

**CONVERTIDORES DC-DC EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS:
ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE
MÁXIMA POTENCIA**

**DIANA CAROLINA ROJAS HERRERA
JORGE ARMANDO MONGUÍ FERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2014**

**CONVERTIDORES DC-DC EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS:
ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE
MÁXIMA POTENCIA**

**DIANA CAROLINA ROJAS HERRERA
JORGE ARMANDO MONGUÍ FERNÁNDEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO ELECTRICISTA**

**Directora:
MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS
Ingeniera Electrónica, MSc.**

**Co-Director:
JOHANN FARITH PETIT
Ingeniero Electricista, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2014

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED (MARCO TEÓRICO)....	20
1.1. PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO.....	20
1.2. CONVERTIDORES DC-DC.....	22
1.3. ALMACENADORES DE ENERGÍA – BANCO DE BATERÍAS	23
1.4. INVERSORES DE POTENCIA.....	24
1.5. RED ELÉCTRICA.....	24
1.6. DISPOSITIVOS DE CONTROL.....	24
2. TOPOLOGÍAS A ESTUDIAR DE LOS CONVERTIDORES DC-DC.....	25
2.1. CONVERTIDOR ĆUK.....	25
2.2. CONVERTIDOR SEPIC	26
2.3. CONVERTIDOR FLYBACK	27
3. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN	29
3.1. ARREGLO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS.....	29

3.2.	DISEÑO DE LOS CONVERTIDORES DC-DC	31
3.3.	ALGORITMOS DE SEGUIMIENTO DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA	34
3.3.1.	Algoritmo de tensión constante.....	36
3.3.2.	Algoritmo de perturbación y observación.....	36
3.3.3.	Algoritmo de conductancia incremental..	39
3.4.	PERTURBACIÓN EN LA IRRADIANCIA	42
3.5.	PERTURBACIÓN EN LA CARGA	43
3.6.	PERTURBACIÓN EN LA TEMPERATURA	44
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
4.1.	PERTURBACIÓN EN LA IRRADIANCIA	46
4.1.1.	Convertidor Ćuk	47
4.1.2.	Convertidor SEPIC.....	52
4.1.3.	Convertidor Flyback.....	58
4.2.	PERTURBACIÓN EN LA TEMPERATURA	63
4.2.1.	Convertidor Ćuk.....	64
4.2.2.	Convertidor SEPIC.....	65
4.2.3.	Convertidor Flyback.....	67

4.2.4.	Observaciones generales	68
4.3.	PERTURBACIÓN EN LA CARGA	68
4.3.1.	Resultados de los convertidores ante una perturbación de carga con algoritmo de tensión constante	69
4.3.2.	Resultados de los convertidores ante una perturbación de carga con algoritmo de control de perturbación y observación.	71
4.3.3.	Resultados de los convertidores ante una perturbación de carga con algoritmo de control de conductancia incremental.....	73
4.4.	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LOS CONVERTIDORES	74
4.4.1.	Eficiencia en el convertidor Ćuk	75
4.4.2.	Eficiencia en el convertidor SEPIC	77
4.4.3.	Eficiencia en el convertidor Flyback.....	78
4.5.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TOPOLOGÍAS RESPECTO AL RIZADO DE LA TENSIÓN DE ENTRADA	80
4.5.1.	Rizado en la tensión de entrada para los convertidores: Convertidor Ćuk.....	80
4.5.2.	Rizado en la tensión de entrada para los convertidores: Convertidor SEPIC	82
4.5.3.	Rizado en la tensión de entrada para los convertidores: Convertidor Flyback	83
5.	OBSERVACIONES GENERALES	85

6. CONCLUSIONES.....	86
CITAS BIBLIOGRAFICAS.....	89
BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXOS.....	93

LISTA DE FIGURA

pág.

Figura 1. Sistema fotovoltaico conectado a la red	20
Figura 2. Característica (ideal) de una célula para diferentes niveles de Irradiancia.....	21
Figura 3. Curva característica de potencia contra tensión de una célula para diferentes niveles de irradiancia.....	22
Figura 4. Diagrama del circuito del convertidor \acute{C} uk	26
Figura 5. Diagrama del circuito del convertidor SEPIC	26
Figura 6. Diagrama del circuito equivalente del convertidor Flyback utilizando un modelo de transformador ideal con inductancia de magnetización	28
Figura 7. Curva de corriente vs tensión, Panel Kyocera simulado	29
Figura 8. Curva de potencia vs tensión, Panel Kyocera simulado	29
Figura 9. Arreglo de paneles fotovoltaicos	31
Figura 10. Principio de funcionamiento del algoritmo PyO	37
Figura 11. Diagrama de flujo del algoritmo PyO.....	38
Figura 12. Principio de funcionamiento del algoritmo CI Modificado de [6]	39
Figura 13. Diagrama de flujo del algoritmo CI.....	41
Figura 14. Circuito de perturbación en la irradiancia	42
Figura 15. Comportamiento de la irradiancia durante las simulaciones	43
Figura 16. Curva de carga para el estrato 3 en Colombia. , Datos tomados de [21].....	44
Figura 17. Convertidor \acute{C} uk con los parámetros calculados	47
Figura 18. Gráfica de potencia aplicando perturbación en la irradiancia, algoritmo de tensión constante, convertidor \acute{C} uk.....	47
Figura 19. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo de tensión constante, convertidor \acute{C} uk.....	48
Figura 20. Gráfica de potencia con perturbación en la irradiancia, algoritmo PyO, convertidor \acute{C} uk.....	49
Figura 21. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo PyO, convertidor \acute{C} uk.....	49
Figura 22. Gráfica de potencia aplicando MPPT con algoritmo CI, convertidor \acute{C} uk.....	50
Figura 23. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo CI, convertidor \acute{C} uk.....	50
Figura 24. Convertidor SEPIC con los parámetros calculados	52
Figura 25. Gráfica de potencia con algoritmo de tensión constante, convertidor SEPIC ...	53

Figura 26. Gráfica de tensión de entrada con algoritmo de tensión constante, convertidor SEPIC.....	53
Figura 27. Gráfica de potencia con perturbación en la irradiancia, algoritmo PyO, convertidor SEPIC	54
Figura 28. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo PyO, convertidor SEPIC	54
Figura 29. Gráfica de potencia con perturbación en la irradiancia, algoritmo CI, convertidor SEPIC	55
Figura 30. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo CI, convertidor SEPIC	55
Figura 31. Ejemplo de rizado de la señal de potencia, convertidor SEPIC con algoritmo PyO.....	57
Figura 32. Convertidor Flyback con los parámetros calculados	58
Figura 33. Gráfica de potencia con perturbación en la irradiancia, algoritmo tensión constante, convertidor Flyback	58
Figura 34. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo de tensión constante, convertidor Flyback.....	59
Figura 35. Gráfica de potencia con perturbación en la irradiancia, algoritmo PyO, convertidor Flyback	60
Figura 36. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo PyO, convertidor Flyback	60
Figura 37. Gráfica de potencia con perturbación en la irradiancia, algoritmo CI, convertidor Flyback.....	61
Figura 38. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo CI, convertidor Flyback	61
Figura 39: Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor Ćuk, Algoritmo TC.....	64
Figura 40: Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor Ćuk, Algoritmo PyO.....	64
Figura 41: Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor Ćuk, Algoritmo CI.....	64
Figura 42: Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor SEPIC, Algoritmo TC.....	65
Figura 43: Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor SEPIC, Algoritmo PyO.....	66
Figura 44; Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor SEPIC, Algoritmo CI.....	66
Figura 45. Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor Flyback, Algoritmo TC.....	67

Figura 46: Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor Flyback, Algoritmo PyO.....	67
Figura 47. Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor Flyback, Algoritmo CI.....	67
Figura 48. Potencia entregada por los paneles con el convertidor Ćuk ante perturbaciones de carga, algoritmo de tensión constante	69
Figura 49. Potencia entregada por los paneles con el convertidor SEPIC ante perturbaciones de carga, algoritmo de tensión constante	70
Figura 50. Potencia entregada por los paneles con el convertidor Flyback ante perturbaciones de carga, algoritmo de tensión constante.....	70
Figura 51. Potencia entregada por los paneles con el convertidor Ćuk ante perturbaciones de carga, algoritmo de perturbación y observación	71
Figura 52. Potencia entregada por los paneles con el convertidor SEPIC ante perturbaciones de carga, algoritmo de perturbación y observación	71
Figura 53. Potencia entregada por los paneles con el convertidor Flyback ante perturbaciones de carga, Algoritmo de perturbación y observación.....	72
Figura 54. Potencia entregada por los paneles con el convertidor Ćuk ante perturbaciones de carga, algoritmo de conductancia incremental	73
Figura 55. Potencia entregada por los paneles con el convertidor SEPIC ante perturbaciones de carga, algoritmo de conductancia incremental	73
Figura 56. Potencia entregada por los paneles con el convertidor Flyback ante perturbaciones de carga, algoritmo de conductancia incremental	74
Figura 57. Eficiencia del convertidor Ćuk con el algoritmo de tensión constante	75
Figura 58. Eficiencia del convertidor Ćuk con el algoritmo de perturbación y observación.....	76
Figura 59. Eficiencia del convertidor Ćuk con el algoritmo de conductancia incremental .	76
Figura 60. Eficiencia del convertidor SEPIC con el algoritmo de tensión constante	77
Figura 61. Eficiencia del convertidor SEPIC con el algoritmo de perturbación y observación	77
Figura 62. Eficiencia del convertidor SEPIC con el algoritmo de conductancia incremental	77
Figura 63. Eficiencia del convertidor Flyback con el algoritmo de tensión constante	78
Figura 64: Eficiencia del convertidor Flyback con el algoritmo de perturbación y observación	79
Figura 65. Eficiencia del convertidor Flyback con el algoritmo de conductancia incremental	79
Figura 66. Señales de tensión de entrada para el convertidor Ćuk controlado mediante los algoritmos a) TC, b) PyO, c) CI.....	80
Figura 67. Señales de tensión de entrada para el convertidor SEPIC controlado mediante los algoritmos a) TC, b) PyO, c) CI.....	82

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Información de los paneles solares	30
Tabla 2. Punto de Máxima Potencia (calculado)	31
Tabla 3. Características del arreglo fotovoltaico en el punto de máxima potencia con irradiancia de 1000 w/m ² , 25 °C	32
Tabla 4. Valores límite mínimos de los componentes pasivos y sus valores utilizados en la simulación del convertidor \acute{C} uk	33
Tabla 5. Valores límite mínimos de los componentes pasivos y sus valores utilizados en la simulación del convertidor SEPIC	33
Tabla 6. Valores límite mínimos de los componentes pasivos y sus valores utilizados en la simulación del convertidor Flyback	34
Tabla 7. Definición de las variables empleadas en los algoritmos de MPPT	35
Tabla 8. Resultados del convertidor \acute{C} uk, perturbación en la irradiancia, algoritmo de tensión constante con D=0,8342	48
Tabla 9. Resultados del convertidor \acute{C} uk con perturbación en la irradiancia, algoritmo de perturbación y observación	50
Tabla 10. Resultados del convertidor \acute{C} uk con perturbación en la irradiancia, algoritmo de conductancia incremental.....	51
Tabla 11. Resumen de los resultados para el convertidor \acute{C} uk bajo los algoritmos trabajados frente a una perturbación en la irradiancia	51
Tabla 12. Tiempo aproximado en llegar al punto de máxima potencia de los diferentes algoritmos.....	52
Tabla 13. Resultados del convertidor SEPIC, perturbación en la irradiancia, algoritmo de tensión constante con D=0,8345	53
Tabla 14. Resultados del convertidor SEPIC, perturbación en la irradiancia, algoritmo PyO	55
Tabla 15. Resultados del convertidor SEPIC, perturbación en la irradiancia, algoritmo CI	56
Tabla 16. Resumen de los resultados para el convertidor sepic bajo los algoritmos trabajados frente a una perturbación en la irradiancia	56
Tabla 17. Tiempo aproximado en llegar al punto de máxima potencia de los diferentes algoritmos [s]	57

Tabla 18. Resultados del convertidor Flyback, perturbación en la irradiancia, algoritmo de TC: $D=0,714$	59
Tabla 19. Potencia entregada por los paneles con perturbación en la irradiancia, convertidor Flyback, algoritmo de PyO	60
Tabla 20. Potencia entregada por los paneles con perturbación en la irradiancia, convertidor Flyback, algoritmo de CI.....	62
Tabla 21. Resumen de los resultados para el convertidor Flyback bajo los algoritmos trabajados frente a una perturbación en la irradiancia	62
Tabla 22. Tiempo aproximado en llegar al punto de máxima potencia de los diferentes algoritmos [s]	63
Tabla 23. Potencia en el convertidor cuk ante una perturbación en la temperatura.....	65
Tabla 24. Potencia en el convertidor SEPIC ante una perturbación en la temperatura	66
Tabla 25. Potencia en el convertidor sepic ante una perturbación en la temperatura	68
Tabla 26. Valores de potencia promedio para los diferentes convertidores, con algoritmo de tensión constante	70
Tabla 27. Valores de potencia promedio para los diferentes convertidores con algoritmo PyO.....	72
Tabla 28. Valores de potencia promedio para los diferentes convertidores, con algoritmo de CI.....	74
Tabla 29. Eficiencia del convertidor Ćuk	76
Tabla 30. Eficiencia del convertidor SEPIC	78
Tabla 31. Eficiencia del convertidor Flyback	79
Tabla 32. Eficiencia de los convertidores y algoritmos ante una reducción del 66% en la carga	87

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Análisis detallado del funcionamiento del convertidor Ćuk.....	92
Anexo B. Análisis detallado del funcionamiento del convertidor SEPIC.....	99
Anexo C. Análisis detallado del funcionamiento del convertidor Flyback.....	102

RESUMEN

TÍTULO: CONVERTIDORES DC-DC EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA*

AUTORES:

DIANA CAROLINA ROJAS HERRERA
JORGE ARMANDO MONGUI FERNANDEZ**

PALABRAS CLAVES:

Electrónica de potencia, control, seguimiento del punto de máxima potencia, MPPT, convertidores DC-DC, Ćuk, Flyback, SEPIC, sistemas fotovoltaicos.

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo de grado muestra un análisis comparativo de tres diferentes topologías de convertidores DC-DC (Ćuk, SEPIC y Flyback), a los que se les implementaron diversos algoritmos de control para el seguimiento del punto de máxima potencia en un sistema fotovoltaico centralizado conectado a la red, considerando los algoritmos de tensión constante, Perturbación y Observación y Conductancia Incremental. Se realizó un diseño de cada topología de acuerdo a su modo de operación y los niveles de rizado deseados en las señales de tensión y en la corriente calculando unos valore límite mínimos, los cuales sirvieron como referencia para finalmente tomar unos valores con los cuales las simulaciones se comportaron mejor. El posterior análisis se llevó a cabo realizando simulaciones en el software PSIM, tomando una configuración de dos paneles solares conectados en serie, según los parámetros de un panel real y simulando la red eléctrica se utilizó una fuente de tensión continua, y con los resultados obtenidos al efectuar unas perturbaciones en irradiancia, en temperatura y en carga, se realizó un estudio comparativo teniendo en cuenta criterios de eficiencia, calidad de la señal, tiempo de respuesta, entre otros, encontrando las ventajas y desventajas de los convertidores y los algoritmos de control implementados.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: María Alejandra Mantilla Villalobos. Codirector: Johann Farith Petit Suárez

ABSTRACT

TITLE: DC-DC CONVERTERS IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: MAXIMUM POWER POINT TRACKING CONTROL TECHNIQUES*

AUTHORS:

DIANA CAROLINA ROJAS HERRERA

JORGE ARMANDO MONGUI FERNANDEZ**

KEYWORDS:

Power electronics, control, maximum power point tracking, MPPT, DC-DC converters, Cuk, Flyback, SEPIC, photovoltaic systems.

DESCRIPTION:

This graduation project presents a comparative analysis of three different topologies of DC-DC converters (Ćuk, SEPIC and Flyback), which operated using control techniques to track the maximum power point of a grid-tied photovoltaic system, considering the methods of constant voltage, Perturbation and Observation and Incremental Conductance. The design of each topology was made according to its operation modes and the ripple in the voltage and the current signals, this way were found the minimum values of the circuit components, those were used as reference to find the final values used in the simulation. The study and comparisons were made through simulations in the software PSIM, using a configuration of two solar panels serie connected, modeled according to the values of a real solar panel, and the grid was modeled by a DC voltage source, and the results, considering a perturbation of the irradiance, the temperature and the load voltage, were used to make a comparative evaluation of the converters response under the criteria of efficiency of the converter and the control techniques, the power quality, the time of response, the convergence rate, among others, and then were found the advantages and disadvantages of the converters and the control techniques applied.

* Work Degree

** Physico-Mechanical Faculty of Engineering. School of Electrical, Electronic Engineering and Telecommunications. Director: Maria Alejandra Villalobos Mantilla. Co-Advisor: Johann Petit Farith Suarez

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica se ha convertido en una necesidad indispensable para el hombre, es requerida en las industrias, en las telecomunicaciones, en varios de los medios de transporte, en el comercio, así como también en los hogares. Por esto es necesario garantizar su disponibilidad y la calidad del servicio [1].

Dentro de los sistemas de generación empleados actualmente se encuentran: el hidráulico, el térmico, el eólico, el fotovoltaico, el nuclear, entre otros, siendo en Colombia el hidráulico y el térmico los más empleados [2]. Los sistemas térmicos convencionales cuentan con el problema de que requieren recursos no renovables como materia prima para su funcionamiento por lo que el costo de la energía es alto, y contribuyen con la destrucción de los recursos naturales a la vez que emiten concentraciones considerables de CO₂ a la atmosfera; los sistemas hidráulicos por su parte requieren de condiciones muy particulares para su instalación y producen impactos negativos en la flora y fauna en donde se instalan. Esto hace que sea necesario estudiar sistemas no convencionales de generación como los sistemas fotovoltaicos buscando su optimización desde la ingeniería [3].

La generación de energía eléctrica a partir de la energía solar mediante el uso de paneles fotovoltaicos se constituye en uno de los sistemas renovables de mayor crecimiento en la actualidad debido a su facilidad de uso final. Dentro de los problemas que enfrenta la generación fotovoltaica, se encuentra la necesidad de grandes superficies para su instalación y la disposición final de las baterías que utiliza, además del alto costo en su implementación y la baja eficiencia que presenta [4].

Actualmente los costos de los paneles han bajado gracias al estudio de nuevos métodos y materiales para la captación de la radiación solar, además se han presentado mejoras en los métodos de adecuación de las señales gracias a la electrónica de potencia y a la integración de nuevos dispositivos electrónicos de uso industrial. Con esto, se ha conseguido mejorar el panorama de la generación fotovoltaica al punto en que se ha hecho accesible para las personas y una opción viable para la electrificación fuera de la red y dentro de ésta. Sin embargo, es necesario seguir sumando esfuerzos para que esta forma de generación continúe mejorando su eficiencia tanto en la transformación de la radiación solar en energía eléctrica, como en la adecuación de las señales y la obtención de la máxima potencia [5].

La generación de energía fotovoltaica conectada a la red está constituida generalmente por diferentes dispositivos, como son: el panel fotovoltaico, el convertidor DC-DC, el inversor de potencia y posibles almacenadores de energía (Bancos de baterías), entre otros [4].

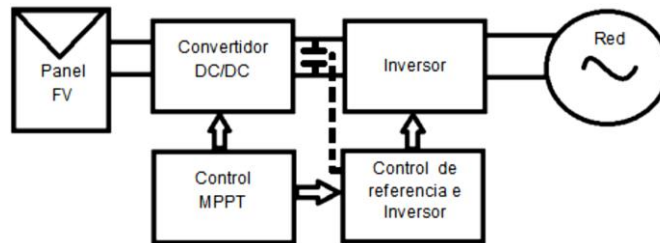
Los paneles fotovoltaicos generalmente poseen eficiencias bajas por lo que, es deseable que estos aprovechen la mayor cantidad de energía proveniente del sol y que entreguen siempre la máxima potencia. Sin embargo cabe mencionar que la respuesta de la curva característica de Corriente-Tensión (curva IV) de los mismos no es lineal y la respuesta Potencia-Tensión (curva PV) solo presenta un punto de máxima potencia para unas condiciones uniformes de irradiancia y temperatura. Generalmente los sistemas fotovoltaicos no operan en este punto por si mismos por lo cual es necesario implementar algoritmos de control que permitan un mejor aprovechamiento de la energía haciendo que los paneles fotovoltaicos trabajen en el punto de máxima potencia. Estos algoritmos pueden ser implementados mediante los convertidores DC-DC [6].

En este sentido, este trabajo de grado busca analizar algunas topologías de convertidores DC-DC, además de diversas estrategias de control del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, *Maximum Power Point Tracking*) de los paneles; esto apuntando hacia la mejora en la eficiencia energética [7].

1. SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED (MARCO TEÓRICO)

Un sistema fotovoltaico típico conectado a la red como el mostrado en la Figura 1 consta generalmente de un arreglo de paneles fotovoltaicos, un convertidor DC-DC, un inversor DC-AC, la red eléctrica y los dispositivos de control [8].

Figura 1. Sistema fotovoltaico conectado a la red



A continuación se hará un breve resumen de los componentes de ésta configuración.

1.1. PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO

El elemento principal de cualquier sistema de energía es el generador, que para los sistemas fotovoltaicos recibe el nombre de panel solar fotovoltaico, el cual está formado por células solares que tienen la propiedad de convertir directamente en electricidad los fotones provenientes de la luz del sol, basándose en el efecto fotovoltaico. Estas células son conectadas eléctricamente, encapsuladas y montadas sobre una estructura de soporte o marco. Las células consisten de una unión p-n diseñada especialmente o dispositivos de barrera Schottky. Proporcionan en su salida de conexión una tensión continua [4].

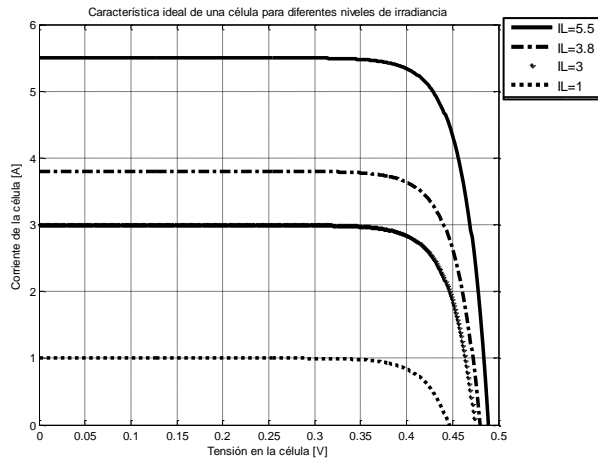
La operación básica de un panel fotovoltaico está caracterizada por su curva IV, obtenida experimentalmente a través de mediciones que permiten conocer con precisión los parámetros eléctricos del panel o el arreglo de paneles bajo determinadas condiciones de irradiancia. En el caso ideal, la ecuación característica de tensión corriente es

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad [\text{A}] \quad (1)$$

Donde I_L es la componente de corriente de célula debida a los fotones, $q=1.6\text{e-}10$ C, $k=1.38\text{e-}23$ J/K y T es la temperatura de la célula en grados Kelvin, además, al hacer $V=0$ se obtiene que I_L es la corriente de corto circuito. En la Figura 2 se muestran las curvas características de Tensión-Corriente de una célula fotovoltaica para diferentes valores de

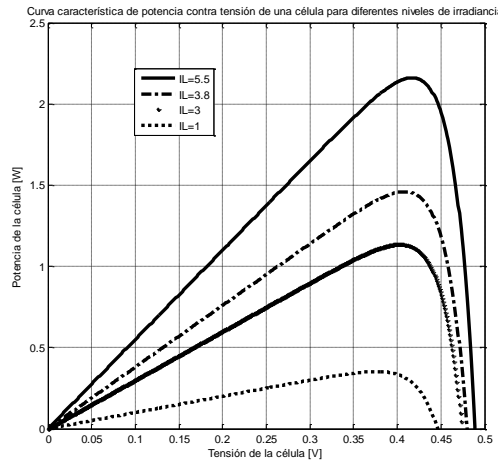
irradiancia, la cual se ve reflejada en cambios en los valores de I_L (un aumento en la irradiancia representa un aumento en I_L) [4].

Figura 2. Característica (ideal) de una célula para diferentes niveles de Irradiancia



En la Figura 3 es posible observar la curva PV característica contra tensión de una célula fotovoltaica. También puede verse que los valores máximos de potencia suceden a diferentes valores de tensión de operación según los niveles irradiancia aplicada a las células de un panel, es esto lo que hace necesario implementar algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), con el fin de extraer la potencia máxima del panel bajo cualquier condición de operación.

Figura 3. Curva característica de potencia contra tensión de una célula para diferentes niveles de irradiancia



En la práctica, las curvas se construyen variando los niveles de tensión DC en los terminales del panel, y midiendo la corriente que éste entrega para una condición de iluminación controlada; para realizar los cambios de tensión en los terminales se utilizan convertidores DC-DC [9].

1.2. CONVERTIDORES DC-DC

Son dispositivos utilizados para transformar el nivel de continua de una señal eléctrica. Suelen ser reguladores de conmutación, dando a su salida una tensión regulada y, la mayoría de las veces con limitación de corriente [10]. Dentro de un sistema de generación fotovoltaica se utilizan para ajustar (elevar o reducir) la tensión de alimentación del generador fotovoltaico y adecuar la señal de tensión de entrada para los inversores.

Además de regular la tensión de salida, los convertidores permiten desacoplar la carga del generador fotovoltaico, y mediante diversas estrategias de control permiten modificar la carga vista por el panel forzando a éste a trabajar en un punto de operación dado. El objetivo de este trabajo es llevar a los paneles a trabajar en su punto de máxima potencia.

En este caso, el convertidor gobernado por un controlador podrá asumir las funciones de regulador de tensión y garantizar la búsqueda del punto de máxima potencia. De acuerdo a la topología del convertidor, éste podrá adaptar el ciclo de trabajo al seguimiento del sistema en intervalos de tiempo, de tal modo que se garantice la máxima eficiencia del sistema en condiciones cambiantes.

El correcto funcionamiento del convertidor DC-DC requiere un circuito de control que será el encargado de realizar el seguimiento del sistema a través de pequeños intervalos de tiempo: tensión de los paneles, corriente entregada y/o potencia generada por los mismos, así como determinar el ciclo de trabajo requerido para garantizar la máxima extracción de potencia de los paneles [11].

Los convertidores se pueden clasificar según su función y si tienen o no existencia de aislamiento galvánico en su configuración.

En general, existen dos métodos para realizar la conversión DC-DC:

Convertidores lineales: Basados en el empleo de un elemento regulador que trabaja en su zona resistiva disipando energía [10].

Convertidores conmutados: Se basan en el empleo de los elementos semiconductores que trabajan en conmutación (corte/conducción), regulando de esta forma el flujo de potencia a la salida del convertidor. A estos convertidores también se les llama fuentes de alimentación conmutadas y poseen grandes ventajas respecto a los convertidores lineales [10].

Tipos de convertidores DC-DC: Son varios los tipos de convertidores DC-DC existentes. Normalmente se clasifican en tres grupos de acuerdo a su función: los que disminuyen la tensión a su salida (convertidor reductor), los que aumentan la tensión a su salida (convertidor elevador) y los que son capaces de realizar ambas funciones. En este artículo se estudiarán topologías especiales de convertidores conmutados del tipo elevador reductor [12].

Más adelante nos referiremos a las topologías a estudiar.

1.3. ALMACENADORES DE ENERGÍA – BANCO DE BATERÍAS

Dado que los arreglos fotovoltaicos producen potencia únicamente bajo condiciones de irradiancia no nulas, los sistemas fotovoltaicos emplean frecuentemente mecanismos de almacenamiento que consisten en baterías recargables, aunque es posible emplear mecanismos particulares.

Cuando se emplea un mecanismo de almacenamiento con baterías, es común incorporar también un controlador de carga en el sistema, de modo que las baterías sean protegidas ante situaciones de sobre carga o de descarga en exceso.

1.4. INVERSORES DE POTENCIA

La función de un inversor es cambiar una señal de entrada de corriente continua a una señal de salida en corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada, por lo tanto este equipo electrónico es un elemento fundamental en una instalación fotovoltaica conectada a la red eléctrica [10].

El inversor dispone además de funciones de protección, para garantizar tanto la calidad de la energía entregada a la red como la seguridad propia de la instalación y las personas.

1.5. RED ELÉCTRICA

El término red eléctrica se utiliza para definir una red que involucra las operaciones de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. La red eléctrica opera a diferentes niveles de tensión y frecuencia; en Colombia la frecuencia de operación es de 60 [Hz], y la tensión de transmisión y distribución varía de acuerdo a condiciones específicas de la red. [13].

1.6. DISPOSITIVOS DE CONTROL

En muchas situaciones se requiere suministrar energía eléctrica en una forma variable y controlada. Para lograr esta tarea es posible utilizar sistemas de control que involucren componentes para gobernar los flujos de potencia entregados a las cargas y/o a la red [14].

En los convertidores DC-DC conmutados que se estudian como parte de este proyecto, se emplean sistemas de control realimentados que se controlan mediante diferentes algoritmos. Dichos sistemas de control emplean transistores de unión bipolar y puerta aislada IGBT como dispositivos de conmutación, gracias a sus características de velocidad de conmutación y potencia soportada [10].

2. TOPOLOGÍAS A ESTUDIAR DE LOS CONVERTIDORES DC-DC

Tal como se mencionó anteriormente, se ha trabajado con tres topologías de convertidores: Ćuk, SEPIC y Flyback.

Como generalidad, los convertidores trabajan de acuerdo al ciclo de trabajo (D) que se define, para un convertidor DC-DC operando en modo continuo bajo dos estados de operación, como:

$$D = \frac{t_1}{t_1+t_2} \quad \text{ó} \quad D = \frac{t_1}{T} \quad (2)$$

Donde t_1 es el tiempo en el que el convertidor permanece en el primer estado de operación, mientras t_2 es el tiempo en el que el mismo permanece en el segundo estado y T es el periodo en el que opera el convertidor.

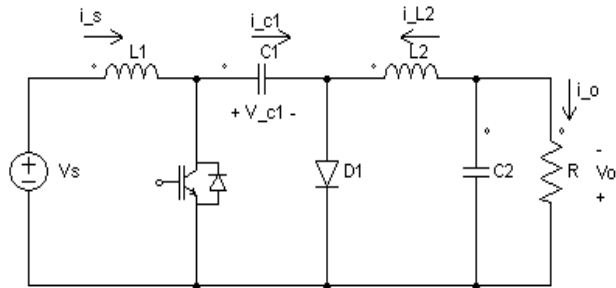
A continuación se describe el funcionamiento de cada uno de estos convertidores.

2.1. CONVERTIDOR ĆUK

El convertidor Ćuk es un tipo de convertidor DC-DC que utiliza un condensador como su principal componente de almacenamiento. Un convertidor Ćuk no aislado se compone de dos inductores, dos capacitores, un interruptor y un diodo, como puede apreciarse en la Figura 4. Este convertidor es del tipo convertidor-inversor dado que la tensión en su salida presenta una polaridad opuesta respecto a la tensión de entrada.

En este convertidor, el condensador $C1$ se utiliza para transferir energía y se conecta alternativamente a la entrada y la salida (dependiendo del estado del interruptor). Los demás elementos almacenadores (bobinas y condensadores), cumplen con la función de actuar sobre las señales de entrada y salida y asemejar su comportamiento como fuentes de corriente y tensión. En la Figura 4 se muestra el diagrama del circuito de esta topología.

Figura 4. Diagrama del circuito del convertidor Ćuk



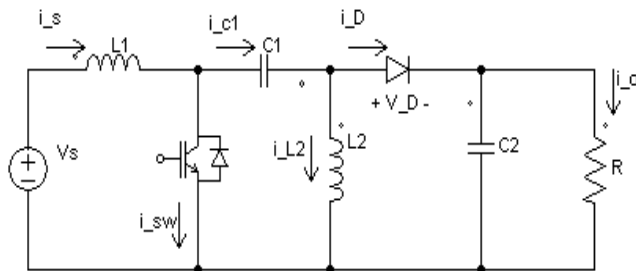
A partir del análisis del funcionamiento del convertidor se tiene la relación entre las tensiones y corrientes de entrada y de salida en términos del ciclo de trabajo se tiene:

$$\frac{D}{1-D} = -\frac{V_o}{V_s} = \frac{I_s}{I_o} \quad (3)$$

2.2. CONVERTIDOR SEPIC

Convertidor de inductor primario con terminación única, SEPIC por sus siglas en inglés, es una topología de convertidor que entrega a la salida una tensión regulada de una entrada variable de tensión [11]. Es usado cuando se quiere tener una tensión de salida menor, igual o mayor a la tensión de entrada, y su mayor uso es el campo de los cargadores de baterías dependiendo del nivel de carga de las mismas [15]. En la Figura5 se muestra la configuración de éste circuito.

Figura 5. Diagrama del circuito del convertidor SEPIC



Asumiendo una eficiencia de 100% en los elementos del sistema y considerando la tensión en el diodo \$V_D\$ se tiene que el ciclo de trabajo \$D\$ se puede expresar también como (4).

$$\frac{D}{1-D} = \frac{V_o + V_D}{V_s} = \frac{I_s}{I_o} \quad (4)$$

2.3. CONVERTIDOR FLYBACK

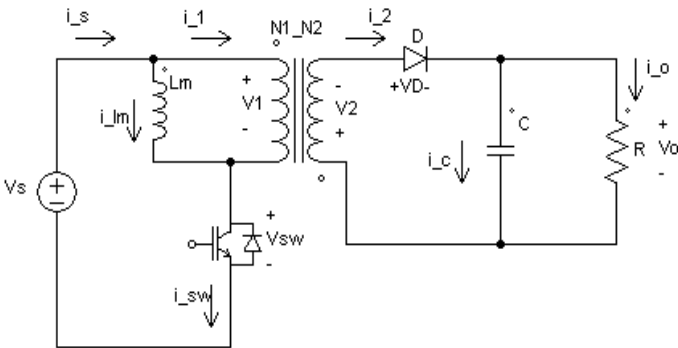
Una de las principales desventajas de utilizar los convertidores como fuentes de tensión conmutadas, consiste en la ausencia de aislamiento entre la entrada y la salida. El convertidor Flyback utiliza el aislamiento galvánico, mediante un conjunto de inductancias magnéticamente acopladas (simuladas como un transformador) para almacenar energía y a la vez provee un aislamiento eléctrico entre la tierra de la fuente de entrada (panel solar) y la tierra de los circuitos de salida [12].

La inclusión de un transformador en el circuito, involucra varios fenómenos adicionales que modifican el comportamiento del convertidor. A nivel constructivo, representa un volumen más grande que el requerido por otro convertidor con características similares; por lo tanto es utilizado en aplicaciones de baja potencia. A nivel eléctrico, la inclusión del transformador causa efectos negativos debidos a la inductancia de dispersión, y se producen sobre tensiones en el interruptor controlado por lo que su uso se limita a tensiones bajas de entrada, dichas sobretensiones pueden manejarse mediante el uso de redes de amortiguación pero esto compromete la eficiencia del convertidor.

En un primer análisis, se utiliza el modelo del transformador como un transformador ideal que incluye la reactancia de magnetización (L_m). Los efectos de las pérdidas y las inductancias de fugas son importantes para determinar las protecciones del circuito, pero para realizar un estudio global del circuito es recomendable utilizar el modelo del transformador simplificado.

En la Figura 6 se muestra el circuito equivalente del convertidor Flyback utilizando el modelo de transformador ideal que incluye la inductancia de magnetización.

Figura 6. Diagrama del circuito equivalente del convertidor Flyback utilizando un modelo de transformador ideal con inductancia de magnetización



En términos de las tensiones de entrada y salida se expresa el ciclo de trabajo D como (5).

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{1-D} \frac{n_2}{n_1} \tag{5}$$

3. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN

3.1. ARREGLO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

El arreglo fotovoltaico considerado en este proyecto consiste en la conexión en serie de dos paneles solares. Para realizar el modelado del generador fotovoltaico, se consideraron las características eléctricas de un panel Kyocera que presenta los parámetros expuestos en la Tabla 4 (tomados de la hoja de datos del fabricante). A partir de estos parámetros se construyeron las curvas de operación para cada panel según las características de temperatura e irradiancia de diseño: 25 [°C] y 1000 [W/m²] (Figuras 7 y 8).

Figura 7. Curva de corriente vs tensión, Panel Kyocera simulado

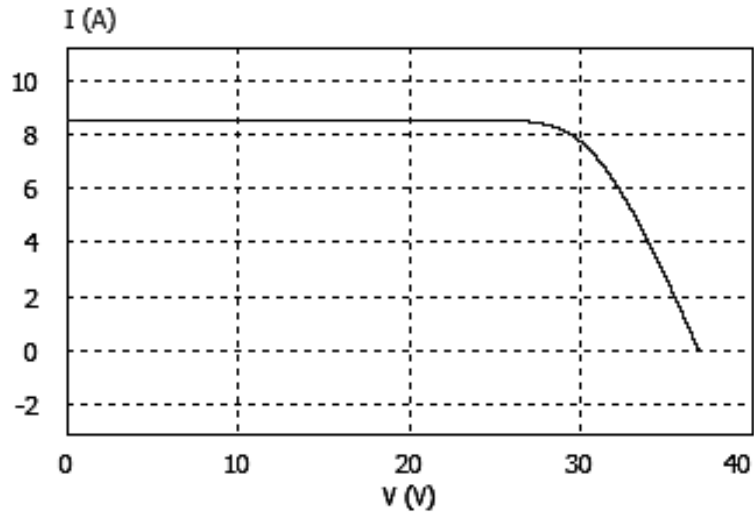


Figura 8. Curva de potencia vs tensión, Panel Kyocera simulado

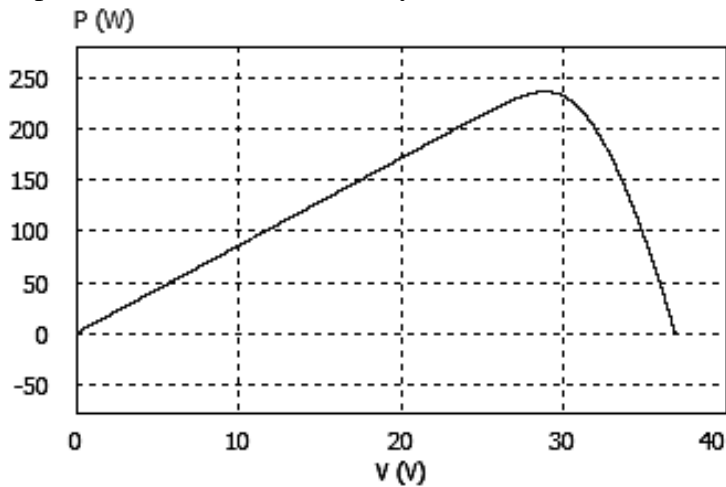


Tabla 1. Información de los paneles solares

PARAMETROS PANEL^a	
NÚMERO DE CÉLULAS NS	36
POTENCIA MÁXIMA P _{MAX}	240 W
TENSIÓN EN P _{MAX}	29,8 V
CORRIENTE EN P _{MAX}	8,6 A
TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO V _{OC}	36,9 V
CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO I _{SC}	8,59 A
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DE V _{OC}	-0,133
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DE I _{SC}	0,0515
INTENSIDAD LUMÍNICA TEMPERATURA DE REFERENCIA T _{REF}	1000 25°C
DV/DI (PENDIENTE) EN V _{OC}	-0,68
[Parámetros del modelo (definidos)]	
BANDA DE ENERGÍA E _G	1,12
FACTOR IDEAL A	1,2
RESISTENCIA SHUNT R _{SH}	1000
COEFICIENTE K _S	0
[Parámetros del modelo (calculados)]	
RESISTENCIA SERIE R _S	0,0153
CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO I _{SC0}	8,59
CORRIENTE DE SATURACIÓN I _{S0}	3,28e-014
COEFICIENTE DE TEMPERATURA C _T	0,004424
[Condiciones de operación]	
INTENSIDAD LUMÍNICA S	1000
TEMPERATURA AMBIENTE T _A	25°C

^aDatos tomados de [16]

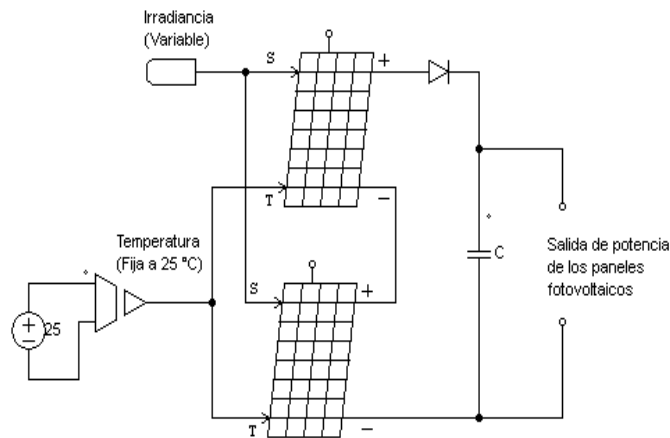
De acuerdo a los parámetros calculados mediante el software PSIM se obtuvieron los valores para el punto de máxima potencia expuestos en la Tabla 2.

Tabla 2. Punto de Máxima Potencia (calculado)

$P_{\text{máx}}$	237,33	[W]
$V_{\text{máx}}$	28,89	[V]
$I_{\text{máx}}$	8,21	[A]

Para los sistemas estudiados se utilizaron dos paneles de iguales características conectados en serie como se ve en la Figura 9, por lo que los valores de tensión y potencia en el punto de máxima potencia corresponden al doble de los calculados (57.78 [V] y 474.66 [W]).

Figura 9. Arreglo de paneles fotovoltaicos



3.2. DISEÑO DE LOS CONVERTIDORES DC-DC

Los convertidores DC-DC se emplean generalmente como reguladores de tensión DC. Para fuentes de continua operan con una tensión de entrada fija y variando el ciclo de trabajo se puede controlar la tensión del lado de la carga.

El análisis de un convertidor DC-DC básico en estado estacionario se basa en dos conceptos:

- El balance de tensión en las bobinas: En régimen estacionario la tensión media durante un periodo de conmutación en las bobinas debe ser cero.
- El balance de intensidad en los condensadores: En régimen estacionario la intensidad media durante un periodo de conmutación en los condensadores debe ser cero.

En la Tabla 3 se resumen los valores de potencia y corriente del arreglo fotovoltaico, así como las tensiones de entrada y salida del convertidor acoplado a este, operando a máxima potencia con una irradiancia de $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ y a temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Estos valores son los utilizados para los cálculos de los valores límite de los componentes de las topologías.

Tabla 3. Características del arreglo fotovoltaico en el punto de máxima potencia con irradiancia de 1000 w/m^2 , $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Potencia máxima	480 [W]
Corriente de entrada (I_{in})	8,054 [A]
Voltaje de entrada (V_{in})	59,6 [V]
Voltaje de salida (V_o)	300 [V]

Para cada una de las tres topologías de convertidores consideradas, el diseño se realizó teniendo en cuenta, inicialmente unos valores límite de los elementos del circuito, según los valores entregados por el arreglo de paneles operando a máxima potencia, y unos valores de rizado máximo de tensión y corriente en los componentes.

A continuación en las Tablas 4, 5 y 6 se resumen las ecuaciones para determinar los valores mínimos para los elementos que conforman cada una de las topologías, los valores calculados de los mismos y los valores utilizados en las simulaciones, seleccionados por presentar un mejor funcionamiento. Todos los cálculos y análisis de los circuitos para determinar las ecuaciones descritas se encuentran como parte de los Anexos.

Tabla 4. Valores límite mínimos de los componentes pasivos y sus valores utilizados en la simulación del convertidor Ćuk

Componentes	Ecuación	Valor límite ^a	Valor utilizado
D para máxima potencia	$\frac{V_o}{V_o - V_s}$	0,834	-
L_1	$\frac{DV_s}{f\Delta I_1}$	1,54 mH	3,2 mH
L_2	$\frac{DV_s}{\Delta I_2}$	7,769 mH	15,62 mH
C_1	$\frac{V_o D}{Rf\Delta V_{C1}}$	0,31 uF	0,33 uF
C_2	$\frac{V_o(1-D)}{8L_2\Delta V_o f^2}$	0,67 uF	3,7 uF

^aLos valores en esta columna se han calculado teniendo en cuenta unos valores de: $f=20\text{kHz}$, $\Delta I_1 = \Delta I_2 = 40\%$, $\Delta V_{C1} = 30\%$, $R = 187,5$ y $\Delta V_o = 1\%$

Tabla 5. Valores límite mínimos de los componentes pasivos y sus valores utilizados en la simulación del convertidor SEPIC

Componentes	Ecuación	Valor límite ^a	Valor utilizado
D para máxima potencia	$\frac{V_o + V_D}{V_s + V_o + V_D}$	0,834	-
L_1	$\frac{DV_s}{f\Delta i_{L1}}$	0,153 mH	1,029 mH
L_2	$\frac{(V_o - V_D)(1-D)}{f\Delta i_{L2}}$	0,122 mH	1,029 mH
C_1	$\frac{(i_o)D}{f\Delta V_{C1}}$	0,925 uF	5,6 uF
C_2	$\frac{V_o D}{Rf\Delta V_o}$	22,2 uF	22,2 uF

^aLos valores en esta columna se han calculado teniendo en cuenta unos valores de: $f=20\text{kHz}$, $\Delta I_1 = \Delta I_2 = 40\%$, $\Delta V_{C1} = 30\%$, $R = 187,5$ y $\Delta V_o = 1\%$.

Tabla 6. Valores límite mínimos de los componentes pasivos y sus valores utilizados en la simulación del convertidor Flyback

Componentes	Ecuación	Valor límite ^a	Valor utilizado
D para máxima potencia	$\frac{V_o N_1}{V_{in} N_2 - V_o N_1}$	0,834	-
Relación de transformación	$\frac{n_1}{n_2}$	-	$\frac{1}{2}$
L_m	$\frac{(1-D)^2 R}{2f} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)$	118,44 uH	120 uH
C	$\frac{V_o D}{R f \Delta V_o}$	19,08 uF	20 uF

^aLos valores en esta columna se han calculado teniendo en cuenta unos valores de: $f=20\text{kHz}$, $R = 187,5$ y $\Delta V_o = 1\%$.

3.3. ALGORITMOS DE SEGUIMIENTO DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

Como se ha visto antes en la figuras 1 y 2, un módulo fotovoltaico ante unas condiciones de radiación uniformes y temperatura constante presenta unas curvas características de V-I y V-P. Se aprecia entonces que existe un único MPP, en el cual el panel fotovoltaico entrega la máxima potencia para dichas condiciones ambientales.

Como se mencionó antes, el sistema generalmente no opera en el MPP por sí mismo, por lo cual es necesario implementar un convertidor DC-DC que cuente con un algoritmo que permita el seguimiento del mismo mediante el ajuste de su ciclo de trabajo D , lo que se conoce como MPPT. Estos algoritmos buscan controlar la tensión y la corriente de los paneles mediante la modificación del ciclo de trabajo ante cambios de irradiancia, temperatura o condiciones de carga [6], [17].

Existen varios algoritmos MPPT, en este documento se analizarán tres de ellos, que son el algoritmo de tensión constante, perturbación y observación (PyO) y conductancia incremental (CI). Las variables a utilizar en estos algoritmos se definen en la Tabla 7.

Tabla 7. Definición de las variables empleadas en los algoritmos de MPPT

Variable	Definición
k	Instante de tiempo
C	Constante del algoritmo
V_o	Tensión de salida del convertidor
$V_s(k)$	Tensión instantánea de los paneles
$V_s(k-1)$	Tensión en los paneles en el instante $k-1$
$I_s(k)$	Corriente instantánea entregada por los paneles
$I_s(k-1)$	Corriente entregada por los paneles en el instante $k-1$
$P(k)$	Potencia instantánea entregada por los paneles
$P(k-1)$	Potencia entregada por los paneles en el instante $k-1$
ΔV	Variación en la tensión entre los instantes k y $k-1$
ΔP	Variación en la potencia entre los instantes k y $k-1$
$D(k)$	Ciclo de trabajo en el instante k
$D(k+1)$	Ciclo de trabajo en el instante $k+1$
$V_r(k)$	Tensión de referencia en los paneles en el instante k
$V_r(k+1)$	Tensión de referencia en los paneles en el instante $k+1$

3.3.1. Algoritmo de tensión constante. El algoritmo de tensión constante es un algoritmo sencillo que se fundamenta en el hecho de que la tensión en el punto de máxima eficiencia (MPP) y la tensión de circuito abierto tienen una relación aproximadamente constante, es decir que no se producen cambios grandes en la tensión del punto de potencia máxima para diferentes condiciones de irradiancia [18].

En este algoritmo, el ciclo de trabajo de los convertidores permanece constante, y se calcula para la condición de irradiancia de diseño, de acuerdo al valor de tensión en el MPP y la tensión requerida a la salida.

Los valores de cálculo en este algoritmo se toman de las curvas características del panel a la irradiancia de diseño, ubicando en la curva el valor de tensión de entrada para el que se presenta la eficiencia máxima. El cálculo del ciclo de trabajo D depende de la topología de convertidor a utilizar.

Las principales desventajas de este algoritmo se presentan ante incrementos en la temperatura de los paneles fotovoltaicos, pues los aumentos de temperatura por encima de la temperatura de diseño en el panel afectan negativamente la eficiencia de éste y se intensifica la necesidad de utilizar algoritmos de control realimentados para el seguimiento de la potencia máxima.

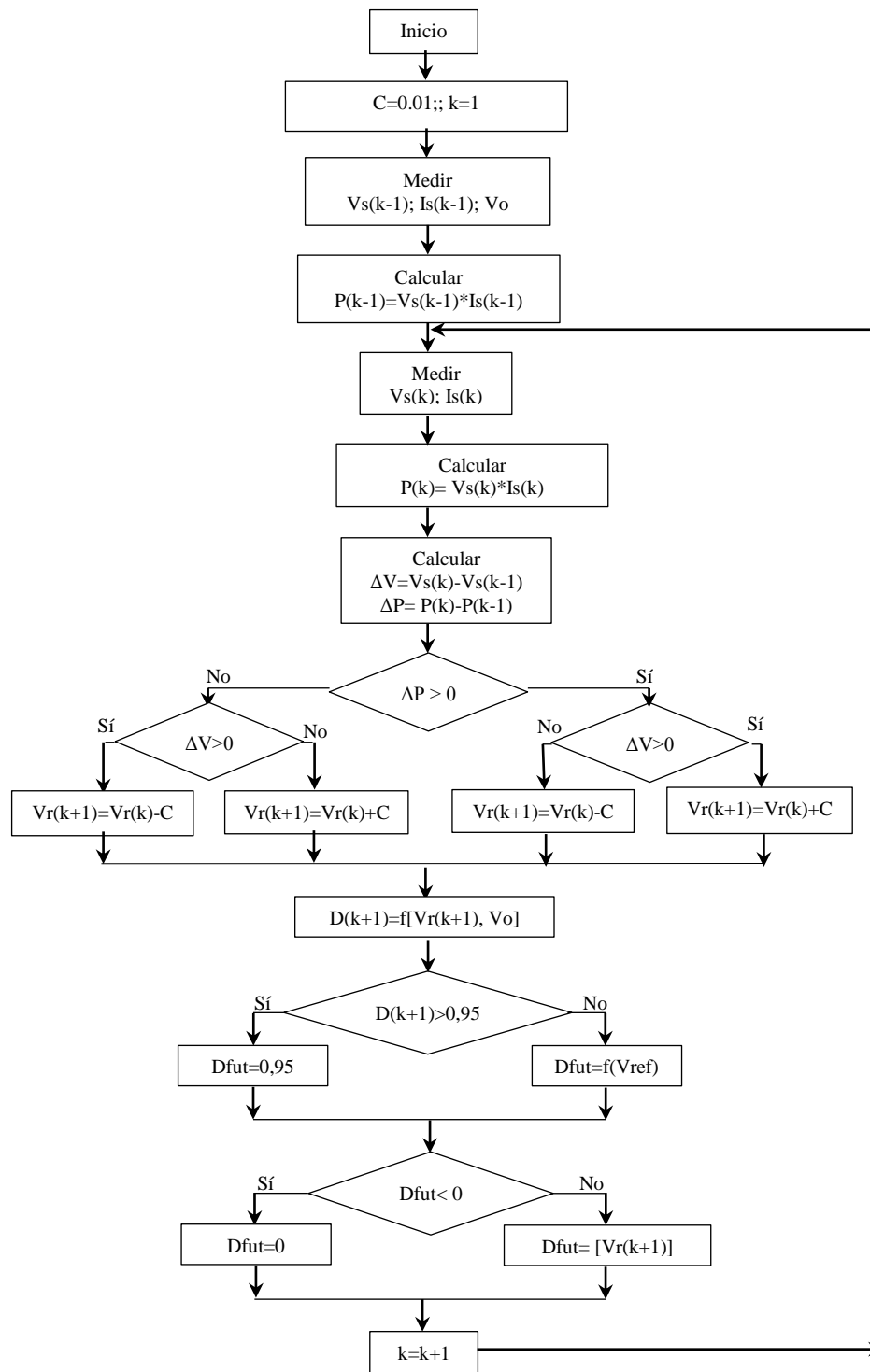
3.3.2. Algoritmo de perturbación y observación. El algoritmo PyO es uno de los más usados en la práctica debido a su fácil implementación. Su funcionamiento es sencillo, se basa en realizar periódicamente una perturbación (aumentando o disminuyendo) la tensión del panel solar lo que modifica el ciclo de trabajo del convertidor. Luego se calcula la potencia entregada en los terminales del panel y se compara con la potencia anterior. Se tiene entonces

$$\Delta P = P_{inst} - P_{ant} \quad (6)$$

Siendo P_{inst} la potencia calculada tras la perturbación y P_{ant} la potencia medida antes de la misma [6].

Como se puede apreciar en la Figura 12, si $\Delta P > 0$ el punto de operación se encuentra a la izquierda del MPP, como es el caso del punto A, por lo que la siguiente perturbación será un incremento en la tensión para que el punto se desplace hacia la izquierda y logre alcanzarlo [19], [8].

Figura 11. Diagrama de flujo del algoritmo PyO



3.3.3. Algoritmo de conductancia incremental. Este algoritmo se basa en que el punto máximo de la función de la curva P-V se da cuando la derivada de la potencia respecto a la tensión es igual a cero [8].

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (7)$$

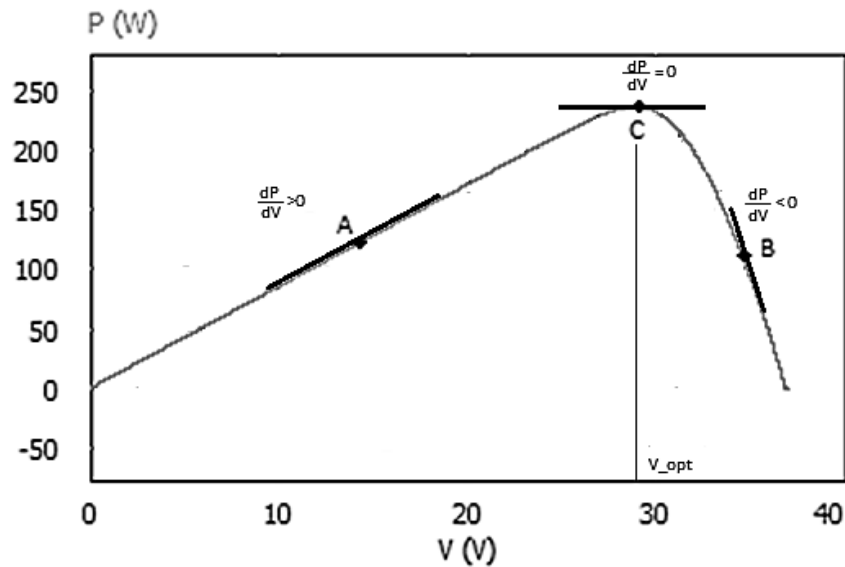
Al reemplazar P por IV se tiene entonces

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + \frac{dI}{dV} \approx I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad (9)$$

Entonces el MPP se rastrea mediante la comparación entre la conductancia instantánea (I/V) y la conductancia incremental ($\Delta I/\Delta V$) [18].

Figura 12. Principio de funcionamiento del algoritmo CI Modificado de [6]



En el punto de MPP la variación de la potencia con respecto a la tensión es igual a cero

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad \text{en el MPP} \quad (10)$$

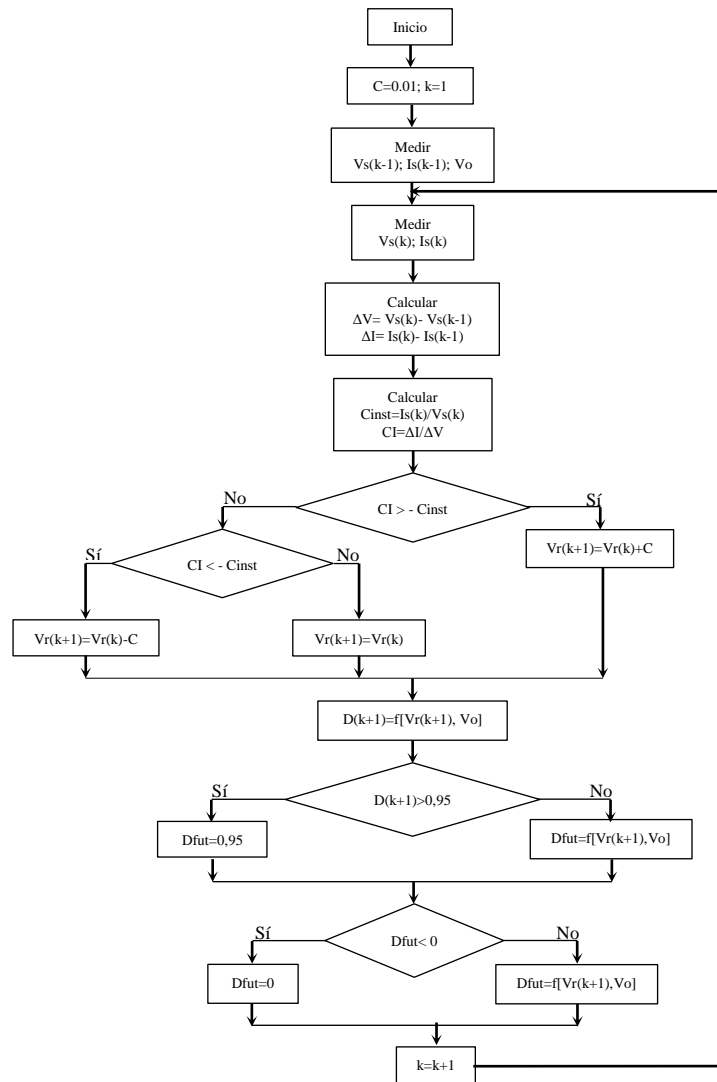
En el caso de que la conductancia incremental y la conductancia instantánea no coincidan, indica que el punto de operación se ha desplazado del MPP.

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad (11) \quad \text{a la izquierda del MPP}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad (12) \quad \text{a la derecha del MPP}$$

En la Figura 13 se observa el diagrama de flujo del algoritmo CI.

Figura 13. Diagrama de flujo del algoritmo CI



3.4. PERTURBACIÓN EN LA IRRADIANCIA

Para evaluar el rendimiento de los convertidores ante perturbaciones en las condiciones de irradiancia se observó el comportamiento de los convertidores al aplicar un cambio en la irradiancia como el descrito a continuación:

- Al comenzar la simulación se consideran condiciones nulas en el sistema y realiza un cambio brusco de irradiancia a 1000 W/m^2 .
- A los 0,5 segundos (tiempo en el que la potencia del sistema se ha estabilizado), se presenta una perturbación que consiste en la reducción de la irradiancia a la mitad (500 W/m^2).

Esta perturbación en la irradiancia se generó utilizando un bloque sencillo en C como se muestra a continuación que responde como se presenta en la Figura 14, generando una señal de la irradiancia como la que se observa en la Figura 15.

Figura 14. Circuito de perturbación en la irradiancia

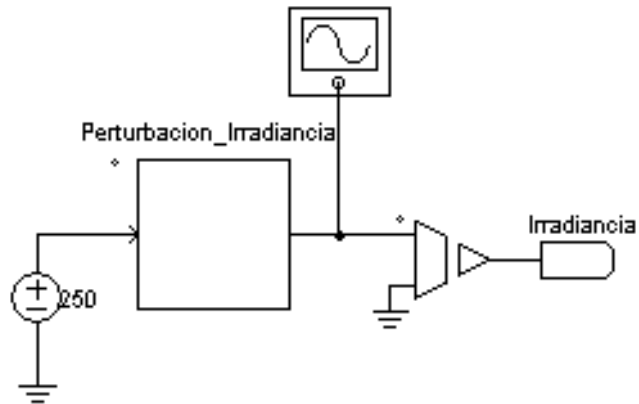
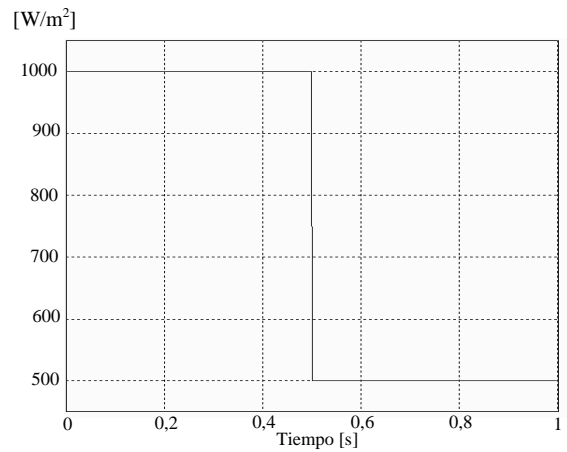


Figura 15. Comportamiento de la irradiancia durante las simulaciones



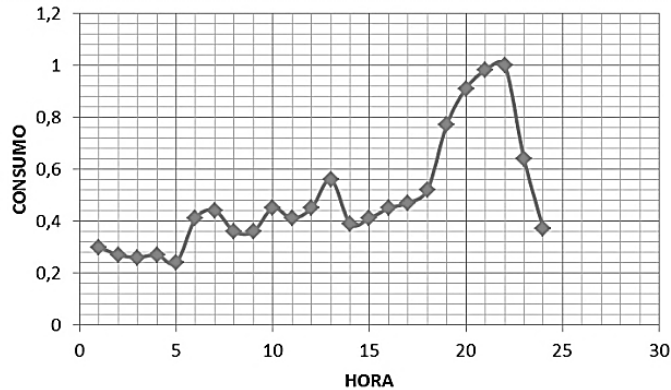
3.5. PERTURBACIÓN EN LA CARGA

Los consumos de potencia eléctrica no son constantes, sino que cambian en el tiempo de acuerdo a una diversidad de factores (entre los que se encuentran la naturaleza de las cargas, el estrato socioeconómico, etc.).

Los datos de los consumos en el país son registrados por XM y se utilizan entre otras cosas, para administrar el mercado de energía eléctrica nacional. Un ejemplo de las variaciones en la demanda nacional se presenta en la Figura 16.

Las variaciones en el consumo de energía, se ven representadas como cambios en los valores de tensión, corriente y potencias a través del sistema. Dichos cambios se estudian desde la perspectiva de los flujos de potencia, pero para las centrales generadoras uno de los parámetros más importantes que modifican el valor de potencia a entregar al sistema es la tensión de salida con la que se conectan a la red [20].

Figura 16. Curva de carga para el estrato 3 en Colombia. , Datos tomados de [21]



En este informe se estudia un sistema de generación fotovoltaico con las características de que es centralizado y está conectado a la red, por lo tanto, es posible representar las variaciones del sistema como variaciones en la tensión de salida de los convertidores.

Desde la perspectiva de la generación de energía mediante sistemas alternativos (en especial los renovables), lo esperado es que se pueda aprovechar al máximo su capacidad de generación. Basados en esta idea, lo esperado para los convertidores estudiados, es que obtengan siempre la potencia máxima que puedan suministrar los paneles solares independientemente de la condición de carga impuesta por la tensión de salida.

3.6. PERTURBACIÓN EN LA TEMPERATURA

Los paneles solares estándar se calientan bajo la incidencia de la luz solar. El incremento en la temperatura de los paneles tiene consecuencias adversas tanto en la eficiencia de estos como en su confiabilidad y vida útil [22].

En algunos estudios teóricos, como los realizados por Shockley y Queisser [23], se determina un límite teórico máximo para la eficiencia en la transformación de energía eléctrica en un panel que corresponde a una eficiencia del 33.7%; esto implica que una parte de la energía recibida por los paneles se transforma en calor en las células solares. En la práctica, las condiciones de temperatura de operación para un panel expuesto en condiciones ambientales normales se encuentran entre 50 – 55 [°C], o mayores [24], [25]. Este calentamiento presenta consecuencias negativas en las capacidades de conversión de un panel.

La eficiencia en la conversión de los paneles solares por lo general se deteriora a temperaturas elevadas. Los paneles cristalinos de silicón presentan una relación típica según la cual un incremento en 1 [K] acarrea un decremento en la eficiencia de aproximadamente 0.45 % [26]. Esta situación representa un desafío para la utilización de los sistemas fotovoltaicos. En este proyecto se estudian los cambios en la potencia obtenida para un panel bajo una perturbación en la temperatura (cambio de 25°C a 55°C) y la importancia que puede tener un convertidor DC-DC con un sistema de control de máxima potencia realimentado como parte del sistema de generación, respecto al comportamiento de la potencia de potencia de los paneles sin un algoritmo de seguimiento del MPP.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los convertidores estudiados fueron simulados en PSIM, el disparo del IGBT se realizó siguiendo diferentes técnicas de control para el seguimiento del punto de máxima potencia. Se realizaron dos tipos de análisis: uno, la respuesta a los cambios de irradiancia, y otro, la respuesta a los cambios de tensión del lado de la carga.

Los valores de eficiencia en esta sección se calculan como la potencia en estado estacionario sobre la potencia máxima del generador fotovoltaico para las condiciones que se requiera.

$$\eta = \frac{P_{inst}}{P_{max}} \quad (13)$$

Esto para medir su capacidad de extraer la máxima potencia de los paneles fotovoltaicos.

4.1. PERTURBACIÓN EN LA IRRADIANCIA

En estas simulaciones se incluyó un cambio en la irradiancia para evaluar la respuesta de los algoritmos en el seguimiento de un punto de máxima potencia diferente. La perturbación en la irradiancia siguió el mismo patrón para todos los convertidores:

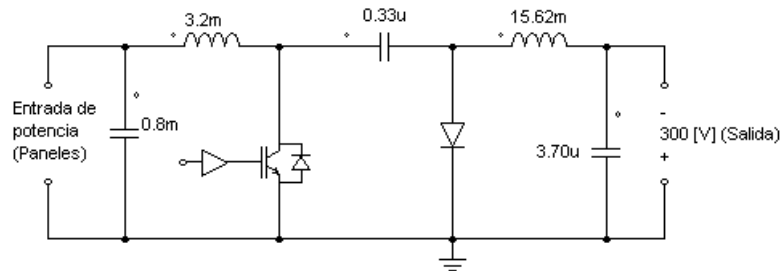
$$\begin{aligned} \text{Valor de irradiancia inicial} &= 1000 \text{ [W/m}^2\text{]} \\ \text{Valor de irradiancia final} &= 500 \text{ [W/m}^2\text{]} \\ \text{Tiempo de cambio de irradiancia} &= 0,5 \text{ segundos} \end{aligned}$$

Para modelar los circuitos que se encuentran después del convertidor DC-DC se utiliza una fuente de tensión constante $V_{outDC}=300 \text{ V}$.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada convertidor con los diferentes algoritmos MPPT.

4.1.1. Convertidor Ćuk. La Figura 17 corresponde al circuito diseñado del convertidor Ćuk para la simulación de acuerdo a las ecuaciones descritas previamente en la Tabla 4.

Figura 17. Convertidor Ćuk con los parámetros calculados



A continuación se presentan las gráficas de potencia instantánea extraída del panel con el convertidor DC-DC y cada uno de los algoritmos.

4.1.1.1. Convertidor Ćuk, método de tensión constante $D=0,8342$. En las Figuras 18 y 19 se observan las gráficas de la potencia extraída de los paneles y la tensión de entrada con el convertidor Ćuk aplicando el algoritmo de tensión constante.

Figura 18. Gráfica de potencia aplicando perturbación en la irradiancia, algoritmo de tensión constante, convertidor Ćuk

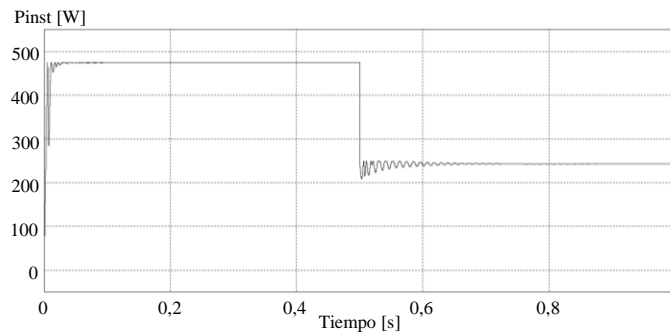
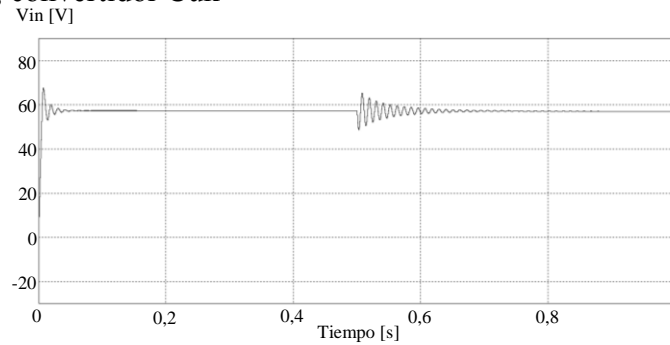


Figura 19. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo de tensión constante, convertidor Ćuk



En la Tabla 8 se observan los valores de potencia extraída y tensión en los paneles en estado estable para cada valor de irradiancia con el convertidor Ćuk con algoritmo de tensión constante.

Tabla 8. Resultados del convertidor Ćuk, perturbación en la irradiancia, algoritmo de tensión constante con $D=0,8342$

IRRADIANCIA	POTENCIA ESTABLE [W]	TENSIÓN PANEL [V]
1000 W/m ²	474,035	57,1205
500 W/m ²	245,762	58,0652

4.1.1.2. Convertidor \dot{C} uk con sistema de control para MPPT, algoritmo de perturbación y observación. Las Figuras 20 y 21 pertenecen a las respuestas de potencia instantánea y la tensión de los paneles solares con el convertidor \dot{C} uk y algoritmo de PyO.

Figura 20. Gráfica de potencia con perturbación en la irradiancia, algoritmo PyO, convertidor \dot{C} uk

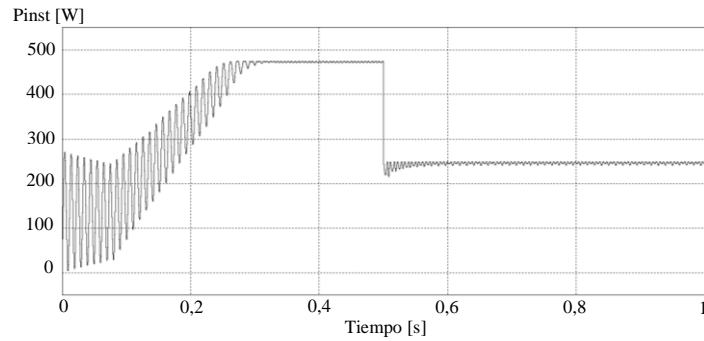
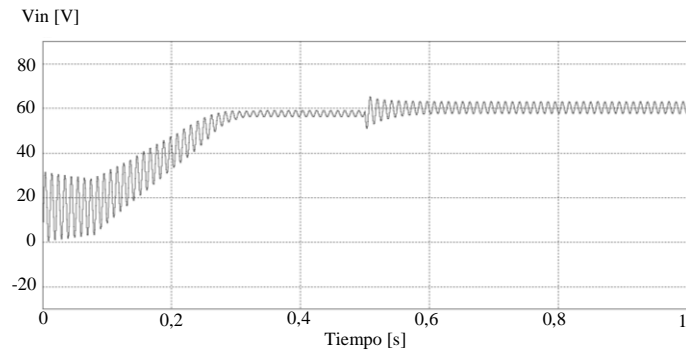


Figura 21. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo PyO, convertidor \dot{C} uk



En la Tabla 9 se observan los valores de potencia extraída y tensión en los paneles en estado estable para cada valor de irradiancia con el convertidor \dot{C} uk y algoritmo PyO.

Tabla 9. Resultados del convertidor \acute{C} uk con perturbación en la irradiancia, algoritmo de perturbación y observación

IRRADIANCIA	POTENCIA ESTABLE [W]	TENSIÓN PANEL [V]
1000 W/m ²	474,169	58,8161
500 W/m ²	249,105	61,2939

4.1.1.3. Convertidor \acute{C} uk con sistema de control para MPPT, algoritmo de conductancia incremental. Las Figuras 22 y 23 pertenecen a las respuestas de potencia instantánea y la tensión de los paneles solares con el convertidor \acute{C} uk y algoritmo de CI.

Figura 22. Gráfica de potencia aplicando MPPT con algoritmo CI, convertidor \acute{C} uk

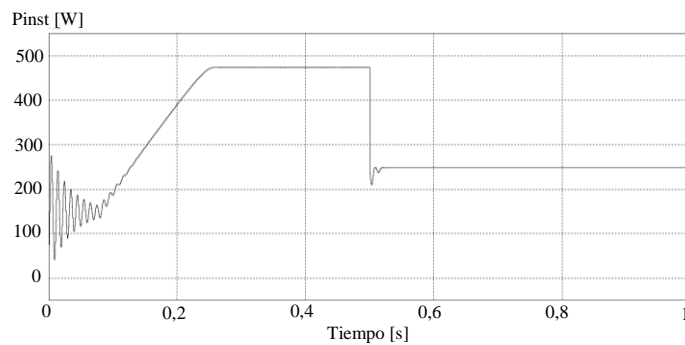
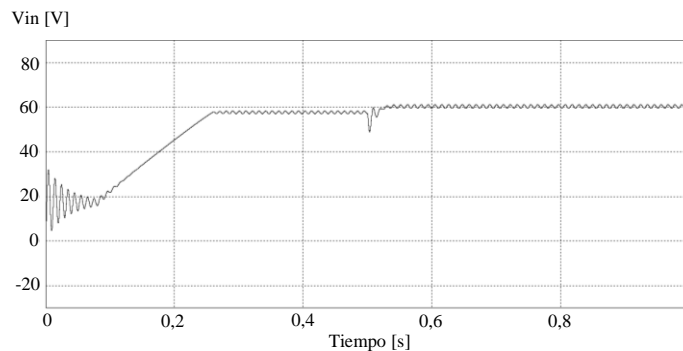


Figura 23. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo CI, convertidor \acute{C} uk



En la Tabla 10 se observan los valores de potencia extraída y tensión en los paneles en estado estable para cada valor de irradiancia con el convertidor \acute{C} uk y algoritmo CI.

Tabla 10. Resultados del convertidor Ćuk con perturbación en la irradiancia, algoritmo de conductancia incremental

IRRADIANCIA	POTENCIA ESTABLE [W]	TENSIÓN PANEL [V]
1000 W/m ²	474,489	57,4268
500 W/m ²	249,022	59,5515

4.1.1.4. Comparación de resultados del convertidor Ćuk para los diferentes algoritmos. En la Tabla 11 se resumen los resultados de las simulaciones del convertidor Ćuk bajo los diferentes algoritmos trabajados, frente a una perturbación en la irradiancia.

Tabla 11. Resumen de los resultados para el convertidor Ćuk bajo los algoritmos trabajados frente a una perturbación en la irradiancia

IRRADIANCIA		1000 [W/m ²]	500 [W/m ²]
POTENCIA MÁXIMA TEÓRICA [W]		474,668	249,654
TENSIÓN CONSTANTE	POTENCIA OBTENIDA [W]	474,035	245,762
	EFICIENCIA [%]	99,87%	98,44%
PERTURBACIÓN Y OBSERVACIÓN	POTENCIA OBTENIDA [W]	474,169	249,105
	EFICIENCIA [%]	99,89%	99,78%
CONDUCTANCIA INCREMENTAL	POTENCIA OBTENIDA [W]	474,489	249,022
	EFICIENCIA [%]	99,96%	99,75%

Se compararon los tiempos aproximados que tarda en alcanzar el 98% del valor en estado estable con cada algoritmo, al inicio de la operación y el tiempo de respuesta a los cambios de irradiancia. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Tiempo aproximado en llegar al punto de máxima potencia de los diferentes algoritmos

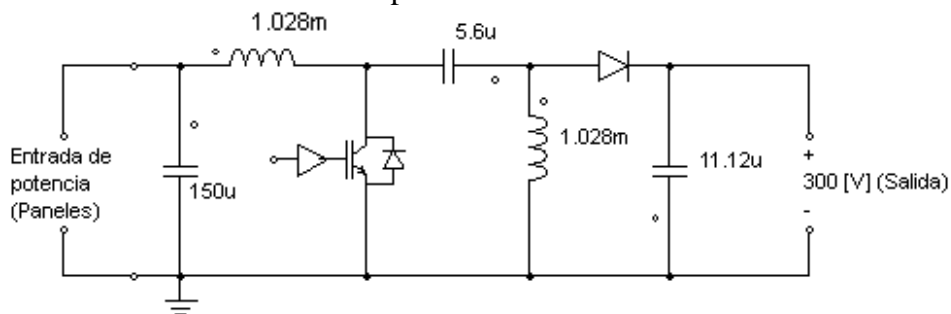
	Tensión constante	PyO	CI
De 0 a 1000 W/m ²	0,03 [s]	0,3 [s]	0,25 [s]
De 1000 a 500 W/m ²	0,1 [s]	0,07 [s]	0,02 [s]

4.1.1.5. Observaciones del convertidor Ćuk

- Bajo el algoritmo de tensión constante, la eficiencia del convertidor no se ve muy afectada por los cambios en la irradiancia y continua operando con una eficiencia de más del 98%.
- Para irradiancia de 1000 W/m², se observa que la eficiencia es mayor operando con el algoritmo de conductancia incremental, sin embargo con una irradiancia de 500 W/m² se observa que el algoritmo de perturbación y observación logra la mayor eficiencia del panel que en los otros algoritmos implementados.
- A tensión constante, a pesar de que la respuesta inicial es buena, tarda significativamente más tiempo en estabilizarse que los otros convertidores estudiados con los cambios de irradiancia como se verá más adelante.

4.1.2. Convertidor SEPIC. La Figura 24 corresponde al circuito diseñado del convertidor SEPIC usado en las simulaciones.

Figura 24. Convertidor SEPIC con los parámetros calculados



A continuación se presentan las gráficas de potencia instantánea extraída del panel con el convertidor DC-DC y cada uno de los algoritmos.

4.1.2.1. Convertidor SEPIC, método de tensión constante $D=0,8345$. En las Figuras 25 y 26 se observan las gráficas de la potencia extraída de los paneles y la tensión de entrada con el convertidor SEPIC aplicando el algoritmo de tensión constante.

Figura 25. Gráfica de potencia con algoritmo de tensión constante, convertidor SEPIC

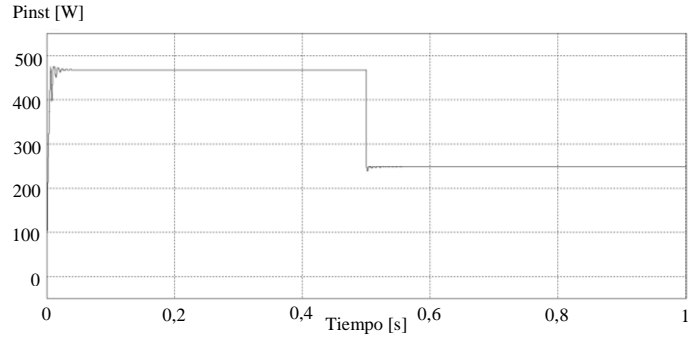
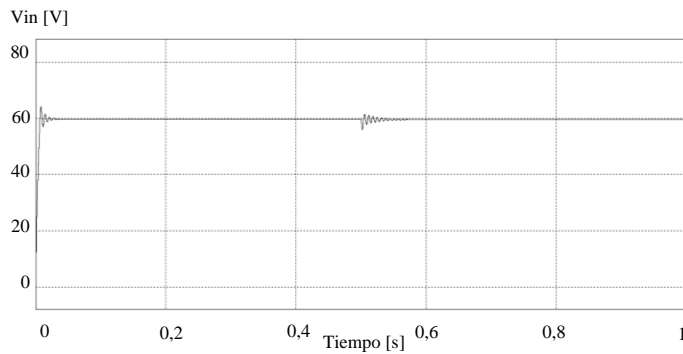


Figura 26. Gráfica de tensión de entrada con algoritmo de tensión constante, convertidor SEPIC



En la Tabla 13 se observan los valores de potencia extraída y tensión en los paneles en estado estable para cada valor de irradiancia con el convertidor SEPIC con algoritmo de tensión constante.

Tabla 13. Resultados del convertidor SEPIC, perturbación en la irradiancia, algoritmo de tensión constante con $D=0,8345$

IRRADIANCIA	POTENCIA ESTABLE [W]	TENSIÓN PANEL [V]
1000 [W/m ²]	468.246	59.748
500 [W/m ²]	249.063	59.580

4.1.2.2. Convertidor SEPIC con sistema de control para MPPT, algoritmo de perturbación y observación. Las Figuras 27 y 28 pertenecen a las respuestas de potencia instantánea y la tensión de los paneles solares con el convertidor SEPIC y algoritmo de PyO.

Figura 27. Gráfica de potencia con perturbación en la irradiancia, algoritmo PyO, convertidor SEPIC

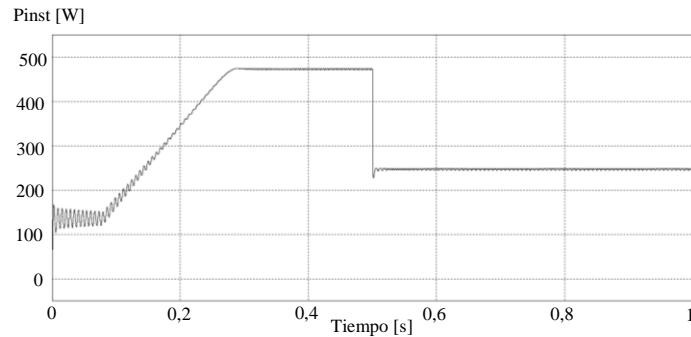
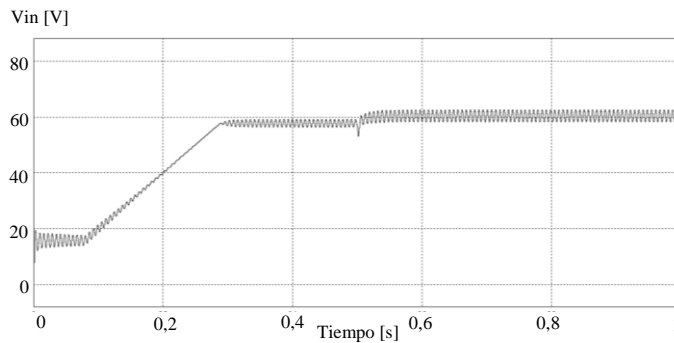


Figura 28. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo PyO, convertidor SEPIC



En la Tabla 14 se observan los valores de potencia extraída y tensión en los paneles en estado estable para cada valor de irradiancia con el convertidor SEPIC y algoritmo PyO.

Tabla 14. Resultados del convertidor SEPIC, perturbación en la irradiancia, algoritmo PyO

IRRADIANCIA	POTENCIA ESTABLE [W]	TENSIÓN PANEL [V]
1000 [W/m ²]	473.207	57.774
500 [W/m ²]	247.266	60.437

4.1.2.3. Convertidor SEPIC con sistema de control para MPPT, algoritmo de conductancia incremental. Las Figuras 29 y 30 pertenecen a las respuestas de potencia instantánea y la tensión de los paneles solares con el convertidor SEPIC y algoritmo de CI.

Figura 29. Gráfica de potencia con perturbación en la irradiancia, algoritmo CI, convertidor SEPIC

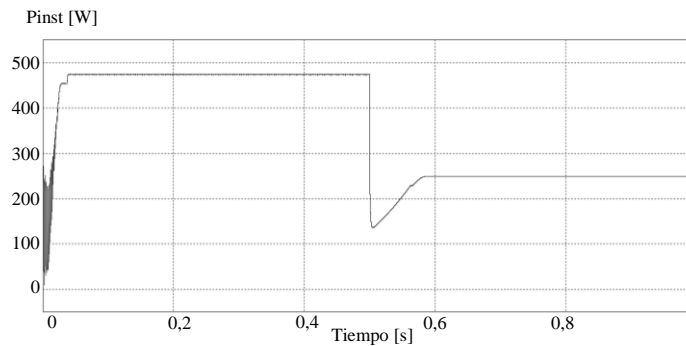
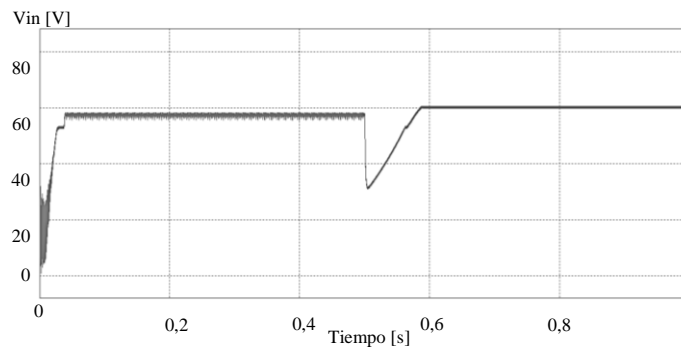


Figura 30. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo CI, convertidor SEPIC



En la Tabla 15 se observan los valores de potencia extraída y tensión en los paneles en estado estable para cada valor de irradiancia con el convertidor SEPIC y algoritmo CI.

Tabla 15. Resultados del convertidor SEPIC, perturbación en la irradiancia, algoritmo CI

IRRADIANCIA	POTENCIA ESTABLE [W]	TENSIÓN PANEL [V]
1000 [W/m ²]	474.666	57.748
500 [W/m ²]	249.654	60.217

4.1.2.4. Comparación de resultados del convertidor SEPIC para los diferentes algoritmos. En la tabla 16 se resumen los resultados de las simulaciones del convertidor SEPIC bajo los diferentes algoritmos trabajados, frente a una perturbación en la irradiancia.

Tabla 16. Resumen de los resultados para el convertidor SEPIC bajo los algoritmos trabajados frente a una perturbación en la irradiancia

IRRADIANCIA		1000 [W/m ²]	500 [W/m ²]
POTENCIA MÁXIMA TEÓRICA [W]		474,668	249,654
TENSIÓN CONSTANTE	POTENCIA OBTENIDA [W]	468,246	249,063
	EFICIENCIA [%]	98,65%	99,76%
PERTURBACIÓN Y OBSERVACIÓN	POTENCIA OBTENIDA [W]	473,207	247,266
	EFICIENCIA [%]	99,69%	99,04%
CONDUCTANCIA INCREMENTAL	POTENCIA OBTENIDA [W]	462,925	246,237
	EFICIENCIA [%]	97,53%	98,63%

Se compararon los tiempos aproximados que tarda en alcanzar el 98% del valor en estado estable con cada algoritmo, al inicio de la operación y el tiempo de respuesta a los cambios de irradiancia. Los resultados se presentan en la Tabla 17.

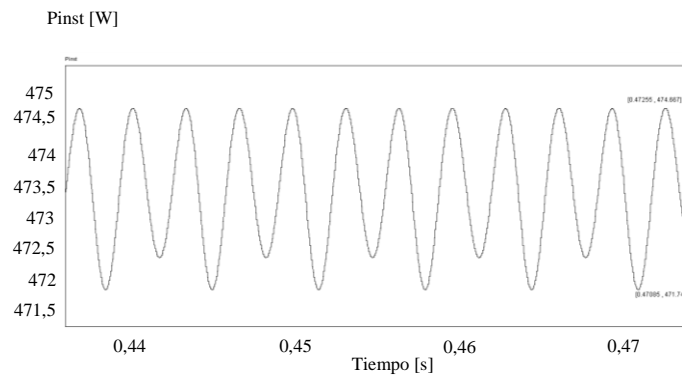
Tabla 17. Tiempo aproximado en llegar al punto de máxima potencia de los diferentes algoritmos [s]

	Tensión constante	PyO	CI
De 0 a 1000 W/m ²	0,016	0,28	0,027
De 1000 a 500 W/m ²	0,011	0,62	0,062

4.1.2.5. Observaciones del convertidor SEPIC

- Este convertidor presenta una potencia de salida con un rizo como el que se muestra en la Figura 31. Debido a esto, los valores de potencia presentados en los resultados corresponden al valor medio de la señal.

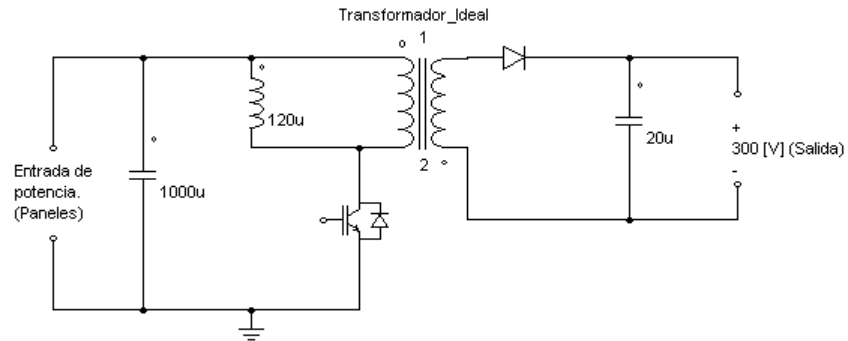
Figura 31. Ejemplo de rizado de la señal de potencia, convertidor SEPIC con algoritmo PyO



- Los valores de eficiencia del convertidor SEPIC son mayores en algunas situaciones al utilizar el convertidor con el algoritmo de tensión constante. Esto se debe a que el rizado en la señal de potencia obtenido con MPPT obliga a comparar un valor promedio con un valor sin rizo (sin MPPT) y en todos los casos estudiados las eficiencias son valores cercanos.

4.1.3. Convertidor Flyback. La Figura 32 corresponde al circuito diseñado para la simulación de acuerdo a las ecuaciones descritas en la tabla 6.

Figura 32. Convertidor Flyback con los parámetros calculados



A continuación se presentan las gráficas de potencia instantánea extraída del panel con el convertidor DC-DC y cada uno de los algoritmos.

4.1.3.1. Convertidor Flyback, método de tensión constante $D=0.714$. En las Figuras 33 y 34 se observan las gráficas de la potencia extraída de los paneles y la tensión de entrada con el convertidor Flyback implementando el algoritmo de tensión constante.

Figura 33. Gráfica de potencia con perturbación en la irradiancia, algoritmo tensión constante, convertidor Flyback

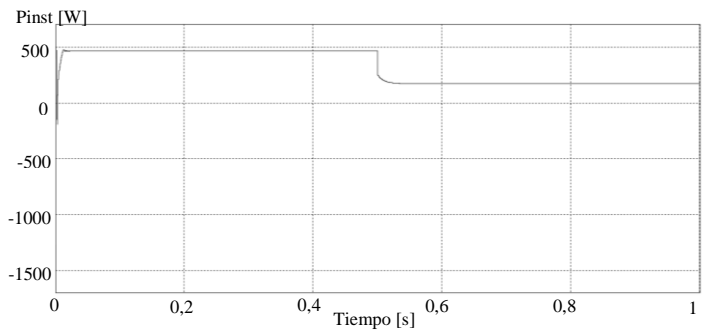
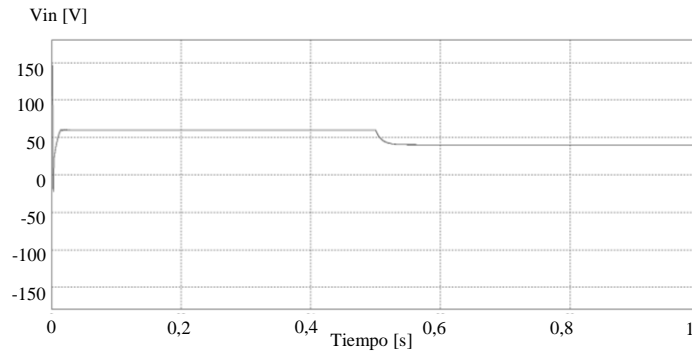


Figura 34. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo de tensión constante, convertidor Flyback



En la Tabla 18 se observan los valores de potencia extraída y tensión en los paneles en estado estable para cada valor de irradiancia con el convertidor Flyback con algoritmo de tensión constante.

Tabla 18. Resultados del convertidor Flyback, perturbación en la irradiancia, algoritmo de TC: $D=0,714$

IRRADIANCIA	POTENCIA ESTABLE [W]	TENSIÓN PANEL [V]
1000 [W/m ²]	465,499	60,0048
500 [W/m ²]	173,359	40,3488

4.1.3.2. Convertidor Flyback con sistema de control para MPPT, algoritmo de perturbación y observación. Las Figuras 35 y 36 pertenecen a las respuestas de potencia instantánea y la tensión de los paneles solares con el convertidor Flyback y algoritmo de PyO.

Figura 35. Gráfica de potencia con perturbación en la irradiancia, algoritmo PyO, convertidor Flyback

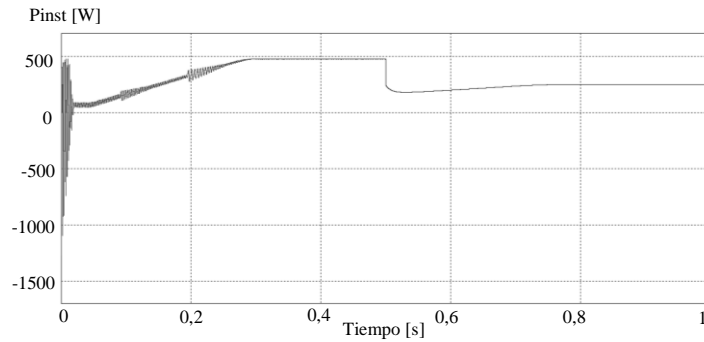
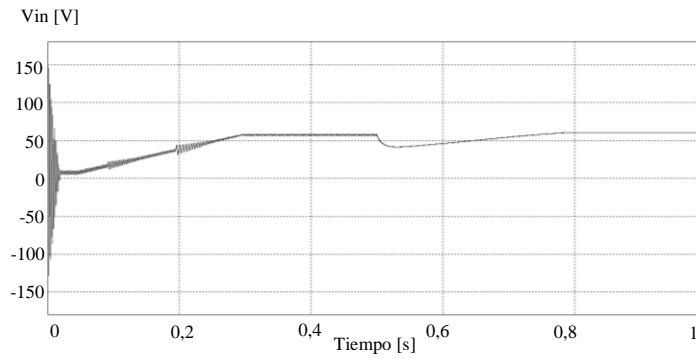


Figura 36. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo PyO, convertidor Flyback



En la Tabla 19 se observan los valores de potencia extraída y tensión en los paneles en estado estable para cada valor de irradiancia con el convertidor Flyback y algoritmo PyO.

Tabla 19. Potencia entregada por los paneles con perturbación en la irradiancia, convertidor Flyback, algoritmo de PyO

IRRADIANCIA	POTENCIA ESTABLE [W]	TENSIÓN PANEL [V]
1000 [W/m ²]	474.668	58.163
500 [W/m ²]	249.655	60.371

4.1.3.3. Convertidor Flyback con sistema de control para MPPT, algoritmo de conductancia incremental. Las Figuras 37 y 38 pertenecen a las respuestas de potencia instantánea y la tensión de los paneles solares con el convertidor Flyback y algoritmo de CI.

Figura 37. Gráfica de potencia con perturbación en la irradiancia, algoritmo CI, convertidor Flyback

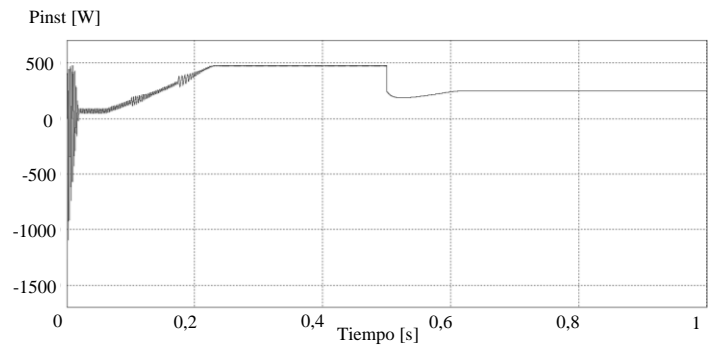
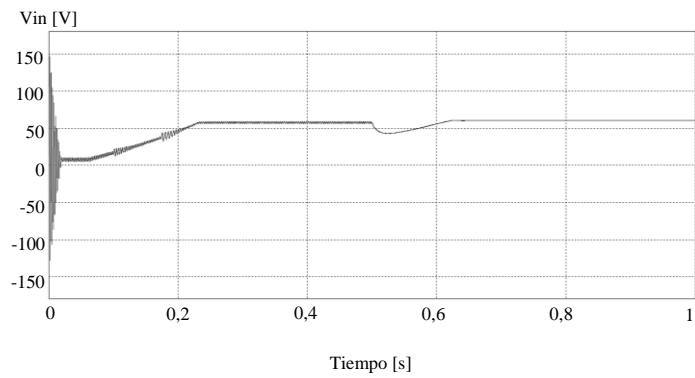


Figura 38. Gráfica de tensión de entrada con perturbación en la irradiancia, algoritmo CI, convertidor Flyback



En la Tabla 20 se observan los valores de potencia extraída y tensión en los paneles en estado estable para cada valor de irradiancia con el convertidor SEPIC y algoritmo CI.

Tabla 20. Potencia entregada por los paneles con perturbación en la irradiancia, convertidor Flyback, algoritmo de CI

IRRADIANCIA	POTENCIA ESTABLE [W]	TENSIÓN PANEL [V]
1000 [W/m ²]	474.668	57.7832
500 [W/m ²]	249.655	60.3806

4.1.3.4. Comparación de resultados del convertidor Flyback para los diferentes algoritmos. En la tabla 21 se resumen los resultados de las simulaciones del convertidor Flyback bajo los diferentes algoritmos trabajados, frente a una perturbación en la irradiancia.

Tabla 21. Resumen de los resultados para el convertidor Flyback bajo los algoritmos trabajados frente a una perturbación en la irradiancia

IRRADIANCIA		1000 [W/m ²]	500 [W/m ²]
POTENCIA MÁXIMA TEÓRICA [W]		474,668	249,654
TENSIÓN CONSTANTE	POTENCIA OBTENIDA [W]	465,499	173,359
	EFICIENCIA [%]	98,07%	69,44%
PERTURBACIÓN Y OBSERVACIÓN	POTENCIA OBTENIDA [W]	474,668	249,655
	EFICIENCIA [%]	100%	100%
CONDUCTANCIA INCREMENTAL	POTENCIA OBTENIDA [W]	474,668	249,654
	EFICIENCIA [%]	100%	100%

Se compararon los tiempos aproximados que tarda en alcanzar el 98% del valor en estado estable con cada algoritmo, al inicio de la operación y el tiempo de respuesta a los cambios de irradiancia. Los resultados se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Tiempo aproximado en llegar al punto de máxima potencia de los diferentes algoritmos [s]

CAMBIOS EN LA IRRADIANCIA	Tensión constante	PyO	CI
De 0 a 1000 [W/m ²]	0,02	0,3	0,05
De 1000 a 500 [W/m ²]	0,1	0,3	0,01

4.1.3.5. Observaciones del convertidor Flyback

- Al comparar los resultados del convertidor Flyback al aplicar los diferentes algoritmos de control en ellos, es posible observar que cuando se aplica el de tensión constante se reduce la potencia obtenida del panel fotovoltaico para las diferentes condiciones de irradiancia.
- En la situación en que la irradiancia es de 1000 [W/m²] se presentan las menores pérdidas de potencia (utilizando el algoritmo a tensión constante), pues en el diseño del convertidor se determinó esta situación como la irradiancia de diseño.
- Se observa que la potencia entregada por el panel es igual al llegar al estado estable al utilizar el algoritmo de perturbación y observación que al utilizar el algoritmo de conductancia incremental.

4.2. PERTURBACIÓN EN LA TEMPERATURA

Esta situación representa un desafío para la utilización de los sistemas fotovoltaicos. En este proyecto se estudian los cambios en la potencia obtenida para un panel bajo una perturbación en la temperatura (cambio de 25°C a 55°C) y la importancia que puede tener un convertidor DC-DC con un sistema de control de máxima potencia realimentado como parte del sistema de generación, respecto al comportamiento de la potencia de potencia de los paneles sin un algoritmo de seguimiento del MPP.

Las figuras utilizadas para las comparaciones corresponden a las figuras 39, 40 y 41 para el convertidor Ćuk, las figuras 42, 43 y 44 para el convertidor SEPIC y las figuras 45, 46 y 47 para el convertidor Flyback.

4.2.1. Convertidor Ćuk

Figura 39: Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor Ćuk, Algoritmo TC.

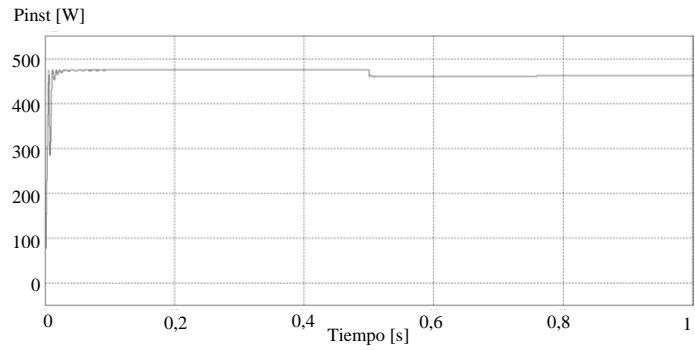


Figura 40: Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor Ćuk, Algoritmo PyO.

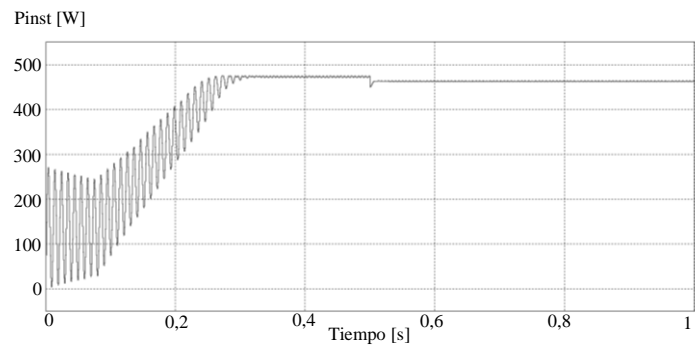
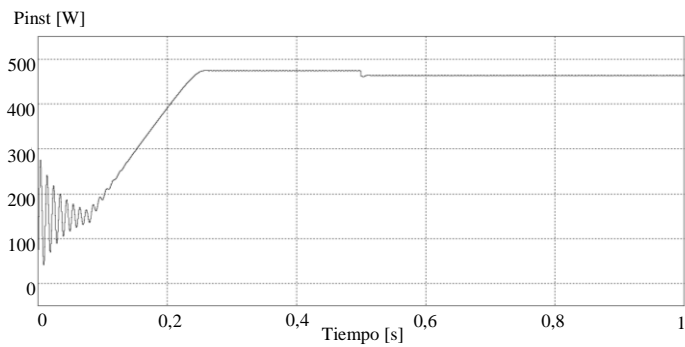


Figura 41: Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor Ćuk, Algoritmo CI.



A continuación en la tabla 23 se presentan los resultados de potencia promedio para el convertidor Ćuk obtenidos al utilizar los algoritmos de control

Tabla 23. Potencia en el convertidor Ćuk ante una perturbación en la temperatura

ALGORITMO	Potencia T=25°C [W]	Potencia T=55°C [W]	DECREMENTO $1-(P_{55°C}/P_{25°C})$
Tensión constante	474,44	461,94	2,63%
Perturbación y observación	473,14	462,80	2,19%
Conductancia incremental	474,38	463,63	2,27%

4.2.2. Convertidor SEPIC

Figura 42: Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor SEPIC, Algoritmo TC.

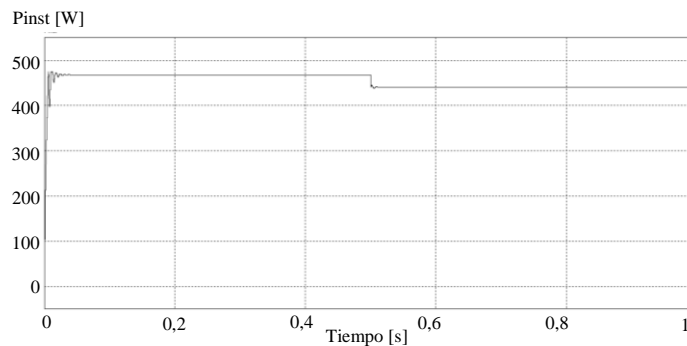


Figura 43: Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor SEPIC, Algoritmo PyO

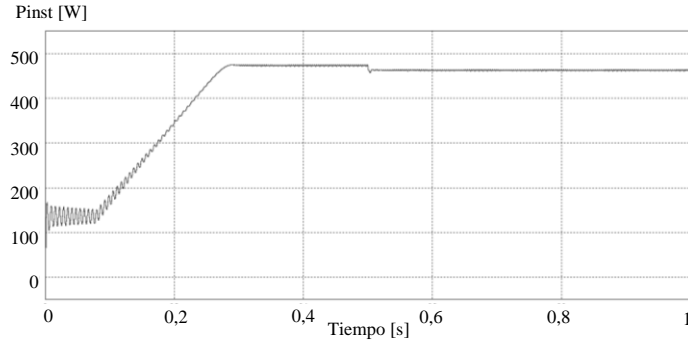
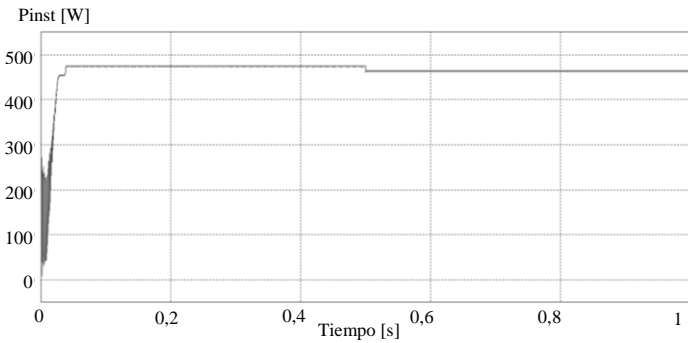


Figura 44; Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor SEPIC, Algoritmo CI.



A continuación en la tabla 24 se presentan los resultados de potencia promedio para el convertidor SEPIC obtenidos al utilizar los algoritmos de control

Tabla 24. Potencia en el convertidor SEPIC ante una perturbación en la temperatura

ALGORITMO	Potencia T=25°C [W]	Potencia T=55°C [W]	DECREMENTO $1-(P_{55°C}/P_{25°C})$
Tensión constante	468,24	440,85	5,85%
Perturbación y observación	473,33	462,73	2,24%
Conductancia incremental	474,47	463,53	2,31%

4.2.3. Convertidor Flyback

Figura 45. Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor Flyback, Algoritmo TC.

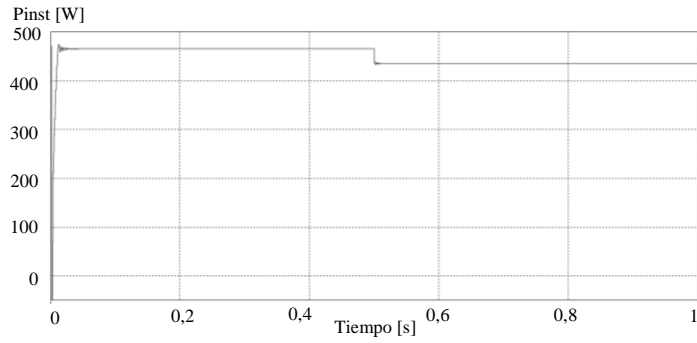


Figura 46: Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor Flyback, Algoritmo PyO.

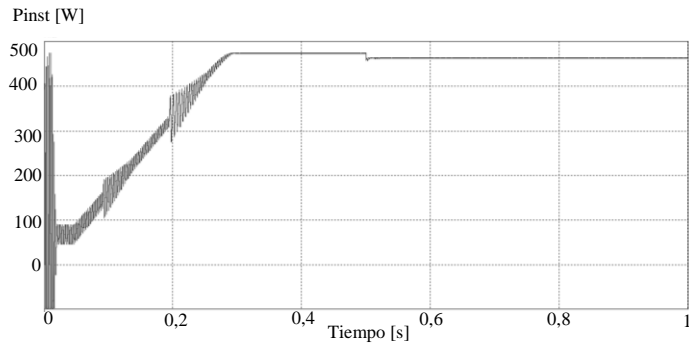
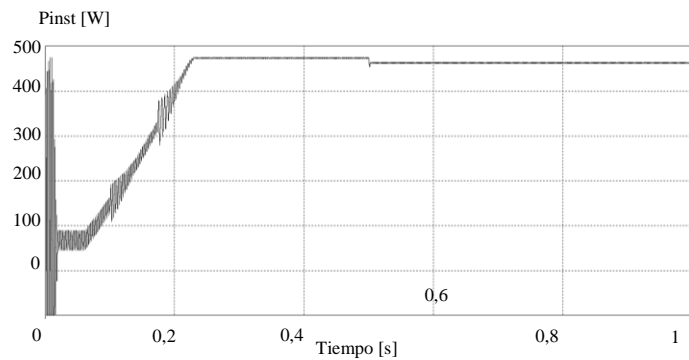


Figura 47. Potencia entregada por el panel ante una perturbación en la temperatura. Convertidor Flyback, Algoritmo CI.



A continuación en la tabla 25 se presentan los resultados de potencia promedio para el convertidor Flyback obtenidos al utilizar los algoritmos de control.

Tabla 25. Potencia en el convertidor SEPIC ante una perturbación en la temperatura

ALGORITMO	Potencia T=25°C [W]	Potencia T=55°C [W]	DECREMENTO $1-(P_{55°C}/P_{25°C})$
Tensión constante	465,44	435,52	6,43%
Perturbación y observación	473,95	463,15	2,28%
Conductancia incremental	473,74	462,96	2,28%

4.2.4. Observaciones generales

- Con base en los resultados anteriores es posible observar que la potencia generada por los paneles solares disminuye a medida que la temperatura incrementa.
- Para todas las estrategias de control se obtuvo un decremento en la potencia obtenida a 55°C respecto a la obtenida a 25°C, pero es posible ver que la aplicación de los algoritmos de seguimiento del MPP afectan positivamente al sistema ante una perturbación en temperatura (incrementan el valor de potencia obtenida respecto a cuándo se utiliza el modelo de tensión constante).
- Los valores porcentuales presentados en los resultados relacionan la potencia que se obtiene con el sistema operando a 55°C sobre la potencia que se obtiene a 25°C. Por lo tanto, aunque muestran un parámetro relacionado con la eficiencia, no representan por sí mismos la eficiencia del sistema.

4.3. PERTURBACIÓN EN LA CARGA

Se realizaron algunas simulaciones en PSIM que permiten comparar la respuesta de los convertidores ante variaciones de carga.

Se supone que las variaciones en la carga se verán reflejadas como perturbaciones en la tensión de salida en terminales del convertidor. La simulación de estas variaciones de tensión se realizará utilizando una fuente de tensión tipo escalón con las siguientes características:

- El valor inicial de la fuente es 300 [V] (El valor de diseño del convertidor), que permanece constante durante 0,5 segundos (tiempo en el que se ha estabilizado la señal de potencia en todos los algoritmos).
- Al transcurrir el tiempo de 0,5 segundos se produce la modificación en el valor de tensión que pasa de 300 [V] a 100 [V] instantáneamente, y permanece como 100 [V] durante otro medio segundo.

Para simplificar el análisis de los convertidores ante las perturbaciones en la carga, se asumen que los valores de irradiancia son constantes e iguales a 1000 [W/m²].

4.3.1. Resultados de los convertidores ante una perturbación de carga con algoritmo de tensión constante. Se realizó un análisis inicial se compararán los convertidores con algoritmo de control de tensión constante.

En las Figuras 48, 49 y 50 se observa la operación de los convertidores *Ćuk*, SEPIC y Flyback respectivamente ante la perturbación en la carga con algoritmo de tensión constante, y como se puede observar, el sistema ya no se encuentra en el punto de máxima potencia.

Figura 48. Potencia entregada por los paneles con el convertidor *Ćuk* ante perturbaciones de carga, algoritmo de tensión constante

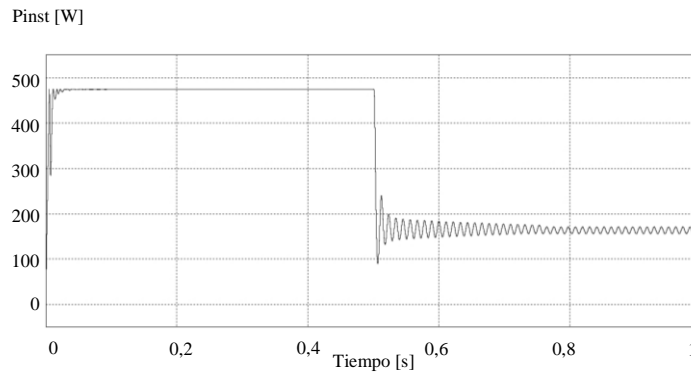


Figura 49. Potencia entregada por los paneles con el convertidor SEPIC ante perturbaciones de carga, algoritmo de tensión constante

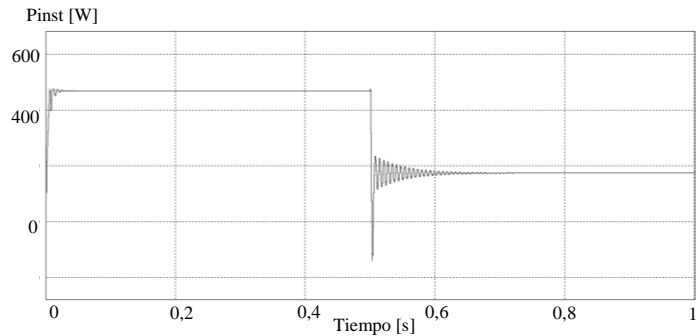
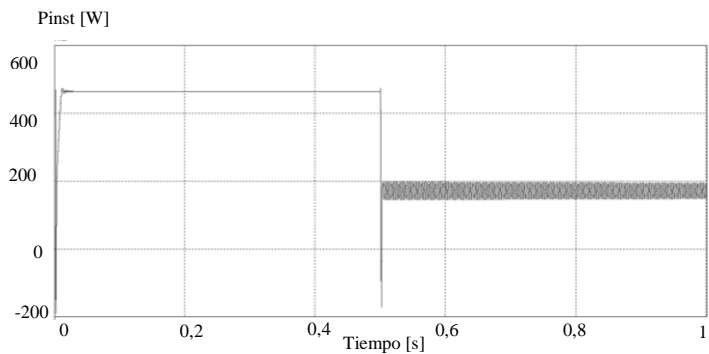


Figura 50. Potencia entregada por los paneles con el convertidor Flyback ante perturbaciones de carga, algoritmo de tensión constante



En la Tabla 26, los valores obtenidos se compararon con el valor de potencia teórica absorbida por el panel a la irradiancia de $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ (474,56 W).

Tabla 26. Valores de potencia promedio para los diferentes convertidores, con algoritmo de tensión constante

TENSIÓN DE SALIDA / EFICIENCIA	ĆUK	SEPIC	FLYBACK
300 [V]	474,5	468,24	465,45
% Eficiencia Vout=300 [V]	100%	99%	98%
100 [V]	165	174,06	172,19
% Eficiencia Vout=100 [V]	35%	37%	36%

Los resultados que se presentan cuando se perturba la carga (simulada como cambios en la tensión de salida) con algoritmo de tensión constante, representan el funcionamiento del convertidor en un sistema aislado, en el que la carga se reduce aproximadamente en un tercio de la carga inicial.

En un sistema conectado a la red lo esperado es obtener siempre la máxima potencia, independientemente de las variaciones de tensión de salida, en este caso es posible ver que la eficiencia se reduce notablemente cuando no se implementan MPPT.

4.3.2. Resultados de los convertidores ante una perturbación de carga con algoritmo de control de perturbación y observación. Se realizaron las simulaciones al implementar el algoritmo de perturbación y observación en los convertidores y a continuación se observan en las Figuras 51, 52 y 53 las gráficas de potencia absorbida de los paneles con este algoritmo.

Figura 51. Potencia entregada por los paneles con el convertidor Ćuk ante perturbaciones de carga, algoritmo de perturbación y observación

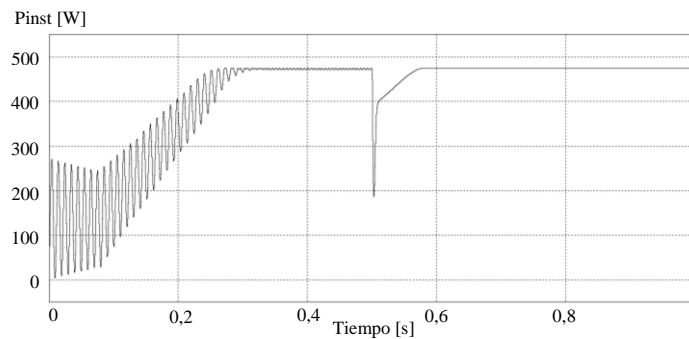


Figura 52. Potencia entregada por los paneles con el convertidor SEPIC ante perturbaciones de carga, algoritmo de perturbación y observación

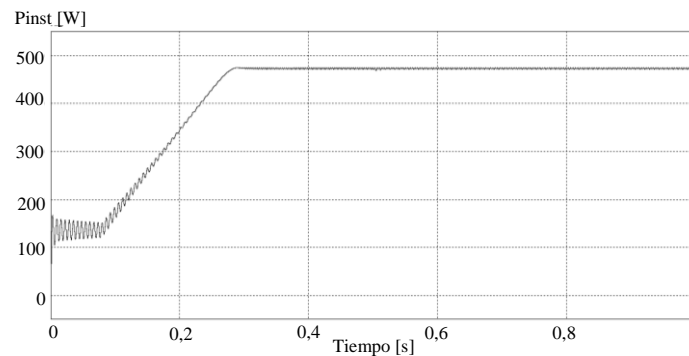
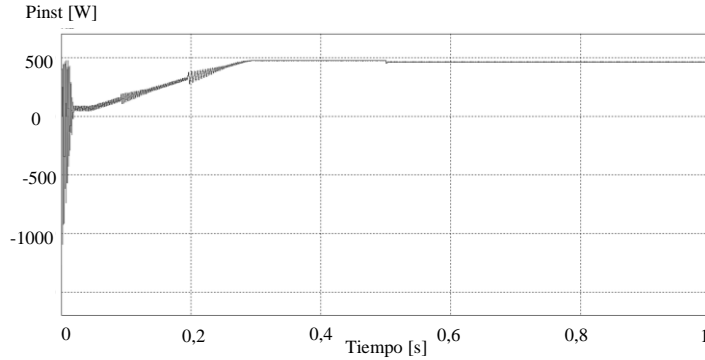


Figura 53. Potencia entregada por los paneles con el convertidor Flyback ante perturbaciones de carga, Algoritmo de perturbación y observación



La Tabla 27 presenta los valores de potencia obtenidos para cada convertidor. Estos se compararon nuevamente con el valor de potencia teórica absorbida por el panel a la irradiancia de $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ y se calcularon las eficiencias bajo este algoritmo.

Tabla 27. Valores de potencia promedio para los diferentes convertidores con algoritmo PyO

TENSIÓN DE SALIDA / EFICIENCIA	ĆUK	SEPIC	FLYBACK
300 [V]	472,99	473,21	473,93
% Eficiencia Vout=300 [V]	99,67%	99,72%	99,87%
100 [V]	474,67	474,45	474,46
% Eficiencia Vout=100 [V]	100,0%	99,98%	99,98%

4.3.3. Resultados de los convertidores ante una perturbación de carga con algoritmo de control de conductancia incremental. Las Figuras 54, 55, 57 y muestran las gráficas de potencia extraída de los paneles cuando se presenta la perturbación con cada convertidor trabajando con el algoritmo de Conductancia incremental.

Figura 54. Potencia entregada por los paneles con el convertidor Cuk ante perturbaciones de carga, algoritmo de conductancia incremental

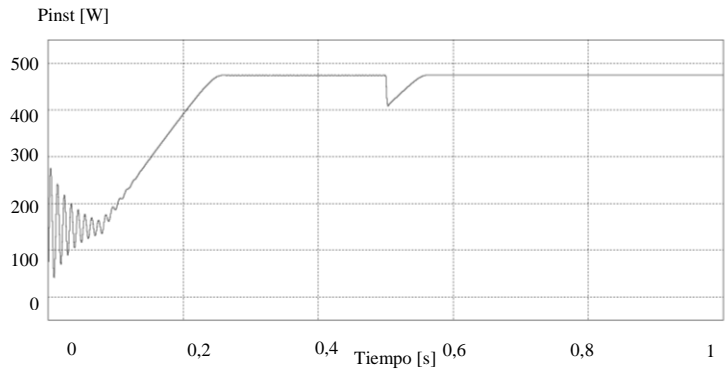


Figura 55. Potencia entregada por los paneles con el convertidor SEPIC ante perturbaciones de carga, algoritmo de conductancia incremental

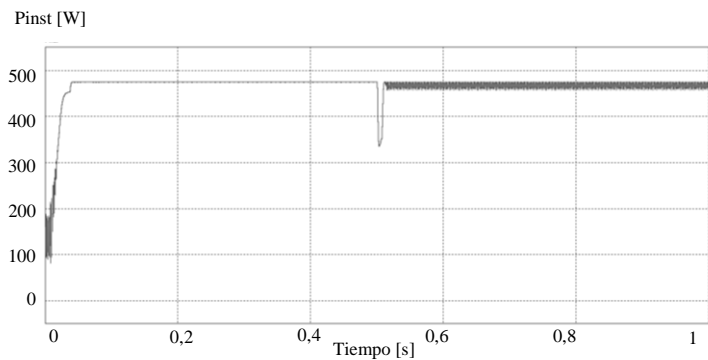
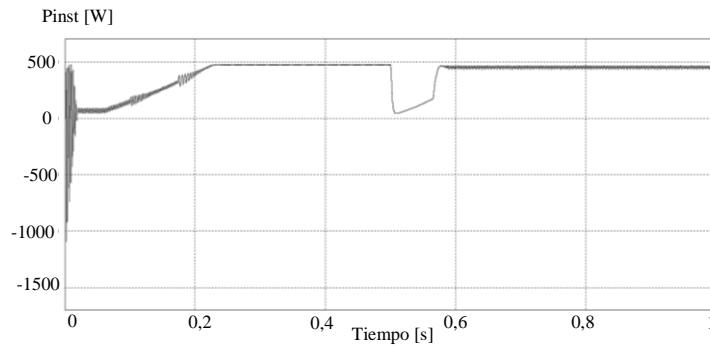


Figura 56. Potencia entregada por los paneles con el convertidor Flyback ante perturbaciones de carga, algoritmo de conductancia incremental



La Tabla 28 con los valores de potencia obtenidos para cada convertidor. Los valores obtenidos se compararon con el valor de potencia teórica absorbida por el panel a la irradiancia de $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ ($474,56 \text{ W}$) y se determinó la eficiencia de cada convertidor.

Tabla 28. Valores de potencia promedio para los diferentes convertidores, con algoritmo de CI

TENSIÓN DE SALIDA / EFICIENCIA	ĆUK	SEPIC	FLYBACK
300 [V]	474,379	473,469	473,666
% Eficiencia $V_{out}=300 \text{ [V]}$	99,96%	99,77%	99,81%
100 [V]	474,67	474,004	468,614
% Eficiencia $V_{out}=100 \text{ [V]}$	100,0%	99,88%	98,75%

4.4. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LOS CONVERTIDORES

Para realizar las comparaciones de los convertidores y los algoritmos aplicados a ellos se tuvo en cuenta el criterio del valor de potencia alcanzado en estado estable.

El cálculo de la eficiencia de los convertidores se hizo mediante la relación entre los valores de potencia instantánea y potencia máxima desde el comienzo de las simulaciones

hasta el tiempo final de la simulación (1.5 [s]). La ecuación que describe el cálculo de la eficiencia corresponde a la ecuación (14) [8].

$$\eta_{mppt} = \frac{\int_0^t P(t)dt}{\int_0^t P_{max}(t)dt} \quad (14)$$

Con esta ecuación es posible determinar la eficiencia total de los convertidores desde el comienzo de la simulación hasta el punto de estabilización de la señal de potencia. Los valores de eficiencia que se calculan mediante esta ecuación difieren de los valores presentados anteriormente, pues los anteriores comparan únicamente el valor de potencia obtenida en estado estable sin considerar el transitorio producido por las perturbaciones.

Las siguientes figuras corresponden a las curvas de eficiencia de los convertidores para una ventana de simulación de 0 a 1,5 segundos. Para el cálculo de eficiencia de los convertidores se permite la simulación avance desde el comienzo hasta el final sin perturbaciones.

4.4.1. Eficiencia en el convertidor $\hat{C}uk$. Las Figuras 57, 58 y 59 corresponden a la respuesta del convertidor $\hat{C}uk$ desde el punto de operación en cero hasta el MPP con los diferentes algoritmos.

Figura 57. Eficiencia del convertidor $\hat{C}uk$ con el algoritmo de tensión constante

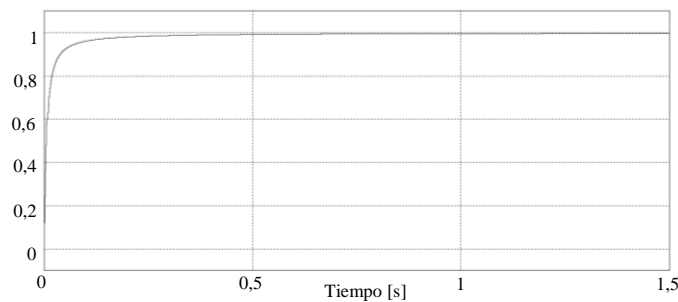


Figura 58. Eficiencia del convertidor $\dot{C}uk$ con el algoritmo de perturbación y observación

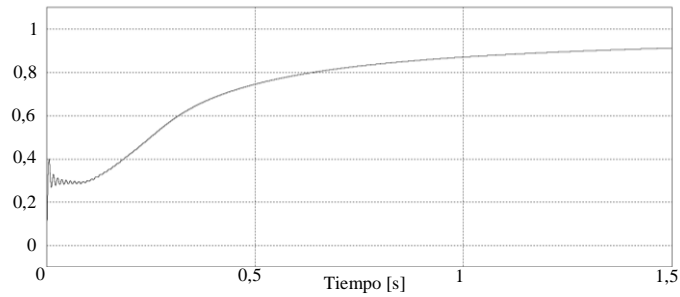
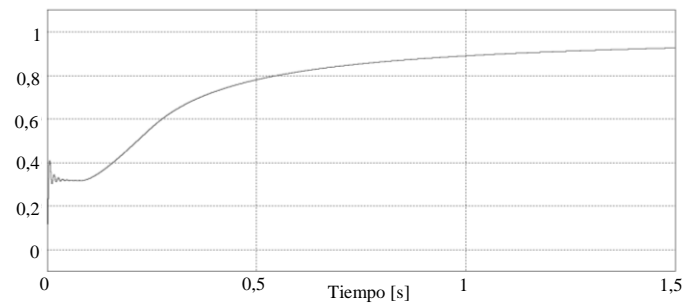


Figura 59. Eficiencia del convertidor $\dot{C}uk$ con el algoritmo de conductancia incremental



Los valores de eficiencia en el estado estable obtenidos para el convertidor $\dot{C}uk$ con los algoritmos de control se encuentran resumidos en la Tabla 29.

Tabla 29. Eficiencia del convertidor $\dot{C}uk$

ALGORITMO	EFICIENCIA
Tensión constante	99,67%
Perturbación y observación	93,62%
Conductancia incremental	91,27%

4.4.2. Eficiencia en el convertidor SEPIC. Las Figuras 60, 61 y 62 corresponden a la respuesta del convertidor SEPIC desde el punto de operación en cero hasta el MPP con los diferentes algoritmos.

Figura 60. Eficiencia del convertidor SEPIC con el algoritmo de tensión constante

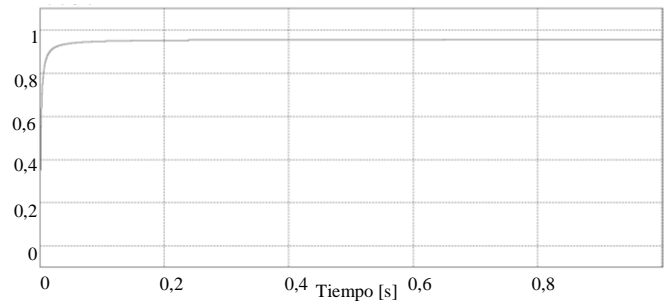


Figura 61. Eficiencia del convertidor SEPIC con el algoritmo de perturbación y observación

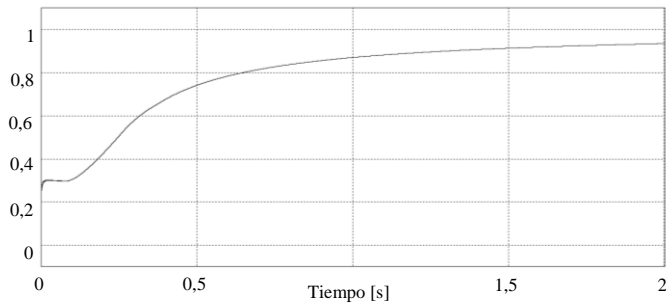
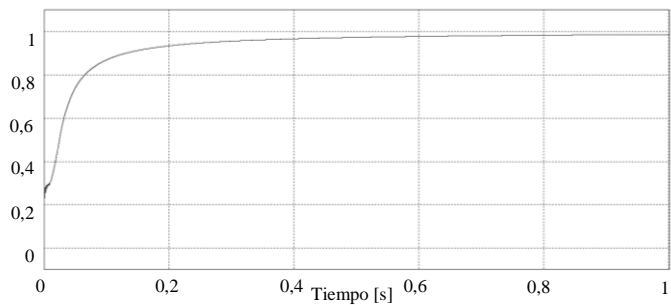


Figura 62. Eficiencia del convertidor SEPIC con el algoritmo de conductancia incremental



Los valores de eficiencia en el estado estable obtenidos para el convertidor SEPIC con los algoritmos de control se encuentran resumidos en la tabla 30.

Tabla 30. Eficiencia del convertidor SEPIC

ALGORITMO	EFICIENCIA
Tensión constante	95,63%
Perturbación y observación	93,50%
Conductancia incremental	98,62%

Con la información anterior, es posible observar que las eficiencias son altas para todos los algoritmos, sin embargo, la diferencia en el tiempo que toma el algoritmo de perturbación y observación en llegar a niveles altos de eficiencia es mucho mayor que los demás.

4.4.3. Eficiencia en el convertidor Flyback. Las Figuras 63, 64 y 65 corresponden a la respuesta del convertidor Ćuk desde el punto de operación en cero hasta el MPP con los diferentes algoritmos.

Figura 63. Eficiencia del convertidor Flyback con el algoritmo de tensión constante

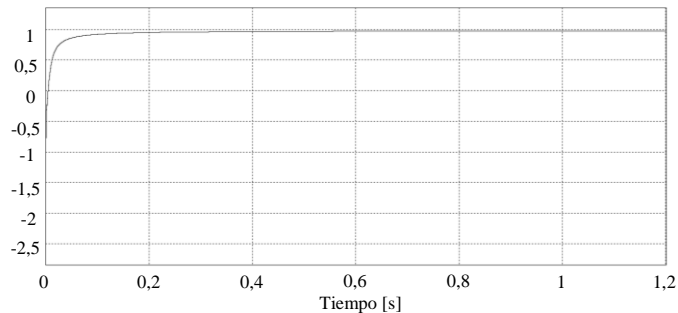


Figura 64: Eficiencia del convertidor Flyback con el algoritmo de perturbación y observación

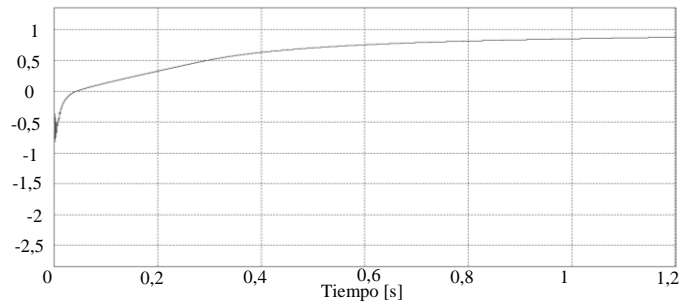
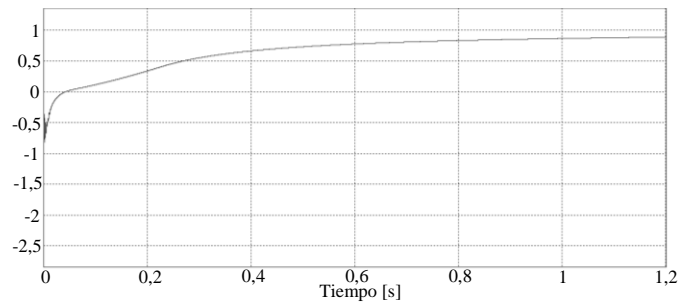


Figura 65. Eficiencia del convertidor Flyback con el algoritmo de conductancia incremental



Los valores de eficiencia en el estado estable obtenidos para el convertidor Flyback con los algoritmos de control se encuentran resumidos en la Tabla 31.

Tabla 31. Eficiencia del convertidor Flyback

ALGORITMO	EFICIENCIA
Tensión constante	97,55%
Perturbación y observación	87,50%
Conductancia incremental	88,50%

4.5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TOPOLOGÍAS RESPECTO AL RIZADO DE LA TENSIÓN DE ENTRADA

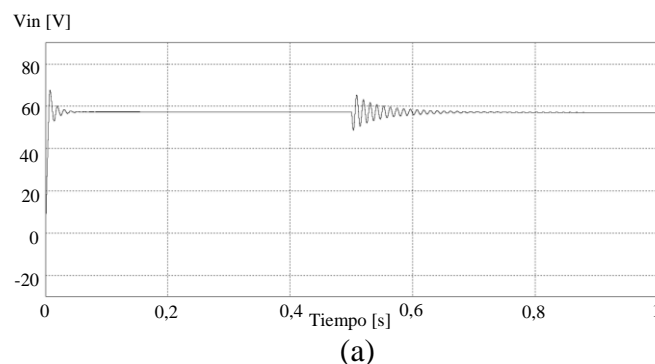
El rizo es una característica inherente a los convertidores con sistemas de control realimentados [14], la función de los algoritmos de control consiste en la modificación del valor de tensión de entrada de los convertidores DC-DC para llevarlos al punto de tensión de máxima potencia [18]. En este proceso la tensión de entrada se ve modificada constantemente pudiendo generar efectos no deseados en los paneles fotovoltaicos. En esta sección se estudiará el rizo en la tensión de entrada al que se ven sometidos los convertidores y la salida de los paneles fotovoltaicos.

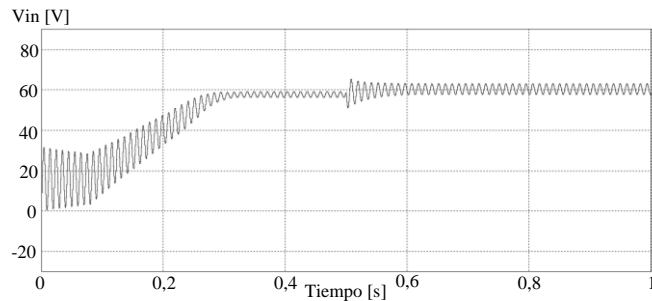
Para realizar un análisis comparativo de las señales de tensión de entrada en los convertidores controlados bajo los diferentes algoritmos, se cuenta con una tensión de salida del convertidor de 300 [V], una irradiancia de 1000 [W/m^2] y una temperatura de 25 [$^{\circ}\text{C}$].

Las figuras utilizadas para las comparaciones corresponden a las figuras 66, 67 Y 68 para el convertidor $\dot{\text{C}}\text{uk}$, las figuras 69, 70 Y 71 para el convertidor SEPIC y las figuras 72, 73 Y 74 para el convertidor Flyback.

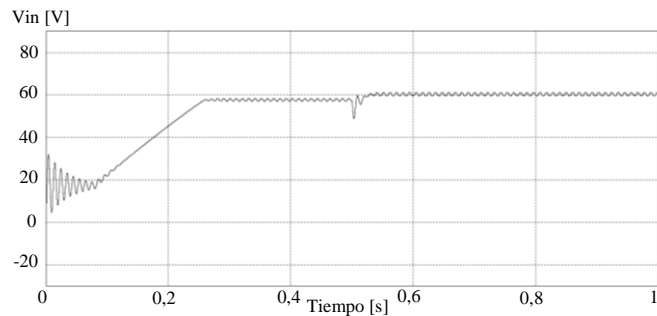
4.5.1. Rizado en la tensión de entrada para los convertidores: Convertidor $\dot{\text{C}}\text{uk}$. A continuación se presentan las figuras de tensión del convertidor $\dot{\text{C}}\text{uk}$ para facilitar la comparación del rizo en las señales.

Figura 66. Señales de tensión de entrada para el convertidor $\dot{\text{C}}\text{uk}$ controlado mediante los algoritmos a) TC, b) PyO, c) CI.





(b)



(c)

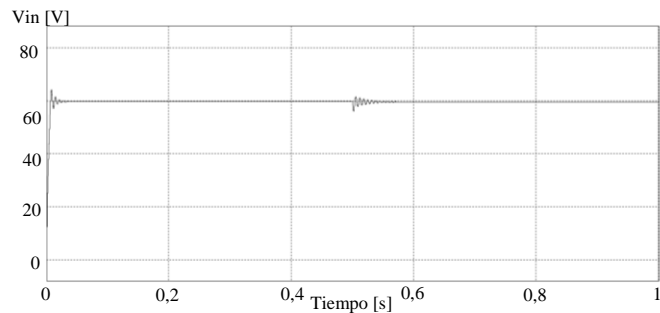
Al comparar las señales de tensión de entrada para el convertidor \dot{C} uk se pueden realizar las siguientes observaciones:

- En todas las situaciones en que se presenta una alteración en las condiciones de operación del panel se producen valores de rizado considerables en la tensión.
- Los valores de rizo que se presentan para el convertidor \dot{C} uk dependen en gran medida del algoritmo de control utilizado. Para los casos estudiados se observa que el rizo es mayor para los algoritmos de PyO y CI que para el algoritmo de tensión constante.
- El valor del rizo en la tensión de entrada para el convertidor \dot{C} uk con el algoritmo de PyO es muy grande en todas las condiciones de operación estudiadas.
- Un parámetro que modifica el valor de rizo de tensión alcanzado en un convertidor, es el valor del paso con el que el algoritmo modifica el comportamiento del ciclo de trabajo. En las simulaciones realizadas el paso C tiene un valor constante de 0.01 para todas las situaciones.
- El tiempo requerido por los convertidores en llegar a un punto de operación estacionario depende del algoritmo a utilizar. Para el convertidor \dot{C} uk estudiado se obtuvo que los tiempos de estabilización son mucho menores para el algoritmo de tensión constante, que para el algoritmo de conductancia incremental y de

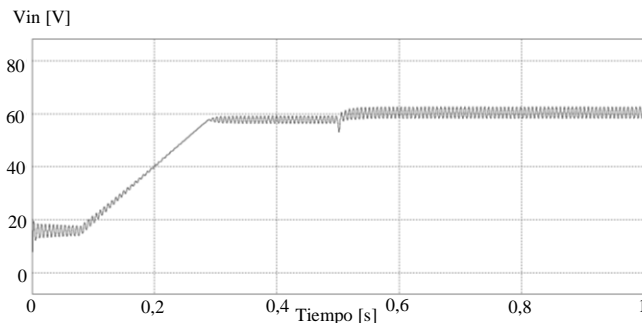
perturbación y observación, con tiempos de 0.05, 0.26 y 0.32 segundos respectivamente.

4.5.2. Rizado en la tensión de entrada para los convertidores: Convertidor SEPIC. A continuación se presentan las figuras de tensión del convertidor SEPIC para facilitar la comparación del rizo en las señales.

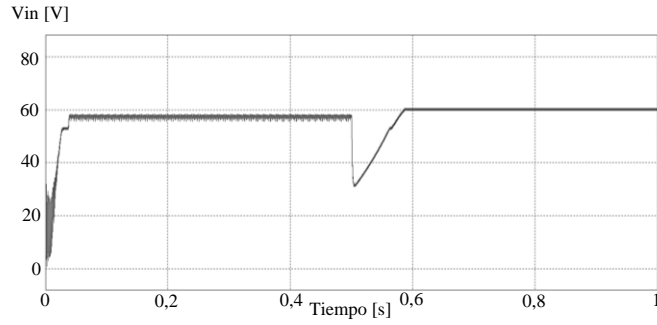
Figura 67. Señales de tensión de entrada para el convertidor SEPIC controlado mediante los algoritmos a) TC, b) PyO, c) CI



(a)



(b)

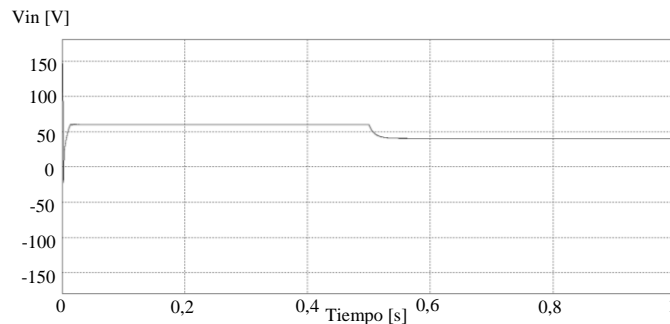


(c)

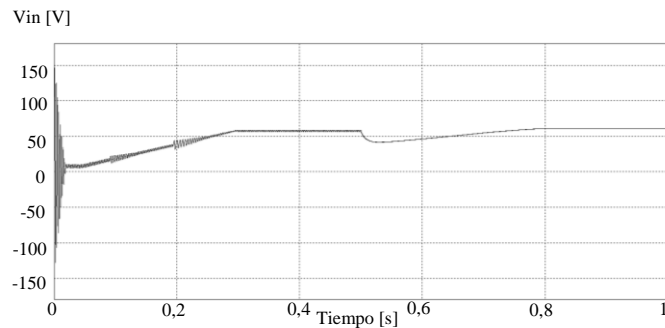
Al comparar las señales de tensión de entrada para el convertidor SEPIC se pueden realizar las siguientes observaciones:

- En el momento en que inicial la simulación el rizo más grande se presenta para el algoritmo de conductancia incremental, seguido por el algoritmo de perturbación y observación y por el algoritmo de tensión constante.
- En la situación en que la señal de potencia se ha estabilizado, el rizo más grande se produce para el convertidor SEPIC con el algoritmo de perturbación y observación, seguido del algoritmo de conductancia incremental y del algoritmo de tensión constante.
- Con el algoritmo de tensión constante no se presenta un rizado considerable en la señal de tensión una vez que ésta se ha estabilizado.
- Para el convertidor SEPIC estudiado se obtuvo que los tiempos de estabilización son muy pequeños para el algoritmo de tensión constante y de conductancia incremental (0.04 [s] para los dos), en comparación con el tiempo requerido por el algoritmo de perturbación y observación (0.3 [s]).

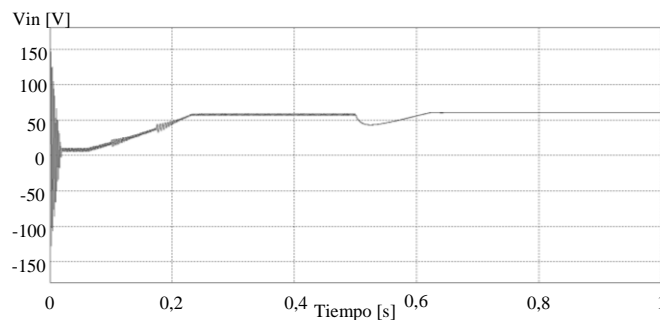
4.5.3. Rizado en la tensión de entrada para los convertidores: Convertidor Flyback



(a)



(b)



(c)

Al comparar las señales de tensión de entrada para el convertidor Flyback se pueden realizar las siguientes observaciones:

- Las señales de tensión de entrada presentan un comportamiento muy poco deseado en un convertidor, llegando a valores de tensión negativa que pueden afectar el comportamiento de los paneles. Esta respuesta podría mejorarse incrementando el valor del condensador de entrada, pero esto implicaría una respuesta más lenta y un mayor tamaño del convertidor.
- En el tiempo en que las señales se han estabilizado, los valores de rizo son similares para los algoritmos PyO y CI y prácticamente nulos para el algoritmo TC.

Para el convertidor Flyback estudiado se obtuvieron tiempos de estabilización similares a los del convertidor \acute{C} uk. Los tiempos de estabilización para los algoritmos fueron: TC=0.04 [s], PyO=0.3 [s] y CI=0.26 [s].

5. OBSERVACIONES GENERALES

El capacitor de entrada es un elemento muy importante en los convertidores DC-DC, de su valor depende el rizado de la tensión de entrada, con él se puede modificar el tiempo de subida del convertidor y reducir los valores de potencia negativa en el panel al momento de arranque del sistema. Para las topologías estudiadas se observaron las siguientes características:

- Al incrementar su valor permite reducir las oscilaciones en la tensión de entrada del panel y en la potencia generada.
- Al incrementar el valor del condensador de entrada se aumenta el tiempo de estabilización de la señal de potencia obtenida.

Como observación general, al implementar algoritmos de control en el convertidor se observa que el convertidor alcanza potencias negativas que pueden afectar la vida útil de los paneles fotovoltaicos.

6. CONCLUSIONES

Para los convertidores estudiados es posible obtener las siguientes conclusiones.

- *Perturbaciones en irradiancia*
 - Las respuestas de los convertidores ante una perturbación en la irradiancia se ven relacionadas con el tipo de algoritmo de control que se emplee. La topología de los convertidores implementada influye en la calidad de la señal de potencia, (en términos de rizado, generación de armónicos, etc.), En todos los casos es posible obtener eficiencias altas cuando se emplea un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia.
 - La señal de potencia presenta el menor rizado cuando se utiliza el algoritmo de tensión constante. Esto se debe a que en este algoritmo no se perturban las condiciones del ciclo de trabajo de los convertidores.
 - Los valores del ciclo de trabajo de los convertidores dependen en gran medida de los valores de tensión de entrada y salida; por lo tanto, cuando se presentan perturbaciones en la irradiancia los cambios en el ciclo de trabajo D son pequeños.
 - Los tiempos de subida en las señales de potencia son un parámetro ligado a los algoritmos de control. De las simulaciones realizadas se obtuvo que el tiempo de subida más pequeño se presenta para el algoritmo de tensión constante, seguido por el algoritmo de conductancia incremental y finalmente el algoritmo de perturbación y observación.

- *Perturbaciones en la carga*
 - En un sistema de generación fotovoltaica conectado a la red se busca obtener siempre la máxima potencia de los paneles solares, independientemente de las variaciones de tensión de salida del sistema, en las situaciones en las que se emplean convertidores DC-DC con algoritmo de tensión constante es posible ver que la eficiencia es baja (alrededor del 35%).
 - Al realizar las simulaciones de los convertidores con los algoritmos de control PyO y CI ante variaciones de carga es posible validar la importancia de estos en un sistema fotovoltaico.
 - Al comparar los valores de potencia obtenida por los convertidores ante una perturbación en la carga es posible observar que al implementar un algoritmo de seguimiento de la máxima potencia en los convertidores, la eficiencia obtenida es alta para cualquier condición de carga (superior al 99%), mientras que con algoritmo de tensión constante, las eficiencias son altas únicamente para valores cercanos a la carga de diseño. Los valores difieren de acuerdo a la topología del

convertidor utilizado y al algoritmo de control empleado como se resume en la Tabla 32.

Tabla 32. Eficiencia de los convertidores y algoritmos ante una reducción del 66% en la carga

ALGORITMO - CONVERTIDOR	CUK	SEPIC	FLYBACK
Tensión constante	35%	37%	36%
Perturbación y observación	100%	99,98%	99,98%
Conductancia incremental	100%	99,88%	98,75%

- En el algoritmo de perturbación y observación, los convertidores difieren levemente entre sí (menos de un 1% respecto al valor teórico) al obtener la potencia máxima de los paneles, la única diferencia considerable es el tiempo de estabilización de la señal de potencia que se hace un poco más grande en los convertidores SEPIC y Flyback.

- Los valores del ciclo de trabajo de los convertidores dependen en gran medida de los valores de tensión de entrada y salida; por lo tanto, cuando se presentan perturbaciones en la carga, que se modelan mediante perturbaciones de tensión, los cambios en el ciclo de trabajo son grandes.

- *Eficiencia de los algoritmos*

- Al comparar las eficiencias obtenidas por los convertidores al ser controlados mediante diferentes algoritmos para una ventana de tiempo de 0 a 1,5 segundos, se observa que la eficiencia máxima la presenta el algoritmo a tensión constante. Esto se debe a que este algoritmo lleva a los convertidores a posicionarse en un punto de potencia estable en poco tiempo con lo que se consigue que la integral de la potencia instantánea en el tiempo inicial de la simulación sea mayor que la de un algoritmo con seguimiento del punto de máxima potencia pues para este segundo el tiempo en llevar al convertidor a un punto de trabajo con potencia estable se incrementa debido a su operación como controlador realimentado.

- Para trabajos futuros se pueden hacer estudios como:

- Considerar los elementos no lineales, resistencias parásitas, dispositivos semiconductores no ideales, implementación de las topologías, considerar controladores en lazo cerrado después del MPPT para mejorar la respuesta ante perturbaciones en la irradiancia, temperatura o tensión de salida y mejorar la velocidad de respuesta del algoritmo, entre otros.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] TRENBERTH, Kevin; FASULLO, John y KIEHL, Jeffrey. Earth's Global Energy Budget. En: AMS Journals Online. Marzo, 2009. vol. 90, no. 3, p. 311-324.
- [2] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Plan de Expansión de Referencia Generación-Transmisión 2013-2027.
- [3] MANTILLA VILLALOBOS, María Alejandra. Modelado de Simulación en Tiempo Real de un Compensador Estático de Potencia para Sistemas de Distribución. Tesis de Maestría. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2011. 146 p.
- [4] MESSENGER, Roger y VENTRE, Jerry. Photovoltaic System Engineering, 2 ed. Boca Raton: CRC PRESS, 2005. 435 p.
- [5] GONZÁLEZ, Raúl, JIMÉNEZ, Humberto, y LAGUNAS, Javier. Sistemas Fotovoltaicos conectados a la red. Boletín IIE [online], Octubre-Diciembre 2003 [citado Agosto 27, 2014]. pp. 140-144.
- [6] ENRIQUE GÓMEZ, Juan Manuel. Diseño, Modelado y Optimización de Sistemas de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia de Generadores Fotovoltaicos mediante Convertidores CC-CC. Memoria para optar al título de Doctor. Huelva: Universidad de Huelva. Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática, 2011. 275 p.
- [7] GARCÍA CARRASCO, Joaquín Eloy. Control Directo de Potencia de Convertidores Electrónicos Conectados a la Red. Tesis doctoral. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2007. 176 p.
- [8] CASTELLANOS MARTINES, Carol Estefanía y QUIÑONEZ GONZÁLEZ, Giovanni Alexander. Integración de Sistemas Fotovoltaicos a la Red: Técnicas de Control para el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2013. 29 p.
- [9] DURÁN E., *et al.* Comparative Analysis of Buck-Boost Converters used to obtain I-V Characteristic Curves of Photovoltaic Modules. En: Power Electronics

Specialists Conference. (15-19, junio: Rhodes, Francia) Memorias. PESC 2008: IEEE, 2008. p. 2036 - 2042.

- [10] RASHID, Muhammad. Electrónica de potencia, Circuitos y Aplicaciones. 2 ed. México: Prentice Hall, 2004. 702 p.
- [11] CARBONELL, Alejandro. Convertidor CC/CC elevador con seguidor de punto de máxima potencia mediante procesador digital de señal. Proyecto de fin de carrera Ingeniería Técnica Industrial, Electrónica industrial. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. Departamento de Tecnología Electrónica, 2009. 118 p.
- [12] HART, Daniel. Electrónica de Potencia. Traducido por Isabel Capella. 1 ed. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN S.A. 2001. 451 p.
- [13] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Código eléctrico colombiano. NTC 2050. Bogotá D.C.: El Instituto, 1990. 847 p.
- [14] OGATA, Katsuhiko, Ingeniería de Control Moderno. Naucalpan de Juarez, México: Prentice Hall, Hispanoamericana S.A, 1998. 997 p.
- [15] FALIN, Jeff. Designing DC/DC converters based on SEPIC Topology. Analog Application Journal [Online]. 4Q 2008 [citada Septiembre 9 2014], pp. 18-23.
- [16] Kyocera Solar, Inc. International Wholesale Distribution. [Online]. 2010 [citado Junio 2014] Disponible en: <http://www.topsolarre.com/6.2011%20Top%20Solar%20Product%20Catalog.pdf>
- [17] ESRAM T. y CHAPMAN P. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. En: Energy Conversion, IEEE Transactions. Junio, 2007. vol. 22, no. 2, pp. 439 - 449.
- [18] ABD EL MOTALEB, Ahmed Mohamed. Seguimiento del punto de máxima potencia en Sistemas Fotovoltaicos. Trabajo de Fin de Master en Sistemas de Energía Eléctrica. Sevilla: Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingenieros (ETS). Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2010. 18 p.
- [19] RUIZ, Luis, et al. Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar. En: RIEE&C, Revista de Ingeniería Electrica, Electrónica y Computación. Diciembre, 2010. vol. 8, no. 1, p. 17-23.

- [20] GRAINGER, John y STEVENSON Jr; William, Análisis de Sistemas de Potencia. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1996. 574 p.
- [21] ESSA-EPM, *Norma de Diseño de Sistemas de Distribución ESSA-EPM*. Santander, Colombia, 2005.
- [22] ZHU, Linxiao, *et al.* Radiative cooling of solar cells. En: *Optica*. Julio, 2014. vol. 1, no. 1, p. 32-38.
- [23] SHOCKLEY, William y QUEISSER, Hans J. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. En: *Journal of Applied Physics*. Marzo, 1961. vol. 32, no. 3, p. 510-519.
- [24] INGERSOLL, J. G. Simplified Calculation of Solar Cell Temperatures in Terrestrial Photovoltaic Arrays. En: *Journal of Solar Energy Engineering*. Mayo, 1986. vol. 108, no. 2, p. 95-101.
- [25] DAVIS, Mark W.; FANNEY, A. Hunter y DOUGHERTY, Brian P. Prediction of Building Integrated Photovoltaic Cell Temperatures. En: *Journal of Solar Energy Engenireeng*. Agosto, 2001. vol. 123, no. 2, p. 200-210.
- [26] SKOPLAKI, E. y PALYVOS, J.A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. En: *Solar Energy*. 2009. vol. 83, p. 614–624.

BIBLIOGRAFÍA

ABD EL MOTALEB, Ahmed Mohamed. Seguimiento del punto de máxima potencia en Sistemas Fotovoltaicos. Trabajo de Fin de Master en Sistemas de Energía Eléctrica. Sevilla: Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingenieros (ETS). Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2010. 18 p.

CARBONELL, Alejandro. Convertidor CC/CC elevador con seguidor de punto de máxima potencia mediante procesador digital de señal. Proyecto de fin de carrera Ingeniería Técnica Industrial, Electrónica industrial. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. Departamento de Tecnología Electrónica, 2009. 118 p.

CASTELLANOS MARTINES, Carol Estefanía y QUIÑONEZ GONZÁLEZ, Giovanni Alexander. Integración de Sistemas Fotovoltaicos a la Red: Técnicas de Control para el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2013. 29 p.

DURÁN E., *et al.* Comparative Analysis of Buck-Boost Converters used to obtain I-V Characteristic Curves of Photovoltaic Modules. En: Power Electronics Specialists Conference. (15-19, junio: Rhodes, Francia) Memorias. PESC 2008: IEEE, 2008. p. 2036 - 2042.

ESRAM T. y CHAPMAN P. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. En: Energy Conversion, IEEE Transactions. Junio, 2007. vol. 22, no. 2, pp. 439 - 449.

HART, Daniel. Electrónica de Potencia. Traducido por Isabel Capella. 1 ed. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN S.A. 2001. 451 p.

RASHID, Muhammad. Electrónica de potencia, Circuitos y Aplicaciones. 2 ed. México: Prentice Hall, 2004. 702 p.

RUIZ, Luis, et al. Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar. En: RIEE&C, Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación. Diciembre, 2010. vol. 8, no. 1, p. 17-23.

ANEXO A. ANÁLISIS DETALLADO DEL FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR CÚK

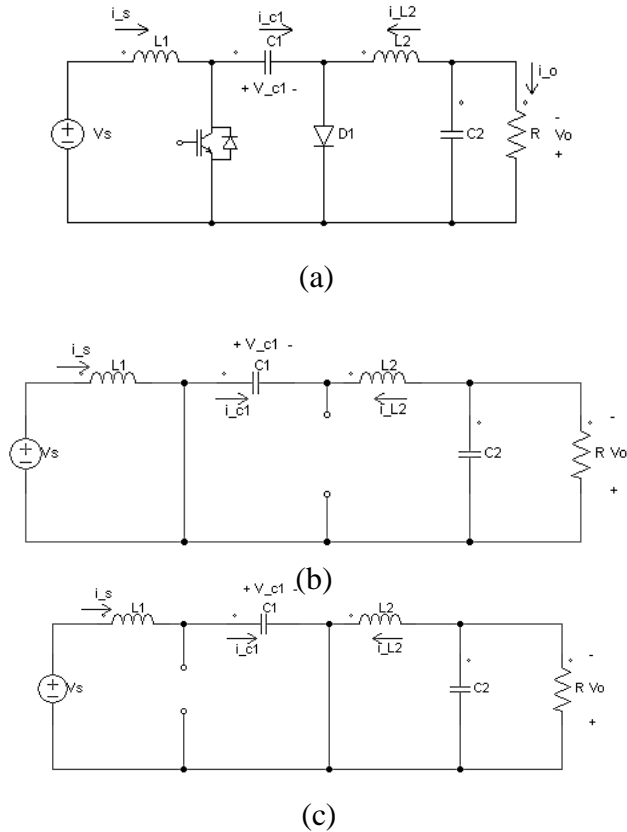
Teniendo en cuenta que todos los convertidores operan en modo continuo, se estudiará lo que sucede internamente cuando el interruptor principal de cada circuito se encuentra abierto durante el tiempo t_1 y cuando se encuentra cerrado durante el tiempo t_2 . Este anexo presenta la explicación en detalle del funcionamiento de los convertidores y la metodología utilizada para obtener las ecuaciones que modelan sus comportamientos.

El convertidor Cúk es un tipo de convertidor DC-DC que utiliza un condensador como su principal componente de almacenamiento. Un convertidor Cúk no aislado se compone de dos inductores, dos capacitores, un interruptor y un diodo, como puede apreciarse en la Figura Anexo 1-a.

En este convertidor, el condensador C1 se utiliza para transferir energía y se conecta alternativamente a la entrada y la salida (dependiendo del estado del interruptor). Los demás elementos almacenadores (bobinas y condensadores), cumplen con la función de actuar sobre las señales de entrada y salida y asemejar su comportamiento como fuentes de corriente y tensión. A continuación se describe en detalle el funcionamiento del convertidor Cúk en el modo de operación continua, con el interruptor en conducción y en circuito abierto. A partir del estudio presentado se establecen las ecuaciones con las que se realiza el diseño de un convertidor Cúk.

Los circuitos del convertidor cuando el interruptor se encuentra en modo de conducción y no conducción se muestran en la Figura Anexo 1 (a) y (b) respectivamente.

Figura Anexo 1. Diagrama del circuito del convertidor Ćuk (a) Esquema del circuito. (b) Circuito equivalente con el interruptor en modo de conducción. (c) Circuito equivalente con el interruptor abierto (Autores)



El análisis del convertidor se realiza planteando las ecuaciones que describen el funcionamiento de los circuitos para los dos posibles estados de operación del interruptor.

Partiendo del funcionamiento en modo de conducción del interruptor controlado se tiene:

$$V_s = V_{L1} = L_1 \frac{I_{L12} - I_{L11}}{t_1} \quad (1)$$

Siendo I_{L12} la corriente máxima que circula por el inductor en el tiempo t_1 e I_{L11} la corriente mínima que circula por el mismo en el tiempo $t = 0$ se obtiene:

$$V_s = V_{L1} = L_1 \frac{\Delta I_1}{t_1} \quad (2)$$

Despejando se obtiene:

$$\Delta I_1 = \frac{V_s t_1}{L_1} \quad (3)$$

$$t_1 = \frac{L_1 \Delta I_1}{V_s} \quad (4)$$

Cuando el transistor no conduce se tiene:

$$V_s - V_{C1} = -V_{L1} = -L_1 \frac{I_{L12} - I_{L11}}{t_2} = -L_1 \frac{\Delta I_1}{t_2} \quad (5)$$

Con lo cual es posible obtener una segunda expresión para ΔI_1 con el interruptor está abierto y una expresión para t_2

$$\Delta I_1 = \frac{-t_2(V_s - V_{C1})}{L_1} \quad (6)$$

$$t_2 = \frac{-L_1 \Delta I_1}{(V_s - V_{C1})} \quad (7)$$

Se procede a igualar las ecuaciones (3) y (6)

$$\frac{V_s t_1}{L_1} = \frac{-t_2(V_s - V_{C1})}{L_1} \quad (8)$$

Y a reemplazar t_1 y t_2 por $t_1 = DT$ y $t_2 = (1 - D)T$

Con lo que se obtiene

$$\frac{V_s DT}{L_1} = \frac{-(1 - D)T(V_s - V_{C1})}{L_1} \quad (9)$$

De aquí despejamos V_{C1}

$$V_{C1} = \frac{V_s}{1 - D} \quad (10)$$

Al analizar la otra mitad del circuito se obtienen las siguientes ecuaciones para las condiciones de interruptor cerrado y abierto.

Con el interruptor cerrado y el diodo abierto se tiene ahora:

$$V_{C1} + V_o = V_{L2} = L_2 \frac{I_{L22} - I_{L21}}{t_1} = L_2 \frac{\Delta I_2}{t_1} \quad (11)$$

$$\Delta I_2 = \frac{t_1(V_o + V_{C1})}{L_2} \quad (12)$$

$$t_1 = \frac{L_2 \Delta I_2}{(V_o + V_{C1})} \quad (13)$$

Así mismo con el interruptor abierto y el diodo en conducción

$$V_{L2} = -L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_o = -L_2 \frac{\Delta I_2}{t_2} \quad (14)$$

$$\Delta I_2 = -\frac{t_2 V_o}{L_2} \quad (15)$$

$$t_2 = -\frac{L_2 \Delta I_2}{V_o} \quad (16)$$

Al igualar (12) y (15), Y reemplazar t_1 y t_2 por $t_1 = DT$ y $t_2 = (1 - D)T$

$$\frac{DT(V_o + V_{C1})}{L_2} = -\frac{(1 - D)TV_o}{L_2} \quad (17)$$

$$V_{C1} = -\frac{V_o}{D} \quad (18)$$

Igualando también (5) y (10)

$$V_{C1} = \frac{V_s}{1 - D} = -\frac{V_o}{D} \quad (19)$$

Se tiene entonces V_o en términos de V_{in}

$$V_o = -\frac{DV_s}{1 - D} \quad (20)$$

Suponiendo un circuito sin pérdidas se tiene:

$$V_s I_s = -V_o I_o = \frac{DV_s I_o}{1 - D} \quad (21)$$

De aquí también se obtiene una representación para la corriente de entrada en términos de la de salida

$$I_s = \frac{D I_o}{1 - D} \quad (22)$$

1. CÁLCULO DE LA INDUCTANCIA L_1

Sabiendo que

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 \quad (23)$$

Reemplazando t_1 y t_2 por (2) y (4)

$$\frac{1}{f} = \frac{L_1 \Delta I_1}{V_s} - \frac{L_1 \Delta I_1}{(V_s - V_{C1})} \quad (24)$$

$$\Delta I_1 = \frac{-V_s(V_s - V_{C1})}{L_1 V_{C1} f} \quad (25)$$

Reemplazando V_{C1} por (5) se tiene

$$\Delta I_1 = \frac{DV_s}{L_1 f} \quad (26)$$

De aquí se puede despejar L_1 en función del rizado en la corriente de entrada que se desea:

$$L_1 = \frac{DV_s}{f \Delta I_1} \quad (27)$$

2. CALCULO DE LA INDUCTANCIA L_2

De la misma manera pero reemplazando t_1 y t_2 por (7) y (9)

$$T = \frac{1}{f} = \frac{L_2 \Delta I_2}{(V_o + V_{C1})} - \frac{L_2 \Delta I_2}{V_o} \quad (28)$$

De aquí:

$$\Delta I_2 = -\frac{V_o(V_o + V_{C1})}{L_2 V_{C1} f} \quad (29)$$

Reemplazando V_{C1} por (10) se tiene

$$\Delta I_2 = \frac{V_o(1 - D)}{L_2 f} = \frac{V_s D}{L_2 f} \quad (30)$$

La inductancia L_2 en términos de V_o o de V_s será:

$$L_2 = \frac{V_o(1 - D)}{\Delta I_2 f} = \frac{DV_s}{\Delta I_2} \quad (31)$$

3. CÁLCULO DE LA CAPACITANCIA C_1

Cuando el interruptor está abierto en $\Delta t = t_2$

$$I_{C1} = I_s \quad (32)$$

La tensión en el capacitor C_1 es

$$V_{C1} = \frac{1}{C_1} \int I_{C1} dt \quad (33)$$

Derivando se tiene

$$dV_{C1} = \frac{1}{C_1} I_{C1} dt \quad (34)$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{1}{C_1} I_{C1} \Delta t = \frac{1}{C_1} I_s t_2 \quad (35)$$

Y $t_2 = T(1 - D)$

$$\Delta V_{C1} = \frac{1}{C_1} I_s T(1 - D) = \frac{1}{C_1 f} I_s (1 - D) \quad (36)$$

$$I_s = \frac{I_o D}{(1 - D)} \quad (37)$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{I_o D}{C_1 f} \quad (38)$$

Y como $I_o \approx \frac{V_o}{R}$

$$C_1 = \frac{V_o D}{R f \Delta V_{C1}} \quad (39)$$

Siendo ΔV_{C1} el rizo deseado en la tensión del capacitor C_1

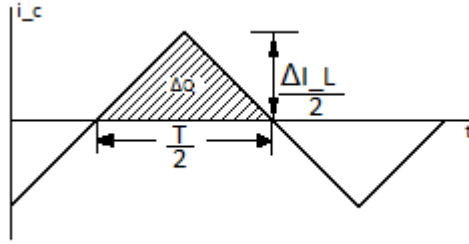
4. CÁLCULO DE LA CAPACITANCIA C_2

Suponiendo una componente ondulatoria en la carga despreciable ($\Delta i_o = 0$)

$$\Delta i_2 = \Delta i_{C2} \quad (40)$$

En la Figura 9. se observa el comportamiento de la corriente i_{C2} y la carga Q en el capacitor C_2

Figura Anexo 2. Comportamiento de la corriente en el capacitor de salida. Modificado de [6] (Fuente: Autores)



$$Q = VC \quad (41)$$

$$\Delta Q = \Delta V_o C_2 \quad (42)$$

Y ΔQ es

$$\Delta Q = \int_0^{T/2} i_{L_2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta I_2}{2} * \frac{T}{2} \right) \quad (43)$$

$$\Delta Q = \frac{\Delta I_2}{8f} \quad (44)$$

Sabiendo que $\Delta I_2 = \frac{V_o(1-D)}{L_2 f}$

$$\Delta Q = \frac{V_o(1-D)}{8L_2 f^2} \quad (45)$$

Reemplazando este valor en (44) y despejando ΔV_o

$$\Delta V_o = \frac{V_o(1-D)}{8L_2 C_2 f^2} \quad (46)$$

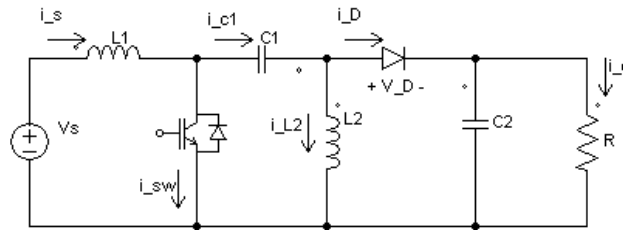
Y de aquí se despeja C_2 teniendo en cuenta el rizo en la tensión de salida ΔV_o que se desea, como:

$$C_2 = \frac{V_o(1-D)}{8L_2 \Delta V_o f^2} \quad (47)$$

ANEXO B. ANÁLISIS DETALLADO DEL FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR SEPIC

El convertidor SEPIC es un tipo de convertidor conmutado que contiene cuatro elementos almacenadores de energía (dos condensadores C1 y C2, y dos inductores L1 y L2). El circuito de este convertidor se presenta en la figura Anexo 3.

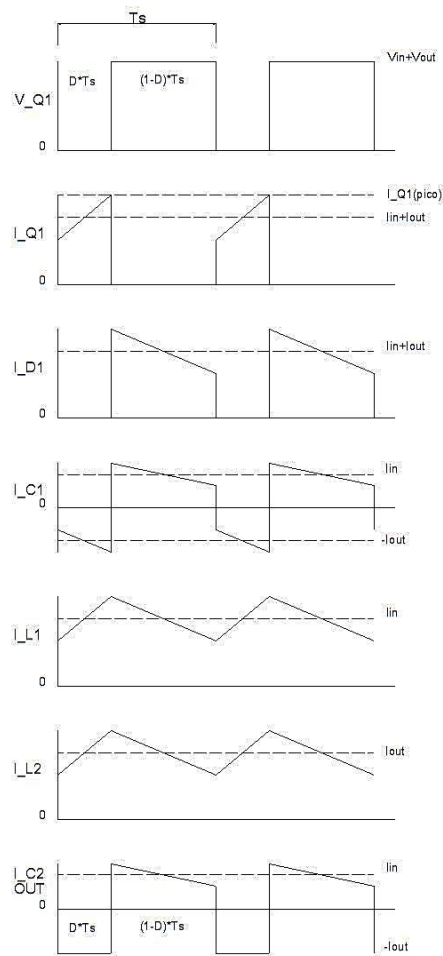
Figura Anexo 3: Diagrama esquemático del convertidor SEPIC (Fuente: Autores)



En la Figura Anexo 4 se pueden observar las gráficas de corrientes en los elementos del circuito.

De un modo similar a como se desarrollaron las ecuaciones para el convertidor Cuk se presentará el procedimiento utilizado para obtener las relaciones necesarias para calcular los valores de los elementos del circuito.

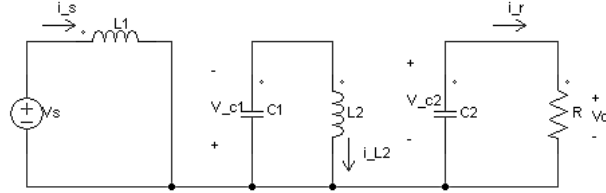
Figura Anexo 4: Formas de onda en el convertidor SEPIC. Modificado de [7] (Fuente: Autores)



ANÁLISIS CON EL INTERRUPTOR EN CONDUCCIÓN

La Figura Anexo 5, corresponde al convertidor SEPIC con el interruptor activado.

Figura Anexo 5: Diagrama del circuito del convertidor SEPIC con el interruptor en modo de conducción (Fuente: Autores)



Cuando el interruptor se encuentra en conducción el diodo no conduce (como consecuencia de la polaridad en el inductor L_2 y el capacitor C_2). Por lo tanto,

$$i_D = 0 \quad (1)$$

Para esta condición la tensión en el inductor L_1 es igual a la de la fuente y está determinada por

$$V_{L1} = V_s = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{\Delta i_{L1}}{DT} \quad (3)$$

De donde es posible despejar el valor de L_1 como:

$$L_1 = \frac{DV_s}{f\Delta i_{L1}} \quad (4)$$

Para este estado del interruptor la tensión en el inductor L_2 está dada por

$$V_{L2} = V_{C1} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{\Delta i_{L2}}{DT} \quad (6)$$

El condensador C_2 queda en serie con la resistencia de carga R , por lo que su corriente es la misma y corresponde a la corriente de salida. $i_{C2} = i_o = i_R$.

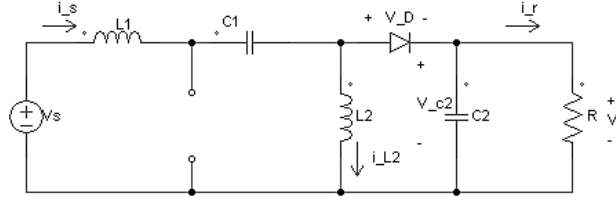
$$i_{C2} = \frac{-V_o}{R} \quad (7)$$

ANÁLISIS CON EL INTERRUPTOR ABIERTO

La Figura Anexo 6, corresponde al convertidor SEPIC con el interruptor desactivado.

Figura Anexo 6: Diagrama del circuito del convertidor SEPIC con el interruptor abierto
(Fuente: Autores)

Figura Anexo 7: Diagrama del circuito del convertidor SEPIC con el interruptor abierto
(Fuente: Autores)



Con base en el circuito presentado en la Figura Anexo 6 es posible plantear las siguientes ecuaciones:

$$V_{L2} = V_o - V_D = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} \quad (8)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{\Delta i_{L2}}{(1-D)T} \quad (9)$$

$$L_2 = \frac{(V_o - V_D)(1-D)}{f \Delta i_{L2}} \quad (10)$$

De las formas de onda de los condensadores presentadas en la Figura Anexo 4 se pueden obtener los valores de los mismos. Se tiene que

$$i_{C1} = C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} \quad (11)$$

$$|\Delta Q| = \int_0^T |i_{C1}| dt \quad (12)$$

$$|\Delta Q| = \left[\frac{(i_{L2m\acute{a}x} - i_{L2m\acute{i}n})DT}{2} \right] + \left[\frac{(i_{L1m\acute{a}x} - i_{L1m\acute{i}n})(1-D)T}{2} \right] \quad (13)$$

$$i_{L1m\acute{a}x} = i_s + \Delta i_{L1} \quad i_{L1m\acute{i}n} = i_s - \Delta i_{L1} \quad (14)$$

$$i_{L2m\acute{a}x} = i_o + \Delta i_{L2} \quad i_{L2m\acute{i}n} = i_o - \Delta i_{L2} \quad (15)$$

$$|\Delta Q| = \left[\frac{(i_o)DT}{2} \right] + \left[\frac{(i_s)(1-D)T}{2} \right] = \left[\frac{(i_o)DT}{2} \right] + \left[\frac{(i_s)DT}{2} \right] \quad (16)$$

$$|\Delta Q| = \frac{(i_o)D}{f} \quad (17)$$

Entonces el capacitor C_1 se puede calcular como:

$$C_1 = \frac{|\Delta Q|}{\Delta V_{C1}} = \frac{(i_o)D}{f\Delta V_{C1}} \quad (18)$$

Para el capacitor C_2 se tiene

$$|\Delta Q| = \frac{V_oDT}{R} = \frac{V_oD}{Rf} \quad (19)$$

Así C_2 viene dado por:

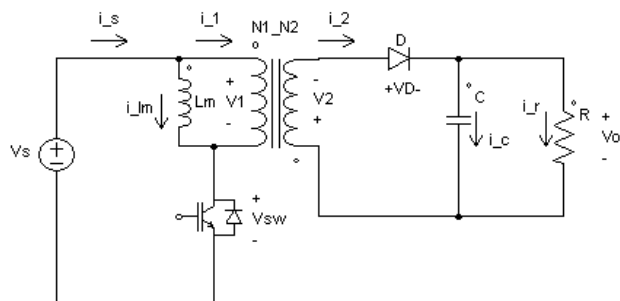
$$C_2 = \frac{|\Delta Q|}{\Delta V_o} = \frac{V_oD}{Rf\Delta V_o} \quad (20)$$

ANEXO C. ANÁLISIS DETALLADO DEL FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR FLYBACK

Una de las principales desventajas de utilizar los convertidores como fuentes de tensión conmutadas, consiste en la ausencia de una tierra aislada para la entrada y la salida [8]. El convertidor Flyback utiliza el aislamiento galvánico, mediante un conjunto de inductancias magnéticamente acopladas (simuladas como un transformador) para almacenar energía y a la vez provee un aislamiento eléctrico entre la tierra de la fuente de entrada (panel solar) y la tierra de los circuitos de salida [8].

La Figura Anexo 7 corresponde al circuito equivalente del convertidor Flyback utilizando el modelo de transformador ideal que incluye la inductancia de magnetización.

Figura Anexo 8: Diagrama del circuito equivalente del convertidor Flyback utilizando un modelo de transformador ideal con inductancia de magnetización (Autores)



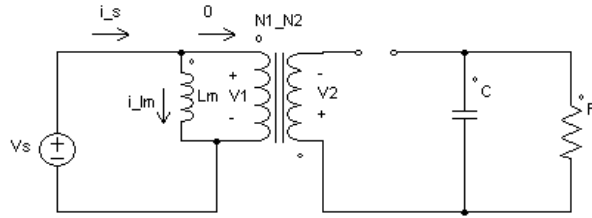
Para realizar el análisis del convertidor se parte de las siguientes suposiciones:

- El condensador de salida es muy grande, por lo tanto la tensión de salida es constante.
- El circuito se analiza en régimen permanente. Las tensiones y corrientes son periódicas con iguales puntos de corte del eje.
- El ciclo de trabajo del conmutador es D y estará cerrado un tiempo DT y abierto $(1-D)T$.
- El interruptor y el diodo son ideales.

1. ANÁLISIS CON EL INTERRUPTOR CERRADO

La gráfica del circuito equivalente del convertidor Flyback con el interruptor en conducción se presenta a continuación.

Figura Anexo 9: Diagrama del circuito del convertidor Flyback con el interruptor activado (Fuente: Autores)



Con base en este diagrama esquemático es posible plantear las ecuaciones necesarias para modelar el convertidor. Del lado primario del transformador se tiene:

$$v_1 = V_{in} = L_m \frac{di_{L_m}}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{di_{L_m}}{dt} = \frac{\Delta i_{L_m}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L_m}}{DT} = \frac{V_{in}}{L_m} \quad (2)$$

Y de ahí la variación de la corriente en L_m cuando el interruptor está cerrado es:

$$(\Delta i_{L_m})_{\text{cerrado}} = \frac{V_{in}DT}{L_m} \quad (3)$$

En el lado del transformador correspondiente a la carga se tiene:

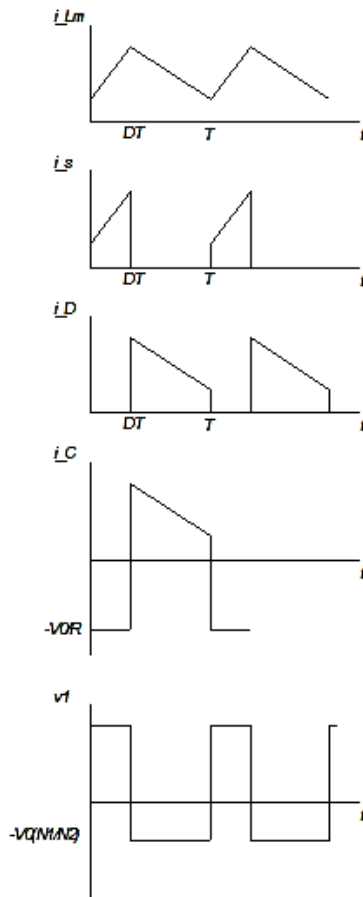
$$v_2 = v_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = V_{in} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (4)$$

$$v_D = -V_o - V_{in} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) < 0 \quad (5)$$

$$i_2 = 0 \quad i_1 = 0 \quad (6)$$

Al aproximar las curvas de carga y descarga de los almacenadores de energía como rectas, se pueden ver las curvas características del funcionamiento del circuito en la Figura Anexo 9.

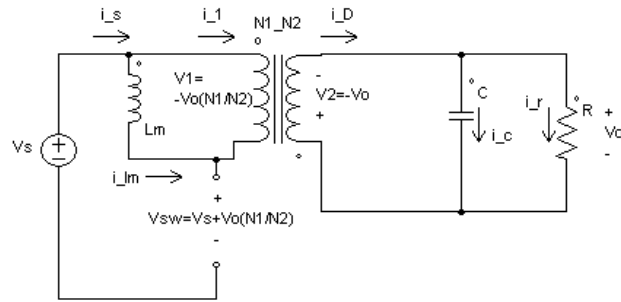
Figura Anexo 10: Formas de onda en el convertidor Flyback. Modificado de [6] (Fuente: Autores)



ANALISIS CON EL INTERRUPTOR ABIERTO

La gráfica del circuito equivalente del convertidor Flyback con el interruptor en modo de no – conducción se presenta a continuación.

Figura Anexo 11: Diagrama del circuito del convertidor Flyback con el interruptor desactivado



Como la corriente por L_m no puede variar instantáneamente, el camino de conducción tiene que ser a través del devanado primario del transformador ideal, la corriente debe entrar por el terminal sin punto del primario y salir por el terminal sin punto del secundario. Suponiendo que la tensión de salida permanece constante con un valor V_o :

$$v_2 = -V_o \quad (7)$$

$$v_1 = v_2 \frac{n_1}{n_2} = -V_o \frac{n_1}{n_2} \quad (8)$$

$$v_1 = L_m \frac{di_{L_m}}{dt} = -V_o \frac{n_1}{n_2} \quad (9)$$

$$\frac{di_{L_m}}{dt} = \frac{\Delta i_{L_m}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L_m}}{(1-D)T} = -\frac{V_o}{L_m} \frac{n_1}{n_2} \quad (10)$$

Así la variación de la corriente por L_m con el interruptor abierto será:

$$(\Delta i_{L_m})_{abierto} = \frac{-V_o(1-D)T}{L_m} \frac{n_1}{n_2} \quad (11)$$

Como la variación neta de corriente en la bobina debe ser cero en un periodo cuando se opera en régimen permanente, se tiene las siguientes expresiones utilizando las ecuaciones (16) y (17)

$$(\Delta i_{L_m})_{cerrado} + (\Delta i_{L_m})_{abierto} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{V_{in}DT}{L_m} - \frac{V_o(1-D)T}{L_m} \frac{n_1}{n_2} = 0 \quad (13)$$

Despejando V_o

$$V_o = V_{in} \frac{D}{1-D} \frac{n_2}{n_1} \quad (14)$$

Con el interruptor abierto también se puede hacer un análisis de las siguientes corrientes y tensiones

$$i_D = -i_1 \frac{n_1}{n_2} = i_{Lm} \frac{n_1}{n_2} \quad (15)$$

$$v_{sw} = V_{in} - v_1 = V_{in} + V_o \frac{n_1}{n_2} \quad (16)$$

$$i_R = \frac{V_o}{R} \quad (17)$$

$$i_C = i_D - i_R = i_{Lm} \frac{n_1}{n_2} - \frac{V_o}{R} \quad (18)$$

En el caso ideal sin pérdidas se tiene:

$$P_{in} = P_o \quad (19)$$

$$V_{in} I_{in} = \frac{V_o^2}{R} \quad (20)$$

Y obteniendo la corriente media en la entrada I_{in} y en la inductancia de magnetización I_{Lm} se tiene:

$$I_{in} = \frac{I_{Lm} DT}{T} = I_{Lm} D \quad (21)$$

Sustituyendo I_{in} en la ecuación (19)

$$V_{in} I_{Lm} D = \frac{V_o^2}{R} \quad (22)$$

$$I_{Lm} = \frac{V_o^2}{V_{in} D R} \quad (23)$$

Y usando la ecuación (18) en términos de V_{in} de un lado y V_o del otro se tiene la igualdad

$$I_{Lm} = \frac{V_{in} D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 = \frac{V_o}{(1-D) R} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (24)$$

Así, utilizando la ecuación (20) y (16) se obtienen los valores mínimos y máximos de la corriente en la bobina de magnetización.

$$I_{L_{mmax}} = I_{L_m} + \frac{\Delta i_{L_m}}{2} = \frac{V_{in}D}{(1-D)^2R} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 + \frac{V_{in}DT}{2L_m} \quad (25)$$

$$I_{L_{min}} = I_{L_m} - \frac{\Delta i_{L_m}}{2} = \frac{V_{in}D}{(1-D)^2R} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \frac{V_{in}DT}{2L_m} \quad (26)$$

Para el funcionamiento continuo se requiere que $I_{L_{min}} > 0$, entonces el valor mínimo de L_m se puede calcular a partir de

$$I_{L_{min}} = 0 \quad (27)$$

$$(L_m)_{min} = \frac{(1-D)^2R}{2f} \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (28)$$

E igual que en el convertidor reductor-elevador, en términos de la tensión de rizado se puede calcular el capacitor de salida

$$C = \frac{V_o D}{Rf \Delta V_o} \quad (29)$$