	5
Figura 1.4	Curvas características I-V de un panel solar para diferentes niveles de temperatura [5]. . . . .	6
Figura 1.5	Características P-V para diferentes niveles de temperatura [5]. . . . .	6
Figura 1.6	Generación de dos máximos locales por la activación de un diodo de bypass. . . . .	7
Figura 1.7	Diagrama de bloques general para un sistema de MPPT. . . . .	7
Figura 1.8	Sistema fotovoltaico de carga de batería y curva I-V de su módulo solar sin (un peak de potencia) y bajo condición de sombreado parcial (dos peaks de potencia). . . . .	8
Figura 1.9	Regulador lineal básico [13]. . . . .	10
Figura 1.10	(a) Convertidor DC-DC básico conmutado, (b) circuito equivalente para conmutación, (c) forma de onda de la tensión de salida [13]. . . . .	11
Figura 1.11	(a) Topología convertidor reductor o buck, (b) circuito equivalente cuando el interruptor se encuentra cerrado, (c) circuito equivalente cuando el interruptor se encuentra abierto. . . . .	12
Figura 1.12	(a) Topología convertidor elevador o boost, (b) circuito equivalente cuando el interruptor se encuentra cerrado, (c) circuito equivalente cuando el interruptor se encuentra abierto. . . . .	13

Figura 1.13	(a) Topología convertidor buck-boost, (b) circuito equivalente cuando el interruptor se encuentra cerrado, (c) circuito equivalente cuando el interruptor se encuentra abierto. . . . .	14
Figura 1.14	(a) Topología convertidor Ćuk, (b) circuito equivalente cuando el interruptor se encuentra abierto, (c) circuito equivalente cuando el interruptor se encuentra cerrado. . . . .	16
Figura 1.15	(a) Topología convertidor SEPIC, (b) circuito equivalente cuando el interruptor se encuentra cerrado, (c) circuito equivalente cuando el interruptor se encuentra abierto. . . . .	17
Figura 1.16	Topología del convertidor versátil buck-boost. . . . .	18
Figura 1.17	Configuración del convertidor para el estado boost. . . . .	20
Figura 1.18	Configuración del convertidor para el estado común. . . . .	21
Figura 1.19	Configuración del convertidor para el estado buck. . . . .	21
Figura 1.20	Corrientes y voltajes establecidos para la obtención del modelo conmutado del convertidor versátil buck-boost. . . . .	22
Figura 1.21	Forma de onda de la señal moduladora, portadora y el ciclo de trabajo resultante de una estrategia de conmutación basada en PWM. . . . .	26
Figura 1.22	Forma de onda del ciclo de trabajo al establecer una estrategia de control con frecuencia de conmutación cuasi-constante. . . . .	27
Figura 1.23	Forma de onda del ciclo de trabajo al establecer una estrategia de control de frecuencia variable. . . . .	27
Figura 1.24	Diagrama de flujo del algoritmo P&O. . . . .	30
Figura 1.25	Comportamiento de la potencia del panel solar ante cambios en el voltaje de referencia. a) Comportamiento de la potencia del panel debido al aumento del voltaje. b) Comportamiento de la potencia del panel debido al decremento del voltaje. c) Decremento en la potencia actual del panel debido a un decremento del voltaje en sus terminales. d) Disminución de la potencia del panel debido al aumento del voltaje en sus terminales. . . . .	31
Figura 1.26	Valor de la derivada de la potencia con respecto al voltaje. . . . .	32
Figura 1.27	Diagrama de flujo del algoritmo de conductancia incremental. . . . .	33

Figura 1.28	Diagrama de flujo del método de voltaje fraccional de circuito abierto. .	35
Figura 1.29	Diagrama de flujo del método de corriente fraccionaria de cortocircuito.	36
Figura 1.30	Diagrama propuesto para el desarrollo del proyecto. . . . .	40
Figura 2.1	Panel solar con dos diodos de bypass. En (a) circulación de corriente sin sombreado en las celdas. En (b) circulación de corriente con sombreado parcial en una celda. En (c) curva característica I-V del panel solar sin sombreado. En (d) curva característica I-V del panel solar con sombreado.	44
Figura 2.2	Diagrama de bloques simplificado para un MPPT. . . . .	45
Figura 2.3	Circuito implementado en PSIM para la simulación del algoritmo perturbar y observar y conductancia incremental. . . . .	46
Figura 2.4	Circuito implementado para simular la técnica de voltaje fraccional de circuito abierto. . . . .	47
Figura 2.5	Circuito utilizado para la simulación del método de corriente fraccionaria de cortocircuito. . . . .	47
Figura 2.6	Comportamiento del voltaje y la corriente del panel fotovoltaico implementando un algoritmo P&O con cambios de referencia de 0.2 V. . . .	48
Figura 2.7	Comportamiento del voltaje y la corriente del panel fotovoltaico implementando un algoritmo P&O con cambios de referencia de 2 V. . . . .	49
Figura 2.8	Comportamiento de la corriente, el voltaje y la potencia del panel fotovoltaico implementando un algoritmo de conductancia incremental con cambios de referencia de 0.4 V. . . . .	50
Figura 2.9	Comportamiento de la corriente, el voltaje y la potencia del panel fotovoltaico implementando un algoritmo de voltaje fraccional de circuito abierto. . . . .	51
Figura 2.10	Comportamiento de la corriente, el voltaje y la potencia del panel fotovoltaico implementando un algoritmo de corriente fraccionaria de cortocircuito. . . . .	52
Figura 3.1	Esquema básico del control predictivo [29]. . . . .	55
Figura 3.2	Cálculos y mediciones que realiza el algoritmo de control predictivo [29].	56

Figura 3.3	Forma de onda de la corriente del inductor al establecer un control de corriente de valle [32]. . . . .	57
Figura 3.4	Forma de onda de la corriente del inductor al establecer un control de corriente de peak [32]. . . . .	58
Figura 3.5	Forma de onda de la corriente del inductor al establecer un control de corriente de valor promedio [32]. . . . .	59
Figura 3.6	Implementación de una estrategia de control de doble lazo. . . . .	60
Figura 3.7	Controlador PI integrado al esquema de control para el MPPT [34]. . .	61
Figura 3.8	Predicción del valor de la variable de interés a partir de distintas configuraciones que adopta el convertidor versátil buck-boost. . . . .	63
Figura 3.9	Control de corriente de peak cuando el tiempo de cálculo excede el tiempo de permanencia del estado. Se observa un incremento del periodo de conmutación. . . . .	65
Figura 3.10	Control de corriente de valle cuando el tiempo de cálculo y de obtención de señales son suficientes para mantener frecuencia de conmutación constante. . . . .	66
Figura 3.11	Forma de onda de un control de corriente de peak a frecuencia cuasi-constante de 100 kHz. . . . .	67
Figura 3.12	Forma de onda de un control de corriente de valle a frecuencia cuasi-constante de 100 kHz. . . . .	68
Figura 3.13	Forma de onda de un control de corriente de valle a frecuencia cuasi-constante de 100 kHz. . . . .	69
Figura 3.14	Forma de onda de un control de corriente de peak a frecuencia cuasi-constante de 100 kHz. . . . .	70
Figura 3.15	Banda de histéresis implementada para el convertidor en modo buck. El ancho se fija en función del tiempo de permanencia $t_2$ . . . . .	71
Figura 3.16	Banda de histéresis implementada para el convertidor en modo boost. El ancho se fija en función del tiempo de permanencia $t_2$ . . . . .	72
Figura 3.17	Control digital multilazo implementado con un convertidor versátil buck-boost. . . . .	73



Figura 3.18	Diagrama de bode de la respuesta en frecuencia del lazo externo implementado para los cuatro modos de operación. . . . .	77
Figura 3.19	Diagrama de flujo de la implementación digital del controlador del lazo interno de corriente. . . . .	79
Figura 3.20	Diagrama de flujo del controlador digital implementado. . . . .	82
Figura 4.1	Esquema de la configuración utilizada para pruebas de control de corriente.	85
Figura 4.2	Respuesta simulada del lazo interno de corriente basado en FCS-MPC. Corriente de referencia igual a 6 A. Voltaje de entrada igual a 17 V y voltaje de salida igual a 12 V. . . . .	86
Figura 4.3	Comportamiento de la corriente de entrada del convertidor y estados conmutados que utilizados para seguir la referencia de corriente. . . . .	86
Figura 4.4	Resultados de simulación del lazo interno de corriente aplicado a un convertidor versátil buck-boost. Voltaje de entrada 8 V y voltaje de salida 12 V. . . . .	87
Figura 4.5	Comportamiento de la corriente de entrada y salida aplicando un cambio de referencia de corriente de 3 A a 6 A. Voltaje de entrada 17 V y voltaje de salida 12 V. . . . .	88
Figura 4.6	Comportamiento de la corriente de entrada y salida aplicando un cambio de referencia de corriente de 6 A a 3 A. Voltaje de entrada 17 V y voltaje de salida 12 V. . . . .	88
Figura 4.7	Comportamiento de la corriente de entrada y salida aplicando un cambio de referencia de corriente de 3 A a 6 A. Voltaje de entrada 8 V y voltaje de salida 12 V. . . . .	89
Figura 4.8	Comportamiento de la corriente de entrada y salida aplicando un cambio de referencia de corriente de 6 A a 3 A. Voltaje de entrada 8 V y voltaje de salida 12 V. . . . .	89
Figura 4.9	Esquema de la configuración utilizada para pruebas del lazo interno de corriente y el lazo externo de tensión. . . . .	90

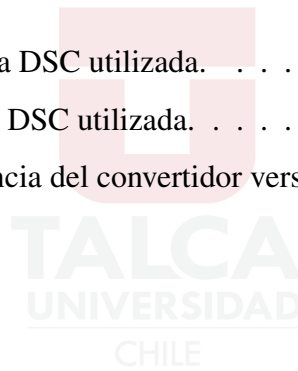
Figura 4.10	Comportamiento del voltaje y la corriente de entrada del convertidor cuando el voltaje de referencia cambia de 16 V a 17 V. . . . .	91
Figura 4.11	Comportamiento del voltaje y la corriente de entrada del convertidor cuando el voltaje de referencia cambia de 17 V a 16 V. . . . .	91
Figura 4.12	Comportamiento del voltaje y la corriente de entrada del convertidor cuando el voltaje de referencia cambia de 8 V a 9 V. . . . .	92
Figura 4.13	Comportamiento del voltaje y la corriente de entrada del convertidor cuando el voltaje de referencia cambia de 9 V a 8 V. . . . .	92
Figura 4.14	Esquema de la configuración utilizada para pruebas del algoritmo MPPT.	93
Figura 4.15	Comportamiento del controlador bajo condiciones ideales del panel solar y luego frente a disminución de irradiancia. . . . .	94
Figura 4.16	Comportamiento del controlador ante una condición de sombreado parcial del panel solar con disminución de irradiancia. . . . .	95
Figura 4.17	Comportamiento del controlador ante un cambio de sombreado parcial a máxima capacidad del panel fotovoltaico. . . . .	96
Figura 4.18	Configuración experimental para la realización de las diferentes pruebas experimentales: (a) Convertidor versátil buck-boost, (b) Controlador digital de señales, (c) fuente de alimentación DC de entrada, (d) Fuente de alimentación DC de salida, (e) Carga electrónica DC en modo de voltaje constante, (f) Osciloscopio, (g) Fuente de alimentación auxiliar para la DSC, sensores de corriente y voltaje de convertidor y controladores MOSFET, (h) Sondas diferenciales de voltaje, (i) Fuente de alimentación auxiliar para sondas diferenciales de voltaje, (j) Laptop para programar la DSC, (k) Protección de acrílico para probar circuitos. . .	97
Figura 4.19	Esquema de la configuración utilizada para pruebas del lazo interno de corriente. . . . .	98

Figura 4.20	Respuestas simuladas (a), (c) y experimentales (b), (d) de la corriente de entrada del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante cuando la referencia de corriente es $i_{ref}$ : (a,b) es igual a 3 A, (c,d) es igual a 6 A. El convertidor opera en modo buck ( $V_g = 18$ V y $V_o = 12$ V). CH1: $i_g$ (2 A/div), CH2: $i_o$ (5 A/div), CH3: $V_g$ (16 V/div), CH4: $V_o$ (16 V/div). . . . .	99
Figura 4.21	Respuestas simuladas (a),(c) y experimentales (b),(d) de la corriente de entrada del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante cuando la referencia es $i_{ref}$ : (a,b) cambios desde 3 A a 6 A, y (c,d) desde 6 A a 3 A. El convertidor opera en modo buck ( $V_g = 18$ V y $V_o = 12$ V). CH1: $i_g$ (2 A/div), CH2: $i_o$ (5 A/div), CH3: $V_g$ (16 V/div), CH4: $V_o$ (16 V/div). . . . .	100
Figura 4.22	Respuestas simuladas (a),(c) y experimentales (b),(d) respuestas de la corriente de entrada del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante cuando la referencia es $i_{ref}$ : (a,b) es igual a 2 A, (c,d) es igual a 4 A. El convertidor opera en modo buck ( $V_g = 24$ V y $V_o = 12$ V). CH1: $i_g$ (2 A/div), CH2: $i_o$ (5 A/div), CH3: $V_g$ (16 V/div), CH4: $V_o$ (16 V/div). . . . .	101
Figura 4.23	Respuestas simuladas (a),(c) y experimentales (b),(d) respuestas de la corriente de entrada del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante cuando la referencia es $i_{ref}$ : (a,b) cambios desde 2 A a 4 A, y (c,d) desde 4 A a 2 A. El convertidor opera en modo buck ( $V_g = 24$ V y $V_o = 12$ V). CH1: $i_g$ (2 A/div), CH2: $i_o$ (5 A/div), CH3: $V_g$ (16 V/div), CH4: $V_o$ (16 V/div). . . . .	102
Figura 4.24	Respuestas simuladas (a),(c) y experimentales (b),(d) de la corriente de entrada del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante cuando la referencia es $i_{ref}$ : (a,b) es igual a 3 A, (c,d) es igual a 6 A. El convertidor opera en modo boost ( $V_g = 9$ V y $V_o = 12$ V). CH1: $i_g$ (2 A/div), CH2: $i_o$ (5 A/div), CH3: $V_g$ (16 V/div), CH3: $V_o$ (16 V/div). . .	103

Figura 4.25	Respuestas simuladas (a),(c) y experimentales (b),(d) de la corriente de entrada del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante cuando la referencia es $i_{ref}$ : (a,b) cambios desde 3 A a 6 A, y (c,d) desde 6 A a 3 A. El convertidor opera en modo boost ( $V_g = 9$ V y $V_o = 12$ V). CH1: $i_g$ (2 A/div), CH2: $i_o$ (5 A/div), CH3: $V_g$ (16 V/div), CH3: $V_o$ (16 V/div). . . . .	104
Figura 4.26	Respuestas simuladas (a),(c) y experimentales (b),(d) de la corriente de entrada del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante cuando la referencia es $i_{ref}$ : (a,b) es igual a 2 A, (c,d) es igual a 4 A. El convertidor opera en modo boost ( $V_g = 6$ V y $V_o = 12$ V). CH1: $i_g$ (2 A/div), CH2: $i_o$ (5 A/div), CH3: $V_g$ (16 V/div), CH3: $V_o$ (16 V/div). . .	105
Figura 4.27	Respuestas simuladas (a),(c) y experimentales (b),(d) de la corriente de entrada del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante cuando la referencia es $i_{ref}$ : (a,b) cambios desde 3 A a 6 A, y (c,d) desde 6 A a 3 A. El convertidor opera en modo boost ( $V_g = 6$ V y $V_o = 12$ V). CH1: $i_g$ (2 A/div), CH2: $i_o$ (5 A/div), CH3: $V_g$ (16 V/div), CH3: $V_o$ (16 V/div). . . . .	106
Figura 4.28	Respuestas experimentales de la corriente de entrada del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante cuando la referencia es $i_{ref}$ 2 A. El convertidor opera en modo buck. CH1: $i_g$ (2 A/div), CH2: $i_o$ (5 A/div), CH3: $V_g$ (16 V/div), CH4: $V_o$ (16 V/div). . . . .	108
Figura 4.29	Respuesta experimental del control de banda de histéresis en modo buck para una referencia de 2 A. El convertidor opera en modo boost. CH1: $i_g$ (2 A/div), CH2: $i_o$ (5 A/div), CH3: $V_g$ (16 V/div), CH4: $V_o$ (16 V/div). . . . .	110
Figura 4.30	Esquema de la configuración utilizada para pruebas del lazo interno de corriente y el lazo externo de tensión. . . . .	111

- Figura 4.31 Respuestas simuladas (a), (c), (e) y experimentales (b), (d), (f) del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante en conjunto con un controlador PI digital cuando la referencia de voltaje de entrada es  $v_{ref}$ : (a,b) es igual a 16 V, (c,d) es igual a 17 V y (e,f) es igual a 18 V. El convertidor opera en modo buck ( $V_o = 12$  V). CH1:  $i_g$  (2 A/div), CH2:  $i_o$  (5 A/div), CH3:  $V_g$  (10 V/div), CH4:  $V_o$  (10 V/div). . . . . 112
- Figura 4.32 Respuestas simuladas (a), (c) y experimentales (b), (d) del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante en conjunto con un controlador PI digital cuando la referencia de voltaje de entrada  $v_{ref}$  cambia (a,b) desde 16 V a 17 V, y (c,d) desde 17 V a 16 V. El convertidor opera en modo buck. CH1:  $i_g$  (2 A/div), CH2:  $i_o$  (5 A/div), CH3:  $V_g$  (10 V/div), CH4:  $V_o$  (10 V/div). . . . . 113
- Figura 4.33 Respuestas simuladas (a), (c) y experimentales (b), (d) del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante en conjunto con un controlador PI digital cuando la referencia de voltaje de entrada  $v_{ref}$  cambia (a,b) desde 17 V a 18 V, y (c,d) desde 18 V a 17 V. El convertidor opera en modo buck. CH1:  $i_g$  (2 A/div), CH2:  $i_o$  (5 A/div), CH3:  $V_g$  (10 V/div), CH4:  $V_o$  (10 V/div). . . . . 114
- Figura 4.34 Respuestas simuladas (a), (c), (e) y experimentales (b), (d), (f) del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante en conjunto con un controlador PI digital cuando la referencia de voltaje de entrada es  $v_{ref}$ : (a,b) es igual a 8 V, (c,d) es igual a 9 V y (e,f) es igual a 10 V. El convertidor opera en modo boost ( $V_o = 12$  V). CH1:  $i_g$  (2 A/div), CH2:  $i_o$  (5 A/div), CH3:  $V_g$  (10 V/div), CH4:  $V_o$  (10 V/div). . . . . 115
- Figura 4.35 Respuestas simuladas (a), (c) y experimentales (b), (d) del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante en conjunto con un controlador PI digital cuando la referencia de voltaje de entrada  $v_{ref}$  cambia (a,b) desde 8 V a 9 V, y (c,d) desde 9 V a 8 V. El convertidor opera en modo boost. CH1:  $i_g$  (2 A/div), CH2:  $i_o$  (5 A/div), CH3:  $V_g$  (10 V/div), CH4:  $V_o$  (10 V/div). . . . . 116

Figura 4.36	Respuestas simuladas (a), (c) y experimentales (b), (d) del control predictivo de corriente a frecuencia cuasi-constante en conjunto con un controlador PI digital cuando la referencia de voltaje de entrada $v_{ref}$ cambia (a,b) desde 9 V a 10 V, y (c,d) desde 10 V a 9 V. El convertidor opera en modo boost. CH1: $i_g$ (2 A/div), CH2: $i_o$ (5 A/div), CH3: $V_g$ (10 V/div), CH4: $V_o$ (10 V/div). . . . .	117
Figura 4.37	Esquema de la configuración utilizada para pruebas del lazo interno de corriente, el lazo externo de tensión y el algoritmo MPPT. . . . .	118
Figura 4.38	Desempeño del controlador ante cambios de irradiancia. Gráficas de potencia, eficiencia, corriente y voltaje en los bornes del panel. . . . .	119
Figura 4.39	Desempeño del controlador bajo condiciones de sombreado. Gráficas de potencia, eficiencia, corriente y voltaje en los bornes del panel. . . . .	120
Figura 1	Vista frontal de la DSC utilizada. . . . .	128
Figura 2	Vista superior de DSC utilizada. . . . .	129
Figura 3	Circuito de potencia del convertidor versátil buck-boost. . . . .	131



# Índice de tablas

Tabla 1.1	Componentes del convertidor versátil buck-boost. . . . .	19
Tabla 1.2	16 configuraciones que puede adoptar el convertidor versátil buck-boost.	20
Tabla 2.1	Parámetros del panel seleccionado para realizar simulaciones de algoritmos MPPT . . . . .	43
Tabla 3.1	Valores de voltaje y corriente de referencia para evaluar el ancho de banda del controlador del lazo interno de corriente. . . . .	74
Tabla 3.2	Valores CF (expresado en Hz) y PM (expresado en grados) de los modos de operación del controlador del lazo interno de corriente. . . . .	74
Tabla 3.3	Frecuencia de cruce por cero (expresado en Hz) y margen de fase (expresado en grados) del controlador del lazo externo de tensión para el modo buck inverso. . . . .	75
Tabla 3.4	Frecuencia de cruce por cero (expresado en Hz) y margen de fase (expresado en grados) del controlador del lazo externo de tensión para el modo buck. . . . .	75
Tabla 3.5	Frecuencia de cruce por cero (expresado en Hz) y margen de fase (expresado en grados) del controlador del lazo externo de tensión para el modo boost inverso. . . . .	76
Tabla 3.6	Frecuencia de cruce por cero (expresado en Hz) y margen de fase (expresado en grados) del controlador del lazo externo de tensión para el modo boost. . . . .	76
Tabla 3.7	Valores CF (expresado en Hz) y PM (expresado en grados) del controlador del lazo externo de tensión para los cuatro modos de operación del controlador. . . . .	77

Tabla 4.1	Descripción y modelo de equipos utilizados para el desarrollo de pruebas experimentales. . . . .	98
-----------	--	----

