

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL POR RECHAZO ACTIVO DE
PERTURBACIONES PARA EL SISTEMA CONVERTIDOR REDUCTOR-
INVERSOR: PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS”**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

PRESENTA:

C. ROOSEMVELT ESTEVA PÉREZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ESTEBAN OSVALDO GUERERO RAMÍREZ

CO-DIRECTOR DE TESIS:

DR. MARCO ANTONIO CONTRERAS ORDAZ

H. CD. DE HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA; FEBRERO DE 2023

Tesis presentada ante los sinodales:

Dr. Fermín Hugo Ramírez Leyva

Dr. Edgardo Yescas Mendoza

M. C. Arturo Pablo Sandoval García

Director de Tesis:

Dr. Esteban Osvaldo Guerrero Ramírez

Co-Director de Tesis:

Dr. Marco Antonio Contreras Ordaz

Dedicatoria

A Dios y a mis padres Jorge y Rubicelia, que me han conducido en la vida, con amor y paciencia. A ustedes, que a lo largo de la vida me guiaron siempre por el buen camino, me brindaron su apoyo y consejos, y en los momentos difíciles me alentaron a seguir adelante, anhelando siempre mi preparación para enfrentar la vida. A mis hermanos Jorge y Miguel Ángel, que son un ejemplo de superación en la vida, por su apoyo en cada momento que lo necesito.

Rusbel

Agradecimientos

A Dios por iluminarme todos los días de mi vida, por no dejarme solo, por iluminar mi mente en cada paso de mi vida.

A mis padres que siempre han sido un ejemplo. A mi madre Rubicelia que es el ser más maravilloso del mundo, por su apoyo moral, comprensión, cariño y amor; por guiar mi camino y estar junto a mí en los momentos difíciles. A mi padre Jorge por enseñarme a afrontar los problemas con entereza y saber responder; por enseñarme con su ejemplo que para lograr lo que se desea se requiere decisión y empeño, gracias a ustedes estoy alcanzando mis metas con mucho orgullo.

A mis hermanos Jorge y Miguel Ángel por ser un ejemplo como hermanos. A Jorge por preocuparse todos los días en mi bienestar, enviándome mensajes “qué tal, cómo te va”. A Miguel Ángel por preocuparse por mí y ayudarme en cada momento que lo necesito. Ambos son los mejores hermanos que pude tener, gracias por todo, los quiero mucho.

A mi amiga Wendy que es una gran persona por todos estos años de amistad incondicional y compañía, porque sin sus ánimos y apoyo cada que me veía trabajado y diciéndome “tú puedes con la tesis”, este trabajo no se habría logrado; así como sus revisiones y observaciones, de igual forma a mis amigos, así como a mis compañeros de generación.

A ella por su comprensión y cariño que me ha brindado desde el día en que la conocí, por sus ánimos y apoyo todos los días para poder terminar este trabajo de tesis.

A mis directores de tesis, el Dr. Marco Antonio y, en especial, al Dr. Esteban, que además de ser un gran profesor es una gran persona, por su paciencia en el desarrollo de este trabajo y dándome los ánimos para culminarlo desde el primer día “con esto te titulas rápido”. Así como también al profesor Heriberto por ayudarme con las correcciones del documento, así como también a darle forma y presentación al mismo.

A mis sinodales el Dr. Hugo, Dr. Yescas y M.C. Arturo Pablo por sus observaciones en la revisión y mejoramiento de este trabajo, sin sus consejos no se habría culminado.

Roosemvelt

Índice General

Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vii
Índice General.....	ix
Índice de Figuras	xi
Índice de Tablas.....	xv
Resumen	xvii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Planteamiento del Problema	6
1.3. Justificación.....	7
1.4. Hipótesis	8
1.5. Objetivos.....	8
1.5.1. Objetivo general	8
1.5.2. Objetivos específicos.....	9
1.6. Metas	9
1.7. Metodología.....	9
1.8. Esquema del documento de tesis.....	11
Capítulo 2. Marco Teórico.....	13
2.1. Paneles Fotovoltaicos	13
2.1.1. Funcionamiento de las celdas fotovoltaicas	13
2.1.2. Modelado matemático de un arreglo fotovoltaico	13
2.2. Convertidores electrónicos de potencia.....	15
2.2.1. Convertidor CD/CD tipo reductor	16
2.2.2. Convertidor CD/CA (Inversor).....	18
2.3. Control por Rechazo activo de perturbaciones.....	20
2.4. Control PID	22
Capítulo 3. Modelado del Sistema Fotovoltaico y Diseño de los Controladores.....	25
3.1. Modelado matemático del sistema fotovoltaico	25
3.2. Diseño del control por rechazo activo de perturbaciones (CRAP).....	29
3.3. Diseño del control PID	36

Capítulo 4. Diseño y Modelado del Sistema Fotovoltaico en el Ambiente MATLAB/Simulink	41
4.1. Modelado de los paneles solares en MATLAB/Simulink	41
4.2. Diseño de los convertidores electrónicos de potencia	44
4.3. Diseño del control por rechazo activo de perturbaciones en el ambiente MATLAB/Simulink	48
4.4. Diseño del control PID en el ambiente MATLAB/Simulink	51
Capítulo 5. Resultados de Simulación	55
Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros	67
6.1. Conclusiones	67
6.2. Trabajos futuros	68
Bibliografía	69
Apéndice A. Procedimiento del Análisis Matemático del Circuito Eléctrico	A-1
Apéndice B. Diseño de los controladores	B-1
B.1. Diseño del control por rechazo activo de perturbaciones (CRAP)	B-1
B.2. Diseño del control PID para el convertidor reductor	B-8
Apéndice C. Código en MATLAB/Simulink	C-1
C.1. Código en MATLAB/Simulink del controlador CRAP.	C-1
C.2. Código en MATLAB/Simulink del control PID del lazo del convertidor reductor ...	C-4

Índice de Figuras

Figura 1.1. Configuración de doble etapa.	5
Figura 1.2. Diagrama a bloques del control por rechazo activo de perturbaciones para el sistema fotovoltaico.	6
Figura 1.3. Diagrama a bloques del control PID para el sistema fotovoltaico.	7
Figura 2.1. Modelado de las celdas fotovoltaicas.	13
Figura 2.2. Curvas a) Voltaje contra corriente y b) voltaje contra potencia, con una irradiancia constante $I_{rr} = 1000 \text{ W/m}^2$	15
Figura 2.3. Curvas a) Voltaje contra corriente y b) voltaje contra potencia, con una temperatura constante $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	15
Figura 2.4. Convertidor CD/CD reductor.	16
Figura 2.5. Comparación de la señal senoidal y portadora.	19
Figura 2.6. Circuito de un convertidor CD/CA (Inversor).	19
Figura 3.1. Circuito eléctrico cuando $u_1 = 1, u_2 = 1$ y $\bar{u}_2 = 0$	25
Figura 3.2. Circuito eléctrico cuando $u_1 = 1, u_2 = 0$ y $\bar{u}_2 = 1$	26
Figura 3.3. Circuito eléctrico cuando $u_1 = 0, u_2 = 1$ y $\bar{u}_2 = 0$	27
Figura 3.4. Circuito eléctrico cuando $u_1 = 0, u_2 = 0$ y $\bar{u}_2 = 1$	28
Figura 3.5. Control por rechazo activo de perturbaciones del sistema fotovoltaico.	30
Figura 3.6. Control PID para el sistema fotovoltaico.	36
Figura 3.7. Bloque PID Controller.	39
Figura 4.1. Simulación del panel solar.	42
Figura 4.2. Conexión de los paneles solares en serie.	43
Figura 4.3. Modelado del panel solar en MATLAB/Simulink.	43
Figura 4.4. Diseño del sistema fotovoltaico en MATLAB/Simulink.	47
Figura 4.5. CRAP en MATLAB/Simulink.	48
Figura 4.6. Observador GPI de voltaje en MATLAB/Simulink.	49
Figura 4.7. Observador GPI de corriente en MATLAB/Simulink.	49
Figura 4.8. Controlador auxiliar v_1 en MATLAB/Simulink.	50
Figura 4.9. Controlador auxiliar v_2 en MATLAB/Simulink.	50
Figura 4.10 Señales de control u_1 y u_2 en MATLAB/Simulink.	51
Figura 4.11. Control PID para el convertidor reductor en MATLAB/Simulink.	52
Figura 4.12. Control PID para el inversor en MATLAB/Simulink.	53

Figura 5.1. Voltaje de salida del panel solar.....	55
Figura 5.2. Señal de control u_1 para el convertidor reductor aplicando a) CRAP y b) PID.	56
Figura 5.3. Modulación PWM para el convertidor reductor aplicando a) CRAP y b) PID.	56
Figura 5.4. Señal de control u_2 para el inversor aplicando a) CRAP y b) PID.....	57
Figura 5.5. Modulación PWM bipolar para el inversor aplicando a) CRAP y b) PID.....	57
Figura 5.6. Voltaje de salida del convertidor reductor $V_{ref} = 160 V$ aplicando a) CRAP y b) PID.	58
Figura 5.7. Corriente de salida en el inversor $I_d = 1.5 A$ aplicando a) CRAP y b) PID.	59
Figura 5.8. a) Componente fundamental en (60 Hz) = 1.537 A y distorsión armónica total THD = 8.93 % antes de la perturbación aplicando CRAP y b) Componente fundamental en (60 Hz) = 1.495 A y distorsión armónica total THD = 12.33 % antes de la perturbación aplicando PID.	59
Figura 5.9. Perturbación actuada en 0.5 s en la corriente de 1.5 A aplicando a) CRAP y b) PID.....	60
Figura 5.10. a) Componente fundamental en (60 Hz)= 1.512 A y distorsión armónica total THD = 13.73 % después de la perturbación aplicando CRAP y b) Componente fundamental en (60 Hz)= 1.475 A y distorsión armónica total THD = 9.39 % después de la perturbación aplicando PID.	60
Figura 5.11. Voltaje de salida del inversor $V_{inv} = 150 V$ aplicando a) CRAP y b) PID...	61
Figura 5.12. Error de voltaje en el convertidor reductor aplicando CRAP y PID.....	61
Figura 5.13. Error cuadrático de voltaje en el convertidor reductor aplicando CRAP y PID.	62
Figura 5.14. Integral del error cuadrático de voltaje en el convertidor reductor aplicando CRAP y PID.	62
Figura 5.15. Error de corriente en el inversor aplicando CRAP y PID.	63
Figura 5.16. Error cuadrático de corriente en el inversor aplicando CRAP y PID.	63
Figura 5.17. Integral del error cuadrático de corriente en el inversor aplicando CRAP y PID.....	63
Figura 5.18. Voltaje de salida del convertidor reductor $V_{ref} = 130 V$ aplicando CRAP y PID.....	64
Figura 5.19. Corriente de salida en el inversor $I_d = 1 A$ aplicando a) CRAP y b) PID.	65
Figura 5.20. Perturbación actuada en 0.5 s en la corriente de 1 A aplicando a) CRAP y b) PID.....	65
Figura 5.21. Voltaje de salida del inversor $V_{inv} = 100 V$ aplicando a) CRAP y b) PID. ...	66
Figura A. 1 cuando $u_1 = 1, u_2 = 1$ y $\bar{u}_2 = 0$	1
Figura A. 2. Cuando $u_1 = 1, u_2 = 0$ y $\bar{u}_2 = 1$	2

Figura A.3. Cuando $u_1 = 0$, $u_2 = 1$ y $\bar{u}_2 = 0$	3
Figura A. 4. Cuando $u_1 = 0$, $u_2 = 0$ y $\bar{u}_2 = 1$	4

Índice de Tablas

Tabla 4.1. Características del panel solar.	41
Tabla 4.2. Respuesta del panel solar de voltaje, corriente y potencia.	44
Tabla 4.3. Valores de los elementos propuestos para el convertidor reductor, inversor y carga resistiva-inductiva.	44
Tabla 5.1. Respuesta de voltaje y corriente del sistema fotovoltaico aplicando el CRAP y PID.	64

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta el diseño y simulación del control por rechazo activo de perturbaciones del sistema convertidor reductor-inversor: para aplicaciones fotovoltaicas. El sistema contempla una configuración de doble etapa, basado en un convertidor CD/CD tipo reductor y un inversor monofásico, conectados en cascada. Los objetivos de este trabajo son la regulación de voltaje a la salida del convertidor reductor y el seguimiento de corriente senoidal a la salida del inversor.

Para cumplir con los objetivos anteriores, se utiliza el control por rechazo activo de perturbaciones bajo la perspectiva de la planitud diferencial y observadores de estado extendido GPI.

Las simulaciones del sistema fotovoltaico propuesto se realizan en el entorno MATLAB/Simulink. Además, para evaluar el funcionamiento del sistema fotovoltaico y la robustez del controlador se presentan resultados de simulación del mismo ante variaciones del voltaje de entrada y perturbaciones en la carga, al mismo tiempo, se presentan gráficas de la distorsión armónica total (THD) de la corriente senoidal a la salida del inversor. Finalmente, se compara el controlador por rechazo activo de perturbaciones con el control PID, bajo las mismas condiciones de funcionamiento del sistema fotovoltaico.

Los resultados de simulación presentan un mejor comportamiento por parte del control por rechazo activo de perturbaciones, debido a que cuenta con un menor tiempo de establecimiento y sigue de mejor manera la referencia de corriente, así como una menor distorsión armónica total (THD) de la misma, que el control PID.

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción

En la actualidad, se busca solucionar el problema del cambio climático, el cual se origina por la emisión de gases de efecto invernadero y la dependencia del petróleo y otros combustibles fósiles para generar energía. Por lo tanto, existe una tendencia mundial a reemplazar las fuentes de energía no renovable por su contraparte renovable [1, 2]. En el caso particular de México, desde el año 2008 se promulgó la Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética; la cual tiene como meta tener una participación de las energías renovables en la producción eléctrica del 35% para el 2024, del 40% para el 2035 y del 50% para el 2050 [3].

Dentro de los diferentes tipos de energía renovable, una de las que más ha llamado la atención es la energía solar. El interés en este tipo de energía se debe a las ventajas que en teoría representa, entre ellas: es una fuente de energía inagotable; está presente con diferentes intensidades en toda la superficie terrestre; es favorable para sitios aislados; y tienen costos reducidos de instalación y mantenimiento [4].

Las celdas fotovoltaicas dieron nombre a lo que se conoce como energía fotovoltaica (Photovoltaic Energy). Las empresas japonesas y estadounidenses se convirtieron en los primeros líderes en la fabricación de células fotovoltaicas para varios usos [5]. La importancia de la energía solar fotovoltaica hace necesaria la utilización de herramientas que permitan analizar el comportamiento de los paneles solares, bajo diferentes condiciones de temperatura y radiación. En [6] mencionan lo significativo de las herramientas para el diseño y análisis de sistemas fotovoltaicos, y desarrollan distintos modelos para su simulación. Igualmente, en [7] se utiliza el software especializado MATLAB, para realizar un análisis de la variación de las curvas características del panel solar, modificando sus parámetros fundamentales por medio de su modelo matemático. Por otra parte, en [8] simulan diferentes sistemas de conversión fotovoltaica-eléctrica, evidenciando distintas experiencias que cubren los aspectos más importantes en el análisis y diseño de sistemas fotovoltaicos.

Varios autores han utilizado la herramienta computacional MATLAB/Simulink para modelar el comportamiento de una celda solar y/o de un módulo fotovoltaico. Por ejemplo, en [9] propusieron un modelo de una celda solar de unión triple, que extendieron a un panel solar e incluyeron un algoritmo MPPT utilizando redes neuronales [10].

Las celdas fotovoltaicas tienen un punto de máxima potencia (MPP) en el que se maximiza la transformación de la energía solar en energía eléctrica [11], [12]. El MPP permite la máxima captación de energía, por lo que es fundamental encontrar este punto mediante técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) utilizando una topología de convertidor adecuada.

Las técnicas MPPT tienen la finalidad de adecuar el ciclo de trabajo del convertidor CD/CD para que se modifique el voltaje y la corriente a la salida y con ello lograr la máxima potencia posible. Han surgido diversos algoritmos para solventar el problema de obtener la máxima potencia, el más conocido es P&O (*Perturbe and Observe*) por la simplicidad de su funcionamiento basado en la curva *voltaje contra potencia* [13].

La energía eléctrica producida a partir de la conversión fotovoltaica se utiliza para cubrir una determinada demanda eléctrica en lugares remotos aislados de la red eléctrica. Las posibles configuraciones de los sistemas fotovoltaicos autónomos pueden abarcar desde sistemas simples, tales como un generador fotovoltaico FV operando un consumo de corriente directa (CD), hasta sistemas con almacenamiento y con consumos CD o en corriente alterna (CA). La incorporación de un inversor en el sistema fotovoltaico para posibilitar la utilización de consumos en corriente alterna tiene como efecto una disminución del rendimiento de operación del sistema a potencias inferiores a la potencia nominal del inversor, debido a la curva de rendimiento típica de inversores autónomos [14].

Durante mucho tiempo se han estudiado los sistemas fotovoltaicos, entre los que se encuentran los sistemas fotovoltaicos conectados a red (SFCR), que como se puede deducir por su nombre, necesitan de la conexión a una red eléctrica para realizar su función generadora de electricidad. Por otra parte, están los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA), estos no necesitan de una conexión con la red eléctrica, y su funcionamiento es independiente o autónomo de dicha red [15].

El uso de sistemas fotovoltaicos para este tipo de aplicaciones aisladas de la red, permiten aprovechar algunas de sus características más ventajosas, como es la disponibilidad de una fuente de energía libre y gratuita en el mismo lugar de consumo, la flexibilidad y modularidad de las instalaciones y la amplia autonomía que estos sistemas proporcionan [16]. Los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFA) se clasifican en tres categorías atendiendo a si utilizan un sistema de acumulación o batería, y/o si es necesario el uso de un generador auxiliar o de respaldo.

SFA sin batería (PV-direct): Se caracteriza porque el módulo o generador fotovoltaico (GFV) alimenta directamente a la carga, sin hacer uso de ningún sistema de acumulación o batería. La fiabilidad del sistema se puede definir como el porcentaje de tiempo durante el cual el sistema responde a las necesidades de las cargas [15].

SFA con batería: Incluye un sistema de almacenamiento o acumulación de energía que permite alimentar la carga incluso cuando el sistema fotovoltaico no se encuentra operando. La conexión entre el GFV y la batería se puede realizar directamente o bien a través de un regulador de carga [15].

Sistema Fotovoltaico Autónomo Híbrido: Incluyen una fuente de energía auxiliar, que puede estar basada también en una energía renovable, como es el caso de los generadores eólicos, generadores mini hidráulicos, etc., o puede incluir una fuente auxiliar que no depende de la aleatoriedad de las condiciones climáticas, como es el caso de un generador basado en combustibles fósiles [15].

Por otro lado, están los sistemas fotovoltaicos conectados a la red: En el caso particular de los sistemas fotovoltaicos ligados a la red, cuya principal aplicación se da en viviendas o edificaciones dentro de las zonas urbanas, los elementos conversores (módulos fotovoltaicos) encargados de transformar la luz del sol en electricidad se instalan sobre el techo de las construcciones para proveer a éstos una mayor y mejor exposición a los rayos solares. En cuanto a la conexión eléctrica del sistema a la red, ésta se lleva a cabo a través de un inversor [17].

Este sistema fotovoltaico se conforma principalmente por tres grandes grupos: las celdas fotovoltaicas, un convertidor electrónico de potencia y una técnica de control adecuada para aprovechar al máximo la transformación de energía solar en energía eléctrica.

Los convertidores electrónicos de potencia son parte fundamental de los sistemas fotovoltaicos, puesto que se encargan de acoplar a los paneles solares con los sistemas de almacenamiento de energía, las cargas eléctricas, y si es necesario con la red eléctrica [18].

Por otro lado, existen diferentes tipos de convertidores que se han utilizado en distintas aplicaciones, entre los cuales existen:

Convertidor reductor (Buck): Es un convertidor de potencia, CD/CD sin aislamiento galvánico, que obtiene a su salida un voltaje menor al de la entrada. Los convertidores buck tienen alta eficiencia y autorregulación [19].

Convertidor elevador (Boost): Es un convertidor CD/CD que obtiene a su salida un voltaje continuo mayor que a su entrada, la energía que se le suministra a este convertidor puede provenir de fuente de CD como baterías, paneles solares o generadores de CD, un aspecto importante a tomar en cuenta es que la corriente de salida es menor al de la entrada [20].

Convertidor reductor-elevador (Buck-Boost): En este tipo de convertidores, la magnitud del voltaje de salida puede ser mayor o menor que la magnitud del voltaje de entrada y la polaridad invertida [21].

Inversores: Los inversores CD/CA son convertidores estáticos de energía que convierten la corriente continua en corriente alterna, y son capaces de alimentar una carga alterna, regulando el voltaje, la frecuencia o ambas. La función de los inversores es transferir la potencia desde una fuente de continua a una carga de alterna [22].

Por otro lado, para tener un funcionamiento eficiente de los convertidores de potencia es necesaria una técnica de control adecuada para aprovechar al máximo la transformación de energía solar en energía eléctrica. Entre las técnicas de control se encuentran, el control por rechazo activo de perturbaciones (CRAP), el cual consiste en estimar de manera precisa las perturbaciones desconocidas de la dinámica del sistema que se desea controlar y proceder a cancelar sus efectos de manera adecuada en la ley de control [23].

En [24] los autores aplicaron el CRAP a un convertidor CD/CD alimentado por un panel fotovoltaico. La razón de utilizar este control fue debido a que el sistema era muy propenso a perturbaciones, tales como: el impacto de la radiación solar, cambios estacionales,

temperatura externa, etc. El trabajo reportado considera el desarrollo del controlador para el convertidor, el cual también emplea un observador de estado estable para estimar las perturbaciones, y la retroalimentación de error de estado no lineal para compensar el sistema, Finalmente, demostraron por medio de simulaciones que el CRAP es un control que está diseñado para ser intrínsecamente robusto frente a variaciones de la planta, logra el efecto del control deseado, tiene buena estabilidad y robustez [25].

Topologías de sistemas fotovoltaicos

Según el tipo de carga, las topologías de los sistemas fotovoltaicos monofásicos se clasifican en dos tipos:

- 1.- Sistemas fotovoltaicos de una etapa.
- 2.- Sistemas fotovoltaicos de doble etapa.

En este trabajo se plantea utilizar la configuración de doble etapa. Para lograr un alto nivel de precisión en la utilidad fotovoltaica, se requieren condiciones de alta eficiencia y buena calidad de conversión.

La configuración de doble etapa, consta de dos etapas de conversión, generalmente un convertidor CD/CD seguido de un inversor. La estructura de esta topología difiere según la potencia nominal.

La razón detrás de la transferencia de un voltaje regulado a la entrada del inversor requiere el uso de convertidores de CD/CD, como se presenta en la Figura 1.1. Los sistemas fotovoltaicos se usan ampliamente en diversas aplicaciones, como sistemas de bombeo y almacenamiento de energía. Para garantizar estas funciones, se utilizan diversos tipos de convertidores CD/CD entre el módulo fotovoltaico y la carga. Las principales ventajas de estos convertidores son la rentabilidad, el flujo de energía y la capacidad de mantener la salida en un valor fijo con respecto a las variaciones de entrada.

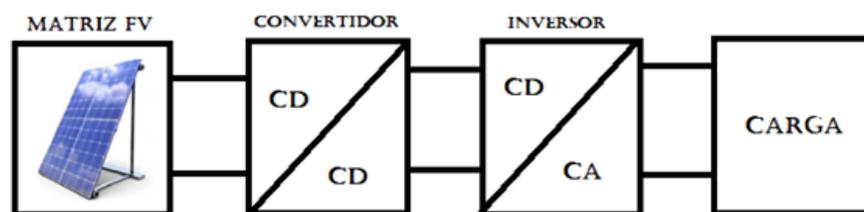


Figura 1.1. Configuración de doble etapa.

1.2. Planteamiento del Problema

El presente trabajo de investigación se centra en la transformación de la energía solar en energía eléctrica para un sistema fotovoltaico autónomo. Debido a que el comportamiento de las celdas fotovoltaicas es no lineal y depende de variables como la radiación solar y la temperatura, se plantea diseñar y simular el sistema utilizando el CRAP para regular el voltaje de un convertidor CD/CD tipo reductor y seguir una referencia de corriente a la salida de un inversor utilizando el software MATLAB/Simulink. Se elige este controlador, debido a que ayudará a rechazar de forma activa las perturbaciones endógenas y exógenas del sistema.

En la figura 1.2 se muestra el diagrama del sistema fotovoltaico a estudiar, el cual consta de un panel solar como fuente de alimentación, un convertidor CD/CD reductor, un inversor, una carga resistiva-inductiva. Adicionalmente, se muestra el diseño a bloques del sistema de control. Se parte de las salidas planas de voltaje y corriente, estas se aplican al control por rechazo activo de perturbaciones del cual se obtienen las señales de control, y son comparadas con señales triangulares para ayudar a la conmutación de los interruptores.

La conexión en cascada de las celdas fotovoltaicas, y los convertidores electrónicos de potencia, resulta en un sistema que no es nada sencillo de analizar debido a la gran cantidad de variables involucradas.

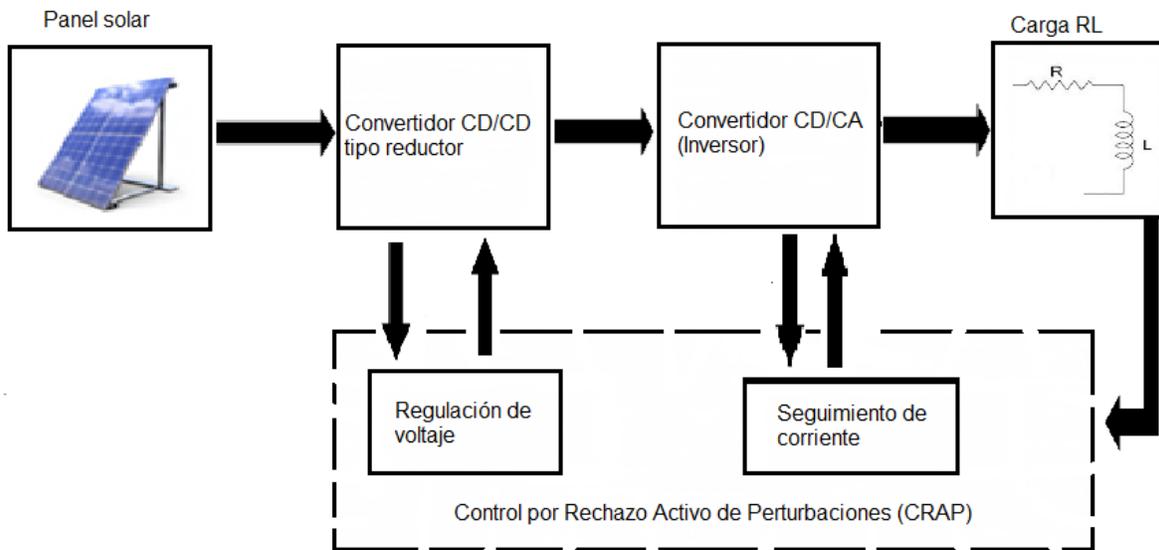


Figura 1.2. Diagrama a bloques del control por rechazo activo de perturbaciones para el sistema fotovoltaico.

Con base al modelo matemático, la propiedad de planitud diferencial y el CRAP, se diseña el controlador del sistema fotovoltaico. Para el diseño del controlador, es indispensable medir las salidas planas del sistema. Para controlar los dispositivos de potencia de los convertidores se utiliza una modulación PWM para el convertidor CD/CD tipo reductor y para el inversor se plantea utilizar una modulación PWM bipolar.

Finalmente, con el objetivo de comparar la funcionalidad y robustez del sistema de control propuesto, se diseña un controlador proporcional integral derivativo (PID) para el sistema fotovoltaico, como se muestra en la figura 1.3.

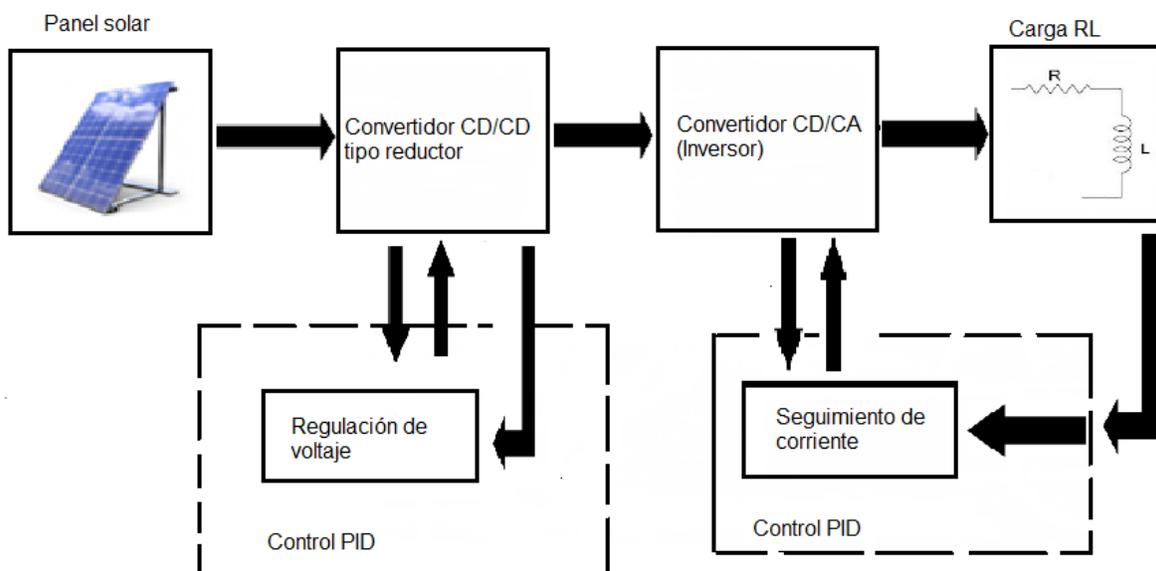


Figura 1.3. Diagrama a bloques del control PID para el sistema fotovoltaico.

El diseño del controlador PID para el sistema fotovoltaico considera dos lazos de control, uno para el convertidor reductor y otro para el inversor. La señal de error que se aplica al controlador PID del convertidor reductor, se obtiene por la diferencia entre el voltaje de referencia y el voltaje de salida real del mismo. De igual forma, para el control PID del inversor, la señal de error se obtiene de la diferencia entre la señal senoidal de referencia y la señal de salida real.

1.3. Justificación

Una alternativa para solución al problema del cambio climático, originado principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero y el aumento de la dependencia del petróleo y otros combustibles fósiles, junto con el alza de los costos de energía, requiere un cambio

fundamental en el sistema energético, el cual solo será posible con una mayor participación de las energías renovables. Dentro de los diferentes tipos de energía renovable, la energía solar fotovoltaica, como tecnología de energía limpia y verde, desempeña un papel vital para suplir la escasez de energía de cualquier país.

Para la interconexión de las celdas fotovoltaicas con alguna carga eléctrica o algún dispositivo de almacenamiento, son necesarios distintos tipos de transformación de la energía, como la conversión de corriente directa a corriente directa mediante un convertidor CD/CD reductor o la conversión de corriente directa a corriente alterna, mediante un convertidor CD/CA o inversor, esto con la finalidad de suministrar energía eléctrica a gran parte de aparatos electrónicos.

Así mismo, el modelado, la simulación y el análisis de los sistemas fotovoltaicos es una fase vital antes de montar el sistema en cualquier lugar, ya que permite entender el comportamiento y características en las condiciones climáticas reales de ese lugar.

Por tal motivo, en este trabajo se plantea el modelado matemático del sistema fotovoltaico utilizando las leyes de corriente y voltaje de Kirchhoff. Adicionalmente, para contrarrestar las variaciones de voltaje de la fuente de alimentación, se plantea el diseño del CRAP en base a la propiedad de planitud diferencial.

1.4. Hipótesis

Con la propiedad de planitud diferencial y el CRAP es posible regular el voltaje de salida del convertidor reductor y seguir una referencia de corriente senoidal a la salida del inversor. Mediante esta técnica de control se obtendrá un sistema robusto ante variaciones en la fuente de entrada y en la carga. Además, bajo las mismas condiciones, el control por rechazo activo de perturbaciones presentará un mejor comportamiento y robustez que el control PID.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Analizar la funcionalidad y la robustez de los controladores CRAP y PID de un sistema fotovoltaico mediante su modelado en MATLAB /Simulink.

1.5.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos relacionados con este trabajo de investigación son los siguientes:

- Determinar el modelado matemático del sistema fotovoltaico.
- Diseñar el CRAP del sistema fotovoltaico.
- Diseñar el control PID del mismo sistema.
- Simular el CRAP en el entorno MATLAB/Simulink.
- Simular el control PID en el entorno MATLAB /Simulink.
- Comparar el control por rechazo activo de perturbaciones (CRAP) y el control PID.

1.6. Metas

- Investigar el funcionamiento de los convertidores CD/CD y CD/CA como fuentes de alimentación alternativa en sistemas aislados de la red.
- Investigar las características de los paneles solares como generadores de energía renovable fotovoltaica y aplicaciones como fuentes de alimentación.
- Adquirir conocimientos sobre los sistemas fotovoltaicos aislados de la red eléctrica.
- Realizar el diseño del control por rechazo activo de perturbaciones.
- Verificar el funcionamiento de la simulación del CRAP y el control PID.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos de ambos controladores.

1.7. Metodología

La ejecución de este trabajo de investigación se llevará a cabo conforme a los objetivos descritos en el mismo. Cada uno se vincula a un conjunto de fases, cuyas descripciones, investigaciones, modelado y simulaciones, se describen a continuación.

Fase 1: Búsqueda bibliográfica sobre los temas de investigación propuestos: los sistemas fotovoltaicos autónomos y conectados a la red eléctrica, los convertidores CD/CD y CD/CA como elementos de acoplo en los sistemas fotovoltaicos, diseño del control por rechazo activo de perturbaciones y control PID.

Fase 2: Realizada la investigación, se elige el sistema fotovoltaico de dos etapas, que consta de un convertidor CD/CD y CD/CA conectados en cascada. El cual resulta es un sistema MIMO (multiple-input y multiple-output) cuyas entradas se representan por las señales de control de los dispositivos de potencia de los convertidores, y las salidas se representan por el voltaje del convertidor CD/CD reductor y la corriente senoidal que proporciona el inversor del sistema fotovoltaico.

Fase 3: Posteriormente se realiza el modelado matemático del sistema mediante las leyes corriente y voltaje de Kirchhoff. Es importante mencionar que se obtiene un sistema plano.

Fase 4: Con la propiedad de planitud diferencial se realiza el diseño del control por rechazo activo de perturbaciones (CRAP).

Fase 5: Simulación del sistema completo para verificar el funcionamiento del sistema fotovoltaico, utilizando los controladores CRAP y PID en el entorno MATLAB/Simulink.

Fase 6: Finalmente, se evalúan pruebas del funcionamiento ante perturbaciones externas al, mismo tiempo se evalúa la robustez de los controladores.

1.8. Esquema del documento de tesis

El esquema del documento de tesis considera lo siguiente:

El capítulo 1 describe los antecedentes, el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos, la hipótesis y la metodología de desarrollo para llevar a cabo este trabajo de tesis.

El capítulo 2 muestra el estado del arte, presentando una revisión bibliográfica del estado actual del uso de los controladores CRAP y PID en los sistemas fotovoltaicos, así como también el funcionamiento de los convertidores electrónicos de potencia.

El capítulo 3 presenta el análisis matemático del sistema fotovoltaico y el diseño detallado del CRAP, para regular el voltaje de salida al convertidor reductor y seguir una corriente de referencia senoidal a la salida del inversor.

El capítulo 4 abarca el diseño del sistema fotovoltaico, el diseño del CRAP y el diseño del PID en el entorno MATLAB/Simulink.

El capítulo 5 presenta las diferentes pruebas realizadas al sistema fotovoltaico y se describen los resultados obtenidos mediante gráficas.

Por último, en el capítulo 6 se muestra la discusión del trabajo, en donde se analizan los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones del análisis.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Paneles Fotovoltaicos

2.1.1. Funcionamiento de las celdas fotovoltaicas

La celda fotovoltaica es un dispositivo electrónico que transforma la energía luminosa en energía eléctrica a partir de un proceso cuántico mecánico denominado ‘efecto fotovoltaico’ el cual consiste en la emisión de electrones de un material semiconductor cuando incide sobre él una radiación electromagnética [27].

Una celda fotovoltaica típica está conformada por una capa P y una N (unión PN) de algún material semiconductor dopado (generalmente silicio) similar al diodo, esta estructura sirve para crear un campo eléctrico permanente. Al estar expuesto a la luz, un fotón desplaza a un electrón (-) generando un hueco (+) en el átomo excitado. El principio de funcionamiento de una celda fotovoltaica consiste en obligar, mediante el efecto del campo eléctrico creado, a los electrones (-) y a los huecos (+) avanzando en direcciones opuestas creándose una diferencia de potencial entre los electrodos positivo y negativo del material semiconductor [28].

2.1.2. Modelado matemático de un arreglo fotovoltaico

Considerando que un arreglo fotovoltaico consiste en la unión de varias celdas fotovoltaicas en serie y/o en paralelo, en la figura 2.1 se muestra el circuito eléctrico equivalente de un arreglo fotovoltaico, se puede ver a las celdas fotovoltaicas como una fuente de corriente dependiente con un comportamiento no lineal [29], como se muestra en la ecuación 2.1.

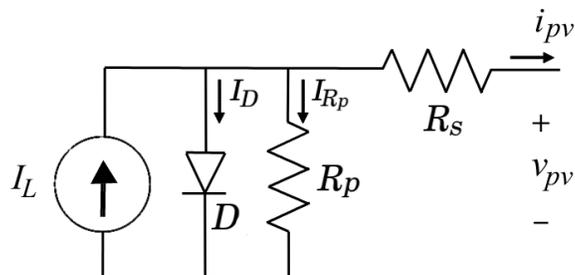


Figura 2.1. Modelado de las celdas fotovoltaicas.

$$I_{pv} = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{v_{pv} + R_s I_{pv}}{V_T}\right) - 1 \right] - \frac{v_{pv} + R_s I_s}{R_p} \quad (2.1)$$

i_{pv} = Corriente de salida del arreglo fotovoltaico.

v_{pv} = Voltaje de salida del arreglo fotovoltaico.

$I_L = N_p I_{ph}$ Es la fotocorriente total del arreglo fotovoltaico.

N_p = Es el número de celdas fotovoltaicas en paralelo.

I_{ph} = Es la fotocorriente de celda fotovoltaica.

$I_0 = N_p I_{os}$ Es la corriente de saturación del diodo.

I_{os} = Es la corriente de saturación de un diodo individual.

R_s = Resistencia en serie del arreglo fotovoltaico.

R_p = Resistencia en paralelo del arreglo fotovoltaico.

$V_T = \frac{N_s n k_B T}{q}$ Es el voltaje térmico generado en el arreglo fotovoltaico.

N_s = Número de celdas fotovoltaicas en serie.

n = Coeficiente de emisión o factor de idealidad del diodo.

k_B = Constante de Boltzmann con un valor de $1.3806 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$.

q = Carga del electrón con un valor de $-1.6021 \times 10^{-19} \text{ C}$.

T = Temperatura del arreglo fotovoltaico.

Para apreciar de mejor forma el comportamiento no lineal de las celdas fotovoltaicas y la dependencia de la potencia con respecto a las variables independientes, en la figura 2.2 se muestran las curvas: a) voltaje contra corriente y b) voltaje contra potencia, en ambas se considera una irradiancia de 1000 W/m^2 , a diferentes temperaturas de funcionamiento, mientras que en la figura 2.3 se muestran las curvas considerando niveles de irradiancia bajo una misma temperatura de las celdas fotovoltaicas de 25°C . En ambas figuras se observa que el punto de máxima potencia (MPP) varía según las condiciones de trabajo y

este valor cambia si no se mantienen las variables independientes en las mismas condiciones [30].

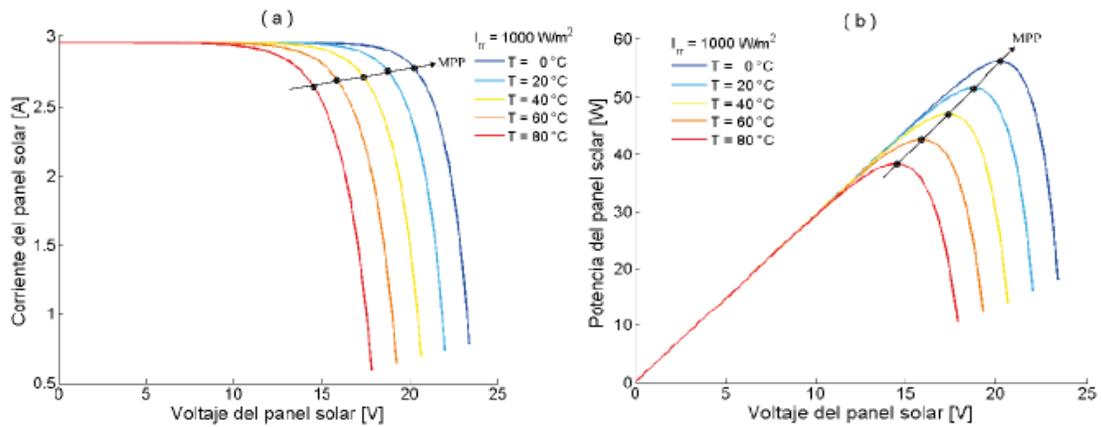


Figura 2.2. Curvas a) Voltaje contra corriente y b) voltaje contra potencia, con una irradiancia constante $I_{rr} = 1000 \text{ W/m}^2$.

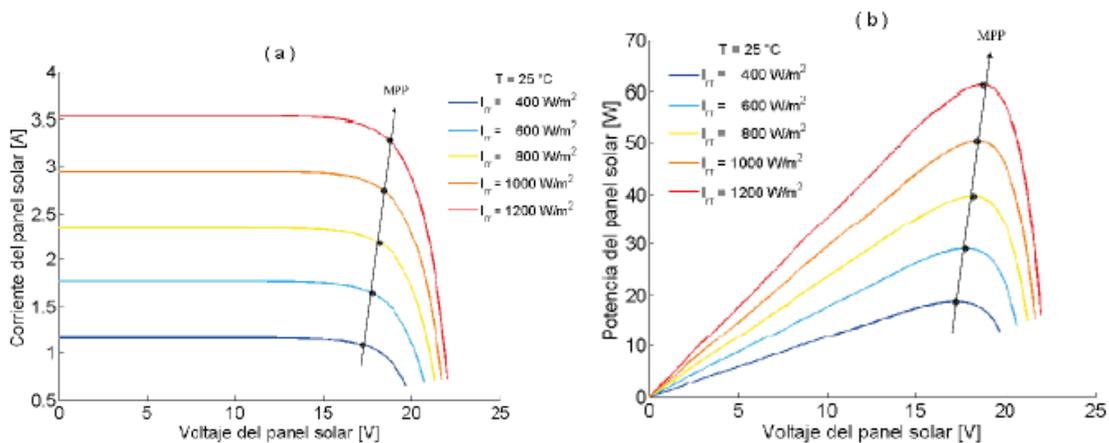


Figura 2.3. Curvas a) Voltaje contra corriente y b) voltaje contra potencia, con una temperatura constante $T = 25^\circ\text{C}$.

2.2. Convertidores electrónicos de potencia

Los convertidores electrónicos de potencia utilizados en los sistemas fotovoltaicos suelen tener dos etapas, basados en convertidores CD/CD y CD/CA (inversores). La función de los primeros es recibir un voltaje de corriente directa de los módulos fotovoltaicos y adaptarlo a la siguiente etapa. Por su parte, los convertidores CD/CA reciben el voltaje de corriente directa adecuado, proporcionado por el convertidor CD/CD y lo transforman en un voltaje de CD/CA con amplitud y fase requerida, que luego se entrega como potencia de CA a una carga eléctrica a través de un filtro que utiliza un inductor.

2.2.1. Convertidor CD/CD tipo reductor

El convertidor CD/CD tipo reductor, produce un voltaje menor que al de su entrada [31], conservando la misma polaridad que el voltaje de entrada. En la figura 2.4 se muestra el circuito eléctrico del convertidor CD/CD reductor, el cual consiste de una fuente de CD, un dispositivo de conmutación (interruptor), un diodo, una bobina y un capacitor, que alimentan una carga, este convertidor funciona abriendo y cerrando un interruptor, este accionamiento genera dos condiciones:

- Cuando el interruptor se cierra, el inductor se energiza de la entrada al igual que la salida.
- Cuando el interruptor se abre, la fuente que alimenta el circuito permanece aislada, esto ocasiona que la energía almacenada en el inductor sea la que alimente al circuito.

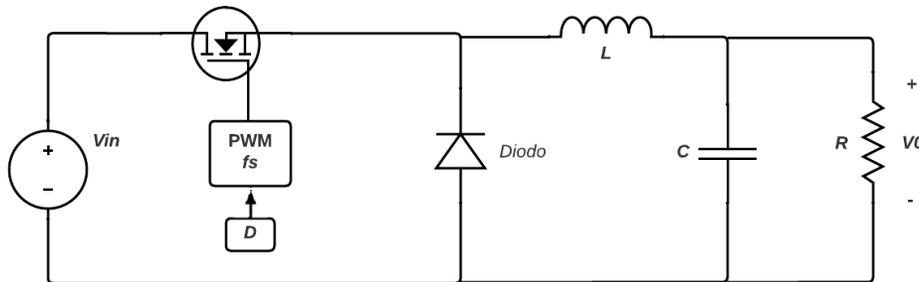


Figura 2.4. Convertidor CD/CD reductor.

V_{in} = Voltaje de entrada al convertidor reductor.

D = Ciclo de trabajo.

f_s = Frecuencia de conmutación.

L = Inductor.

C = Capacitor.

R = Resistencia de carga.

V_0 = Voltaje de salida.

Al modificar alguno de sus principales parámetros (carga, la bobina o la frecuencia de conmutación), ocasiona un cambio en las ecuaciones diferenciales, que describen el

comportamiento del sistema. Dado que dicho comportamiento es no lineal, diseñar y plantear un controlador adecuado es de gran importancia [32].

El modelo matemático del convertidor no solo depende de los componentes de su estructura, sino también de la configuración que adquiere el circuito al cambiar el estado de conmutación. En la ecuación (2.2) se muestra la relación del voltaje de salida al de entrada, en donde, V_0 es el voltaje de salida que se desea obtener, V_{in} es el voltaje de entrada que se tiene en la fuente, y el ciclo de trabajo $D \in \{0,1\}$ es la señal de control que trabaja mediante un PWM a una frecuencia f_s .

$$V_0 = DV_{in} \quad (2.2)$$

En el convertidor CD/CD reductor se busca el modo de conducción continuo (MCC) con una corriente permanente en el inductor L . Para que esta topología de este convertidor se encuentre en MCC, según [31] debe satisfacer la condición de la ecuación (2.3).

$$L \geq \frac{(1-D)R}{2f_s} \quad (2.3)$$

Dado que en el circuito físico existe una capacitancia C finita, esto genera un rizado ΔV_0 , que en [31] expresa una fracción del voltaje de salida en la ecuación (2.4).

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1-D}{8LCf_s^2} \quad (2.4)$$

Finalmente, para obtener la relación del ciclo de trabajo D , se debe tener en cuenta la impedancia de entrada Z_{in} , la impedancia de salida $Z_0 = R$ y la eficiencia n_b del convertidor reductor, como se observa en la ecuación (2.5).

$$D = \sqrt{n_b \frac{Z_0}{Z_{in}}} \quad (2.5)$$

Dadas las ecuaciones anteriores, es posible regular el voltaje de salida modificando el ciclo de trabajo del convertidor. Esta es la principal aplicación de los convertidores de voltaje, y esencialmente para lo que se utiliza este convertidor reductor en este trabajo.

2.2.2. Convertidor CD/CA (Inversor)

Actualmente los convertidores CD/CA o inversores tienen muchas aplicaciones en la industria. Estos dispositivos se encuentran dentro de la fuente de poder ininterrumpible. La generación de energía eléctrica por medio de fuentes renovables, como solar, eólica, etc., requieren el uso de inversores para poder proporcionar la energía [33].

Los inversores son circuitos que convierten la corriente continua en corriente alterna. Este dispositivo transfiere potencia desde una fuente continua a una carga en alterna, el objetivo es crear una tensión en alterna cuando solo hay disponible una fuente de tensión continua [31]. Las aplicaciones típicas de los inversores puede ser, accionamiento de motores de CA de velocidad ajustable, sistemas de alimentación interrumpida (SAI), dispositivos de corriente alterna que funcionan a partir de una batería, entre otras [34].

El inversor funciona abriendo y cerrando dispositivos de conmutación (interruptores), este accionamiento es generado mediante una modulación PWM. La modulación PWM presenta diversas ventajas, entre las que se destacan la disminución del contenido armónico y el desplazamiento de los armónicos no fundamentales a altas frecuencias [35]. Esto conlleva grandes ventajas en la reducción del volumen y peso del filtro de salida ya que permite diseñar filtros con frecuencias de cortes mayores.

Otra ventaja de esta técnica de modulación radica en la capacidad de controlar la tensión de salida mediante la amplitud de la señal portadora (señal triangular) y de la moduladora (señal sinusoidal) [35].

Entre las configuraciones de modulaciones PWM utilizadas, se encuentra la conmutación bipolar. Para esta conmutación solo es necesario el uso de una señal senoidal moduladora o de referencia y una señal triangular portadora, el resultado de la comparación de estas dos señales genera las siguientes condiciones:

- Los interruptores conectan la carga a $+V_{cc}$ cuando s_1 y s_2 están cerrados.
- Los interruptores conectan la carga a $-V_{cc}$ cuando s_3 y s_4 están cerrados.

En la figura 2.5 se muestra la comparación de las señales, Cuando la señal senoidal es mayor que la señal triangular la salida está en $+V_{cc}$ y cuando la señal senoidal es menor que la señal portadora la salida está en $-V_{cc}$.

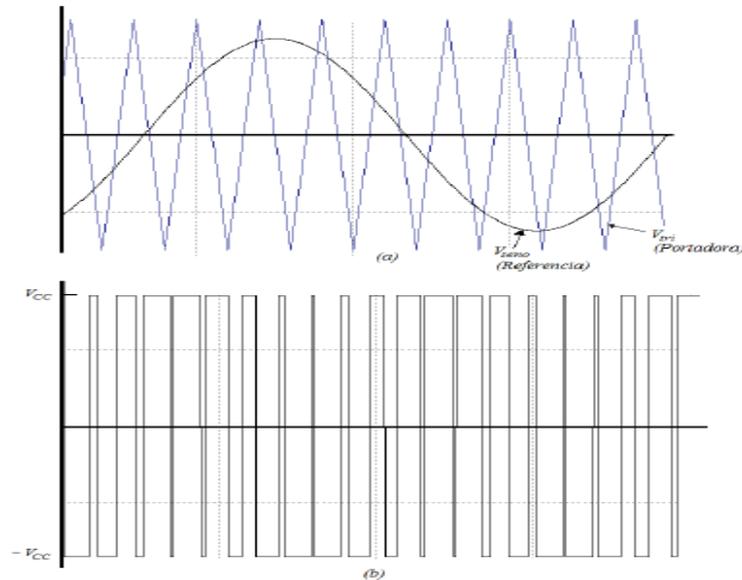


Figura 2.5. Comparación de la señal senoidal y portadora.

La conmutación periódica del voltaje de la carga entre $+V_{cc}$ y $-V_{cc}$ genera en la carga un voltaje, la forma de onda de la corriente en la carga depende de los componentes de la carga. En la figura 2.6 se muestra el circuito eléctrico de un inversor.

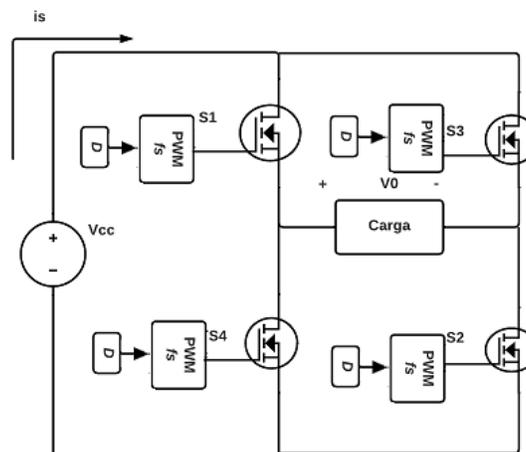


Figura 2.6. Circuito de un convertidor CD/CA (Inversor).

V_{cc} = Voltaje en CD de la entrada al inversor.

f_s = Frecuencia de conmutación.

$s_1, s_2, s_3, s_4 =$ Dispositivos de conmutación.

$V_0 =$ Voltaje de salida.

La impedancia Z de la carga de la salida del inversor, esta surge de la relación voltaje y corriente como muestra en la ecuación (2.6).

$$Z = \frac{V_0}{I_s} \quad (2.6)$$

La magnitud de la impedancia está dada por la ecuación (2.7).

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (2.7)$$

De la ecuación (2.7) se obtiene el valor del inductor expresado en la ecuación (2.8).

$$L = \sqrt{\frac{(Z)^2 - R^2}{\omega^2}} \quad (2.8)$$

Finalmente, para obtener la distorsión armónica total (THD) tanto de voltaje como de corriente se presenta la ecuación (2.9).

$$DAT_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_{n,rms})^2}}{V_{1,rms}} \quad (2.9)$$

$$DAT_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_{n,rms})^2}}{I_{1,rms}}$$

2.3. Control por Rechazo activo de perturbaciones

La idea fundamental del CRAP se le atribuye al francés Jean V. Poncelet, quien en el siglo XIX buscaba minimizar en forma activa, a partir de las señales de control, los efectos de las perturbaciones en las salidas del sistema. Un siglo después en la Unión Soviética, Gerghe V. Shipanov formalizo la idea bajo el nombre de “principio de invariancia”. Sin embargo, fue Jiquing Han, uno de los alumnos de G.V. Shipanov, quien le dio al método una serie de aplicaciones académicas e industriales introduciendo contribuciones originales, la más

importante fue el uso de un observador de estado extendido para estimar las perturbaciones desconocidas y nombró al método como Estimación y Rechazo Activo de Perturbaciones (ERAP) [36]. Por otro lado, C.D. Johnson, bajo el nombre de Control Basado en Acomodación de Perturbaciones (CAP), propuso la idea de estimar el efecto de la perturbación desconocida como si fuese representable por una variable de estado auxiliar [37]. Finalmente, Hebertt Sira y sus colaboradores han hecho una aportación en el uso de observadores de estado extendido proponiendo el proporcional integral generalizado (GPI) [38].

El observador de estado extendido o GPI, surge debido a que el observador propuesto por J. Han se basa en una configuración no lineal que se contempla con una retroalimentación de estados también no lineal, lo cual dificulta su implementación. En contraste, un observador GPI permite estimar de manera precisa, lineal, simple y sencilla la estimación total de las perturbaciones sin requerir exactamente los parámetros de la planta, siempre que el sistema cumpla con la propiedad de planitud diferencial [39].

El término de planitud diferencial fue introducido por Michael Fliess y sus colaboradores en [40] con base en el álgebra diferencial. En el álgebra diferencial, un sistema es visto como un campo diferencial generado por un conjunto de variables, que son llamadas salidas planas, donde su número depende del número de entrada.

Se dice que un sistema es diferencialmente plano, o simplemente plano, si cada una de las variables de estado del sistema y entradas de control, se pueden expresar en términos de las salidas planas y sus derivadas sucesivas.

Esta propiedad, de algunos sistemas dinámicos, permite trivializar la tarea de planeación de trayectorias sin resolver ecuaciones diferenciales, y reduce el problema de diseño de control retroalimentado. Finalmente, la propiedad de controlabilidad de un sistema está íntimamente ligado con la planitud diferencial, puesto que el sistema es controlable si y solo si es diferencialmente plano [39].

2.4. Control PID

En 1911, el empresario e inventor Elmer Sperry creó el control PID (Proporcional-integral-derivativo), que une las tres acciones. Sperry desarrolló este control para la Armada de los Estados Unidos con la finalidad de automatizar la dirección y capaz de compensar las variaciones persistentes y predecir futuras variaciones en alta mar. Unos años después de su creación, el ingeniero Nicolas Minorsky publicó el primer análisis teórico de este control, describiendo el comportamiento en una ecuación matemática que hasta hoy sirve como base de cálculo [41].

El uso de las técnicas de control clásico como es el control PID de ganancia fija, en algunos casos resulta ser una buena alternativa para controlar sistemas dinámicos, ya que proporcionan tiempos de respuesta rápidos, sin embargo, entre mayor es la precisión requerida en el sistema el ajuste de este tipo de control es más difícil ya que son bastantes sensibles a las señales de ruido y en ocasiones introducen oscilaciones cuando se presentan retardos en el sistema [42].

El controlador proporcional integral derivativo (PID) es un mecanismo de retroalimentación de bucle de control ampliamente utilizado en la industria. El controlador intenta ajustar y corregir el error entre el proceso medio, el proceso deseado y las medidas correctivas de salida para ajustar el proceso en consecuencia. Este controlador debe ajustarse con la frecuencia suficiente y al mismo tiempo dentro del rango controlable del sistema [43].

La acción proporcional multiplica la señal de error por una constante k_p que determina la cantidad de acción proporcional que tendrá el controlador. Esta acción intenta minimizar el error del sistema. Cuando el error es grande, la acción de control es grande y tiende a minimizar este error.

La acción integral, como su nombre lo indica, calcula la integral de la señal de error y la multiplica por la constante k_i . La integral se puede ver como la suma o acumulación de la señal de error. A medida que pasa el tiempo pequeños errores se van sumando para hacer que la acción integral sea cada vez mayor. Con esto se consigue reducir el error del sistema en régimen permanente.

La acción derivativa, esta acción de control es proporcional a la derivada de la señal de error multiplicada por la constante kd . La derivada del error es otra forma de llamar a la “velocidad” del error. Cuando el sistema se mueve a una velocidad alta hacia el punto de referencia, el sistema se pasará de largo debido a su inercia. Esto produce un sobre impulso y oscilaciones en torno a la referencia. Para evitar este problema, el controlador debe reconocer la velocidad a la que el sistema se acerca a la referencia para poder frenarle con antelación a medida que se acerque a la referencia deseada y evitar que la sobrepase [44].

Capítulo 3. Modelado del Sistema Fotovoltaico y Diseño de los Controladores

En este capítulo se describe el desarrollo matemático del sistema fotovoltaico y el diseño de ambos controles para obtener la regulación de voltaje del convertidor CD/CD reductor y el seguimiento de corriente del inversor, para el correcto funcionamiento del sistema final.

3.1. Modelado matemático del sistema fotovoltaico

Se desarrolló el análisis matemático del sistema fotovoltaico para obtener las ecuaciones, las cuales servirán para realizar el correspondiente diseño del CRAP.

Se aplica las leyes de corriente y voltaje de Kirchhoff al convertidor tipo reductor y al inversor como se muestra en la figura 3.1. Cuando las señales de control tienen valores de $u_1 = 1$, $u_2 = 1$ y $\bar{u}_2 = 0$. Siendo u_1 la señal de control del convertidor reductor y u_2 , \bar{u}_2 las señales de control del inversor.

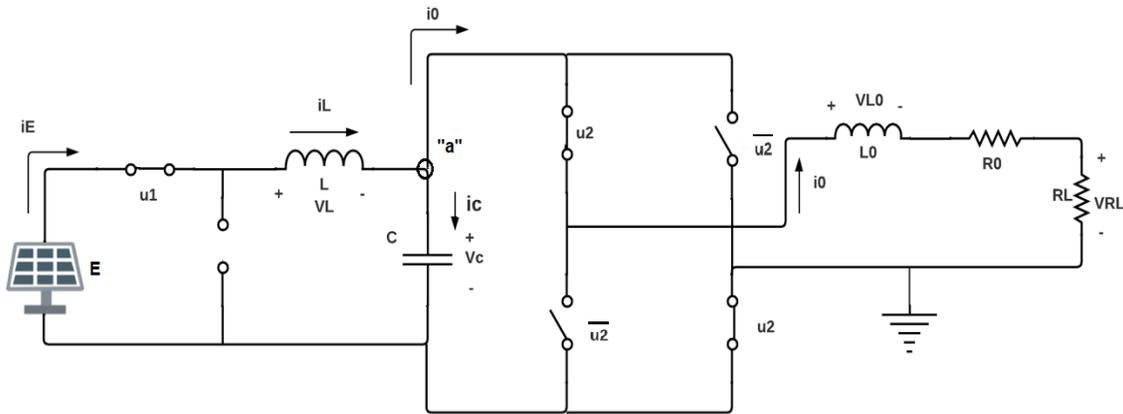


Figura 3.1. Circuito eléctrico cuando $u_1 = 1$, $u_2 = 1$ y $\bar{u}_2 = 0$.

Aplicando la ley de voltaje de Kirchhoff al lazo formado por, la fuente de alimentación (panel solar), el inductor L y el capacitor C, se obtiene la ecuación (3.1).

$$L \cdot \frac{di}{dt} = E - V_c \tag{3.1}$$

A continuación, se aplica la ley de corrientes de Kirchhoff al nodo “a”, en donde se obtiene la ecuación (3.2).

$$C \cdot \frac{dv_c}{dt} = i_L - i_0 \quad (3.2)$$

Posteriormente, se aplica la ley de voltaje de Kirchhoff al lazo formado por el capacitor C , el filtro L y la resistencia de carga, para obtener la ecuación (3.3).

$$L_0 \cdot \frac{di_0}{dt} = V_C - i_0(R_0 + R_L) \quad (3.3)$$

Por otro lado, cuando las señales de control toman valores de $u_1 = 1$, $u_2 = 0$ y $\bar{u}_2 = 1$ como se muestra en la figura 3.2, se realiza el análisis matemático del sistema, tomando en consideración que la corriente va en sentido contrario para el análisis en el inversor y la carga resistiva-inductiva.

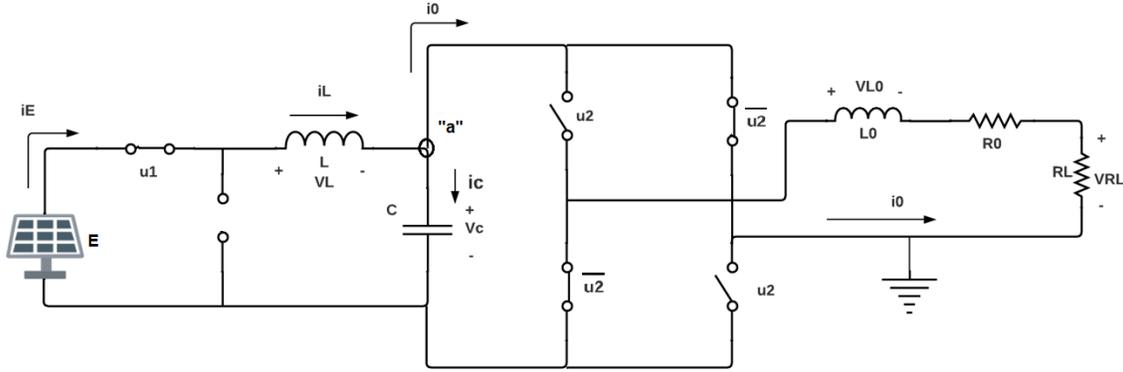


Figura 3.2. Circuito eléctrico cuando $u_1 = 1$, $u_2 = 0$ y $\bar{u}_2 = 1$.

Para esta configuración el análisis matemático del lazo conformado por la fuente de alimentación (panel solar), el inductor L y el capacitor C , resulta en la misma ecuación (3.1) obtenida en la figura 3.1.

$$L \cdot \frac{di}{dt} = E - V_C \quad (3.1)$$

Después, se aplica ley de corrientes de Kirchhoff al nodo "a", considerando que la corriente va en sentido contrario como se expresa en la figura 3.2, se obtiene la ecuación (3.4).

$$C \cdot \frac{dv_c}{dt} = i_L + i_0 \quad (3.4)$$

Tomando en consideración que la corriente va en sentido contrario, se aplica la ley de voltajes de Kirchhoff al lazo conformado por el capacitor C, el filtro L y la resistencia de carga, donde se obtiene la ecuación (3.5).

$$L_0 \cdot \frac{di_0}{dt} = -V_C - i_0(R_0 + R_L) \tag{3.5}$$

Para cuando las señales de control tienen valores de $u_1 = 0$, $u_2 = 1$ y $\bar{u}_2 = 0$ como se aprecia en la figura 3.3.

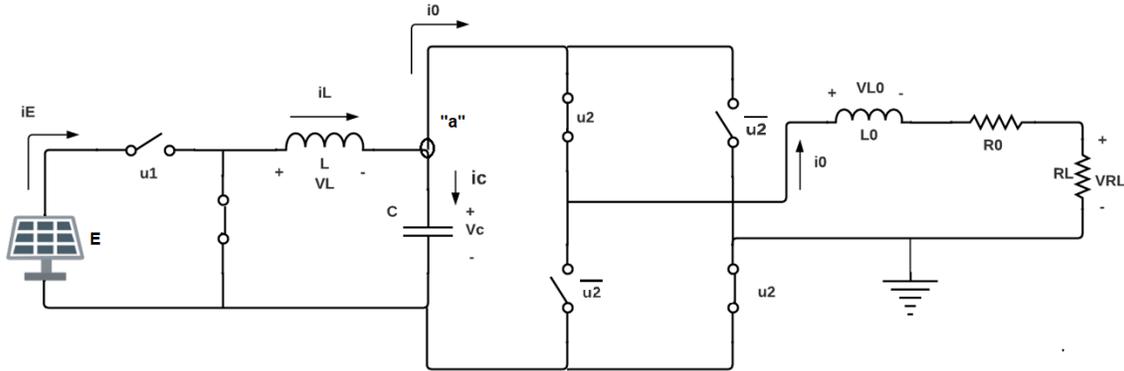


Figura 3.3. Circuito eléctrico cuando $u_1 = 0$, $u_2 = 1$ y $\bar{u}_2 = 0$.

Para el análisis de esta configuración el lazo está conformado por el inductor L y el capacitor C, en donde se aplica ley de voltaje de Kirchhoff, obteniendo la ecuación (3.6).

$$L \cdot \frac{di}{dt} = -V_C \tag{3.6}$$

Posteriormente, se aplica nuevamente ley de corrientes al nodo “a”, para así obtener la ecuación (3.7).

$$C \cdot \frac{dv_C}{dt} = -i_L \tag{3.7}$$

Al lazo formado por el capacitor C, filtro L y la resistencia de carga, se aplica ley de voltaje, para obtener la ecuación (3.8).

$$L_0 \cdot \frac{di_0}{dt} = V_C - i_0(R_0 + R_L) \tag{3.8}$$

Cuando las señales de control toman valores de $u_1 = 0$, $u_2 = 0$ y $\bar{u}_2 = 1$, se procede a realizar el análisis matemático al circuito de la figura 3.4.

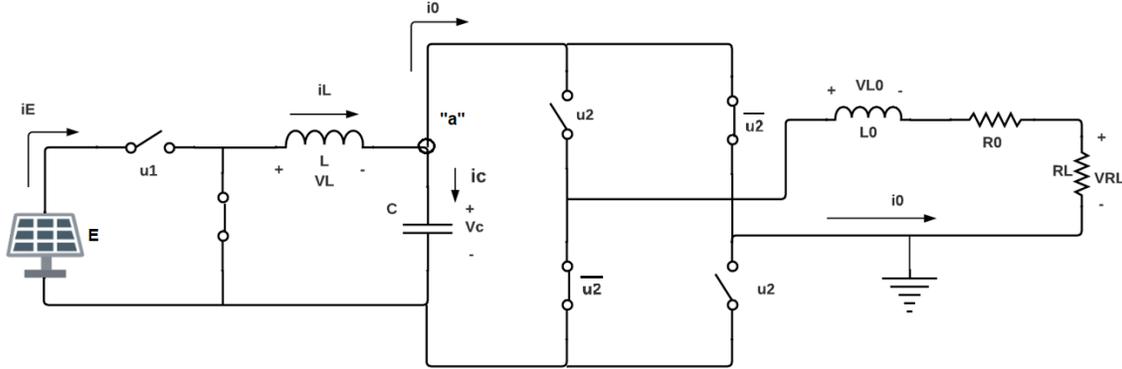


Figura 3.4. Circuito eléctrico cuando $u_1 = 0$, $u_2 = 0$ y $\bar{u}_2 = 1$.

El análisis matemático resultante aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff al lazo conformado por el inductor L y el capacitor C , resulta en la misma ecuación (3.6), por lo tanto, se obtiene la ecuación (3.9).

$$L \cdot \frac{di}{dt} = -V_C \quad (3.9)$$

Para esta configuración la corriente va en sentido contrario como se expresa en la figura 3.4, se aplica ley de corrientes de Kirchhoff al nodo "a", resultando en la ecuación (3.10).

$$C \cdot \frac{dv_C}{dt} = -i_L \quad (3.10)$$

Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff al lazo conformado por el capacitor C , el filtro L y la resistencia de carga, tomando en consideración que la corriente va en sentido contrario, se obtiene la ecuación (3.11).

$$L_0 \cdot \frac{di_0}{dt} = -V_C - i_0(R_0 + R_L) \quad (3.11)$$

Finalmente, al realizar una combinación de las ecuaciones obtenidas anteriormente, resultan las ecuaciones (3.12), las cuales son utilizadas para el diseño del controlador CRAP.

$$L \cdot \frac{di}{dt} = E u_1 - V_C$$

$$C \cdot \frac{dv_c}{dt} = i_L + (1 - 2u_2)i_0 \quad (3.12)$$

$$L_0 \cdot \frac{di_0}{dt} = -(1 - 2u_2)V_c - i_0(R_0 + R_c)$$

Donde $u_1, u_2 \in [0, 1]$

u_1 = Señal de control para el convertidor reductor

u_2 = Señal de control para el inversor

E = Voltaje de entrada

C = Capacitor del convertidor reductor

L = Inductor del convertidor reductor

L_0 = Inductor de carga

R_0 = Resistencia asociada en serie del inductor de carga

R_L = Resistencia de carga

i_L = Corriente en el inductor del convertidor reductor

V_c = Voltaje en el capacitor

i_0 = Corriente de salida del inversor

3.2. Diseño del control por rechazo activo de perturbaciones (CRAP)

Considerando el sistema de las ecuaciones (3.12) resultantes del sistema fotovoltaico desarrollado anteriormente (véase subcapítulo 3.1) se realiza el diseño del CRAP para el sistema fotovoltaico. En la figura 3.5 se muestra el diseño a bloques del sistema fotovoltaico con el control por rechazo activo de perturbaciones.

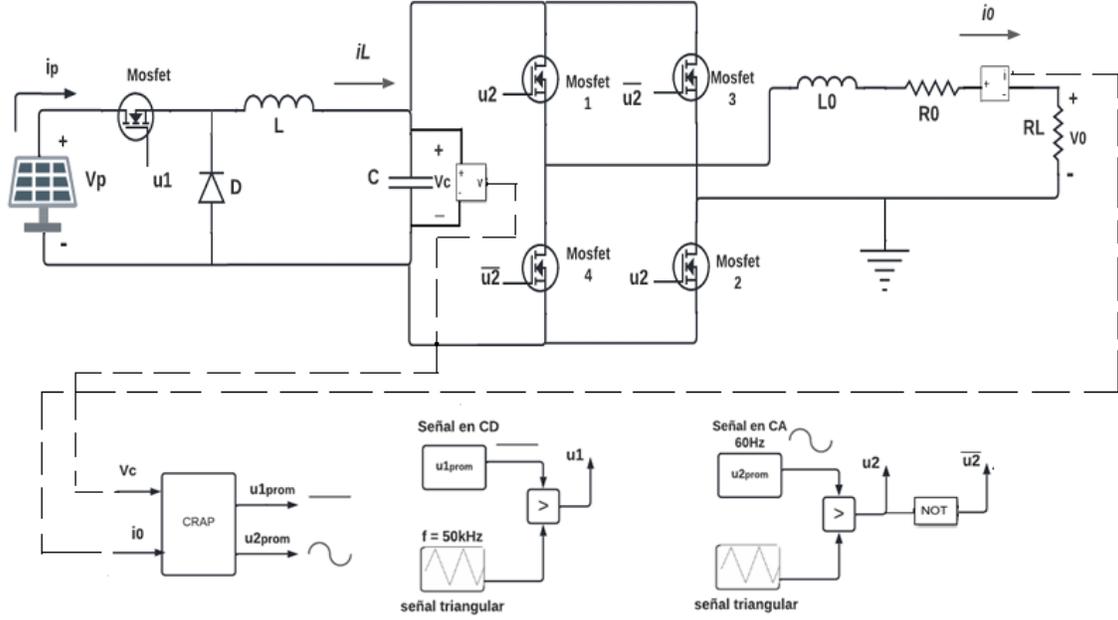


Figura 3.5. Control por rechazo activo de perturbaciones del sistema fotovoltaico.

Considerando el sistema de la ecuación (3.12) y realizando un cambio de variable $x_1 = i_L$, $x_2 = v_C$ y $x_3 = i_0 = I_0$, se obtiene el sistema de la ecuación (3.13).

Realizando una inspección de las ecuaciones resultantes del sistema, se observa un sistema plano, cuyas salidas planas son $x_2 = v_C$ y $x_3 = i_0$, responsables de la parametrización del sistema.

$$L \cdot \frac{di}{dt} = E u_1 - x_2$$

$$C \cdot \frac{dv_C}{dt} = x_1 + (1 - 2u_2)x_3 \quad (3.13)$$

$$L_0 \cdot \frac{di_0}{dt} = -(1 - 2u_2)x_2 - x_3(R_0 + R_c)$$

Dado que el mismo número de entradas de control debe ser el mismo número de salidas planas, se tienen, dos entradas de control y dos salidas planas [45]. En el sistema de la ecuación (3.14) se muestra la parametrización diferencial, en la que cada una de las variables de estado y las entradas de control se encuentra en términos de las salidas planas F y sus derivadas.

$$\begin{aligned}
 x_1 &= C\dot{F}_1 + \frac{L_0 F_2 \dot{F}_2}{F_1} + \frac{F_2^2 (R_0 + R_C)}{F_1} \\
 x_2 &= F_1 \\
 x_3 &= F_2
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

En la ecuación (3.15) se muestran las señales de control, las cuales se expresan en función de las derivadas de mayor orden de las salidas planas \ddot{F}_1 y \ddot{F}_2 , en donde, ϕ_1 y ϕ_2 se consideran las perturbaciones internas y externas que afectan al sistema.

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \frac{L C}{E} \ddot{F}_1 + LL_0 \frac{F_2}{EF_1} \ddot{F}_2 + \frac{2LF_2}{EF_1} ((R_0 + R_C)) \dot{F}_2 + LL_0 \frac{F_1 \dot{F}_2 \dot{F}_2}{EF_1^2} - LL_0 \frac{F_2 \dot{F}_1 \dot{F}_2}{EF_1^2} - L(R_0 + R_C) \left(\frac{F_2^2 \dot{F}_1}{EF_1^2} \right) + \frac{F_1}{E} \\
 u_2 &= \frac{L_0 \dot{F}_2}{2F_1} + \frac{F_2 (R_0 + R_C)}{2F_1} + \frac{1}{2} \\
 \dot{u}_2 &= \frac{L_0}{2F_1} \ddot{F}_2 - \frac{L_0 \dot{F}_2 \dot{F}_1}{2F_1^2} + \frac{(R_0 + R_C) F_1 \dot{F}_2}{2F_1^2} - \frac{(R_0 + R_C) F_2 \dot{F}_1}{2F_1^2} \\
 \phi_1 &= \frac{2LF_2}{EF_1} ((R_0 + R_C)) \dot{F}_2 + LL_0 \frac{F_1 \dot{F}_2 \dot{F}_2}{EF_1^2} - LL_0 \frac{F_2 \dot{F}_1 \dot{F}_2}{EF_1^2} - L(R_0 + R_C) \left(\frac{F_2^2 \dot{F}_1}{EF_1^2} \right) + \frac{F_1}{E} \\
 \phi_2 &= -\frac{L_0 \dot{F}_2 \dot{F}_1}{2F_1^2} + \frac{(R_0 + R_C) F_1 \dot{F}_2}{2F_1^2} - \frac{(R_0 + R_C) F_2 \dot{F}_1}{2F_1^2}
 \end{aligned}$$

La relación que vincula a las entradas de control con las derivadas de orden superior a través de una matriz, esta resulta ser no invertible. Esto indica que el grado relativo no está bien definido, de ahí que una extensión dinámica de la entrada de control u_2 conlleva a que los grados relativos estén bien definidos de acuerdo a las entradas y a las salidas planas seleccionadas [45], esta relación se muestra en la ecuación (3.15).

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \frac{L C}{E} \ddot{F}_1 + \frac{LL_0 F_2}{EF_1} \ddot{F}_2 + \phi_1 \\
 \dot{u}_2 &= \frac{L_0}{2F_1} \ddot{F}_2 + \phi_2
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

La ecuación (3.15) se expresa en forma matricial, como se muestra en la ecuación (3.16).

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ \dot{u}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{LC}{E} & \frac{LL_0F_2}{EF_1} \\ 0 & \frac{L_0}{2F_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{F}_1 \\ \ddot{F}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Despejando las derivadas de mayor orden de las salidas planas \ddot{F}_1 y \ddot{F}_2 de la ecuación (3.16), se obtiene la ecuación (3.17).

$$\begin{pmatrix} \ddot{F}_1 \\ \ddot{F}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{E}{LC} & -\frac{2F_2}{C} \\ 0 & \frac{2F_1}{L_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ \dot{u}_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{E}{LC} & -\frac{2F_2}{C} \\ 0 & \frac{2F_1}{L_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{pmatrix} \ddot{F}_1 \\ \ddot{F}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{E}{LC} & -\frac{2F_2}{C} \\ 0 & \frac{2F_1}{L_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ \dot{u}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix}$$

En la ecuación (3.18) se muestra el observador GPI de voltaje en términos de la salida plana F_1 , el cual incluye un integrador para una aproximación más apropiada.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{F}}_1 &= \hat{F}_{C1} + \lambda_2(F_1 - \hat{F}_1) \\ \dot{\hat{F}}_{C1} &= \left(\frac{E}{LC}\right)u_1 - \frac{2F_2}{C}\dot{u}_2 + \hat{s}_1 + \lambda_1(F_1 - \hat{F}_1) \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\dot{\hat{s}}_1 = \lambda_0(F_1 - \hat{F}_1)$$

Considerando que $v_c = F_1$ y $\hat{s}_1 = \varphi_1$, se obtiene la ecuación (3.19).

$$\begin{aligned} \dot{\hat{v}}_c &= \hat{v}_{C1} + \lambda_2(v_c - \hat{v}_c) \\ \dot{\hat{v}}_{C1} &= \left(\frac{E}{LC}\right)u_1 - \frac{2I_0}{C}\dot{u}_2 + \hat{s}_1 + \lambda_1(v_c - \hat{v}_c) \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\dot{\hat{s}}_1 = \lambda_0(v_c - \hat{v}_c)$$

En la ecuación (3.20) se muestra el observador GPI de corriente en términos de la salida plana F_2 , el cual incluye un integrador para una aproximación más apropiada.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{F}}_2 &= \hat{F}_{O2} + \delta_2(F_2 - \hat{F}_2) \\ \dot{\hat{F}}_{O2} &= \frac{2F_1}{L_0}\dot{u}_2 + \hat{g}_1 + \delta_1(F_2 - \hat{F}_2)\end{aligned}\quad (3.20)$$

$$\dot{\hat{g}}_1 = \delta_0(F_2 - \hat{F}_2)$$

Considerando que $I_o = F_2$ y $\hat{g}_1 = \varphi_2$, se obtiene la ecuación (3.21).

$$\begin{aligned}\dot{\hat{I}}_0 &= \hat{I}_{O1} + \delta_2(I_o - \hat{I}_0) \\ \dot{\hat{I}}_{O1} &= \frac{2V_c}{L_0}\dot{u}_2 + \hat{g}_1 + \delta_1(I_o - \hat{I}_0)\end{aligned}\quad (3.21)$$

$$\dot{\hat{g}}_1 = \delta_0(I_o - \hat{I}_0)$$

Para la sintonización de los coeficientes λ y δ de los observadores GPI de voltaje y corriente propuestos se utiliza el método de ubicación de polos, de los cuales se eligen los coeficientes de acuerdo a la parte lineal predominante del polinomio característico del cual se desee que rijan el comportamiento del error. Para este caso se elige el siguiente polinomio Routh-Hurwitz de tercer orden. $P_1 = (s^2 + (2\zeta_1\omega_{n1})s + \omega_{n1}^2)(s + \alpha) = P_2$. La sintonización de los observadores está representada en el conjunto de ecuaciones (3.22) y (3.23).

Para los coeficientes de amortiguamiento ζ_1, ζ_{11} deben ser nominados entre $0 < \zeta_1, \zeta_{11} < 1$, la frecuencia del sistema debe ser entre $0 < \omega_{n1}, \omega_{n11}$ y para $\alpha > 0$.

Sintonización del observador de voltaje:

$$\begin{aligned}P_1 &= (s^2 + (2\zeta_1\omega_{n1})s + \omega_{n1}^2)(s + \alpha) \\ P_1 &= s^3 + s^2(2\zeta_1\omega_{n1} + \alpha) + s(\omega_{n1}^2 + 2\zeta_1\omega_{n1}\alpha) + \alpha\omega_{n1}^2\end{aligned}\quad (3.22)$$

$$\lambda_0 = \alpha \omega_{n1}^2$$

$$\lambda_1 = \omega_{n1}^2 + 2\zeta_1 \omega_{n1} \alpha$$

$$\lambda_2 = 2\zeta_1 \omega_{n1} + \alpha$$

Sintonización del observador de corriente:

$$P_2 = (s^2 + (2\zeta_{11} \omega_{n11})s + \omega_{n11}^2)(s + \alpha)$$

$$P_2 = s^3 + s^2(2\zeta_{11} \omega_{n11} + \alpha) + s(\omega_{n11}^2 + 2\zeta_{11} \omega_{n11} \alpha) + \alpha \omega_{n11}^2 \quad (3.23)$$

$$\delta_0 = \alpha \omega_{n11}^2$$

$$\delta_1 = \omega_{n11}^2 + 2\zeta_{11} \omega_{n11} \alpha$$

$$\delta_2 = 2\zeta_{11} \omega_{n11} + \alpha$$

En las ecuaciones (3.24) y (3.25) se hace uso de controladores auxiliares v_1 y v_2 con el propósito de obtener el comportamiento deseado de regulación de voltaje y seguimiento de corriente de las salidas planas deseadas \bar{v}_c y I_0^* .

Diseño del controlador auxiliar v_1 de voltaje:

$$v_1 = \ddot{F}_1^* - k_1(\hat{F}_1 - \dot{F}_1^*) - k_0(F_1 - F_1^*)$$

$$v_1 = -k_1(\hat{F}_1) - k_0(F_1 - F_1^*) \quad (3.24)$$

$$v_1 = -k_1 \hat{v}_{c1} - k_0(v_c - \bar{v}_c)$$

Diseño del controlador auxiliar v_2 de corriente:

$$v_2 = \ddot{F}_2^* - k_1(\hat{F}_2 - \dot{F}_2^*) - k_0(F_2 - F_2^*) \quad (3.25)$$

$$v_2 = \dot{I}_0^* - k_3(\hat{I}_{01} - \dot{I}_{01}^*) - k_2(I_0 - I_0^*)$$

Para los coeficientes k_0, k_1, k_2, k_3 de los controladores auxiliares se hizo uso del polinomio Routh-Hurwitz de segundo orden $P_3 = s^2 + (2\zeta_2 \omega_{n2})s + \omega_{n2}^2 = P_4$. La sintonización de

los coeficientes queda expresada en las ecuaciones (3.26) y (3.27). Donde $0 < \zeta_2, \zeta_3 < 1$ y $\omega_{n2}, \omega_{n3} > 0$.

Sintonización del controlador auxiliar v_1 de voltaje:

$$P_3 = s^2 + (2\zeta_2\omega_{n2})s + \omega_{n2}^2$$

$$k_0 = \omega_{n2}^2 \quad (3.26)$$

$$k_1 = 2\zeta_2\omega_{n2}$$

Sintonización del controlador auxiliar v_2 de corriente:

$$P_4 = s^2 + (2\zeta_3\omega_{n3})s + \omega_{n3}^2$$

$$k_2 = \omega_{n3}^2 \quad (3.27)$$

$$k_3 = 2\zeta_3\omega_{n3}$$

En la ecuación (3.28) se muestra el diseño matemático de la señal senoidal deseada.

$$I_O^* = A \sin(\omega_n t)$$

$$I_{O1}^* = \dot{I}_O^* = A \omega_n \cos(\omega_n t) \quad (3.28)$$

$$\dot{I}_{O1}^* = \ddot{I}_O^* = -A (\omega_n)^2 \sin(\omega_n t)$$

Finalmente, en la ecuación (3.29) se muestra el control para cada una de las entradas, en donde la señal de control u_2 se obtiene integrando \dot{u}_2 .

$$u_1 = \frac{LC}{E}(v_1 - \hat{s}_1) + \frac{LL_O I_O}{EF_1}(v_2 - \hat{g}_1) \quad (3.29)$$

$$\dot{u}_2 = \frac{L_O}{2v_C}(v_2 - \hat{g}_1)$$

3.3. Diseño del control PID

El controlador proporcional integral derivativo (PID) permite controlar un sistema en lazo cerrado para que consiga el estado de salida deseado. Este controlador está compuesto por tres elementos, de los cuales proporcionan una acción proporcional, integral y derivativa [46]. En la figura 3.6 se muestra el sistema a bloques del control PID para el sistema fotovoltaico.

- La acción proporcional pretende minimizar el error del sistema, así como aumentar la velocidad de respuesta del sistema.
- La acción integral disminuye el error del sistema en régimen permanente.
- La acción derivativa aumenta la estabilidad del sistema controlado.

En el diseño del controlador PID al sistema fotovoltaico, se plantean dos lazos de control, uno para el convertidor reductor y otro para el inversor.

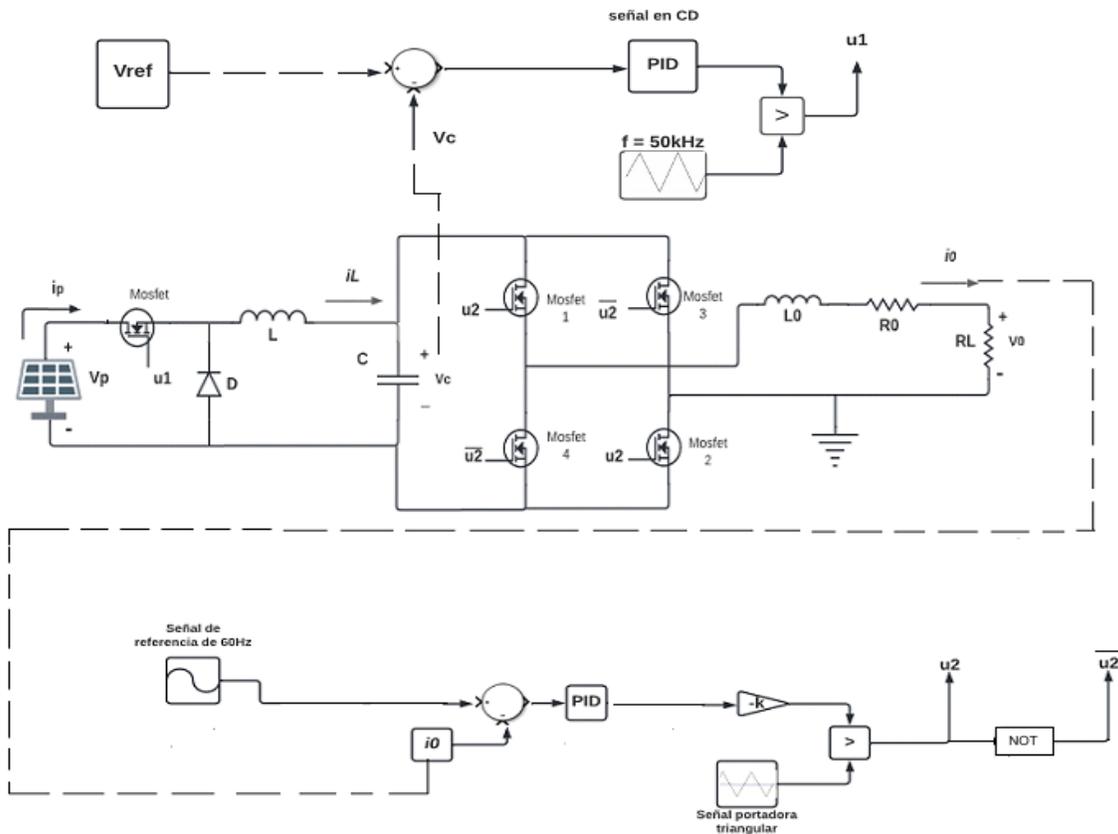


Figura 3.6. Control PID para el sistema fotovoltaico.

Para el caso del convertidor reductor se determina su función de transferencia, partiendo de las ecuaciones (3.30) resultantes del análisis aplicando las leyes de Kirchhoff al convertidor reductor.

$$L \cdot \frac{di}{dt} = Eu - V \tag{3.30}$$

$$C \cdot \frac{dv}{dt} = i_L - \frac{V}{R}$$

Aplicando la transformada de Laplace al sistema de ecuaciones (3.30).

$$LSI(s) = Eu(s) - V(s)$$

$$CSV(s) = I(s) - \frac{V(s)}{R}$$

Se obtiene la función de transferencia del convertidor reductor como se muestra en la ecuación (3.31).

$$G(s) = \frac{V(s)}{u(s)} = \frac{\frac{E}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \tag{3.31}$$

Se tiene que el controlador PID tiene la forma

$$u(t) = kp \cdot e(t) + \frac{kp}{\tau_i} \int e(t)dt + kp \cdot \tau_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Mediante la transformada de Laplace se tiene que la función de transferencia para el PID queda expresada en la ecuación (3.32).

$$Gc(s) = \frac{u(s)}{E(s)} = kp \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s\right) \tag{3.32}$$

Se obtiene la función de transferencia de lazo cerrado como se presenta en la ecuación (3.33).

$$H(s) = \frac{G(s) \cdot Gc(s)}{1 + G(s) \cdot Gc(s)}$$

$$H(s) = \frac{\left(\frac{E}{LC}\right) \cdot \left(kp + \frac{kp}{\tau_i s} + kp \cdot \tau_d s\right)}{\left(\frac{E}{LC}\right) \cdot \left(kp + \frac{kp}{\tau_i s} + kp \cdot \tau_d s\right) + s^2 + \frac{1}{RC} s + \frac{1}{LC}} \quad (3.33)$$

Después, se obtiene el polinomio característico del denominador de la función de transferencia de lazo cerrado, debido a que esta ayuda a poder sintonizar adecuadamente el controlador, la cual queda expresada en la ecuación (3.34).

$$s^3 + \left(\frac{1}{RC} + \frac{E}{LC} \cdot kp \cdot \tau_d\right) s^2 + \left(\frac{1}{LC} + \frac{E \cdot kp}{LC}\right) s + \frac{E kp}{LC \tau_i} \quad (3.34)$$

La sintonización de la ecuación (3.34) se realiza mediante un polinomio Routh-Hurwitz de tercer orden, el cual se expresa en la ecuación (3.35).

$$(s^2 + 2\zeta wn s + wn^2)(s + \alpha)$$

$$s^3 + (\alpha + 2\zeta wn) s^2 + (wn^2 + 2\zeta wn \alpha) s + \alpha wn^2 \quad (3.35)$$

Igualando el polinomio tipo Routh-Hurwitz con el polinomio característico de la función a lazo cerrado, se obtienen las ecuaciones (3.36), (3.37) y (3.38) para las variables kp , ki y kd , las cuales servirán para sintonizar el convertidor reductor.

$$kp = \frac{LC}{E} (wn^2 + 2\zeta wn \alpha) \quad (3.36)$$

$$ki = \frac{LC}{E} (\alpha wn^2) \quad (3.37)$$

$$kd = \frac{LC}{E} \left(\alpha + 2\zeta wn - \frac{1}{RC} \right) \quad (3.38)$$

Una vez obtenido el control PID para el convertidor reductor, se realiza el control PID para el inversor, para este diseño se hizo uso de la herramienta *PID Controller*, el cual se encuentra en la librería *Simulink Library Browser* como se muestra en la figura 3.6. Esta

herramienta permite implementar los siguientes controladores (PID, PI, PD, P e I), así mismo, se puede establecer el dominio del tiempo ya sea en forma continua o discreta. [46].

Por otro lado, permite sintonizar de manera adecuada las ganancias k_p , k_i y k_d del control PID, para un correcto funcionamiento.

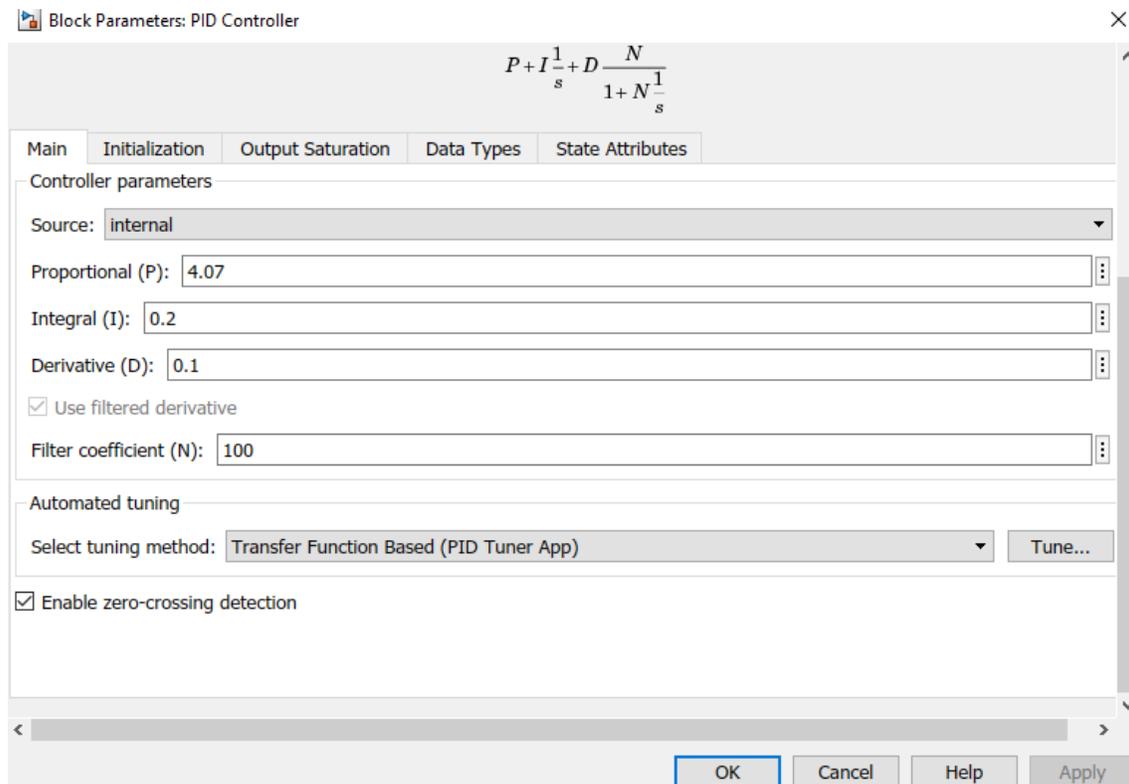


Figura 3.7. Bloque PID Controller.

Capítulo 4. Diseño y Modelado del Sistema Fotovoltaico en el Ambiente MATLAB/Simulink

Una vez realizado el análisis matemático del sistema fotovoltaico y el diseño de ambos controladores, se realiza la integración del sistema fotovoltaico aplicando el CRAP y el control PID en el ambiente MATLAB/Simulink, para analizar su funcionamiento ante perturbaciones aplicadas.

4.1. Modelado de los paneles solares en MATLAB/Simulink

Las características del Panel Solar Fotovoltaico EPCOM PRO-5012 [26] se muestran en la tabla 4.1. Puesto que cada panel proporciona una potencia de 50 W, se tomarán diez paneles conectados en serie, para obtener un voltaje en CD de 179 V aproximadamente, con una potencia de 500 W y una corriente de 2.79 A, de acuerdo a las características contempladas en la tabla 4.1. Con el uso del convertidor CD/CD reductor, el voltaje proporcionado por los paneles solares se reducirá a 160 V, dicho voltaje se utiliza para alimentar al circuito inversor. Con el controlador que se propone, se espera obtener una corriente senoidal a la salida del inversor con una amplitud variable que dependerá del índice de modulación en amplitud del mismo.

Tabla 4.1. Características del panel solar.

Características del panel solar	
Máxima potencia PM (W)($\pm 3\%$)	50 W
Máximo Voltaje V_m (V)($\pm 3\%$)	17.9 V
Máxima Corriente I_{mp} (A)($\pm 3\%$)	2.79 A
Voltaje de Circuito Abierto V_{oc} (V)	22.1 V
Corriente de cortocircuito I_{sc} (A)	3.96 A
Máximo Voltaje de Sistema	600 V
Tamaño del Módulo	(530x670x25) mm
Peso del Módulo	3.6 Kg

En la figura 4.1 se muestra la simulación en MATLAB/Simulink del panel solar con las características contempladas en la tabla 4.1. El panel solar se configura con una temperatura de 25°C grados y una radiación solar de 1000 W/m^2 . Tomando en

consideración un resistor de 6Ω conectado al panel solar el cual actúa como una carga con la finalidad de poder visualizar el voltaje y la corriente descritos en la tabla anterior.

Los resultados de voltaje y corriente máximos obtenidos del panel solar se pueden visualizar mediante las terminales de salida positivo y negativo del panel solar o mediante un puerto M en el cual se muestran las señales de voltaje y corriente del panel solar.

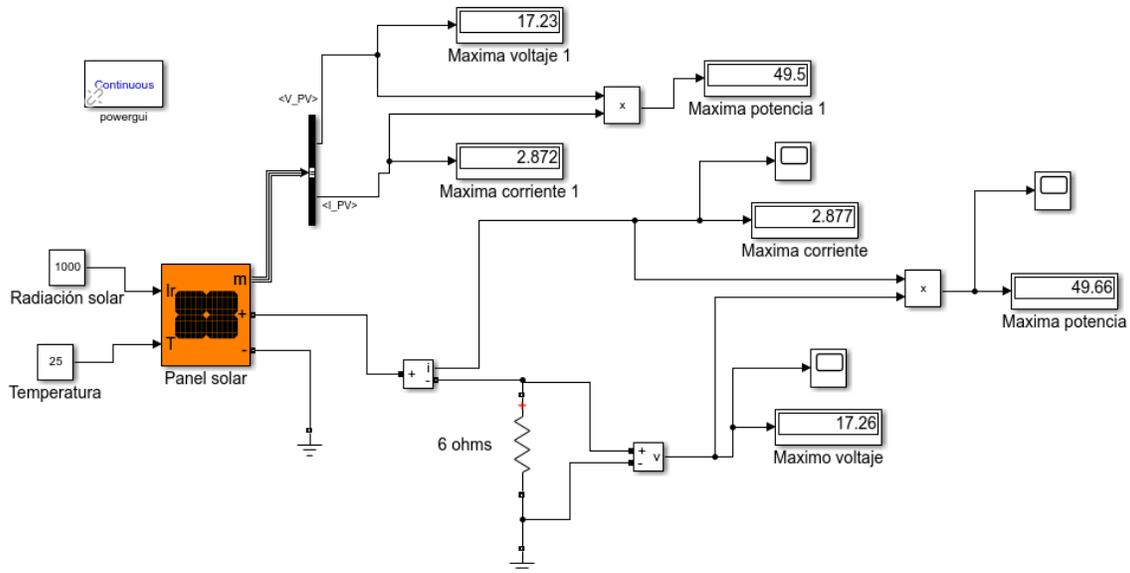


Figura 4.1. Simulación del panel solar.

Tomando las características contempladas en la tabla 4.1 se procedió a realizar la conexión de los paneles solares en serie como se muestra en la figura 4.2, para obtener el voltaje de entrada deseado al sistema fotovoltaico.

Utilizando la herramienta *Systems Power Specialized* en MATLAB/Simulink, se procedió a tomar el panel solar ubicado en el apartado de *Sources*. La radiación solar y temperatura se expresan en los indicadores 1 y 2, los valores de voltaje se visualizan en la salida positiva del primer panel y la salida negativa del décimo panel.

La conexión de los paneles solares se muestra en la figura 4.3. Donde se conectó una resistencia de carga de un valor de 64Ω , para el valor de esta resistencia se realizó un cálculo matemático aplicando la ley de Ohm, dividiendo la suma del voltaje que proporciona cada uno de los diez paneles fotovoltaicos conectados en serie y la corriente que proporcionan, con la finalidad de observar el voltaje de salida de los paneles solares.

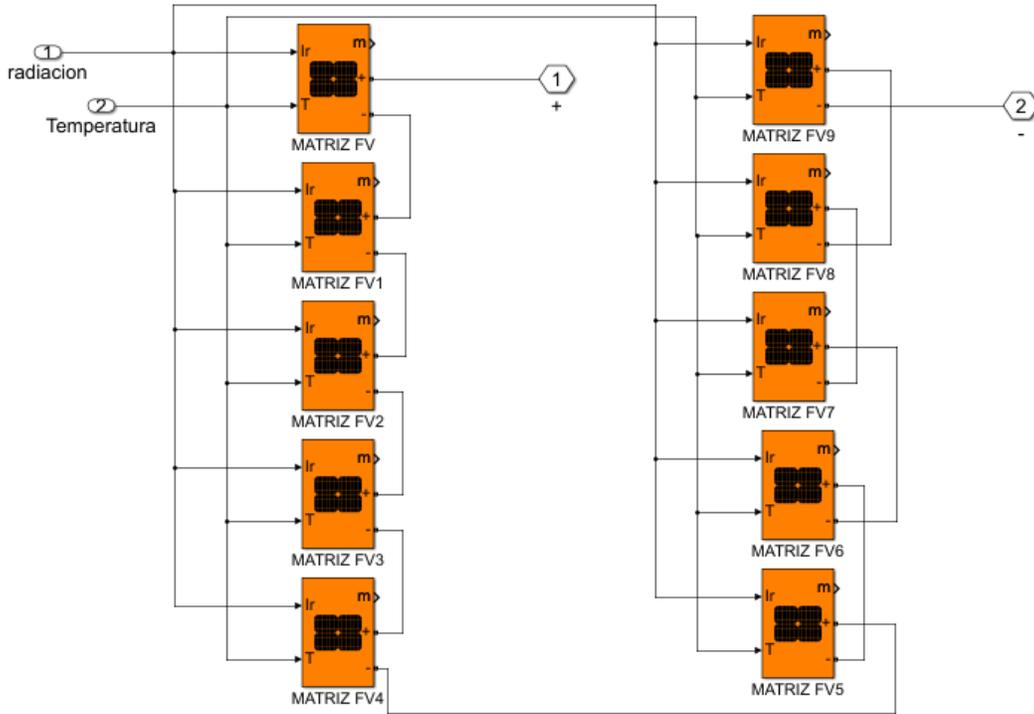


Figura 4.2. Conexión de los paneles solares en serie.

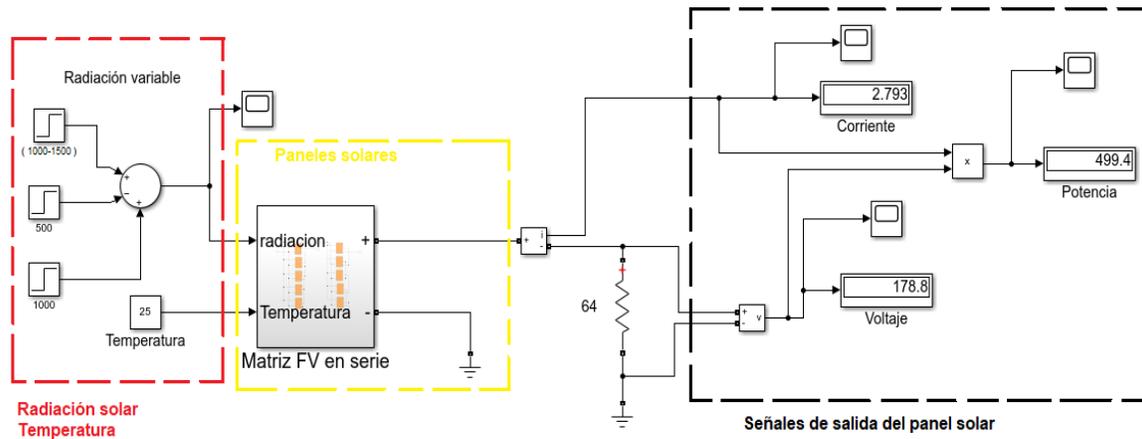


Figura 4.3. Modelado del panel solar en MATLAB/Simulink.

Esta conexión se hizo con la finalidad de mostrar el voltaje, corriente y potencia que suministran los diez paneles fotovoltaicos, los cuales se utilizaron para proveer de energía al sistema fotovoltaico.

- La radiación variable de {1000-1500-500-1000} W/m^2 y una temperatura de 25 °C se muestra en el recuadro rojo.
- La conexión de los paneles solares expresada en el subsistema del recuadro amarillo.
- Las salidas de voltaje, corriente y potencia se observan en el recuadro negro.

En la tabla 4.2 se muestran los resultados teóricos y simulados del panel solar con una radiación solar de 1000 W/m^2 y una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Esta prueba tiene como objetivo mostrar las variaciones que existen en el panel solar.

Tabla 4.2. Respuesta del panel solar de voltaje, corriente y potencia.

Conexión de paneles solares			
Parámetros	Teórico	Simulado	% error
Voltaje	$V_p = 179 \text{ V}$	$V_p = 178.8 \text{ V}$	0.11 %
Corriente	$I = 2.79 \text{ A}$	$I = 2.793 \text{ A}$	0.11 %
Potencia	$P = 500 \text{ W}$	$P = 488.4 \text{ W}$	0.12 %

4.2. Diseño de los convertidores electrónicos de potencia

En esta fase se presenta el diseño de los convertidores del sistema. En la tabla 4.3 se presentan los valores de los parámetros para el convertidor reductor, inversor y la carga resistiva-inductiva.

Tabla 4.3. Valores de los elementos propuestos para el convertidor reductor, inversor y carga resistiva-inductiva.

Elemento	Valor
	Convertidor reductor
Inductor	$L = 679.68 \mu\text{H}$
Capacitor	$C = 450 \mu\text{F}$
Frecuencia de conmutación	$f_s = 50 \text{ kHz}$
Inversor	
Frecuencia de conmutación	$f_s = 15 \text{ kHz}$
Carga	
Inductor	$L_0 = 10 \text{ mH}$
Resistencia interna del inductor	$R_0 = 0.7 \Omega$
Resistencia de carga	$RL = 100 \Omega$

En la figura 4.4 se presenta el circuito del sistema fotovoltaico en MATLAB/Simulink a partir de los parámetros de diseño contemplados de la tabla 4.2 y 4.3, la descripción de las etapas involucradas se presenta a continuación:

- El panel solar fotovoltaico, alimenta al sistema con un voltaje $V_E = 179 \text{ V}$ y una corriente de 2.79 A .

- El convertidor CD/CD tipo reductor tiene un voltaje de entrada $E = 179 V$ y un voltaje de salida deseado $V_c = 160 V$. La frecuencia de conmutación de la señal triangular aplicada es de $f_s = 50 kHz$ debido a que si se tiene una frecuencia muy grande las pérdidas por conmutación serían mayores y si la frecuencia es muy pequeña los elementos que conforman el convertidor reductor tendrán valores grandes, esta señal es comparada con una señal de control u_1 generada por el controlador, para tener como resultado la señal PWM y ayudar a la conmutación del interruptor. El cálculo para el valor del capacitor y del inductor se determinó a partir del ciclo de trabajo, dado por las ecuaciones (4.1) y (4.2). Para el caso del capacitor se ajustó a $C = 450 \mu F$, esto con la finalidad de disminuir el rizo de voltaje.

$$\Delta i_l = 0.5$$

$$\Delta v = 0.005$$

$$D = \frac{V_0}{V_s} = \frac{160 V}{179 V} = 0.8938$$

Valor del inductor:

$$L = \frac{V_0(1 - D)}{\Delta i_l f_s} = \frac{(160)(1 - 0.8938)}{(0.5)(50000)} \quad (4.1)$$

$$L = 679.68 \mu H$$

Valor del capacitor:

$$C = \frac{V_0(1 - D)}{8L\Delta v f_s^2} \quad (4.2)$$

$$C = 250 \mu F$$

- El inversor tiene un voltaje de entrada $V_c = 160 V$ proporcionado por el convertidor reductor, el inversor sigue una corriente senoidal con una amplitud de $1.5 A$ y el bloque encerrado de color café muestra el diseño de la señal senoidal deseada correspondiente al conjunto de ecuaciones (3.28). Se obtiene un $V_p = 150 V$ y un $V_{rms} = 106 V$ aproximadamente en la salida del inversor,

este voltaje se obtiene considerando la corriente deseada y la resistencia de carga RL , como se muestra en las ecuaciones (4.3).

$$I_d = 1.5 A$$

$$R_L = 100 \Omega$$

$$V_p = R_L I_d \quad (4.3)$$

$$V_p = 150 V$$

$$V_{rms} = \frac{150 V}{\sqrt{2}} \approx 106.06 V$$

Para la conmutación de los dispositivos de potencia del inversor se utiliza una modulación PWM bipolar, esta se conforma de una señal triangular de frecuencia de $15 kHz$, se elige esta frecuencia porque tiene un buen balanceo en pérdidas por conmutación, debido a que si se selecciona una frecuencia grande existe un aumento en las perdidas por conmutación del inversor, por lo tanto, la frecuencia de conmutación se selecciona en un rango de $6 - 20 kHz$, el rango audible que puede percibir el oído humano [47] y producir una mejor forma de onda, ésta frecuencia seleccionada es comparada con la señal de control u_2 generada por el controlador, para asimismo obtener la señal de conmutación PWM bipolar que ayude a los dispositivos de conmutación a estar en estado abierto o cerrado.

- Para verificar la robustez del sistema fotovoltaico y de los controles aplicados, se incluye un resistor para demandar una mayor corriente la cual será vista como una perturbación externa en el inversor, se conecta una resistencia de 50Ω en paralelo con la resistencia de carga RL , ésta se activa mediante un *switch breaker* cuando la simulación lleva un tiempo de ejecución de $0.5 s$.

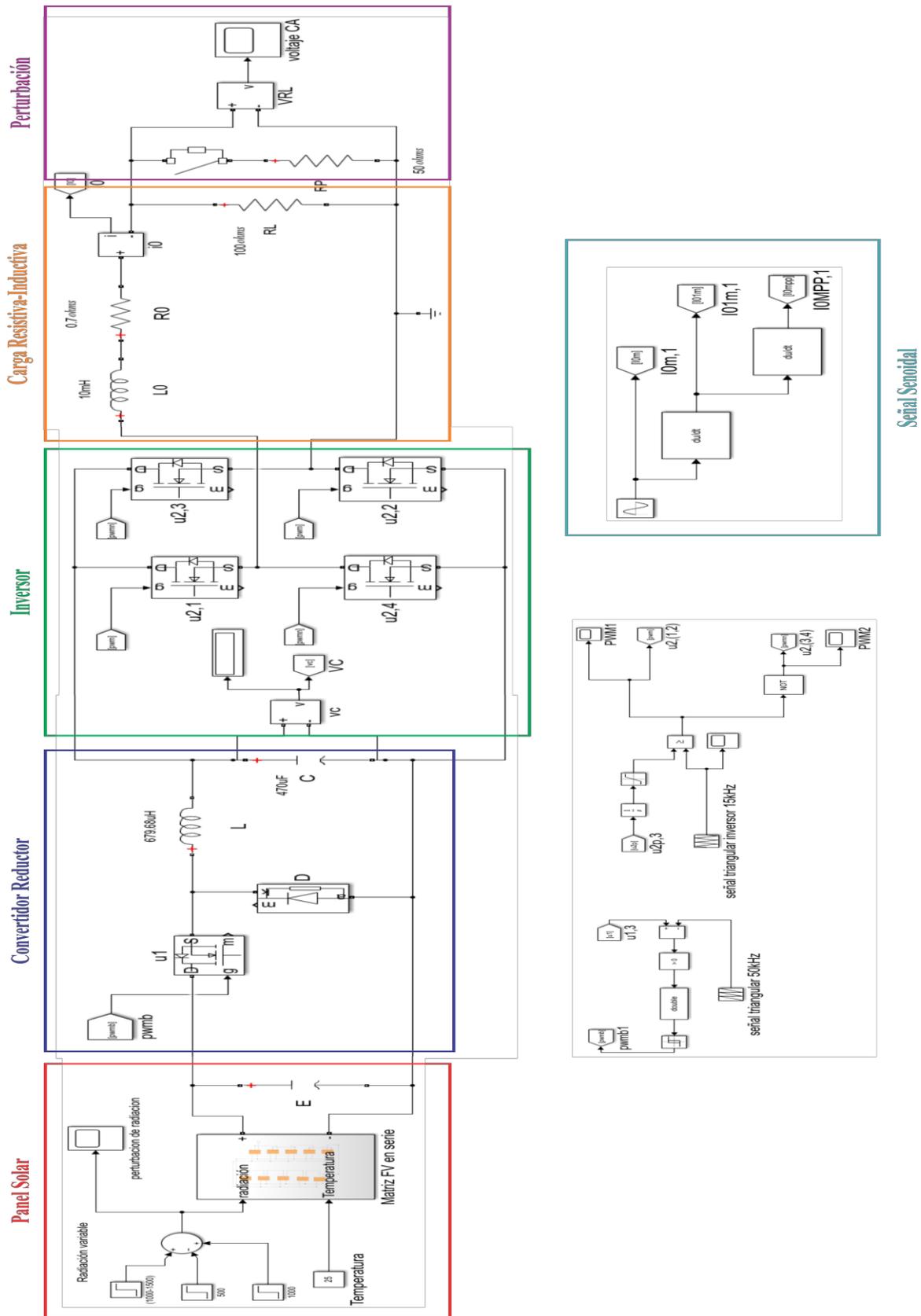


Figura 4.4. Diseño del sistema fotovoltaico en MATLAB/Simulink.

4.3. Diseño del control por rechazo activo de perturbaciones en el ambiente MATLAB/Simulink

Una vez realizado el análisis matemático del sistema fotovoltaico y el CRAP (véase capítulo 3), se realiza el diseño del sistema fotovoltaico aplicando el CRAP en el ambiente MATLAB/Simulink, en la figura 4.5 se muestra el controlador CRAP utilizando la herramienta *User-Defined Functions* en MATLAB/Simulink, en donde:

- Los bloques encerrados en color café corresponden a los observadores GPI de voltaje y corriente.
- Los bloques encerrados en color rojo corresponden a los controladores auxiliares para el voltaje y corriente v_1 y v_2 .
- Los bloques encerrados en color negro corresponden a las señales de control u_1 y u_2 .

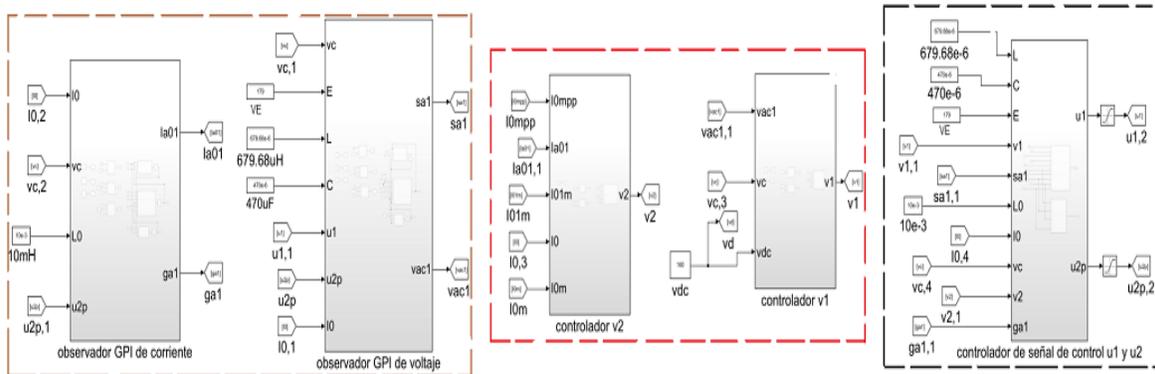


Figura 4.5. CRAP en MATLAB/Simulink.

En las figuras 4.6 y 4.7 se muestran los subsistemas que tiene por nombre “observador GPI de voltaje” y “observador GPI de corriente”, en donde:

- Los bloques de la figura 4.6 corresponden al conjunto de ecuaciones (3.19), correspondiente al observador GPI de voltaje, se sintonizó utilizando el conjunto de ecuaciones (3.22) obteniendo como resultado $\zeta_1 = 0.7071$, $\omega_{n1} = 10000$ y $\alpha = 6000$.
- Los bloques de la figura 4.7 corresponden al conjunto de ecuaciones (3.21), correspondiente al observador GPI de corriente, de igual forma se sintonizó

utilizando el conjunto de ecuaciones (3.23) obteniendo como resultado $\zeta_{11} = 0.7071, \omega_{n11} = 12000$ y $\alpha = 6000$.

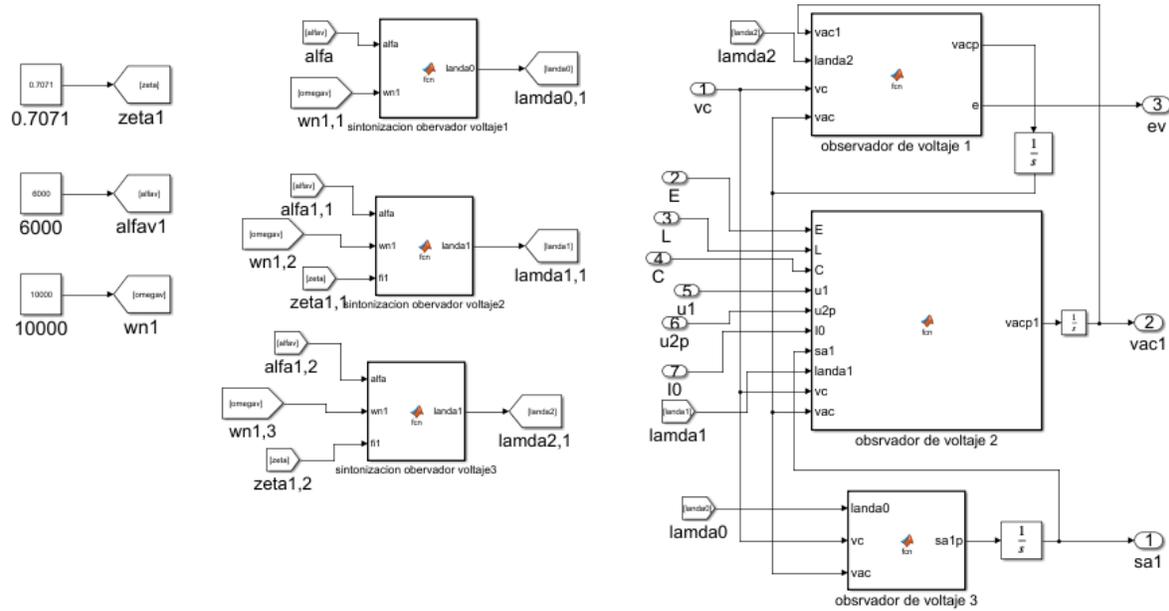


Figura 4.6. Observador GPI de voltaje en MATLAB/Simulink

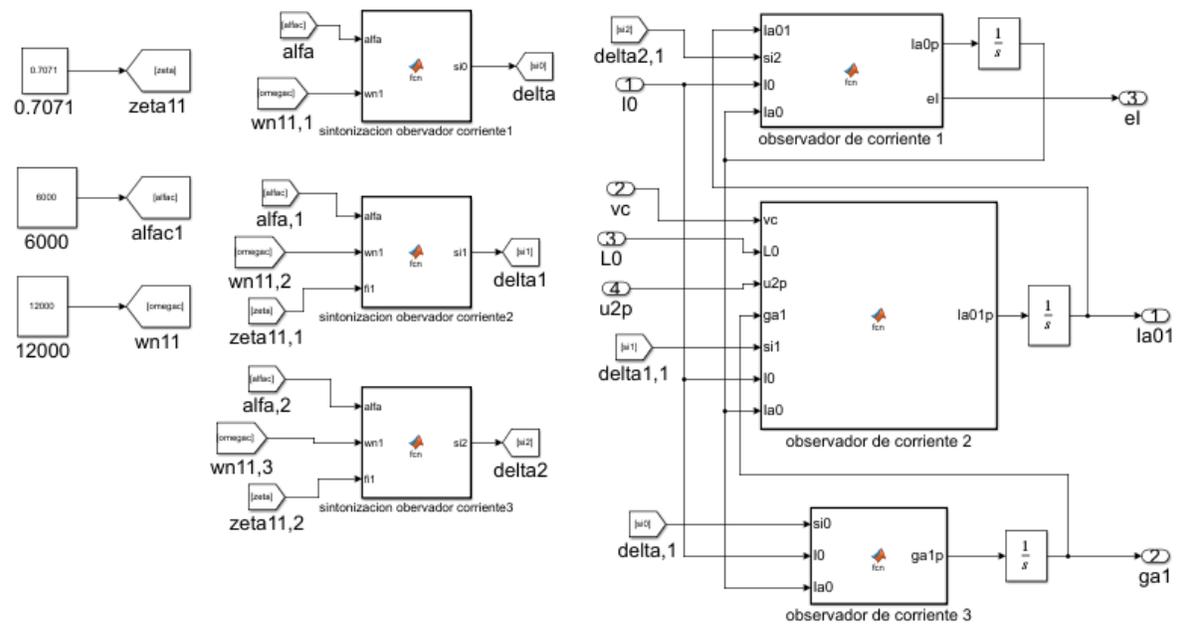


Figura 4.7. Observador GPI de corriente en MATLAB/Simulink

El controlador CRAP está conformado por dos controladores auxiliares denominados “controlador v_1 y v_2 ”, como se muestra en las figuras 4.8 y 4.9.

- En la figura 4.8 se observan con más detalle los bloques involucrados para el controlador auxiliar v_1 correspondiente al conjunto de ecuaciones (3.24), en este subsistema se selecciona el voltaje de referencia que se desea tener V_d a la salida del convertidor reductor, el cual se sintonizó utilizando el conjunto de ecuaciones (3.26) obteniendo como resultado $\zeta_2 = 0.7071$ y $\omega_{n2} = 1000$.
- En la figura 4.9 se muestra el controlador auxiliar v_2 correspondiente al conjunto de ecuaciones (3.25), de igual forma se sintonizó utilizando las ecuaciones (3.27) obteniendo como resultado $\zeta_3 = 0.7071$ y $\omega_{n3} = 7000$.

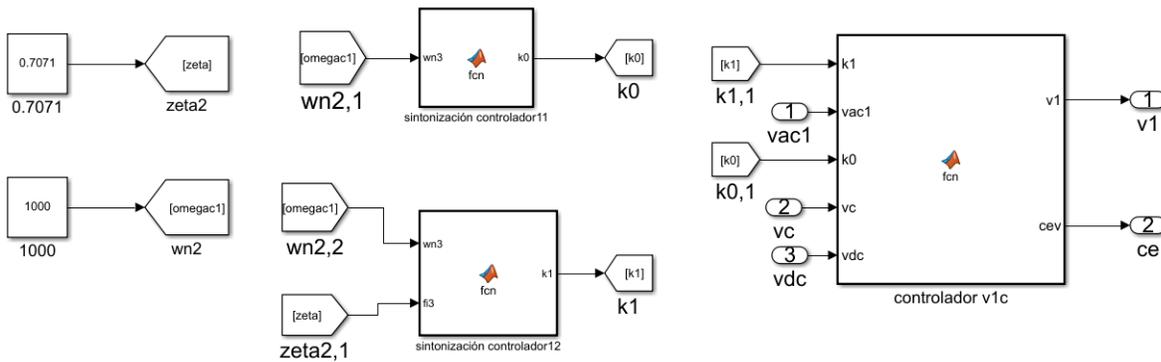


Figura 4.8. Controlador auxiliar v_1 en MATLAB/Simulink.

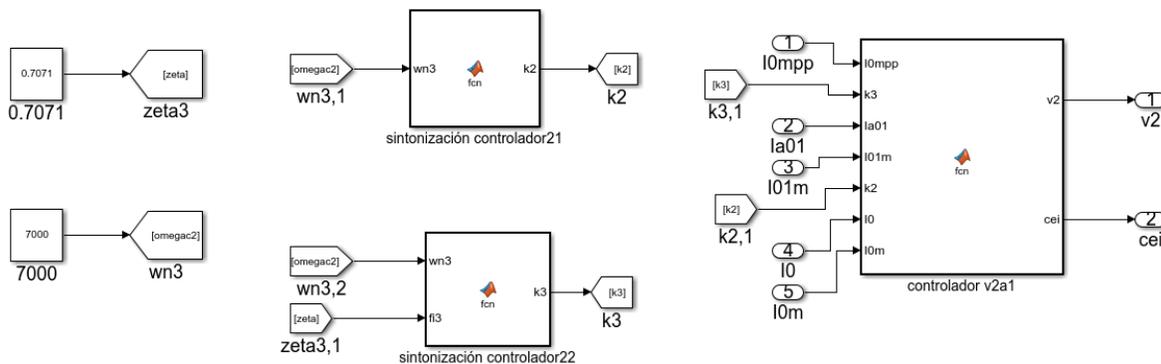


Figura 4.9. Controlador auxiliar v_2 en MATLAB/Simulink.

En la figura 4.10 se muestran los bloques involucrados para las señales de control u_1 y u_2 correspondientes al conjunto de ecuaciones (3.29).

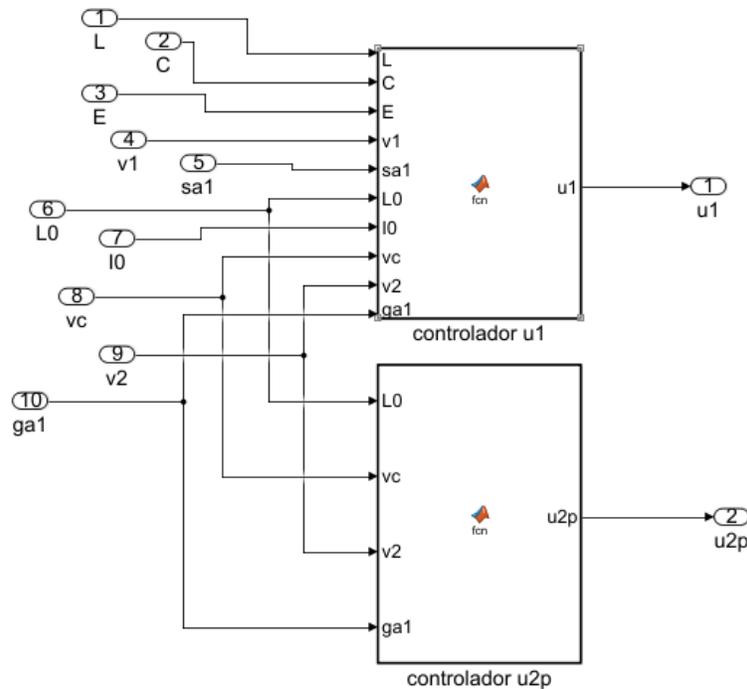


Figura 4.10 Señales de control u_1 y u_2 en MATLAB/Simulink.

4.4. Diseño del control PID en el ambiente MATLAB/Simulink

Una vez realizado el diseño del sistema fotovoltaico en el entorno MATLAB/Simulink aplicando el controlador CRAP, se realiza el diseño del sistema fotovoltaico aplicando el control PID, esto con la finalidad de comparar el funcionamiento de ambos controladores ante las perturbaciones que se le aplican al sistema.

Una vez diseñado el controlador PID para el convertidor reductor (véase subcapítulo 3.3), se realiza el diseño en el entorno MATLAB/Simulink, como se muestra en la figura 4.11, en donde:

- El bloque encerrado en color negro corresponde al error de voltaje obtenido mediante la diferencia del voltaje deseado y el voltaje medido.
- El bloque encerrado de color rojo corresponde a la acción proporcional, la cual se sintonizó utilizando la ecuación (3.36) obteniendo como resultado $\omega_n = 3000$ y $\alpha = 1500$, el resultado obtenido de la parte proporcional se multiplica por el error de voltaje, para posteriormente ser sumado con la parte integral y derivativa.
- El bloque encerrado en color verde corresponde a la acción derivativa, esta se sintoniza utilizando la ecuación (3.38) obteniendo como resultado $\zeta =$

0.7071 , $\omega_n = 3000$ y $\alpha = 1500$, el resultado obtenido de la parte diferencial se multiplica por la derivada del error de voltaje, para posteriormente ser sumado con la parte proporcional e integral.

- El bloque encerrado en color morado corresponde a la acción integral, la cual se sintonizó utilizando la ecuación (3.37) obteniendo como resultado $\omega_n = 3000$ y $\alpha = 1500$, el resultado de esta parte integral, el resultado obtenido se multiplica por la integral del error de voltaje, para posteriormente ser sumado con la parte proporcional y derivativa.
- En el bloque llamado “suma”, se realiza la sumatoria de la parte proporcional, integral y derivativa, para obtener la señal de control u_1 .

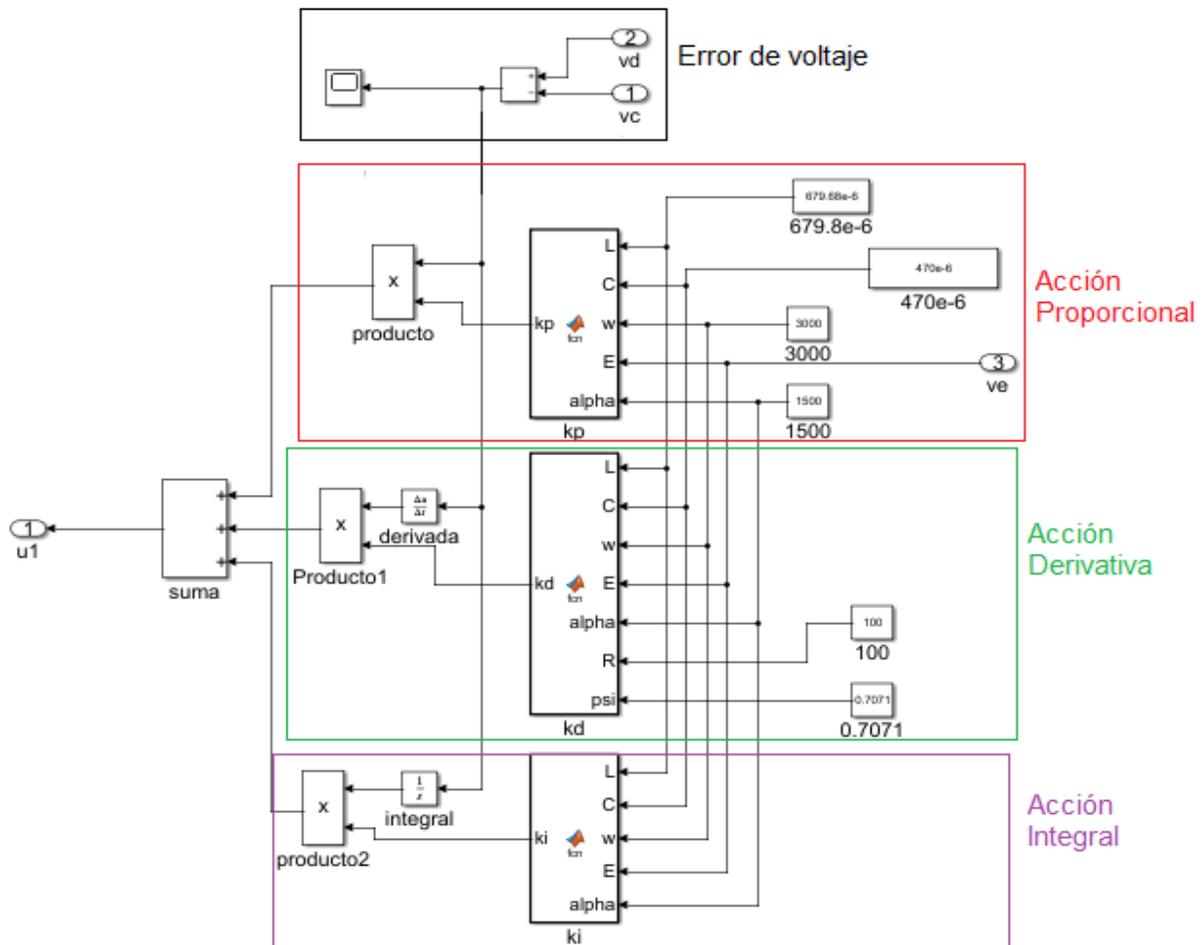


Figura 4.11. Control PID para el convertidor reductor en MATLAB/Simulink.

En seguida, se realiza el diseño del control PID para el inversor en MATLAB/Simulink como se muestra en la figura 4.12, de igual forma que con el convertidor reductor se hace uso de la herramienta *PID Controller*, en donde:

- La corriente de referencia senoidal de amplitud pico $I_d = 1.5 A$ se resta con la salida real que nos proporciona el inversor para obtener un error el cual ingresa al control PID del inversor, al momento de sintonizar resulta en ganancias de $k_p = 10$, $k_i = 2$ y $k_d = 0.1$, la señal resultante del control PID se compara con una señal triangular de 15 kHz para la conmutación de los interruptores del inversor. Obtenidas estas señales $u_{2,1}$ y $u_{2,2}$, se les conecta una compuerta NOT para obtener a las señales $u_{2,3}$ y $u_{2,4}$, estas corresponden al complemento de las señales $u_{2,1}$ y $u_{2,2}$.

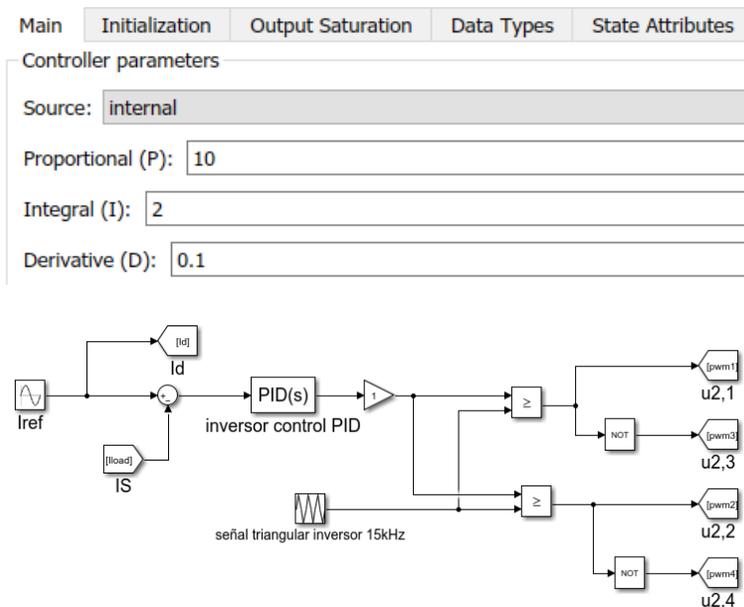


Figura 4.12. Control PID para el inversor en MATLAB/Simulink.

Capítulo 5. Resultados de Simulación

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al sistema fotovoltaico, con la finalidad de regular la salida de voltaje del convertidor reductor y seguir una referencia de corriente en el inversor aplicando el CRAP y el control PID.

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos con el control por rechazo activo de perturbaciones, para diferentes voltajes y corrientes deseadas, con el objetivo de obtener una comparación de los resultados obtenidos con el CRAP, se aplicaron los mismos voltajes y corrientes deseadas al sistema fotovoltaico aplicando el control PID.

Con la finalidad de conocer la robustez de los controladores CRAP y PID, se considera una radiación solar variable de $\{1000-1500-500-1000\} W/m^2$ y una temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$, así como una resistencia de carga externa que se aplica en 0.5 s . En la figura 5.1 se muestra el voltaje proporcionado por el panel solar aplicado al convertidor reductor, se considera un capacitor de $470\text{ }\mu\text{F}$ para disminuir el rizo generado.

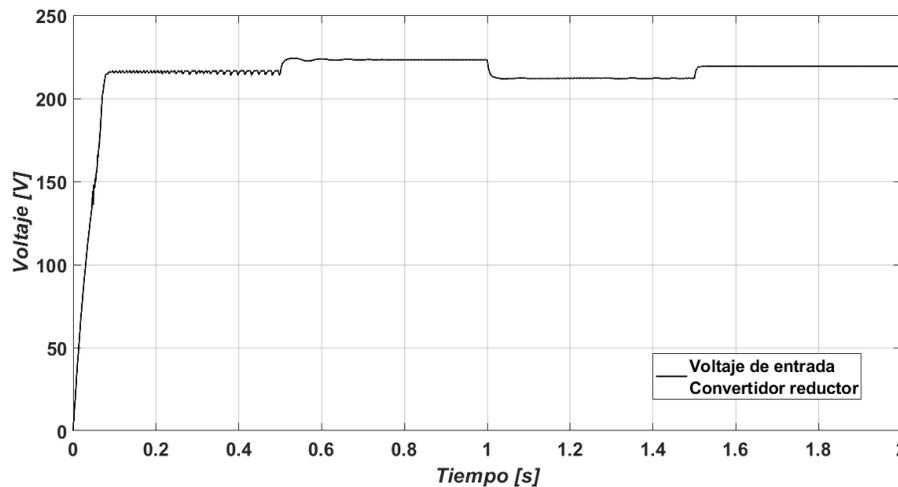


Figura 5.1. Voltaje de salida del panel solar.

A continuación, en la figura 5.2a se presenta la señal de control u_1 generada por el controlador CRAP para el convertidor reductor, mientras que en la misma figura 5.2b se presenta la respuesta empleando el PID, como se observa en las figuras, ambas señales de control reaccionan a las perturbaciones generadas en el panel solar y la carga, este ajuste se

realiza con la finalidad de compensar la variación de voltaje y pueda llegar a la referencia deseada.

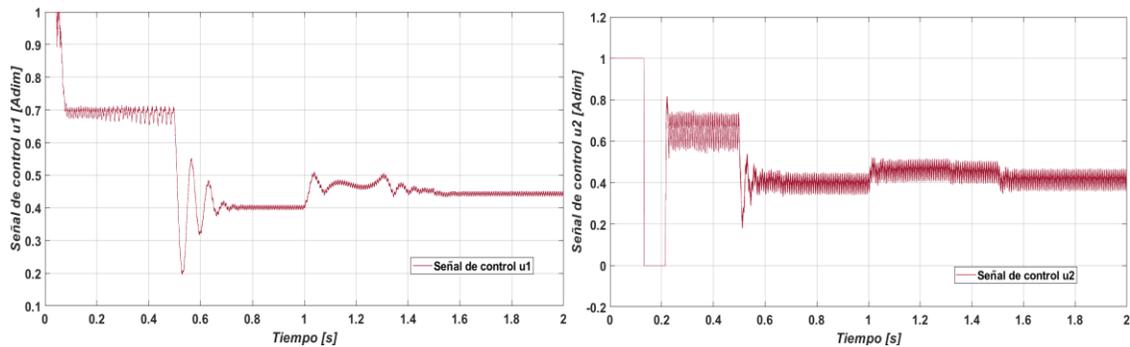


Figura 5.2. Señal de control u_1 para el convertidor reductor aplicando a) CRAP y b) PID.

En la figura 5.3, se muestran las señales PWM encargadas de activar el dispositivo de conmutación del convertidor reductor, generadas por la comparación de una señal triangular de 50 kHz y la señal u_1 generada por los mismos controladores.

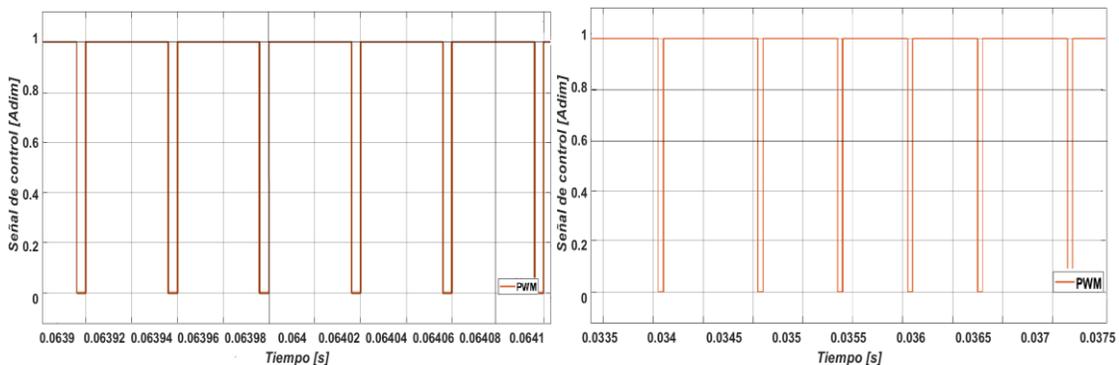


Figura 5.3. Modulación PWM para el convertidor reductor aplicando a) CRAP y b) PID.

En la figura 5.4a se muestra la señal de control u_2 generada por el controlador CRAP para el inversor, esta señal se hace más pequeña cuando la carga entra en operación en 0.5 s debido a que se compensa el aumento de corriente generado en la carga del inversor, mientras que en la misma figura 5.4b se presenta la respuesta empleando el controlador PID, para este caso cuando la carga entra en operación se incrementa el rizo de la señal de control.

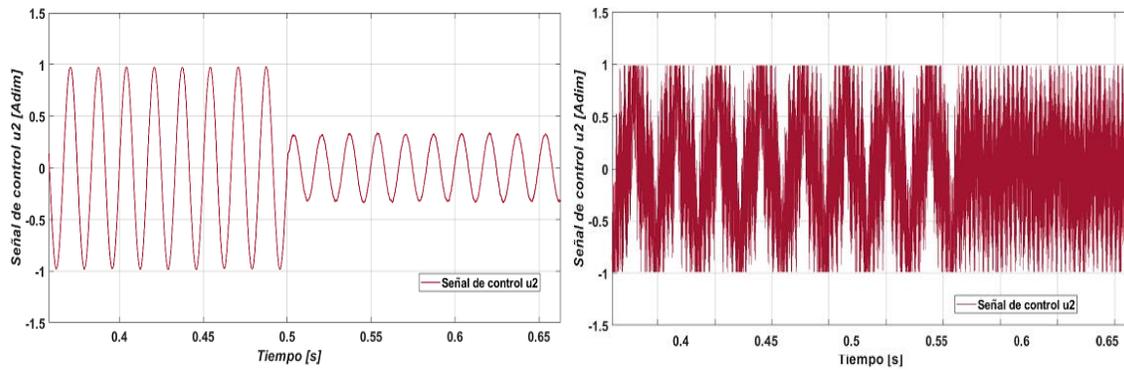


Figura 5.4. Señal de control u_2 para el inversor aplicando a) CRAP y b) PID.

En la figura 5.5 se muestran las señales de control de los dispositivos de conmutación para la modulación PWM bipolar en el inversor, esta señal es generada mediante la comparación de una señal triangular de 15 kHz y la señal u_2 generada por los controladores.

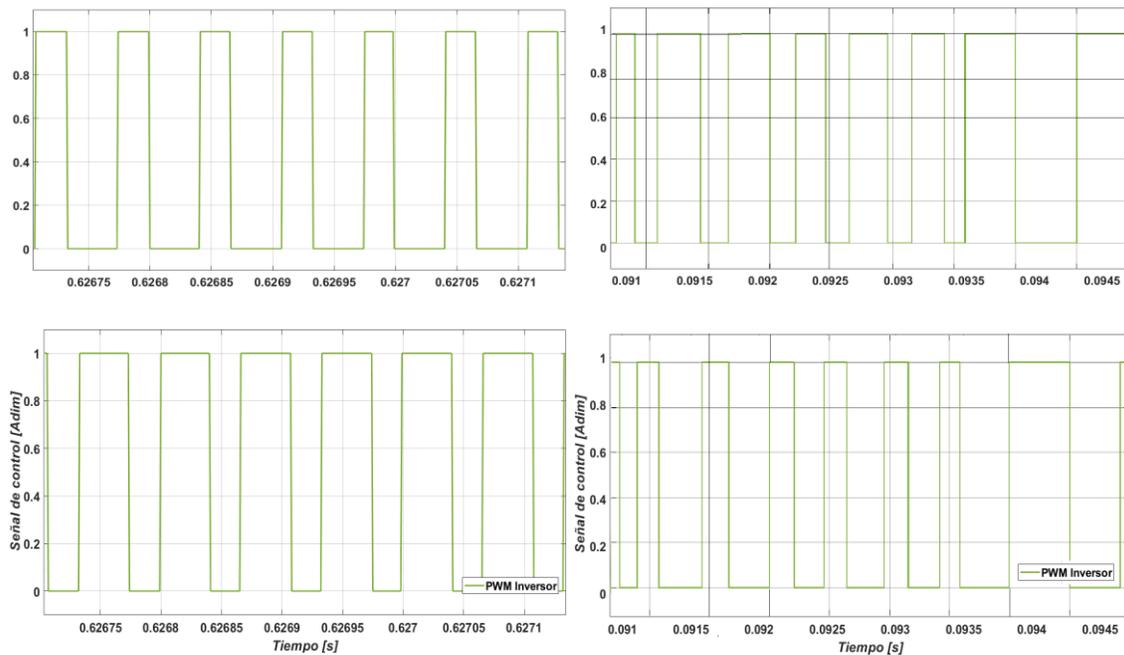


Figura 5.5. Modulación PWM bipolar para el inversor aplicando a) CRAP y b) PID.

A continuación, se presentan los resultados de simulación del sistema fotovoltaico tomando en consideración un voltaje de entrada al convertidor reductor proporcionado por el panel solar $V_p = 170 V$, un voltaje deseado en el convertidor reductor $V_{ref} = 160 V$ y una corriente senoidal deseada con una amplitud pico $I_d = 1.5 A$ en el inversor.

En la figura 5.16 se muestra el voltaje de salida en el convertidor reductor para ambos controladores, en donde el tiempo de establecimiento es de 0.1 s aplicando el controlador

CRAP como se muestra en la figura 5.6a, el voltaje de salida del convertidor contiene un sobretiro por lo que el tiempo de establecimiento es de 0.2 s como se muestra en la figura 5.6b para el caso del controlador PID, cabe mencionar que no cuentan con el mismo tiempo de establecimiento, ya que para la sintonización de los controladores se utiliza la técnica de prueba y error, en donde las ganancias se establecen en 0 inicialmente, luego se incrementan lentamente los valores a un valor específico hasta el punto en donde la señal de salida tenga un buen comportamiento, en las figuras se muestra un desajuste de voltaje debido a las perturbaciones introducidas en la carga y variaciones en la radiación solar, sin embargo se logra mantener la referencia de voltaje deseado.

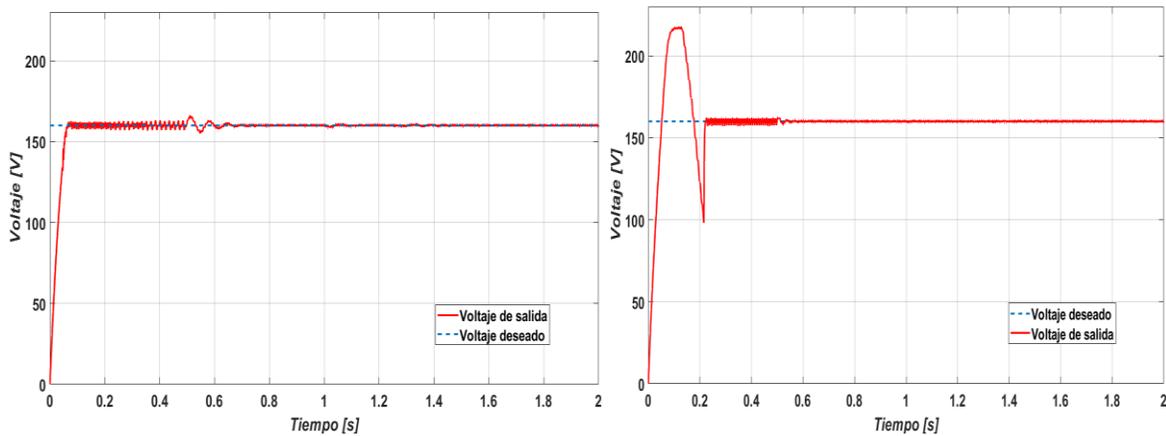


Figura 5.6. Voltaje de salida del convertidor reductor $V_{ref} = 160 V$ aplicando a) CRAP y b) PID.

En la figura 5.7 se muestra el comportamiento de la señal senoidal de salida del inversor para ambos controladores con una corriente deseada con amplitud pico $I_d = 1.5 A$, en la figura 5.7a se muestra la señal de corriente del inversor con un tiempo de establecimiento de 0.1 s aplicando controlador CRAP, mientras que en la figura 5.7b la señal de corriente en el inversor cuenta con un tiempo de establecimiento de 0.2 s aplicando el controlador PID, cabe mencionar que no cuentan con el mismo tiempo de establecimiento, ya que para sintonizar la ganancias de los controladores se utilizó la misma técnica de prueba y error utilizada en el voltaje.

Para tener una mejor perspectiva de la calidad en la corriente de salida del inversor, se utiliza la herramienta *FFT Analysis* en MATLAB/Simulink, para obtener la amplitud de la componente fundamental (60 Hz) y la distorsión armónica total (THD) de la corriente antes de que actúe la perturbación en la carga. En la figura 5.8a se muestra una corriente con una

componente fundamental de $1.537A$ y un THD de 8.93% cuando se aplica el controlador CRAP, mientras que con el controlador PID se obtiene una corriente con una componente fundamental de $1.495A$ y un THD de 12.33% como se muestra en la figura 5.8b, como se puede observar el controlador CRAP tiene un mayor acercamiento a la corriente deseada y un menor THD.

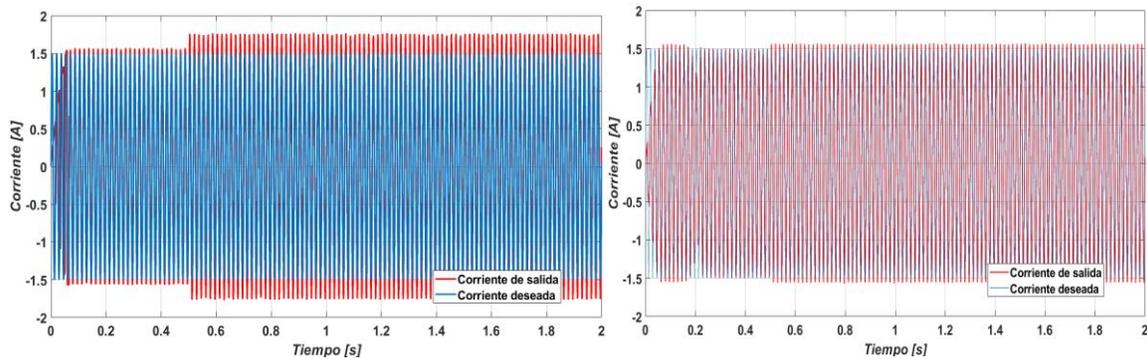


Figura 5.7. Corriente de salida en el inversor $I_d = 1.5 A$ aplicando a) CRAP y b) PID.

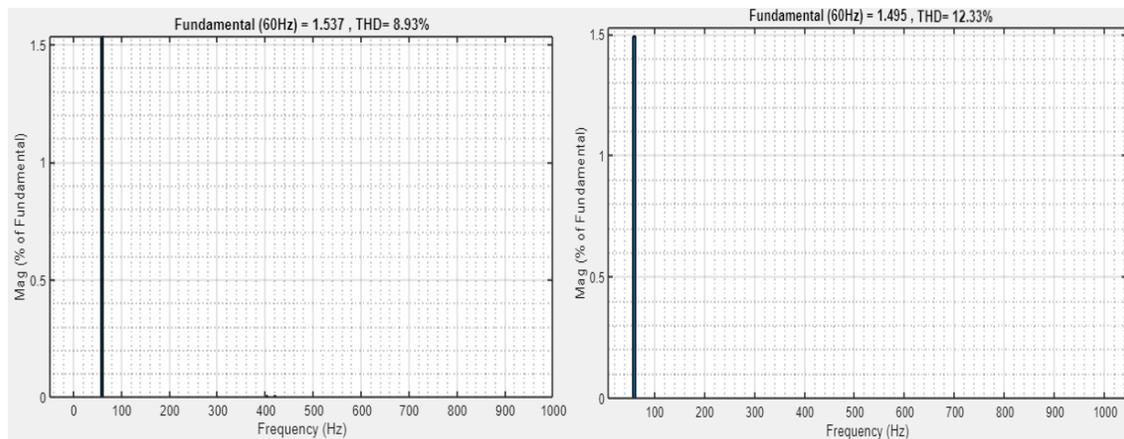


Figura 5.8. a) Componente fundamental en (60 Hz) = $1.537 A$ y distorsión armónica total THD = 8.93% antes de la perturbación aplicando CRAP y b) Componente fundamental en (60 Hz) = $1.495 A$ y distorsión armónica total THD = 12.33% antes de la perturbación aplicando PID.

En la figura 5.9 se presenta un acercamiento “zoom” para observar de mejor forma la corriente del inversor cuando entra en funcionamiento la perturbación en la carga en $0.5 s$ aplicando el controlador CRAP y PID, en ambos casos existe un incremento en el rizo de corriente a la salida del inversor, debido a la aplicación repentina de la resistencia externa en paralelo con la resistencia de carga.

Para observar la calidad en la corriente de salida del inversor, se obtiene la amplitud de la componente fundamental (60 Hz) y la distorsión armónica total (THD) de la corriente

durante la perturbación. En la figura 5.10a se muestra una corriente con una componente fundamental de $1.512 A$ y una distorsión armónica total (THD) de 13.73% aplicando el controlador CRAP, mientras que con el controlador PID se obtiene una corriente con una componente fundamental de $1.475 A$ y un THD de 9.39% como se muestra en la figura 5.10b, como se puede observar el controlador CRAP tiene un mayor acercamiento a la corriente deseada.

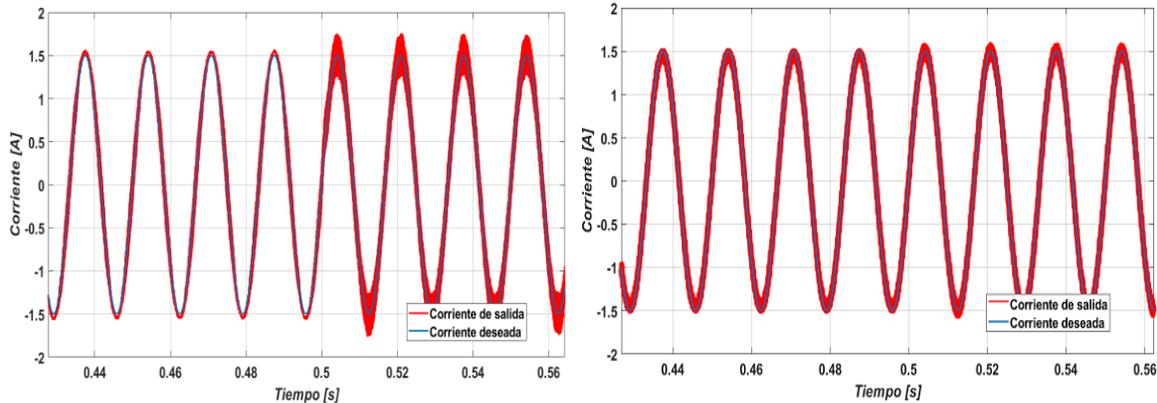


Figura 5.9. Perturbación actuada en $0.5 s$ en la corriente de $1.5 A$ aplicando a) CRAP y b) PID.

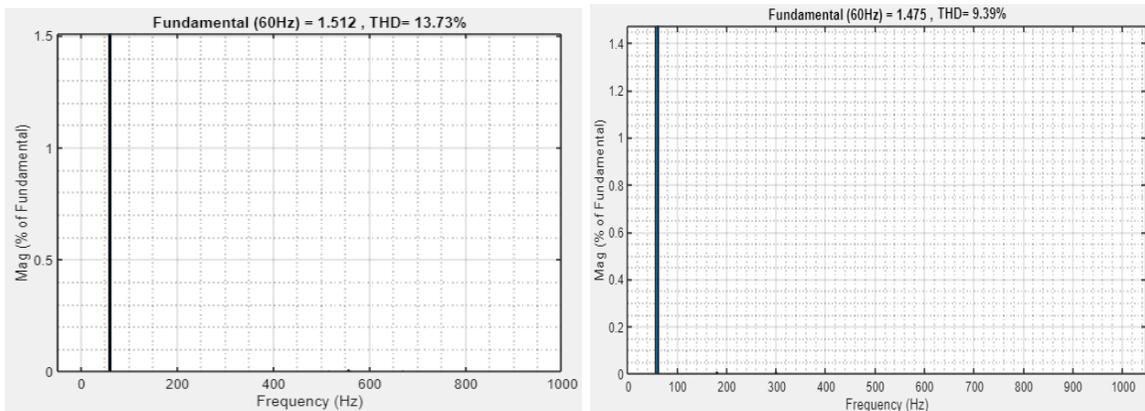


Figura 5.10. a) Componente fundamental en $(60 \text{ Hz}) = 1.512 A$ y distorsión armónica total $\text{THD} = 13.73 \%$ después de la perturbación aplicando CRAP y b) Componente fundamental en $(60 \text{ Hz}) = 1.475 A$ y distorsión armónica total $\text{THD} = 9.39 \%$ después de la perturbación aplicando PID.

En la figura 5.11 se muestra el voltaje de salida senoidal del inversor con una amplitud $V_{inv} = 150 V$ y un $V_{rms} = 106 V$ aplicando ambos controladores, debido a que la perturbación entra en operación en $0.5 s$ provoca que la resistencia de carga de 100Ω quede en paralelo con la resistencia de externa de 50Ω , provocando una disminución en el

voltaje de salida del inversor de $V_{inv} = 50 V$, el voltaje no se mantiene debido a que el control no es robusto en voltaje.

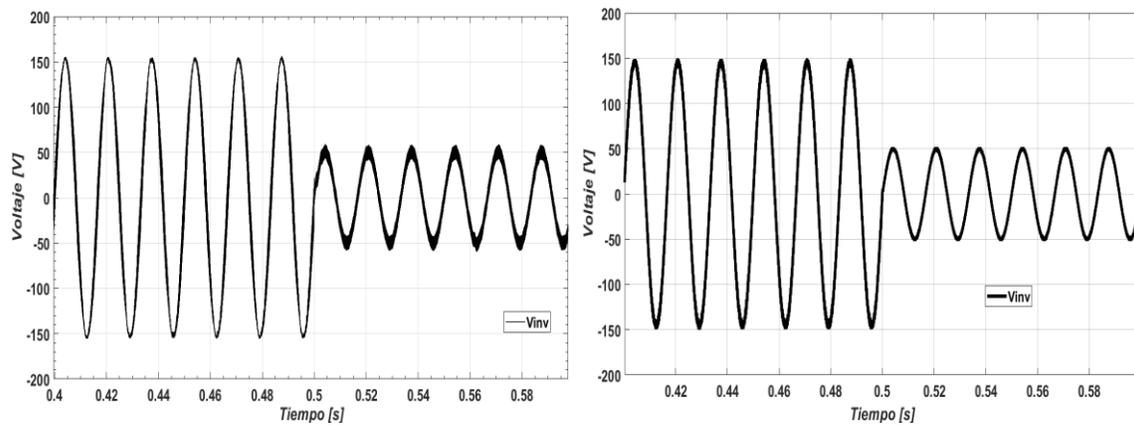


Figura 5.11. Voltaje de salida del inversor $V_{inv} = 150 V$ aplicando a) CRAP y b) PID.

En la figura 5.12 se presentan las señales de error de voltaje en el convertidor reductor generadas por ambos controladores, es importante mencionar que dicho error tiende a 0 V, en seguida se obtiene el error cuadrático como se muestra en la figura 5.13 y la integral del error cuadrático (ISE) como se muestra en la figura 5.14, se obtienen estos valores debido a que ambas respuestas de voltaje contienen sobre-amortiguamiento provocando un incremento del ISE para cada controlador.

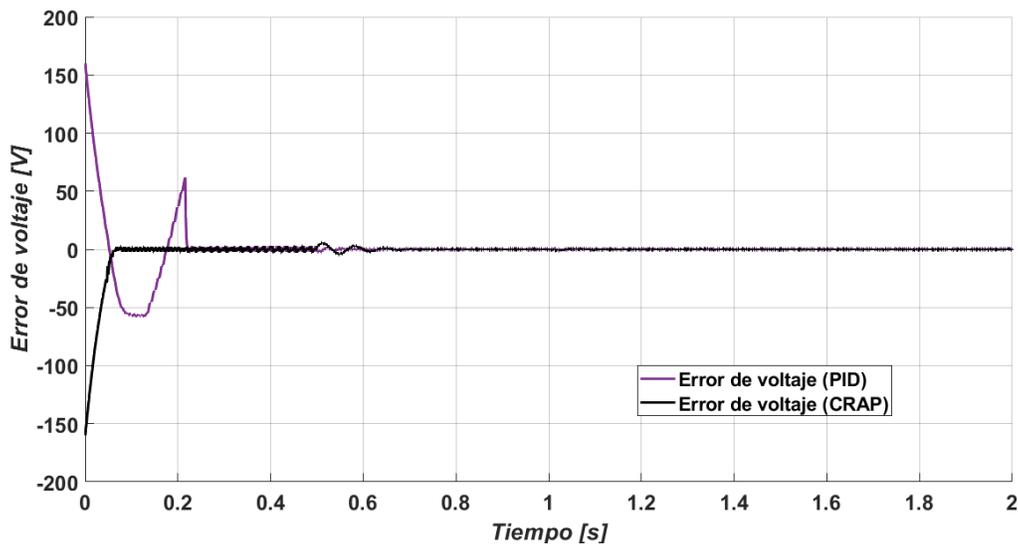


Figura 5.12. Error de voltaje en el convertidor reductor aplicando CRAP y PID.

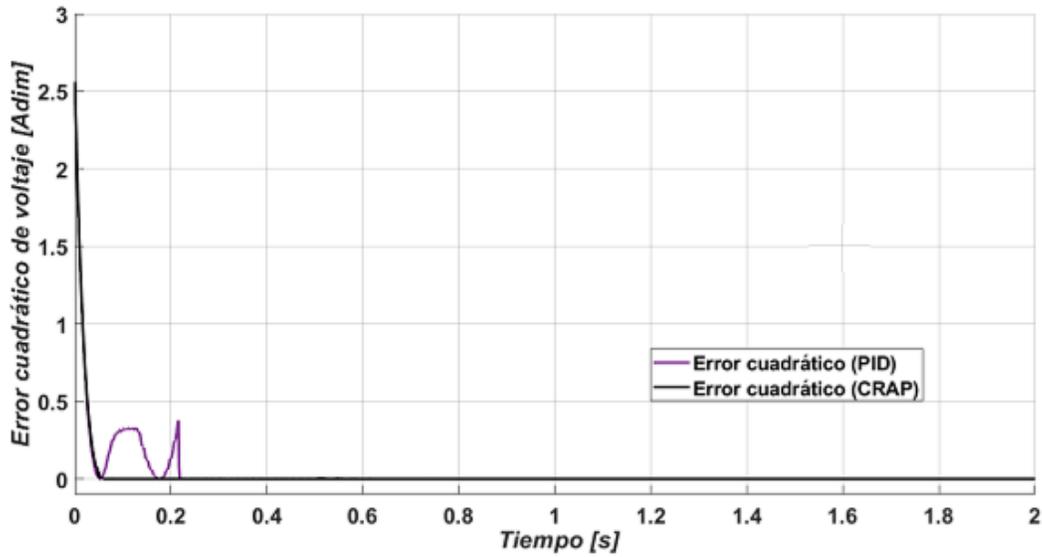


Figura 5.13. Error cuadrático de voltaje en el convertidor reductor aplicando CRAP y PID.

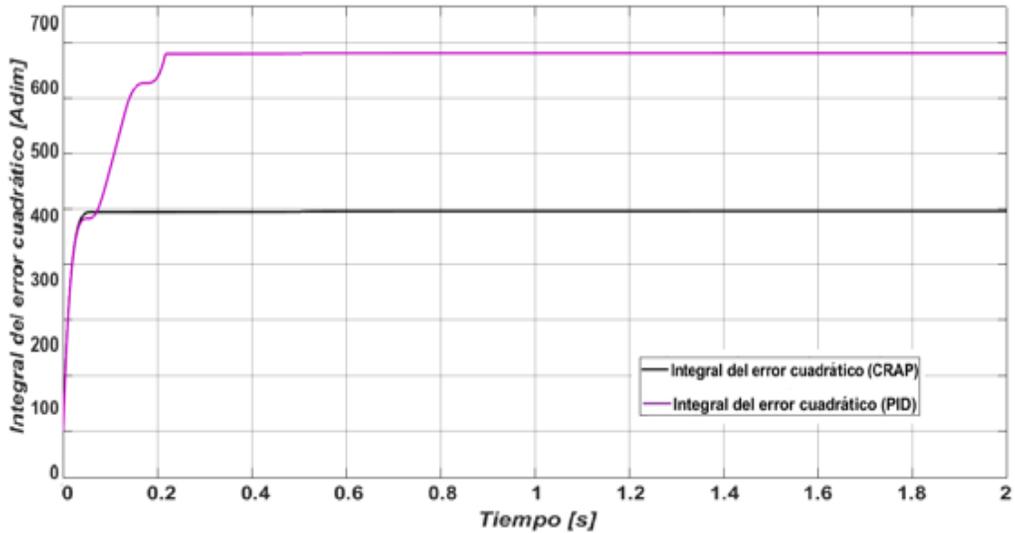


Figura 5.14. Integral del error cuadrático de voltaje en el convertidor reductor aplicando CRAP y PID.

En la figura 5.15 se muestran las señales de error de corriente en el inversor generadas por los controladores, el valor de estas señal es aproximadamente igual a 0 A, de igual forma se obtuvo la señal de error cuadrático como se muestra en la figura 5.16, así como la señal de la integral del error cuadrático (ISE) como se muestra en la figura 5.17.

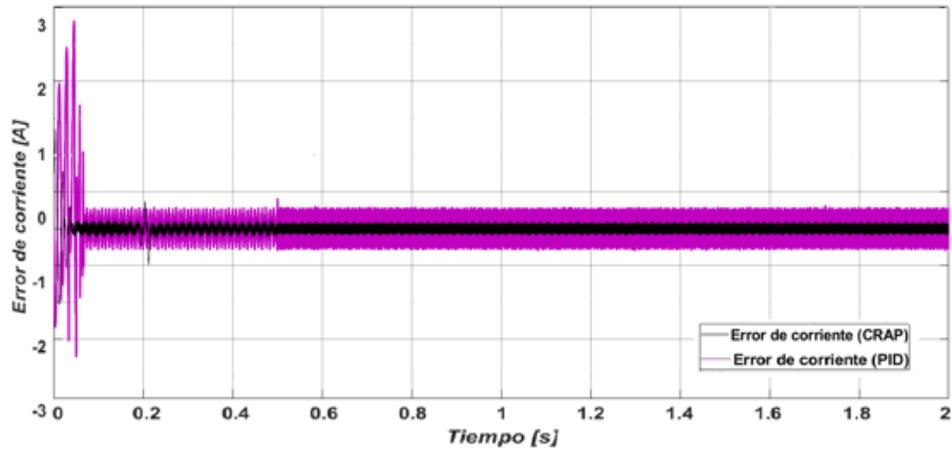


Figura 5.15. Error de corriente en el inversor aplicando CRAP y PID.

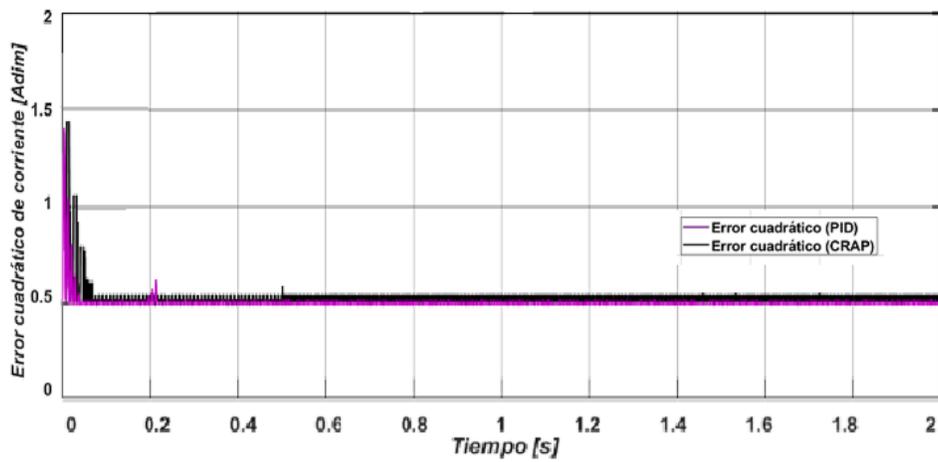


Figura 5.16. Error cuadrático de corriente en el inversor aplicando CRAP y PID.

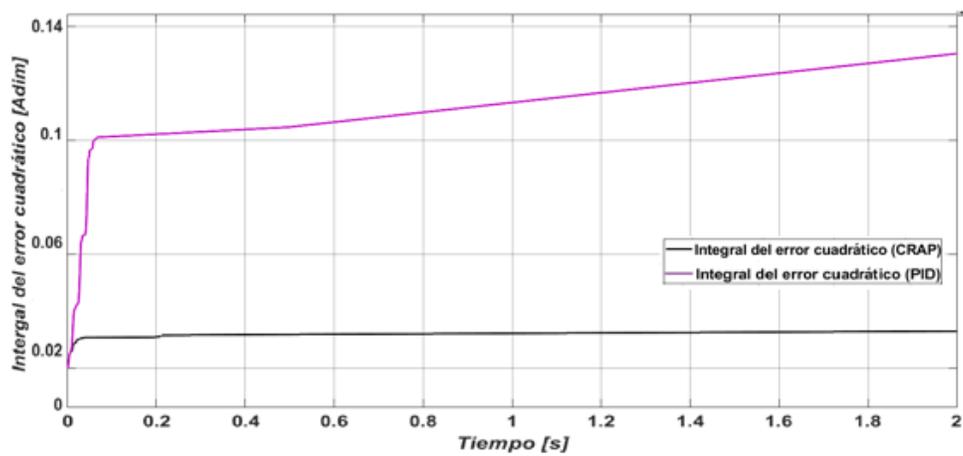


Figura 5.17. Integral del error cuadrático de corriente en el inversor aplicando CRAP y PID.

En la tabla 5.1 se muestra una comparación de los resultados teóricos con los de simulación para el voltaje y la corriente aplicando del CRAP y PID.

Tabla 5.1. Respuesta de voltaje y corriente del sistema fotovoltaico aplicando el CRAP y PID.

Controlador	Convertidor reductor			Inversor		
	Referencia	Simulado	% error	Referencia	Simulado	% error
CRAP	$V_{cd} = 160 V$	$V_{cd} = 160.4 V$	0.25 %	$I_p = 1.5 A$	$I_p = 1.51 A$	0.67 %
PID	$V_{cd} = 160 V$	$V_{cd} = 160.2 V$	0.12 %	$I_p = 1.5 A$	$I_p = 1.485 A$	1 %

Para tener un mejor panorama del comportamiento del sistema fotovoltaico aplicando ambos controladores, se realizan pruebas con diferentes voltajes y corrientes deseadas, dado que el voltaje máximo que nos proporcionan los paneles solares es de $179 V$ se procedió a tomar voltajes de referencia menores, en la figura 5.18 se muestra el comportamiento del sistema fotovoltaico aplicando un voltaje deseado $V_{ref} = 130 V$ en el convertidor reductor para ambos controladores, en la figura 5.18a se observan los resultados obtenidos con respecto al controlador CRAP el cual cuenta con un tiempo de establecimiento de $0.1 s$ y un desajuste en $0.5 s$ debido a la perturbación de la carga, sin embargo el controlador responde de buena forma y logra seguir la referencia deseada, para el caso del controlador PID de la figura 5.18b cuenta con un sobretiro mayor provocando que el tiempo de establecimiento sea de $0.4 s$ mayor que el presentado por el CRAP.

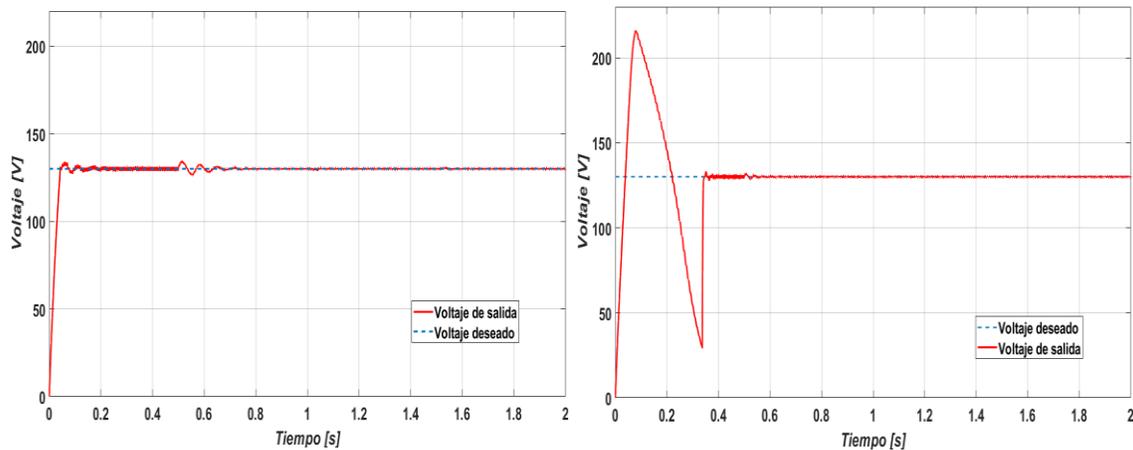


Figura 5.18. Voltaje de salida del convertidor reductor $V_{ref} = 130 V$ aplicando CRAP y PID.

En la figura 5.19 se muestra la señal de corriente senoidal con un valor pico de $I_d = 1 A$ aplicando ambos controladores, el tiempo de establecimiento de la corriente es de $0.1 s$ aplicando el CRAP como se muestra en la figura 5.19a, para el caso del controlador PID presenta un tiempo de establecimiento de $0.3 s$ como se muestra en la figura 5.19b.

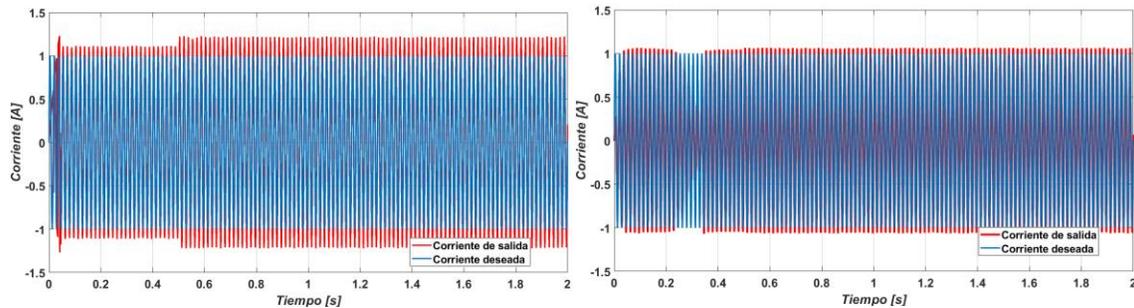


Figura 5.19. Corriente de salida en el inversor $I_d = 1 A$ aplicando a) CRAP y b) PID.

En la figura 5.20 se muestra que la perturbación es más notoria en $1 A$ al aplicar ambos controladores, se aprecia que hay un aumento en el rizo de corriente al momento que se acciona la perturbación, sin embargo, ambos controladores logran seguir la referencia deseada.

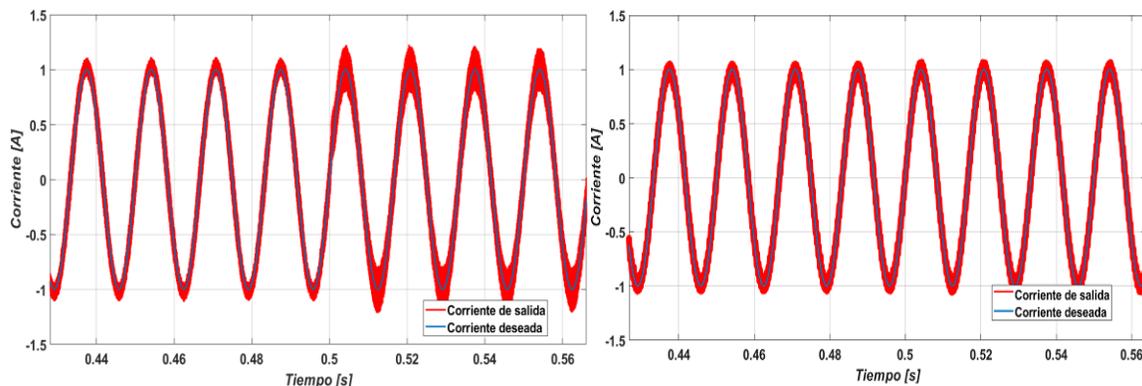


Figura 5.20. Perturbación actuada en $0.5 s$ en la corriente de $1 A$ aplicando a) CRAP y b) PID.

Como se muestra en la figura 5.21, la amplitud del voltaje senoidal a la salida del inversor es de $V_{inv} = 100 V$ y un $V_{rms} = 70 V$ aplicando ambos controladores, cuando se aplica la perturbación en $0.5 s$ en la carga, el voltaje de salida se reduce a $V_{inv} = 33 V$, se puede observar que el voltaje no se mantiene debido a que los controladores no son robustos en voltaje.

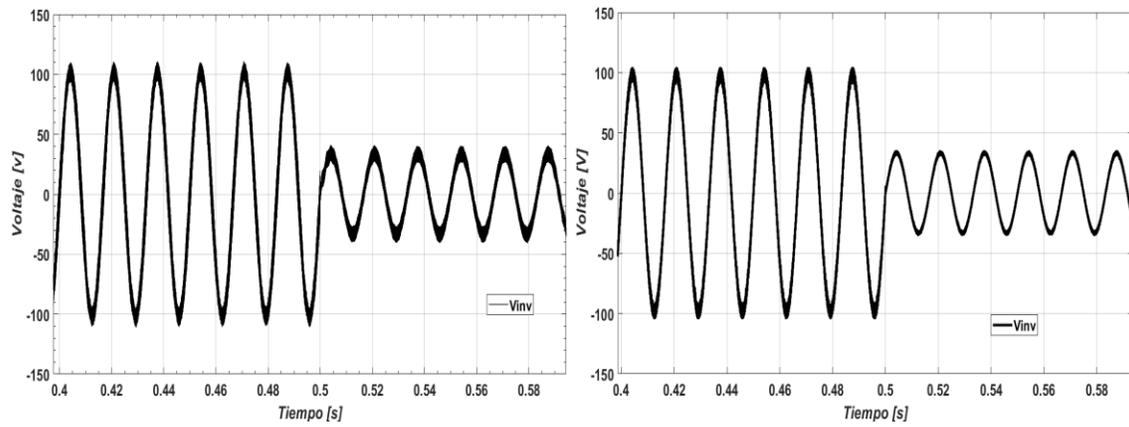


Figura 5.21. Voltaje de salida del inversor $V_{inv} = 100$ V aplicando a) CRAP y b) PID.

Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros

En este capítulo se presentan las conclusiones generales del trabajo de tesis y se plantean algunos trabajos futuros para seguir con la misma línea de investigación.

6.1. Conclusiones

En este trabajo de tesis se realizó el diseño y simulación del sistema fotovoltaico aplicando los controladores CRAP y PID, los cuales cumple con las siguientes tareas: regular el voltaje de salida del convertidor reductor y seguir una corriente de referencia senoidal a la salida del inversor. Además, hacer un análisis comparativo entre la robustez de ambos controladores.

Para lograr los objetivos y como consecuencia la hipótesis planteada al inicio, es importante mencionar que primero se hizo el modelado matemático del sistema fotovoltaico utilizando las leyes de Kichhoff, en seguida se realizó el diseño del control por rechazo activo de perturbaciones y posteriormente se procedió a realizar la simulación correspondiente utilizando la herramienta MATLAB/Simulink. Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre el CRAP y el PID.

Los resultados de simulación obtenidos muestran la efectividad y robustez del control por rechazo activo de perturbaciones, donde en forma general se observa que se obtiene el voltaje deseado a la salida del convertidor reductor, se sigue la referencia de corriente senoidal a la salida del inversor, a pesar de las variaciones del voltaje de entrada y la perturbación externa aplicada a la carga. Así mismo, los resultados de simulación muestran que con la propiedad de planitud diferencial y la ley de control por rechazo activo de perturbaciones, se consigue llevar a cero el error de estimación del voltaje de salida del convertidor y de la corriente de carga para obtener el voltaje de salida deseado y la corriente de referencia deseada. Los mismos resultados muestran una mejor respuesta dinámica del CRAP con un tiempo de establecimiento menor a 0.1 s, una componente fundamental (60 Hz) de 1.53 A y una menor distorsión de corriente a la salida del inversor con un THD igual a 8.93 % antes de la perturbación, así como una componente fundamental de 1.51 A y un THD de 13.73 % durante la perturbación y un menor rizo de

corriente, con lo cual se demuestra la superioridad de este controlador con respecto al PID ya que este cuenta con un tiempo de establecimiento mayor a 0.2 s, una componente fundamental (60 Hz) de 1.49 A y un THD igual a 12.33 % antes de la perturbación, una componente fundamental (60 Hz) de 1.47 A y un THD de 9.39 % durante la perturbación aplicada, así como un mayor rizo de corriente.

Los resultados muestran que el controlador propuesto presenta robustez ante las variaciones de voltaje de los paneles solares con respecto a las variaciones de irradiancia y temperatura, así como las perturbaciones aplicadas en la carga. Con los resultados anteriores, los objetivos planteados en este trabajo de tesis para el sistema fotovoltaico han sido alcanzados, de manera evidente, lo que permite validar la hipótesis de partida para este sistema.

6.2. Trabajos futuros

De acuerdo a los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo de tesis, se plantean las siguientes tareas como trabajos futuros, para continuar con esta línea de investigación.

- La implementación experimental de este trabajo podría ser de gran ayuda ya que el voltaje regulado de manera robusta es suficiente para abastecer una residencia o aparatos electrónicos que requieran un nivel alto en CD.
- Modelado y simulación del sistema fotovoltaico, aplicando el controlador CRAP y al mismo tiempo utilizar un algoritmo MPPT.
- Modelado y simulación del sistema fotovoltaico con filtro LC y carga resistiva, para mejorar la corriente de salida.
- Análisis comparativo del control por rechazo activo de perturbaciones y otras técnicas de control como puede ser modos deslizantes, aplicado al sistema fotovoltaico.
- Aplicación del sistema fotovoltaico en Micro-redes.
- Aplicación del sistema fotovoltaico en zonas rurales.

Bibliografía

- [1] Rabaia MKH, Abdelkareem, MA, Sayed ET, Elsaid K, Chae KJ, Wilberforce T, et al. Environmental impacts of solar energy systems: A review. *Sci Total Environ.* pp. 754-989. 2021.
- [2] Sampaio PGV, González MOA. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renew Sustain Energy.* pp. 590–601. 2017.
- [3] Joaquín Coldwell P, Beltrán Rodríguez L, Hernández Ochoa C.E. *Prospectiva de Energías Renovables.* 2016.
- [4] Kabir E, Kumar P, Kumar S, Adelodun AA, Kim KH. Solar energy: Potential and future prospects. *Renew Sustain Energy.* pp. 894–900. 2018.
- [5] Salazar Peralta A, Pichardo S. J. Alfredo, Pichardo S. La energía solar, una alternativa para la generación de energía renovable. *Revista de Investigación y Desarrollo.* Vol 2. Septiembre 2016.
- [6] Silvestre S, Castañar L, & Guasch D. Herramientas de Simulación para Sistemas Fotovoltaicos en Ingeniería. *Formación Universitaria.* pp. 13-18. 2008.
- [7] González F. Model of photovoltaic module in Matlab. *In Ii Cibelec.* pp. 1-5. 2006.
- [8] Jimenez F, & Solé, D. *Estudio y simulación de sistemas de conversión fotovoltaica-eléctrica mediante Matlab/Simulink.* Saei'09. 2009.
- [9] Rezk, H, & Hasaneen, E. S. A new MATLAB/Simulink model of triple-junction solar cell and MPPT based on artificial neural networks for photovoltaic energy systems. *Ain Shams Engineering Journal.* pp. 873-881. 2015.
- [10] Vera Davila G. A, Delgado Ariza C. J, Sepulveda Mora B. S. Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab. Vol. 8. 2018.
- [11] Hernández Callejo L, Gallardo Saavedra S, Alonso Gómez V. A review of photovoltaic systems: Design operation and maintenance. *Sol Energy.* pp. 188-426. 2019.
- [12] Obeidat F. A comprehensive review of future phovoltaic systems. *Sol Energy.* pp. 163-545. 2018.

- [13] Martínez Barbosa A. Diseño e implementación de un sistema MPPT y regulación de voltaje mediante CRAP del panel solar SUNMODULE SW50, Universidad Tecnológica de la Mixteca. Noviembre 2016.
- [14] Alonso Abella M. Sistemas fotovoltaicos. Energía Solar Fotovoltaica. Escuela de Organización Industrial, CIEMAT.
- [15] Aguilera J, Hontoria L, José Muñoz F. Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos. Escuela Politécnica Superior de Jaén. Universidad de Jaén.
- [16] Díaz Villar P. Confiabilidad de los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos: Aplicación a la Electrificación Rural, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid. Abril 2003.
- [17] González G.R, Humberto R, Jiménez G, Lagunas M. J. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Boletín IIE. octubre-diciembre de 2003.
- [18] Bolaños Rodríguez V.A. Diseño y construcción de un sistema de alimentación para LEDs de potencia utilizando el convertidor CD/CD tipo Flyback.
- [19] Ramos Flores C. Análisis de un convertidor CD/CD destinado al almacenamiento híbrido de energía, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Julio 2017.
- [20] Fernando Valderrama F, Henry Moreno C, Manuel Vega H. Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia DC-DC tipo boost, Universidad de San Buenaventura Sede Bogotá: septiembre de 2011.
- [21] Galván Blanco J. A. Convertidor controlado usado como fuente de alimentación de un circuito magnético. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. febrero 2015.
- [22] Montes Aguilar J.G. Acondicionamiento de un inversor, mediante una propuesta de sistema audiovisual auxiliar para comunidades indígenas, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Abril 2014.
- [23] Orozco-Soto S.M, Ibarra-Zannata J.M. Control por rechazo activo de perturbaciones para el equilibrio de robots humanoides, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), México. pág.3.

- [24] Huping Y, Qiangxin J, Yun Z. Active-Disturbance Rejection Control and Its Application to Solar PV DC-DC Converter. 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering. pp. 1-4. 2010.
- [25] Hernández Osornio M.Y. Control Activo de Rechazo a Perturbaciones Aplicado a un Sistema Fotovoltaico, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. pp. 6-8. Agosto 2020.
- [26] Catalogo PRO-5012, epcor power line: soluciones en energía.
- [27] International Renewable Energy Agency, Renewable Energy Cost Analysis-Solar Photovoltaics, IRENA, Insights, Vol. I, n°4, pp. 1-45, 2012.
- [28] Rashid H.M. Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications. USA. Academic Press. 2011.
- [29] Guerreo Ramírez E, Martínez Barbosa A, Contreras Ordaz M. A, Guerreo Ramírez G, Guzmán Ramírez G, Barahona Avalos J.L, Adam Medina M. Universidad Tecnológica de la Mixteca, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Energies. pp 5-6. 2022.
- [30] Guerreo Ramírez E, Martínez Barbosa A, Contreras Ordaz M. A, Guerreo Ramírez G. Universidad Tecnológica de la Mixteca, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Electrical Energy Systems. pp. 2-3. 20 de septiembre de 2019.
- [31] Hart W. D. Electrónica de potencia, Madrid: Pearson Educación, 2001.
- [32] Morales Laguado L, Chomorro H, Soriano J. Análisis y Comparación entre un Controlador PI Difuso y un Controlador PI Optimo Convencional para un Convertidor Reductor, Ingeniería e Investigación, Bogotá, Diciembre 2009.
- [33] Navarro D, Barajas A, Pérez E, Cortes D. Extensión de Controladores CD/CD a CD/CA Implementados por Modos Deslizantes o SPWM. Octubre 2013.
- [34] Montes Aguilar J.G, Acondicionamiento de un Inversor, Mediante una Propuesta de Sistema Audiovisual Auxiliar para Comunidades Indígenas, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C, Ciudad Juárez Chihuahua, pp. 9-11, Abril 2014.

- [35] Vázquez Gutiérrez R.A, Diseño e Implementación de un Inversor Monofásico de 500VA de Bajo Coste, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, pp. 25-27.
- [36] Han J. From PID to Active Disturbance Rejection Control. IEEE on Industrial Electronics, Vol. LVI, n°3, pp. 900-906. 2009.
- [37] Johnson C.D. Accomodation of External Disturbances in Linear Regulator and Servomechanism Problems, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. XVI, n°6, pp. 635-644, 1971.
- [38] Sira Ramírez H, Luviano Juárez A, Cortés Romero J. Control lineal robusto de sistema no lineales diferencialmente planos. Revista Iberoamericana de Automática e Información Industrial, vol. VIII, n°1, pp. 14-28. 2011.
- [39] Sira Ramírez H, Agrawal S.K. Differentially Flat Systems, USA: CRC Press. 2004.
- [40] Fliess M, Lévine J, Martin P, Rouchon P. Sur les systèmes non linéaires différentiellement plats, Paris, Francia: C. R. Acad. Sci. 1992.
- [41] Lucas Brollo A. Desenvolvimento de uma Planta Didáctica para o Controle de Niveles de Tanques Acoplados. 2016.
- [42] Ferreyra A, Fuentes R. Estudio comparativo entre control PID y difuso. UAM. Departamento de Electrónica.
- [43] Rahmawaty M. Balancing Robot Beroda Dua Menggunakan Metoda Kontrol Proporcional, Integral dan Derivatif. Universitat Politècnica de Catalunya. 2015.
- [44] Ogata K. Ingeniería de Control Moderna. Tercera Edición. Editorial Prentice Hall.
- [45] Guerrero E, Sira H, Martínez A, Linares J, Guzmán E. On The Robust Control of Parallel-Cascade DC/DC Buck Converter. IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, Vol. 14, Febrero 2016.
- [46] Gil Garces L.A, Control PID para el Control de Velocidad de un Motor CD. Universidad Tecnológica de Pereira. 2014.

[47] Emin Asker M, Kilic H. Modulation Index and Switching Frequency effect on Symmetric Regular Sampled SPWM. Vocational Schools of Technical Sciences, Dicle University, Diyarbakir, Turkey. pp. 104. 2017.

Apéndice A.

Procedimiento del Análisis Matemático del Circuito Eléctrico

En el presente apéndice se muestra el procedimiento del análisis matemático del convertidor reductor y el inversor, para calcular las ecuaciones promedio, que resulta en un sistema plano multi-variable.

Las ecuaciones desarrolladas a continuación se utilizan para realizar el diseño del control por rechazo activo de perturbaciones el cual se aplica al sistema fotovoltaico propuesto, de igual forma se toman en consideración las señales de control u_1 y u_2 .

En la figura A.1, se muestra el análisis al circuito, aplicando las leyes de voltaje y corriente de Kirchhoff.

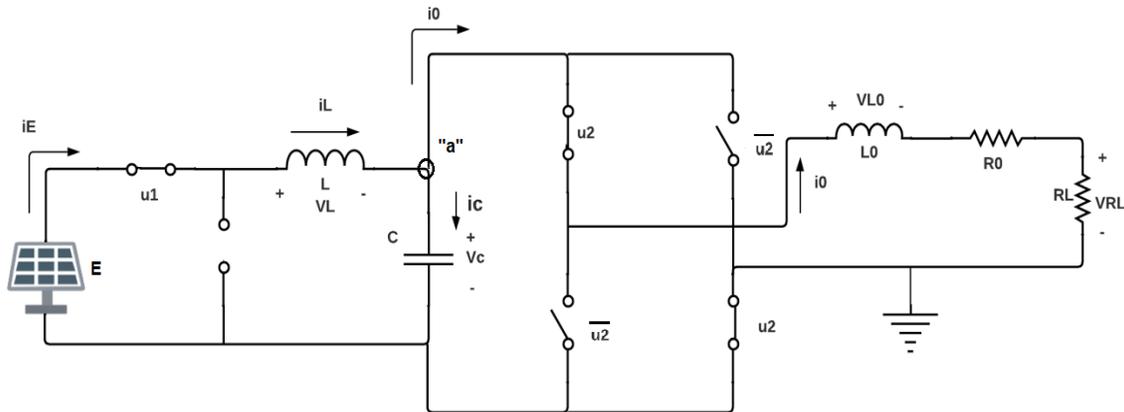


Figura A. 1 cuando $u_1 = 1$, $u_2 = 1$ y $\bar{u}_2 = 0$.

$$E = V_L + V_C$$

$$E = \frac{Ldi}{dt} + V_C$$

$$\frac{Ldi}{dt} = E - V_C \tag{A.1}$$

$$i_L = i_C + i_0$$

$$i_L = i_C + i_0$$

$$i_L = \frac{Cdv}{dt} + i_0$$

$$\frac{Cdv}{dt} = i_L - i_0 \quad (\text{A.2})$$

$$V_C = V_{L0} + V_{R0} + V_{RL}$$

$$V_C = V_{L0} + i_0 R_0 + i_0 R_C$$

$$\frac{L_0 di_0}{dt} = V_C - i_0 (R_0 + R_C) \quad (\text{A.3})$$

Aplicando las leyes de Kirchhoff al circuito de la figura A.2

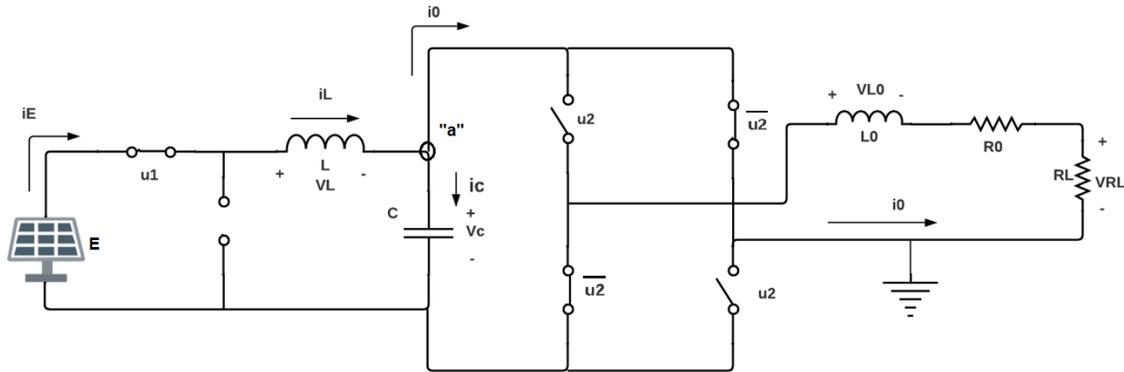


Figura A. 2. Cuando $u_1 = 1$, $u_2 = 0$ y $\bar{u}_2 = 1$

$$E = V_L + V_C$$

$$E = \frac{Ldi}{dt} + V_C$$

$$\frac{Ldi}{dt} = E - V_C \quad (\text{A.4})$$

$$i_L = i_C - i_0$$

$$i_L = \frac{Cdv}{dt} - i_0$$

$$\frac{Cdv}{dt} = i_L + i_0 \quad (\text{A.5})$$

$$V_C = -V_{L0} - V_{R0} - V_{RL}$$

$$V_C = -\frac{L_0 di_0}{dt} - i_0 R_0 - i_0 R_c$$

$$\frac{L_0 di_0}{dt} = -V_C - i_0 R_0 - i_0 R_c$$

$$\frac{L_0 di_0}{dt} = -V_C - i_0 (R_0 + R_c) \quad (\text{A.6})$$

Aplicando leyes de Kirchhoff al circuito de la figura A.3.

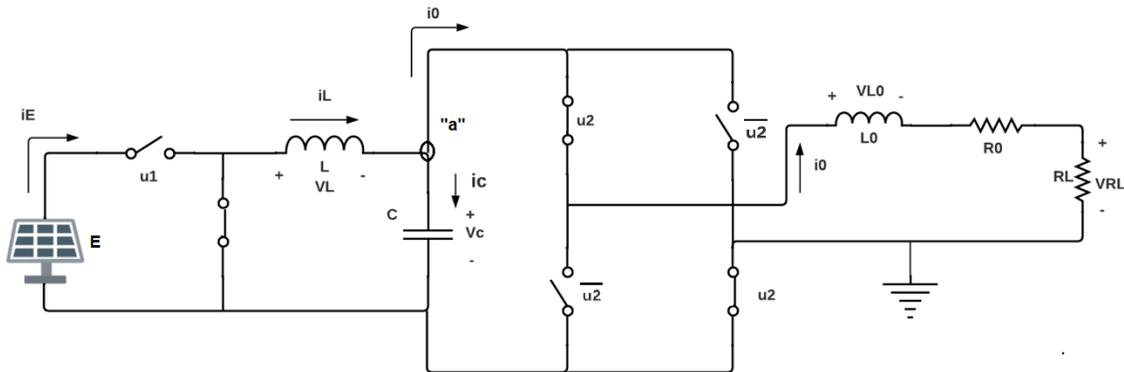


Figura A.3. Cuando $u_1 = 0$, $u_2 = 1$ y $\bar{u}_2 = 0$.

$$V_L + V_C = 0$$

$$V_L = -V_C$$

$$\frac{Ldi}{dt} = -V_C \quad (\text{A.7})$$

$$i_L = -i_C$$

$$\frac{Cdv}{dt} = -i_L \quad (\text{A.8})$$

$$V_C = V_{L0} + V_{R0} + V_{RL}$$

$$V_C = \frac{L_0 di_0}{dt} + i_0 R_0 + i_0 R_c$$

$$\frac{L_0 di_0}{dt} = V_C - i_0 R_0 - i_0 R_c$$

$$\frac{L_0 di_0}{dt} = V_C - i_0 (R_0 + R_c) \quad (\text{A.9})$$

Cuando $u_1 = 0$, $u_2 = 0$ y $\bar{u}_2 = 1$

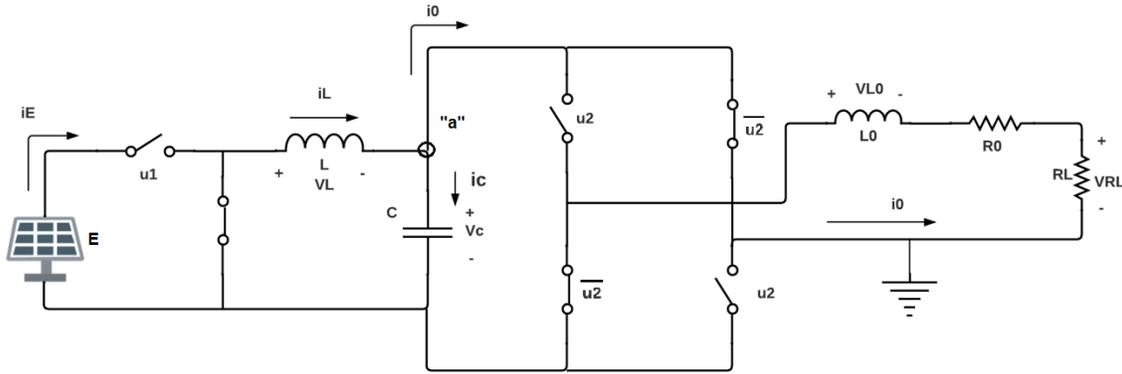


Figura A. 4. Cuando $u_1 = 0$, $u_2 = 0$ y $\bar{u}_2 = 1$.

$$V_L = -V_C$$

$$\frac{L di}{dt} = -V_C \quad (\text{A.10})$$

$$i_L = -i_C$$

$$\frac{C dv}{dt} = -i_L \quad (\text{A.11})$$

$$V_C = -\frac{L_0 di_0}{dt} - i_0 R_0 - i_0 R_c$$

$$\frac{L_0 di_0}{dt} = -V_C - i_0 R_0 - i_0 R_c$$

$$\frac{L_0 di_0}{dt} = -V_C - i_0(R_0 + R_c) \quad (\text{A.12})$$

Tomando como referencia [A.1] y [A.7], se obtiene la siguiente ecuación, cuando es $u_1 = 0$; o $u_1 = 1$, dependiendo si el interruptor está abierto o cerrado.

$$\frac{L di}{dt} = E u_1 - V_C \quad (\text{A.13})$$

Apoyándose de las ecuaciones [A.2] y [A.5], se obtiene la siguiente ecuación, cuando es $u_2 = 0$; o $u_2 = 1$, dependiendo si el interruptor está abierto o cerrado.

$$\frac{C dv}{dt} = i_L + (1 - 2u_2)i_0 \quad (\text{A.14})$$

Tomando como referencia [A.3], [A.6], [A.9] y [A.12], se obtiene la siguiente ecuación, Cuando es $u_2 = 0$; o $u_2 = 1$, dependiendo si el interruptor está abierto o cerrado.

$$\frac{L_0 di_0}{dt} = -(1 - 2u_2)V_C - i_0(R_0 + R_c) \quad (\text{A.15})$$

Apéndice B.

Diseño de los controladores

B.1. Diseño del control por rechazo activo de perturbaciones (CRAP)

A continuación, se muestra el procedimiento llevado a cabo para el diseño del control por rechazo activo de perturbaciones.

Con ayuda de las ecuaciones [A.13], [A.14] y [A.15] obtenidas del análisis del circuito, se obtiene el control para el sistema. Realizando un cambio de variable $x_1 = i_L$, $x_2 = v_C$ y $x_3 = i_0$, se obtiene la ecuación (B.1).

Realizando una inspección de las ecuaciones resultantes del sistema, resulta en un sistema plano, en donde se tienen que las salidas planas son $x_2 = v_C$ y $x_3 = i_0$.

Dado que el mismo número de entradas de control debe ser el mismo número de salidas planas, se tienen, dos entradas de control y dos salidas planas [45]. En el sistema de la ecuación (3.14) se muestra la parametrización diferencial, en la que cada una de las variables de estado y las entradas de control se encuentra en términos de las salidas planas F y sus derivadas.

$$L \cdot \frac{di}{dt} = Eu_1 - x_2$$

$$C \cdot \frac{dv}{dt} = x_1 + (1 - 2u_2)x_3 \tag{B.1}$$

$$L_0 \cdot \frac{di_0}{dt} = -(1 - 2u_2)x_2 - x_3(R_0 + R_c)$$

Con las siguientes salidas planas:

$$x_2 = F_1$$

$$x_3 = F_2$$

Donde la ecuación [A.15]:

$$L_O \dot{F}_2 = -F_1(1 - 2u_2) - F_2(R_O + R_C)$$

$$L_O \dot{F}_2 + F_2(R_O + R_C) = -F_1(1 - 2u_2)$$

$$-F_1(1 - 2u_2) = L_O \dot{F}_2 + F_2(R_O + R_C)$$

$$F_1(1 - 2u_2) = -L_O \dot{F}_2 - F_2(R_O + R_C)$$

$$(1 - 2u_2) = -\frac{L_O \dot{F}_2}{F_1} - \frac{F_2(R_O + R_C)}{F_1}$$

$$-2u_2 = -\frac{L_O \dot{F}_2}{F_1} - \frac{F_2(R_O + R_C)}{F_1} - 1$$

$$2u_2 = \frac{L_O \dot{F}_2}{F_1} + \frac{F_2(R_O + R_C)}{F_1} + 1$$

$$u_2 = \frac{L_O \dot{F}_2}{2F_1} + \frac{F_2(R_O + R_C)}{2F_1} + \frac{1}{2}$$

Para la ecuación [A.14]:

$$C \dot{x}_2 = x_1 + x_3(1 - 2u_2)$$

$$C \dot{F}_1 = x_1 + F_2(1 - 2u_2)$$

$$C \dot{F}_1 = x_1 + F_2 \left(-\frac{L_O \dot{F}_2}{F_1} - \frac{F_2(R_O + R_C)}{F_1} \right)$$

$$C \dot{F}_1 = x_1 - \frac{L_O F_2 \dot{F}_2}{F_1} - \frac{F_2^2(R_O + R_C)}{F_1}$$

$$x_1 = C \dot{F}_1 + \frac{L_O F_2 \dot{F}_2}{F_1} + \frac{F_2^2(R_O + R_C)}{F_1}$$

La ecuación [A.13], se utiliza para obtener u_1 :

$$L \dot{x}_1 = -x_2 + E u_1$$

$$L \dot{x}_1 = -F_1 + E u_1$$

$$L \left(C \dot{F}_1 + L_O \left(\frac{F_2}{F_1} \dot{F}_2 + \dot{F}_2 \left(\frac{F_1 \dot{F}_2 - F_2 \dot{F}_1}{F_1^2} \right) \right) + (R_O + R_C) \left(\frac{2F_1 F_2 \dot{F}_2 - F_2^2 \dot{F}_1}{F_1^2} \right) \right) = -F_1 + E u_1$$

$$Eu_1 = L \left(C\ddot{F}_1 + L_o \left(\frac{F_2}{F_1} \ddot{F}_2 + \dot{F}_2 \left(\frac{F_1 \dot{F}_2 - F_2 \dot{F}_1}{F_1^2} \right) \right) + (R_o + R_c) \left(\frac{2F_1 F_2 \dot{F}_2 - F_2^2 \dot{F}_1}{F_1^2} \right) \right) + F_1$$

$$Eu_1 = L C \ddot{F}_1 + LL_o \frac{F_2}{F_1} \ddot{F}_2 + LL_o \frac{F_1 \dot{F}_2 \dot{F}_2}{F_1^2} - LL_o \frac{F_2 \dot{F}_1 \dot{F}_2}{F_1^2} + L(R_o + R_c) \frac{2F_1 F_2 \dot{F}_2}{F_1^2} - L(R_o + R_c) \left(\frac{F_2^2 \dot{F}_1}{F_1^2} \right) + F_1$$

$$Eu_1 = L C \ddot{F}_1 + LL_o \frac{F_2}{F_1} \ddot{F}_2 + \frac{2LF_2}{F_1} ((R_o + R_c)) \dot{F}_2 + LL_o \frac{F_1 \dot{F}_2 \dot{F}_2}{F_1^2} - LL_o \frac{F_2 \dot{F}_1 \dot{F}_2}{F_1^2} - L(R_o + R_c) \left(\frac{F_2^2 \dot{F}_1}{F_1^2} \right) + F_1$$

$$u_1 = \frac{L C}{E} \ddot{F}_1 + LL_o \frac{F_2}{EF_1} \ddot{F}_2 + \frac{2LF_2}{EF_1} ((R_o + R_c)) \dot{F}_2 + LL_o \frac{F_1 \dot{F}_2 \dot{F}_2}{EF_1^2} - LL_o \frac{F_2 \dot{F}_1 \dot{F}_2}{EF_1^2} - L(R_o + R_c) \left(\frac{F_2^2 \dot{F}_1}{EF_1^2} \right) + \frac{F_1}{E}$$

Para los controladores se tienen las ecuaciones (B.2) y (B.3).

$$u_1 = \frac{L C}{E} \ddot{F}_1 + LL_o \frac{F_2}{EF_1} \ddot{F}_2 + \frac{2LF_2}{EF_1} ((R_o + R_c)) \dot{F}_2 + LL_o \frac{F_1 \dot{F}_2 \dot{F}_2}{EF_1^2} - LL_o \frac{F_2 \dot{F}_1 \dot{F}_2}{EF_1^2} - L(R_o + R_c) \left(\frac{F_2^2 \dot{F}_1}{EF_1^2} \right) + \frac{F_1}{E}$$

$$u_2 = \frac{L_o \dot{F}_2}{2F_1} + \frac{F_2(R_o + R_c)}{2F_1} + \frac{1}{2}$$

$$u_1 = \frac{L C}{E} \ddot{F}_1 + \frac{LL_o F_2}{EF_1} \ddot{F}_2 + \phi_1 \tag{B.2}$$

$$u_2 = \frac{L_o \dot{F}_2}{2F_1} + \frac{F_2(R_o + R_c)}{2F_1} + \frac{1}{2}$$

$$\dot{u}_2 = \frac{L_o F_1 \ddot{F}_2}{2F_1^2} - \frac{L_o \dot{F}_2 \dot{F}_1}{2F_1^2} + \frac{(R_o + R_c) F_1 \dot{F}_2}{2F_1^2} - \frac{(R_o + R_c) F_2 \dot{F}_1}{2F_1^2}$$

$$\dot{u}_2 = \frac{L_o}{2F_1} \ddot{F}_2 - \frac{L_o \dot{F}_2 \dot{F}_1}{2F_1^2} + \frac{(R_o + R_c) F_1 \dot{F}_2}{2F_1^2} - \frac{(R_o + R_c) F_2 \dot{F}_1}{2F_1^2}$$

$$\dot{u}_2 = \frac{L_o}{2F_1} \ddot{F}_2 + \phi_2 \tag{B.3}$$

Los argumentos englobados en ϕ_1 y ϕ_2 se consideran las perturbaciones internas y externas que afectan al sistema.

La relación que vincula a las entradas de control con las derivadas de orden superior a través de una matriz, esta resulta ser no invertible. Esto indica que el grado relativo no está bien definido, de ahí que una extensión dinámica de la entrada de control u_2 conlleva a que los grados relativos estén bien definidos de acuerdo a las entradas y a las salidas planas seleccionadas [45], esta relación se muestra en la ecuación (B.2 y B.3).

$$\phi_1 = \frac{2LF_2}{EF_1}((R_0 + R_C)\dot{F}_2 + LL_0 \frac{F_1\dot{F}_2\dot{F}_2}{EF_1^2} - LL_0 \frac{F_2\dot{F}_1\dot{F}_2}{EF_1^2} - L(R_0 + R_C) \left(\frac{F_2^2\dot{F}_1}{EF_1^2}\right) + \frac{F_1}{E}$$

$$\phi_2 = -\frac{L_0\dot{F}_2\dot{F}_1}{2F_1^2} + \frac{(R_0 + R_C)F_1\dot{F}_2}{2F_1^2} - \frac{(R_0 + R_C)F_2\dot{F}_1}{2F_1^2}$$

Las ecuaciones (B.2) y (B.3) se expresan en forma matricial como se muestra en la ecuación (B.4).

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ \dot{u}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{LC}{E} & \frac{LL_0F_2}{EF_1} \\ 0 & \frac{L_0}{2F_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{F}_1 \\ \ddot{F}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} \quad (\text{B.4})$$

Despejando las derivadas de mayor orden de las salidas planas \ddot{F}_1 y \ddot{F}_2 de la ecuación (B.4), se obtiene la ecuación (B.5).

$$\begin{pmatrix} \ddot{F}_1 \\ \ddot{F}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{E}{LC} & -\frac{2F_2}{C} \\ 0 & \frac{2F_1}{L_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ \dot{u}_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{E}{LC} & -\frac{2F_2}{C} \\ 0 & \frac{2F_1}{L_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} \quad (\text{B.5})$$

$$\begin{pmatrix} \ddot{F}_1 \\ \ddot{F}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{E}{LC} & -\frac{2F_2}{C} \\ 0 & \frac{2F_1}{L_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ \dot{u}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix}$$

En la ecuación (B.6) se muestra el observador GPI de voltaje en términos de la salida plana F_1 , el cual incluye un integrador para una aproximación más apropiada.

$$\dot{\hat{F}}_1 = \hat{F}_{C1} + \lambda_2(F_1 - \hat{F}_1)$$

$$\dot{\hat{F}}_{C1} = \left(\frac{E}{LC}\right)u_1 - \frac{2F_2}{C}\dot{u}_2 + \hat{s}_1 + \lambda_1(F_1 - \hat{F}_1) \quad (\text{B.6})$$

$$\dot{\hat{s}}_1 = \lambda_0(F_1 - \hat{F}_1)$$

Considerando que $v_c = F_1$ y $\hat{s}_1 = \varphi_1$, se obtiene la ecuación (B.7).

$$\dot{\hat{v}}_c = \hat{v}_{c1} + \lambda_2(v_c - \hat{v}_c)$$

$$\dot{\hat{v}}_{c1} = \left(\frac{E}{LC}\right)u_1 - \frac{2I_0}{C}\dot{u}_2 + \hat{s}_1 + \lambda_1(v_c - \hat{v}_c) \quad (\text{B.7})$$

$$\dot{\hat{s}}_1 = \lambda_0(v_c - \hat{v}_c)$$

Para sintonizar el observador de voltaje se hizo uso de un polinomio Routh-Hurwitz de tercer orden, como se muestra en las ecuaciones (B.8).

$$P_1 = (s^2 + (2\zeta_1\omega_{n1})s + \omega_{n1}^2)(s + \alpha)$$

$$P_1 = s^3 + s^2(2\zeta_1\omega_{n1} + \alpha) + s(\omega_{n1}^2 + 2\zeta_1\omega_{n1}\alpha) + \alpha\omega_{n1}^2 \quad (\text{B.8})$$

$$\lambda_0 = \alpha\omega_{n1}^2$$

$$\lambda_1 = \omega_{n1}^2 + 2\zeta_1\omega_{n1}\alpha$$

$$\lambda_2 = 2\zeta_1\omega_{n1} + \alpha$$

En la ecuación (B.9) se muestra el observador GPI de corriente en términos de la salida plana F_2 , el cual incluye un integrador para una aproximación más apropiada.

$$\dot{\hat{F}}_2 = \hat{F}_{O2} + \delta_2(F_2 - \hat{F}_2)$$

$$\dot{\hat{F}}_{O2} = \frac{2F_1}{L_0}\dot{u}_2 + \hat{g}_1 + \delta_1(F_2 - \hat{F}_2) \quad (\text{B.9})$$

$$\dot{\hat{g}}_1 = \delta_0(F_2 - \hat{F}_2)$$

Considerando que $I_0 = F_2$ y $\hat{g}_1 = \varphi_2$, se obtiene la ecuación (B.10).

$$\begin{aligned}\hat{I}_0 &= \hat{I}_{01} + \delta_2(I_0 - \hat{I}_0) \\ \hat{I}_{01} &= \frac{2V_c}{L_0} \dot{u}_2 + \hat{g}_1 + \delta_1(I_0 - \hat{I}_0)\end{aligned}\tag{B.10}$$

$$\hat{g}_1 = \delta_0(I_0 - \hat{I}_0)$$

Para sintonizar el observador de corriente se hizo uso de un polinomio Routh-Hurwitz de tercer orden, como se muestra en las ecuaciones (B.11).

$$\begin{aligned}P_2 &= (s^2 + (2\zeta_{11}\omega_{n11})s + \omega_{n11}^2)(s + \alpha) \\ P_2 &= s^3 + s^2(2\zeta_{11}\omega_{n11} + \alpha) + s(\omega_{n11}^2 + 2\zeta_{11}\omega_{n11}\alpha) + \alpha\omega_{n11}^2\end{aligned}\tag{B.11}$$

$$\delta_0 = \alpha\omega_{n11}^2$$

$$\delta_1 = \omega_{n11}^2 + 2\zeta_{11}\omega_{n11}\alpha$$

$$\delta_2 = 2\zeta_{11}\omega_{n11} + \alpha$$

El diseño de los controladores auxiliares de voltaje y corriente se muestra en las ecuaciones (B.12) y (B.13).

$$\begin{aligned}v_1 &= \ddot{F}_1^* - k_1(\hat{F}_1 - \dot{F}_1^*) - k_0(F_1 - F_1^*) \\ v_1 &= -k_1(\hat{F}_1) - k_0(F_1 - F_1^*)\end{aligned}\tag{B.12}$$

$$v_1 = -k_1\hat{v}_{c1} - k_0(v_c - \bar{v}_c)$$

$$v_2 = \ddot{F}_2^* - k_1(\hat{F}_2 - \dot{F}_2^*) - k_0(F_2 - F_2^*)\tag{B.13}$$

$$v_2 = \dot{I}_0^* - k_3(\hat{I}_{01} - \dot{I}_{01}^*) - k_2(I_0 - I_0^*)$$

La señal senoidal de referencia se muestra en el conjunto de ecuaciones (B.14).

$$I_0^* = A \sin(\omega_n t)$$

$$I_{O1}^* = \dot{I}_O^* = A \omega_n \cos(\omega_n t) \quad (\text{B.14})$$

$$\dot{I}_{O1}^* = \ddot{I}_O^* = -A (\omega_n)^2 \sin(\omega_n t)$$

El diseño de los controladores para las señales de control se observan en las ecuaciones (B.15)

$$u_1 = \frac{LC}{E} (v_1 - s_1) + \frac{LL_0 F_2}{EF_1} (v_2 - g_1) \quad (\text{B.15})$$

$$\dot{u}_2 = \frac{L_0}{2F_1} (v_2 - g_1)$$

La sintonización del controlador auxiliar de voltaje se realizó con el uso de un polinomio Routh-Hurwitz, obteniéndose así los siguientes valores de k_0 y k_1 , como se muestra en el conjunto de ecuaciones (B.16).

$$P_3 = s^2 + (2\zeta_3 \omega_{n3})s + \omega_{n3}^2$$

$$k_0 = \omega_{n3}^2 \quad (\text{B.16})$$

$$k_1 = 2\zeta_3 \omega_{n3}$$

Para la sintonización del controlador auxiliar de corriente se hizo uso del mismo polinomio Routh-Hurwitz, obteniendo los valores de k_2 y k_3 , como se muestra en el conjunto de ecuaciones (B.17).

$$P_4 = s^2 + (2\zeta_3 \omega_{n3})s + \omega_{n3}^2$$

$$k_2 = \omega_{n3}^2 \quad (\text{B.17})$$

$$k_3 = 2\zeta_3 \omega_{n3}$$

B.2. Diseño del control PID para el convertidor reductor

En este apartado se muestra el procedimiento llevado a cabo para el diseño del control PID, realizando el modelado matemático del convertidor reductor, aplicando las leyes de Kirchhoff resulta en el sistema de ecuaciones (B.18).

$$\begin{aligned} L \cdot \frac{di}{dt} &= Eu - V \\ C \cdot \frac{dv}{dt} &= i_L - \frac{V}{R} \end{aligned} \quad (\text{B.18})$$

Aplicando la transformada de Laplace al sistema de ecuaciones (B.18).

$$LSI(s) = Eu(s) - V(s)$$

$$CSV(s) = I(s) - \frac{V(s)}{R}$$

Despejando a $I(s)$ de la ecuación anterior

$$I(s) = \frac{Eu(s) - V(s)}{LS}$$

$$CSV(s) = \frac{Eu(s) - V(s)}{LS} - \frac{V(s)}{R}$$

$$CSV(s) + \frac{V(s)}{LS} + \frac{V(s)}{R} = \frac{Eu(s)}{LS}$$

$$V(s) \left(CS + \frac{1}{LS} + \frac{1}{R} \right) = \frac{Eu(s)}{LS}$$

$$\frac{V(s)}{u(s)} = \frac{E}{LCS^2 + 1 + \frac{L}{R}S}$$

La función de transferencia del convertidor reductor se muestra en la ecuación (B.19).

$$G(s) = \frac{V(s)}{u(s)} = \frac{\frac{E}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (\text{B.19})$$

Se tiene que el controlador PID tiene la forma:

$$u(t) = kp \cdot e(t) + \frac{kp}{\tau_i} \int e(t) dt + kp \cdot \tau_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Mediante la transformada de Laplace se tiene que la función de transferencia para el PID queda expresada en la ecuación (B.20).

$$u(s) = kp \cdot E(s) + \frac{kp}{\tau_i} \cdot \frac{E(s)}{S} + kp \cdot \tau_d \cdot S \cdot E(s)$$

$$G_c(s) = \frac{u(s)}{E(s)} = kp \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i S} + \tau_d S\right) \quad (\text{B.20})$$

La función de transferencia de lazo cerrado queda expresada en la ecuación (B.21).

$$H(s) = \frac{G(s) \cdot G_c(s)}{1 + G(s) \cdot G_c(s)}$$

$$H(s) = \frac{\left(\frac{\frac{E}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}}\right) \cdot \left(kp \left(1 + \frac{1}{\tau_i S} + \tau_d S\right)\right)}{1 + \left(\frac{\frac{E}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}}\right) \cdot \left(kp \left(1 + \frac{1}{\tau_i S} + \tau_d S\right)\right)}$$

$$H(s) = \frac{\left(\frac{E}{LC}\right) \cdot \left(kp + \frac{kp}{\tau_i S} + kp \cdot \tau_d S\right)}{\left(\frac{E}{LC}\right) \cdot \left(kp + \frac{kp}{\tau_i S} + kp \cdot \tau_d S\right) + s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (\text{B.21})$$

Se obtiene el polinomio característico del denominador de la función de transferencia de lazo cerrado, la cual queda expresada en la ecuación (B.22).

$$s^3 + \left(\frac{1}{RC} + \frac{E}{LC} \cdot kp \cdot \tau_d\right) s^2 + \left(\frac{1}{LC} + \frac{E \cdot kp}{LC}\right) s + \frac{E kp}{LC \tau_i} \quad (\text{B.22})$$

La sintonización se realiza mediante un polinomio Routh-Hurwitz de tercer orden como se expresa en la ecuación (B.23).

$$(S^2 + 2\zeta wnS + wn^2)(S + \alpha)$$

$$S^3 + (\alpha + 2\zeta wn)S^2 + (wn^2 + 2\zeta wn\alpha)S + \alpha wn^2 \quad (\text{B.23})$$

Igualando el polinomio tipo Routh-Hurwitz con el polinomio característico de la función a lazo cerrado, se obtienen las ecuaciones (B.24), (B.25) y (B.26) para las variables kp , ki y kd , las cuales servirán para sintonizar el convertidor reductor.

$$\frac{1}{RC} + \frac{E}{LC} \cdot kp \cdot \tau_d = \alpha + 2\zeta wn$$

$$\frac{1}{LC} + \frac{E \cdot kp}{LC} = wn^2 + 2\zeta wn\alpha$$

$$\frac{E \cdot kp}{LC \cdot \tau_i} = \alpha wn^2$$

De la ecuación (a) se obtiene kp .

$$\frac{1}{RC} + \frac{E}{LC} \cdot kp \cdot \tau_d = \alpha + 2\zeta wn$$

$$1 + E \cdot kp = LC(wn^2 + 2\zeta wn\alpha)$$

$$kp = \frac{LC}{E}(wn^2 + 2\zeta wn\alpha) \quad (\text{B.24})$$

De la ecuación (c) se obtiene ki .

$$\frac{E \cdot kp}{LC \cdot \tau_i} = \alpha wn^2$$

$$\frac{kp}{\tau_i} = ki = \frac{LC}{E}(\alpha wn^2) \quad (\text{B.25})$$

De la ecuación (a) se obtiene kd .

$$\frac{1}{RC} + \frac{E}{LC} \cdot kp \cdot \tau_d = \alpha + 2\delta\omega n$$

$$\left(\frac{E}{LC}\right) \cdot kp \cdot \tau_d = \alpha + 2\delta\omega n - \frac{1}{RC}$$

$$kp \cdot \tau_d = kd = \frac{LC}{E} \left(\alpha + 2\delta\omega n - \frac{1}{RC} \right) \quad (\text{B.26})$$

Apéndice C.

Código en MATLAB/Simulink

C.1. Código en MATLAB/Simulink del controlador CRAP.

En el presente apéndice se presenta el código realizado en el entorno MATLAB/Simulink para el sistema fotovoltaico.

El código para el observador GPI de voltaje y corriente de las figuras 4.5 y 4.6, correspondiente al conjunto de ecuaciones (3.19) y (3.21), se muestra a continuación, así como la sintonización de los observadores correspondiente al conjunto de ecuaciones (3.22) y (3.23).

```
-----  
Observador GPI de voltaje  
-----
```

```
% vc = voltaje medido  
% vac = voltaje estimado  
% vacp = derivada del voltaje estimado  
% salp = derivada del integrador  
% I0 = corriente medida  
% e = error de voltaje  
-----
```

```
function [vacp, vacp1, salp, e]= fcn(vac1, lamda2, vc, vac, E, L, C, u1,  
u2p, I0, sa1, lamda1, lamda0)
```

```
e=vc-vac;  
vacp = vac1 + lamda2*(vc-vac);  
vacp1 = ((E/(L*C))*u1) - (((2*I0)/C)*u2p) + sa1 + lamda1*(vc-vac);  
salp = lamda0*(vc-vac);  
-----
```

```
Observador GPI de corriente  
-----
```

```
% vc = voltaje medido  
% I0 = corriente medida  
% Ia0 = corriente estimada  
% Ia0p = derivada de la corriente estimada  
% galp = derivada del integrador  
% eI = error de corriente  
-----
```

```
function [Ia0p, Ia01p, galp, eI]= fcn(Ia01, si2, I0, Ia0, vc, L0,  
u2p,gal, si1, si0)
```

```
eI=I0-Ia0;
Ia0p = Ia01 + si2*(I0-Ia0);
Ia01p = (((2*vc)/(L0))*u2p) + ga1 + si1*(I0-Ia0);
ga1p = si0*(I0-Ia0);
```

Sintonización del observador GPI de voltaje

```
function [landa0, landa1, lamda2] = fcn(alfa, wn1, fil)
```

```
landa0 = alfa*wn1*wn1;
landa1 = (wn1*wn1)+(2*fil*wn1*alfa);
lamda2 = (2*fil*wn1)+(alfa);
```

Sintonización del observador GPI de corriente

```
function [si0, si1, si2] = fcn(alfa, wn1, fil)
```

```
si0 = (alfa*wn1*wn1);
si1 = (wn1*wn1)+(2*fil*wn1*alfa);
si2 = (2*fil*wn1)+(alfa);
```

El código para los controladores auxiliares de voltaje y corriente de las figuras 4.7 y 4.8, correspondiente al conjunto de ecuaciones (3.24) y (3.25), se presenta a continuación, así como la sintonización de los mismos correspondientes al conjunto de ecuaciones (3.26) y (3.27).

Controlador auxiliar de voltaje

```
% vc = voltaje medido
% vdc = voltaje deseado
```

```
function [v1] = fcn(k1, vac1, k0, vc, vdc)
```

```
v1 = -(k1*vac1) - (k0*(vc-vdc));
```

Controlador auxiliar de corriente

```
% I0 = corriente medida
% I0m = corriente deseada
% I0mp = I01m = primera derivada de la corriente deseada
% I0mpp = doble derivada de la corriente deseada
```

```
function [v2] = fcn(I0mpp, k3, Ia01, I01m, k2, I0, I0m)
```

```
v2 = I0mpp - k3*(Ia01-I01m) - k2*(I0-I0m);
```

```
-----
Sintonización del controlador auxiliar v1 de voltaje
-----
```

```
function [k0, k1] = fcn(wn3, fi3)
```

```
k0 = wn3*wn3;
```

```
k1 = 2*fi3*wn3;
```

```
-----
Sintonización del controlador auxiliar v2 de corriente
-----
```

```
function [k2, k3] = fcn(wn3, fi3)
```

```
k2 = wn3*wn3;
```

```
k3 = 2*fi3*wn3;
```

El código para las señales de control u_1 y u_2 , de la figura 4.9, correspondiente al conjunto de ecuaciones (3.29), se muestra a continuación.

```
-----
Señales de control u1 y u2
-----
```

```
% L = inductor del convertidor reductor
```

```
% C = capacitor
```

```
% E = voltaje de entrada
```

```
% v1 y v2 = salida de los controladores auxiliares
```

```
% L0 = inductor de la carga
```

```
% vc = voltaje medido
```

```
% I0 = corriente medida
```

```
% sa1 y ga1 = estimadores
```

```
function [u1, u2p] = fcn(L, C, E, v1, sa1, L0, I0, vc, v2, ga1)
```

```
u1 = (((L*C)/(E))*(v1-sa1))+(((L*L0*I0)/(E*vc))*(v2-ga1));
```

```
u2p = ((L0)/(2*vc))*(v2-ga1);
```

```
-----
```

C.2. Código en MATLAB/Simulink del control PID del lazo del convertidor reductor

En el presente apartado se presenta el código para el controlador PID, en el cual se realiza la acción proporcional, integral y derivativa de la figura (4.11), correspondiente al conjunto de ecuaciones (3.36), (3.37) y (3.38).

```
-----
Acción proporcional
-----
```

```
% kp = proporcional
% L = inductor del convertidor
% C = capacitor
% E = voltaje de entrada
-----
```

```
function kp = fcn(L,C,w,E,alpha)
```

```
kp = ((L*C*w*w)+(2*alpha*w*L*C))/E;
```

```
-----
Acción integral
-----
```

```
% ki = integral
-----
```

```
function ki = fcn(L,C,w,E,alpha)
```

```
ki = ((L*C)/E)*(alpha*w*w);
```

```
-----
Acción derivativa
-----
```

```
% kd = derivativa
-----
```

```
function kd = fcn(L,C,w,E,alpha,R,psi)
```

```
kd = ((L*C)/E)*(alpha+2*w*psi-1/(R*C));
-----
```