



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MÉRIDA

**ITM**

**“Diseño, Implementación y Evaluación de Convertidor  
DC-DC para Aplicaciones Fotovoltaicas”**

**OPCIÓN I:**

**“TESIS”**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**ING.RENAN ANTONIO GONZALEZ ESPINOSA**

**MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO**

**2021**





DEPENDENCIA: DIV. DE EST. DE POSG. E INV.  
No. DE OFICIO: X-117/21  
Mérida, Yucatán, **17/mayo/2021**

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**C. RENAN ANTONIO GONZÁLEZ ESPINOSA**  
**PASANTE DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA**  
**PRESENTE.**

De acuerdo al fallo emitido por su director **Jesús Sandoval Gio** y la comisión revisora integrada por Carlos Alberto Luján Ramírez, Víctor Sandoval Curmina y Agustín Alfonso Flores Novelo, considerando que cubre los requisitos establecidos en el Reglamento de Titulación de los Institutos Tecnológicos le autorizamos la impresión de su trabajo profesional con la TESIS:

**"DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE CONVERTIDOR DC-DC PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS"**

**ATENTAMENTE**  
*Excellencia en Educación Tecnológica*

**HERMINA ANDREA UIBBARRI BENÍTEZ**  
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE**  
**POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

C.p. Archivo  
RAIIB/GAME/zac



Km.5 Carretera Mérida-Progreso A.P 911 C.P  
97118 Mérida Yucatán, México, Tels. 964-  
50-90, Ext. 10001, 10401, 10601,10201  
email:contacto@merida.tecnm.mx  
web: itmerida.mx



Dedico esta tesis:

A Dios por darme la oportunidad de realizar este ciclo de estudiar un posgrado.

A mi esposa e hijo, que en todo momento por contar con su apoyo de sacrificar el tiempo de haber podido compartir más con ellos.

A mi familia, por estar al pendiente de mí en todo momento y en especial a mi padre (+) y madre.

A mis maestros, por toda su paciencia y entrega por enseñarme sus conocimientos dándome su valioso tiempo.

A mis conocidos y amigos de alguna manera aportaron su apoyo para que concluyera este posgrado.

## Tabla de contenido

Tabla de contenido.....	III
Lista de figuras.....	V
Lista de ecuaciones .....	VI
Lista de tablas.....	IX
1. Introducción.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.1.1. Eficiencia de paneles fotovoltaicos .....	6
1.2. Planteamiento del problema.....	7
1.3. Objetivos.....	7
1.3.1. Objetivo General.....	7
1.3.2. Objetivos específicos.....	8
1.4. Supuestos.....	8
1.5. Justificación .....	9
2. Marco teórico .....	10
2.1. Introducción .....	10
2.2. Topología básica de convertidores DC-DC .....	11
2.3. Conceptos del panel Fotovoltaico .....	13
2.4. Diseño de Cuk .....	15
2.4.1. Estados de operación del convertidor Cuk.....	15

2.4.2.	Ecuaciones para la topología del sistema Cuk .....	17
2.4.3.	Cálculo del toroide .....	24
2.4.4.	Calculo para inductancia y capacitancia de un Convertidor Cuk.....	27
2.5.	Relación de impedancia del sistema Cuk con la Impedancia de carga .....	29
2.6.	Simulación de circuitos eléctricos con software.....	34
3.	Metodología .....	34
3.1.	Introducción .....	34
3.2.	Aplicación de ecuaciones utilizando Scilab. ....	35
3.3.	Caracterización del panel solar en Psim .....	35
3.4.	Simulación Psim con valores calculados.....	38
3.5.	Simulación con valores reales del circuito.....	38
3.6.	Algoritmo y programa MPPT .....	39
3.7.	Desarrollo de prototipo PCB.....	41
4.	Resultados.....	43
4.1.	Introducción .....	43
4.2.	Resultados de simulación con elementos ideales .....	43
4.3.	Simulación en Psim con valores reales utilizados .....	45
4.4.	Comparativa entre resultados .....	46
5.	Conclusiones .....	51
5.1	Trabajo a futuro .....	52

Referencias.....	53
Anexo A Hojas de datos.....	58
Introducción.....	58
Microcontrolador PIC18F4550.....	59
ACS712.....	61
Toroide.....	63
IRF630.....	65
LM323.....	67
LM7812.....	69
IR2110.....	71
Anexo B Programa en Scilab para cálculo de valores.....	73
Anexo C Algoritmo de MPPT.....	76

## Lista de figuras

Figura 1.Elementos que intervienen en una tipología Cuk.....	16
Figura 2.En el tiempo de encendido ( $t_{on}$ ).....	16
Figura 3. En el tiempo de apagado $t_{off}$ .....	17
Figura 4. Imagen de un toroide. ....	25
Figura 5. Imagen del modelo del panel fotovoltaico S72PC-315 . ....	36
Figura 6. Evaluación del panel. ....	36
Figura 7. Datos insertados en Psim. ....	37

Figura 8. Imagen gráfica de comportamiento del panel fotovoltaico S75PC-315.....	38
Figura 9. Esquemático de la topología Cuk valores calculados.....	38
Figura 10. Imagen que visualiza el voltaje y corriente de salida elementos físicos. ...	39
Figura 11. Imagen del algoritmo de perturbar y observar. ....	40
Figura 12. Inicio de maquinado de PCB. ....	41
<i>Figura 13. Prototipo de PCB</i> .....	42
Figura 14. Implementación con componentes. ....	42
Figura 15. Prototipo final. ....	43
Figura 16. Voltaje e intensidad de salida del Cuk hacia la carga. ....	44
Figura 17. Relación de potencia del panel fotovoltaico y potencia de salida. ....	44
Figura 18. Salida voltaje e intensidad del Cuk hacia la carga.....	45
Figura 19. Relación de potencia del panel fotovoltaico y potencia de salida. ....	46
Figura 20. Modelo físico del panel con una Irradiancia de 1000 W/m <sup>2</sup> .....	47
Figura 21. Modelo físico del panel con una irradiancia de 800 W/m <sup>2</sup> .....	48
Figura 22. Modelo físico del panel con una irradiancia de 200 W/m <sup>2</sup> .....	48
Figura 23. Irradiancia de 1000 W/m <sup>2</sup> y potencia del panel fotovoltaico .....	49
Figura 24. Irradiancia de 800 W/m <sup>2</sup> y potencia del panel fotovoltaico.....	49

#### Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Caculo de ciclo de trabajo de encendido .....	17
Ecuación 2. Variables de corriente y Voltaje .....	17
Ecuación 3. Función en el tiempo On.....	18
Ecuación 4. Matriz global de la variable de elementos pasivos. ....	18

Ecuación 5. en el intervalo $t_{on}$ .....	18
Ecuación 6. Matriz 4x4 A1.....	19
Ecuación 7. Matriz 2x4 B1.....	19
Ecuación 8. En el tiempo de apagado $t_{off}$ .....	19
Ecuación 9. Valores que tiene la matriz A2. ....	20
Ecuación 10. Valores que tiene la matriz B2. ....	20
Ecuación 11. Ecuación combinada relacionada con el ciclo de trabajo. ....	20
Ecuación 12. Para obtener la matriz $A_p$ . ....	20
Ecuación 13. Obteniendo la matriz $A_p$ . ....	21
Ecuación 14. Para obtener la matriz $B_p$ . ....	21
Ecuación 15. Para obtener la matriz $B_p$ . ....	21
Ecuación 16. Homogenizando esta ecuación.....	22
Ecuación 17. Matriz de resultados X. ....	22
Ecuación 18. Matriz de resultados X expandido.....	22
Ecuación 19. Cálculo de beta.....	23
Ecuación 20. Ley de Ohm. ....	24
Ecuación 21. Se utiliza para encontrar la sección del perfil del toroide. ....	25
Ecuación 22. Permeabilidad del Material. ....	26
Ecuación 23. Permeabilidad de un material. ....	26
Ecuación 24. Longitud media del toroide.....	26
Ecuación 25. Factor de inductancia. ....	27
Ecuación 26. Para encontrar Inductancia.....	27
Ecuación 27. Rizo de corriente en el inductor $L_1$ . ....	27
Ecuación 28. Rizo de corriente en el inductor $L_2$ . ....	28

Ecuación 29. Rizo en el capacitor $C_1$ .	28
Ecuación 30. Rizo en el capacitor $C_2$ .	28
Ecuación 31. Cálculo del valor de la bobina $L_1$ .	28
Ecuación 32. Cálculo del valor de la bobina $L_2$ .	28
Ecuación 33. Cálculo de capacitor $C_1$ .	29
Ecuación 34. Cálculo de capacitor $C_2$ .	29
Ecuación 35. Análisis del voltaje total del circuito.	29
Ecuación 36. Análisis del voltaje total del circuito.	29
Ecuación 37. Análisis del voltaje total del circuito.	30
Ecuación 38. Despeje de $V_{L_2}$ .	30
Ecuación 39. Voltaje presente en el circuito.	30
Ecuación 40. Análisis en el tiempo on del voltaje.	30
Ecuación 41. Análisis en el tiempo off del voltaje.	30
Ecuación 42. Igualando voltajes tiempo on-off.	31
Ecuación 43. Voltaje de entrada al sistema Cuk con respecto a la carga.	31
Ecuación 44. Corriente de entrada al sistema.	31
Ecuación 45. Corriente que pasa por estos Elementos.	31
Ecuación 46. Corriente de salida del inductor $L_2$ .	31
Ecuación 47. Sumatoria total de corriente.	32
Ecuación 48. Corriente que pasa por el Inductor $L_2$ .	32
Ecuación 49. Corriente en el tiempo on.	32
Ecuación 50. Corriente por los elementos en el tiempo on.	32
Ecuación 51. Corriente en el tiempo $t_{on}$ .	32
Ecuación 52. Corriente en el tiempo $t_{off}$ .	33

Ecuación 53. Corrientes en el tiempo $t_{on-t_{off}}$ .....	33
Ecuación 54. Corriente de entrada en relación a la salida.....	33
Ecuación 55. Relación de ley de Ohm .....	33
Ecuación 56. Relación de impedancia total respecto a la carga.....	34

#### Lista de tablas

Tabla 1. Arreglo de diferentes topologías de convertidores DC-DC .....	13
Tabla 2. Nomenclatura utilizada en las variables del Algoritmo y en el compilador ...	40
Tabla 3. Valores de elementos pasivos Calculados y componentes existentes. ....	46

## Resumen

En este trabajo de tesis se presenta el diseño y la simulación de un sistema convertidor Dc - Dc con topología Cuk para sistemas fotovoltaicos. Adicionalmente, se incluye el método utilizado para diseñar los inductores toroidales que se utilizan en esta topología. Se utilizó el software Scilab como apoyo para resolver las ecuaciones de estado del convertidor, y Psim para la simulación de la transferencia de energía entre el sistema convertidor y el generador fotovoltaico. Se muestran las gráficas de esta transferencia energética, y se comparan los comportamientos de un sistema diseñado idealmente con el de una implementación real del convertidor Cuk.

## 1. Introducción.

### 1.1. Antecedentes

Hoy en día el consumo de energía eléctrica es importante en el mundo, ya que la dependencia que el ser humano tiene en ella, tanto para realizar sus actividades cotidianas como en la producción de bienes y servicios, ha ido en aumento.

Para la generación de energía eléctrica se utiliza la combustión de gas natural o el combustóleo, que es el residuo del proceso para producción de los combustibles como gasolinas o turbosina, ambos son generadores de CO<sub>2</sub>, azufre, gases invernadero y residuos sólidos que son agresivos para el medio ambiente.

Se han realizado múltiples investigaciones en donde se demuestra que el uso de los hidrocarburos contamina el medio ambiente y es una de las principales consecuencias del calentamiento global. Otra fuente de energía es la energía nuclear, que en su momento viene a proponer una solución a la demanda de energía eléctrica, pero sus efectos son tan devastadores para los ecosistemas y al ser humano que obliga por consiguiente al hombre a tratar de innovar utilizando el poder de la naturaleza para producir energías limpias que permitan aprovechar: el aire, los ríos, las mareas, el calor del subsuelo y el sol.

De estas fuentes de energía la que más abunda en el planeta es la energía solar; esta presenta un beneficio al contar con una potencia promedio de  $900 \text{ W/m}^2$  [1], de esta manera se vuelve la energía preferida, se puede enumerar múltiples beneficios de esta fuente de energía en las que se puede mencionar el calentamiento de agua, para

realizar procesos de desalinización o de como se conoce normalmente potabilizar agua y lo más importante en el trabajo científico es el desarrollo de prototipos que utilizan la energía del sol de la forma más eficiente y tienen un máximo rendimiento durante las horas de luz solar, que aunque son 12 horas en promedio no se puede aprovechar ésta en todo su potencial a causa de factores como: las nubes, las tormentas, poca irradiancia a tempranas horas y cerca la hora nocturna hace que solo se tenga un aprovechamiento de 8 horas en promedio al descontar las perturbaciones mencionadas con anterioridad.

En años antes de acabar el siglo XIX y a mediados del siglo XX se hicieron los principales descubrimientos con respecto a la adquisición de energía. El primero fue el descubrimiento de los paneles fotovoltaicos y el otro fue la utilización del silicio para mejorar el funcionamiento y eficiencia en estos paneles; a partir de estos descubrimientos se encuentran diversos usos a estas celdas fotovoltaicas, también por otra parte la comunidad científica empieza a investigar y a desarrollar otras formas para la generación de electricidad, lo cual da lugar a las llamadas energías renovables.

Existen diferentes tipos de energías renovables o alternas, por mencionar el primer tipo de energía renovable se tiene a la energía eólica y como segundo la energía fotovoltaica, tanto la eólica como la fotovoltaica se descubre a finales del siglo XIX y a mediados también del siglo XX se realiza el descubrimiento que se puede utilizar con corriente alterna, que utiliza la fuerza del viento para generar electricidad. El principal medio para obtenerla son los aerogeneradores, “molinos de viento” de tamaño variable que transforman con sus aspas la energía cinética del viento en energía mecánica [2].

Se tiene también la energía llamada geotérmica, lo interesante de esta fuente alterna de energía es aprovechar el calor del subsuelo para climatizar, obtener agua caliente y desinfectante de forma ecológica, también se han realizado trabajos para aprovecharla en la producción de energía eléctrica es una de las fuentes de energía renovable menos conocidas [3].

La energía hidráulica se obtiene de la caída del agua desde cierta altura a un nivel inferior, ésta provoca el movimiento de ruedas hidráulicas o turbinas a gran velocidad dando lugar a un movimiento de rotación. Finalmente, el movimiento mecánico se transforma por medio de los generadores en energía eléctrica [4].

La energía mareomotriz se produce gracias al movimiento generado por las mareas que es aprovechada por turbinas, éstas convierten el movimiento mecánico mediante un alternador generando energía eléctrica, finalmente este último está conectado con una central en tierra que distribuye la energía hacia la comunidad [5].

La energía biomasa incluye madera, plantas de crecimiento rápido, algas cultivadas, restos de animales, etc. es renovable siempre y cuando se use adecuadamente. La biomasa puede ser usada directamente como combustible que es usado para la generación de energía eléctrica [6].

Por último, el sol, los paneles solares son módulos que usan la energía que proviene de la radiación solar, hay de dos tipos, aquellos que producen agua caliente o los paneles solares fotovoltaicos para producir electricidad, estos se pueden aplicar tanto en uso residencial como industrial. En esta tesis se trata de enfatizar las bondades de aplicar el efecto fotovoltaico que transforma luz en electricidad, este efecto se logra al

exponer de manera directa a la luz solar una de las caras de una célula fotoeléctrica (que conforman los paneles) produciendo una diferencia de potencial eléctrico entre ambas caras que hace que los electrones salten de un lugar a otro, generando así corriente eléctrica [7].

En México los sistemas fotovoltaicos están normalizados en la NOM-001-SEDE-2012, y se encuentra en los artículos 690, 705 de este documento publicado en el diario oficial, por el organismo rector que es la secretaría de energía [8].

Consciente de la necesidad de optimizar recursos se toma interés por las energías renovables y de esta manera se empieza a investigar los tipos de convertidores existentes y se opta por el de topología llamado convertidor DC – DC tipo Cuk que debe su nombre al ingeniero maestro Slobodan Cuk. En el estado del arte se encuentra que es un sistema que sirve para aplicaciones de estabilización de voltaje directo o corriente directa en la generación de energía evitando, en lo posible pérdidas de energía, se puede citar estas investigaciones que han dado resultados en publicación de patentes, de este estado del arte dichas patentes se relacionan con el proyecto de tesis que se mencionan a continuación: CN108736705, Tipo JFET auto excitado intercalado Cuk convertidor; CN108712070 (A), Convertidor bidireccional DC- DC Cuk basado en ZCS PWM y sistema y método; CN108736704 (A), Circuito de equilibrio de elementos de almacenamiento de energía tipo bus, sistema y método basados en cuasiorresonancia bidireccional DC - DC Cuk converter; CN107911022 (A), Sistema de control de valor pico tipo de corriente convertidor de interruptor Cuk; CN107947565, Circuito de control de convertidor Cuk basado en modo PSM;

CN204859103 (U), Novedoso dispositivo de generación de energía fotovoltaica basado en circuito Cuk. Estas patentes son de 2013 a 2018.

Como dato interesante existen cuarenta y tres patentes relacionadas con convertidores Cuk. Cuarenta de estas pertenecen a personas de nacionalidad de china y solamente tres por parte de nacionalidad norteamericana que también han estado trabajando en temas relacionados con los convertidores mencionados.

Otros usos interesantes es el trabajo con panel fotovoltaicos para trabajos de soldadura, iluminación LED, celdas de combustible y como transmisión de energía eléctrico-electrónico [9].

#### 1.1.1. Eficiencia de paneles fotovoltaicos

La eficiencia de los paneles solares varía considerablemente, solamente en condiciones excepcionales un módulo rinde la energía anunciada por el fabricante. En la vida real y en las mejores condiciones bajo el sol del mediodía, un panel puede producir solamente entre 75 y 85% de su capacidad nominal por varias razones y una de las causas es la forma de medirlos [10].

Los valores de los módulos anunciados por los fabricantes se miden momentáneamente con un flash, usando el estándar STC (Standard Test Conditions). Esta forma permite un control durante la fabricación, pero no refleja el rendimiento de un panel instalado en la intemperie. La razón es que cada vez que cualquier nube proporciona sombra al panel hace que deje producir la energía de diseño mostrada en la placa de características [10].

## 1.2. Planteamiento del problema

En todo sistema fotovoltaico se requiere una conversión de la energía eléctrica generada para suministrarla a una aplicación específica. Esta necesidad puede satisfacerse utilizando convertidores conmutados, ya que pueden implementarse con una gran variedad de topologías y alta eficiencia. El convertidor Cuk, como ya se ha mencionado, presenta gran flexibilidad aunque existe información en el estado del arte, esta topología es poco utilizada perdiendo con ello los beneficios que ella nos brinda. A causa de que los paneles fotovoltaicos tienen un punto de operación de máxima eficiencia que es variable dependiendo de las condiciones de irradiancia y de carga, para ello se requiere la implementación de un algoritmo del seguimiento del punto de máxima potencia que se integre al control del convertidor.

Este trabajo aborda la problemática de diseñar un convertidor DC-DC conmutado que implemente un algoritmo del seguimiento del punto de máxima potencia para conseguir máxima la transferencia de energía de un sistema fotovoltaico a una carga.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo General

Una vez planteado el problema, el camino a seguir consiste en utilizar un convertidor DC-DC Cuk,.Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo principal diseñar un convertidor DC-DC Cuk a través de simulaciones que incluya un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia para su implementación y evaluación para aplicarse en sistemas fotovoltaicos

### 1.3.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo mencionado anteriormente, es necesario realizar los siguientes objetivos específicos:

- Investigar el funcionamiento del convertidor DC-DC cuk mediante la revisión del estado del arte para determinar los criterios de diseño de un convertidor.
- Diseñar convertidor DC-DC Cuk mediante el uso del software Psim para cumplir con los criterios de diseño.
- Implementar del algoritmo de MPPT Perturbar y Observar en un microcontrolador de la familia PIC18F4550 para controlar el circuito convertidor de topología Cuk.
- Evaluar los resultados del comportamiento del algoritmo utilizado el software Psim para validar el diseño del convertidor DC-DC Cuk

### 1.4. Supuestos

Un convertidor conmutado de topología Cuk, el cual implemente un algoritmo de MPPT del tipo perturbar y observar, transferirá eficientemente la energía de un sistema fotovoltaico a una carga específica

En el desarrollo de este proyecto de tesis se pretende simular con el software Psim para investigar el comportamiento del Sistema del convertidor DC-DC Cuk; y el modelado del panel utilizado en el proyecto.

En laboratorio se desarrolla el prototipo para validación del comportamiento del voltaje de salida preestablecido con respecto a la carga utilizando el algoritmo propuesto con el PIC18F4550.

Se establece la comparativa del proceso de simulación con respecto al prototipo implementado en y laboratorio visualizando el comportamiento de ambos tanto de la simulación como el cambio de ciclo de trabajo en el prototipo.

### 1.5. Justificación

Hoy en día en los sistemas fotovoltaicos se requiere un sistema de transferencia de energía confiable y flexible para suministrar esta energía a la carga.

El diseño de convertidores se vuelve esencial en la búsqueda de sistemas fotovoltaicos más eficientes.

En el mercado digital existe una variedad de software de simulación tipo SPICE, en el podemos encontrar al Scilab, Simulink, Orcad, workbench, MULTISIM, psCAD, Proteus y al ver en la página del proveedor de software el Psim cumple con los requerimientos necesarios que permite tener una interface para simular sistemas electrónicos de potencia.

En un principio se consideró trabajar con el PIC tipo dsPIC33FJ16GS502; teniendo la limitante de adquirirlo, en relación con el PIC18F4550 de fácil adquisición en el mercado local, otra ventaja es el conocimiento de este componente por ser habitualmente utilizado en proyectos de investigación en la institución donde se presenta este proyecto de tesis.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Introducción

Todo diseño de circuitos requiere estar sustentado por las ecuaciones descritas en la literatura de libros, publicaciones científicas, que respalde la hipótesis de algún proyecto de investigación o el desarrollo de un cierto componente que se requiera, esto también sirve para explicar el comportamiento de un dispositivo ( en referencia a un componente o componentes) del tal manera que se idealiza el sistema para que este análisis de componentes se realice que defina estos comportamientos y al someterlos a pruebas de campo demuestre que respuesta obtenemos. En esta parte se visualiza a través de un software un circuito que sirve para colocar los componentes activos y pasivos que intervienen en el análisis dentro de los circuitos integrados, los componentes electrónicos no se pueden observar en forma directa su funcionamiento, por eso se utilizan las ecuaciones descritas en el presente capítulo para representar el comportamiento en condiciones de trabajo. También estas ecuaciones demuestran que para el análisis en investigación son de suma importancia para comunicarse con cualquier persona de una manera precisa dedicado al estado del arte como al estado de la técnica.

Por consiguiente del artículo análisis, diseño e implementación de un convertidor Cúk para iluminación led [11]; se toma las fórmulas para la aplicación del convertidor a utilizar en la tesis, este artículo describe a detalle las fórmulas a utilizar, para el análisis del convertidor se utiliza el modelado mediante espacio de estados, a través del cual se determinó la solución en estado estable y las funciones de transferencia necesarias

para cerrar el lazo de control estas ecuaciones se ven el tema de estados de operación del convertidor Cuk.

## 2.2. Topología básica de convertidores DC-DC

Respecto al convertidor, este realiza el trabajo de acondicionar el voltaje para su uso; para poder utilizar la fuente de energía solar se tiene que trabajar con convertidores de voltaje del tipo DC-DC conocidos también como reguladores de conmutación.

Los tipos de convertidores DC-DC existentes con sus respectivas topologías se muestran en la tabla 1 y se mencionan a continuación:

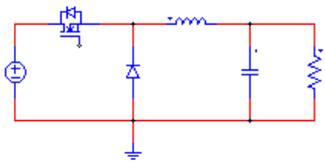
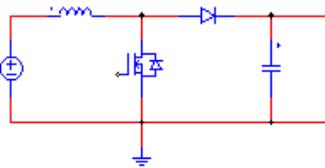
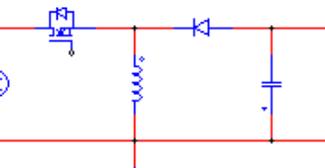
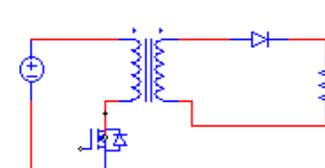
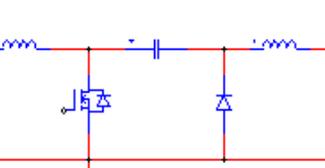
Convertidor Buck conocido también como un reductor de voltaje, acondiciona el voltaje de entrada para que en la salida disminuya el voltaje. Un ejemplo de este convertidor es el eliminador de voltaje de corriente continua comúnmente utilizado en los cargadores de celular.

Convertidor Boost también llamado como elevador de voltaje, se utiliza para que el voltaje de salida del panel fotovoltaico se ajuste al voltaje que demanda algún dispositivo. Como ejemplo de aplicación se tiene un motor de corriente directa que requiere un voltaje nominal 90 volts para su funcionamiento.

Convertidor Buck-Boost es un dispositivo autoajutable que reduce o eleva el voltaje según el requerimiento del dispositivo, se puede utilizar en cargadores de baterías o para usos en equipos directamente a una carga mayor en DC.

Convertidor Flyback es un elevador de voltaje comúnmente utilizado en electrónica analógica llamado transformador de aislamiento que se conoce por sus aplicaciones en la industria de televisores.

Convertidor Cuk fué llamado en honor al científico Slobodan Cuk; este es un elevador y reductor de voltaje a la vez, a diferencia del buck-boost su funcionamiento lo realiza regulando la modulación por ancho de pulso (por sus siglas en inglés PWM) de tal manera que va teniendo un menor rizo o señal de interferencia. Un ejemplo de aplicación es la utilización de este convertidor para celdas de combustible (producción de celdas de hidrogeno).

Topología	Circuito	Característica
Convertidor DC-DC Buck		Opera como un reductor de voltaje
Convertidor DC-DC Boost		Es utilizado para elevar el voltaje
Convertidor DC-DC Buck Boost		Realiza la función de reducir o aumentar voltaje
Convertidor DC-DC Flyback		Usa un transformador de aislamiento entre la entrada y la salida
Convertidor DC-DC Cuk		Realiza la función de reducir o aumentar su voltaje con la ventaja de tener un menor rizo

### 2.3. Conceptos del panel Fotovoltaico

Por su composición química existen tres tipos de paneles fotovoltaicos:

#### ➤ Monocristalino

Las celdas solares de silicio Monocristalino (mono-Si), son bastante fáciles de reconocer por su coloración y aspecto uniforme, que indica una alta pureza en silicio,

#### ➤ Película fina

El fundamento de estos paneles es depositar varias capas de material fotovoltaico en una base. Dependiendo de cuál sea el material empleado podemos encontrar paneles de capa fina de silicio amorfo (a-Si), de telurio de cadmio (CdTe), de cobre, indio, galio y selenio (GIS/CIGS) o células fotovoltaicas orgánicas (OPC). Dependiendo del tipo, un módulo de capa fina, presentan una eficiencia del 7-13%. Debido a que tienen un gran potencial para uso doméstico, son cada vez más demandados.

#### ➤ Policristalino

Los primeros paneles solares Policristalino de silicio aparecieron en el mercado en 1981. A diferencia de los paneles Monocristalino, en su fabricación no se emplea el método Czochralski. El silicio en bruto se funde y se vierte en un molde cuadrado. A

continuación, se enfría y se corta en láminas perfectamente cuadradas o rectangulares [7].

Para este proyecto de tesis es utilizado el tipo Policristalino.

Algunos de los conceptos a mencionar que se deben tener en cuenta para cada celda fotovoltaica serían los siguientes:

Seguimiento del “punto de potencia máxima” (MPPT por sus siglas en inglés): Es la medición de la potencia en un panel solar, esta se representa en unidades de potencia visualizada en una gráfica  $V - I$ , representado por el MPPT llamado así comúnmente nos representa el punto de la máxima potencia que nos entrega el panel en condiciones de trabajo [12].

Voc: Es el voltaje que se mide en circuito abierto, es el voltaje que entrega el panel al estar en contacto con la fuente de energía que es el sol. Este potencial es el que entrega el panel por sus características de diseño

Isc: Es la corriente medida en corto circuito para determinar la máxima corriente que va a circular por el circuito. Considerando el arreglo interno de conversión de energía, obtenida esta corriente realizando una prueba de corto circuito

Irradiancia: Es la medición de la potencia del panel solar alrededor de un área en otras palabras la  $Potencia/Área = Watts/m^2$ . Importante hacer notar que esta irradiancia es diferente en cada zona geográfica y la posición de incidencia de los rayos solares en los paneles fotovoltaicos esto se compensa con la inclinación debida en cada región donde se utilice estos paneles [13]. Para el estado de Yucatán la inclinación promedio es 21 Grados de inclinación [14].

Temperatura de trabajo del panel solar, es la temperatura en la que opera el panel solar. Por lo regular se opera con una sensación térmica es de 26 grados centígrados [15].

Esta tecnología está siendo aprovechada tanto por inversionistas que están realizando parques con paneles fotovoltaicos, como por particulares que han decidido invertir para tener que pagar menos en sus consumos de energía [7].

## 2.4. Diseño de Cuk

### 2.4.1. Estados de operación del convertidor Cuk

Una de las ventajas de este convertidor es que suministra un voltaje a la salida mayor o menor que el voltaje de la fuente y lo realiza sin transformador de aislamiento, logrando una alta eficiencia porque se tiene bajas pérdidas en la conmutación del MOSFET; por su salida de voltaje que es polaridad inversa con respecto a la fuente también se le conoce como un regulador inversor, al estar conformado por un capacitor y una bobina  $L_1$  y  $L_2$  ocurre el efecto que la energía acumulada en la bobina es devuelta a la carga en polaridad contraria. El convertidor Cuk opera en modo de conducción continua (MCC) gracias al capacitor  $C_1$  de transferencia de energía Figura 1 [16].

Los paneles fotovoltaicos que existen en el mercado proporcionan diversos voltajes de salida. Para esta tesis se utiliza un panel fotovoltaico cuya salida es entre 30 V a 44 V, el voltaje promedio considerado es de 37 V con una corriente de salida de 2 A para alimentar un cargador de batería a 13.8 V; se muestra el circuito Cuk a continuación, con todos sus elementos activos, incluso los elementos parásitos que intervienen en la construcción de esta topología, como se observa en la Figura 1.

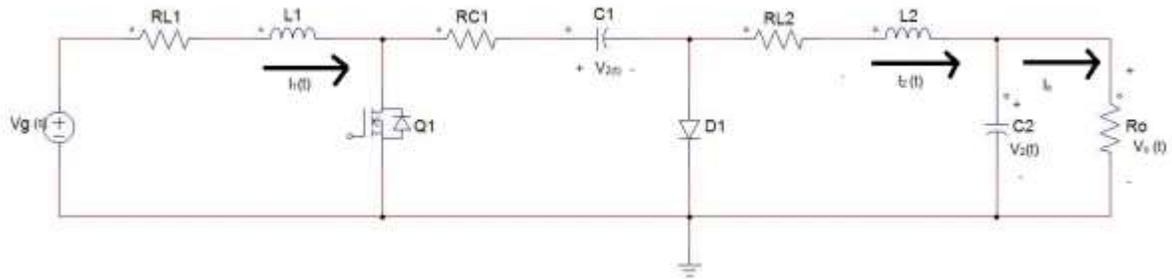


Figura 1. Elementos que intervienen en una tipología Cuk

Durante el estado de encendido ( $t_{on}$ ), que se denota con la letra “D”, es cuando está en modo de conducción el MOSFET, que es un elemento activo conocido también como elemento discreto por dejar pasar o no la corriente y funciona como un switch. Lo anterior se muestra en la Figura 2.

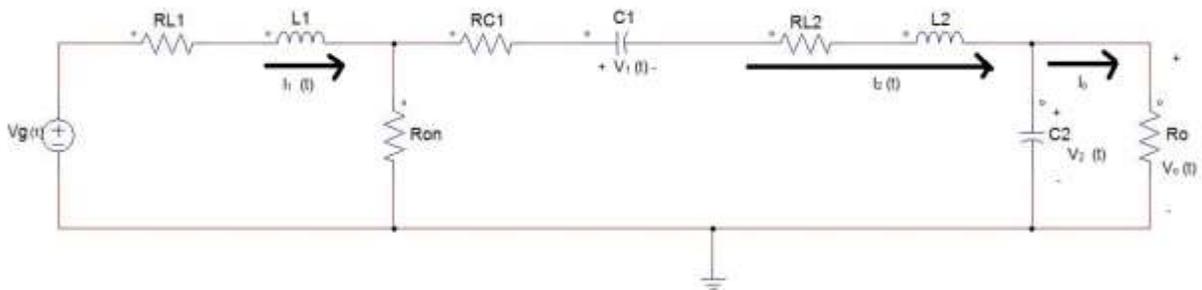


Figura 2. En el tiempo de encendido ( $t_{on}$ )

Y por último la condición de apagado ( $t_{off}$ ) donde su notación es  $(1-D)$ , durante este tiempo ocurre el efecto de conducción a través del diodo de alta frecuencia conocido como diodo shottky, provocando en este elemento una caída de voltaje en sentido inverso que se ve reflejado en la polaridad del voltaje de salida ( $V_o$ ) Figura 3. ◦

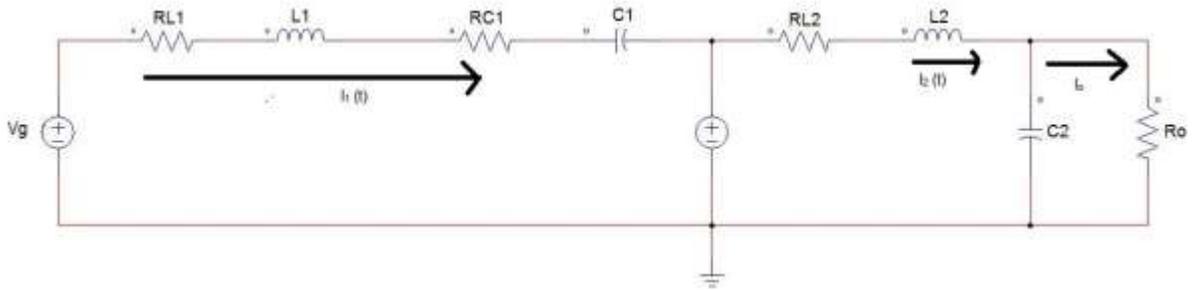


Figura 3. En el tiempo de apagado  $t_{off}$ .

#### 2.4.2. Ecuaciones para la topología del sistema Cuk

Considerando que un ciclo es el tiempo que dura transitar de encendido a apagado y su medición se denomina frecuencia por su constancia en un determinado periodo (ciclos por segundo), modulación de ancho de pulso PWM por sus siglas en inglés "Pulse Width Module", es la acción de modificar la duración del estado encendido y apagado durante el ciclo sin alterar su frecuencia, ciclo de trabajo es el tiempo que dura en un ciclo la condición de encendido ver ecuación 1, se le conoce como DC por sus siglas en inglés "Duty Cycle" [11].

$$DC = \frac{V_o}{(V_o + V_g)}$$

Ecuación 1. Cáculo de ciclo de trabajo de encendido

Siendo las variables de estado en el tiempo del vector  $x(t)$  que indica para este análisis las corrientes que fluyen por los inductores y los voltajes en los capacitores que representan a este vector

$$x(t) = \begin{bmatrix} i1(t) \\ i2(t) \\ V1(t) \\ V2(t) \end{bmatrix}$$

Ecuación 2. Variables de corriente y Voltaje

Analizando el circuito en el tiempo de encendido se obtiene  $u(t)$  las variables de entrada que representan el vector de control con respecto a la fuente y al voltaje en el diodo se obtiene como se muestra en la ecuación 3.

$$u(t) = \begin{bmatrix} Vg(t) \\ Vd \end{bmatrix}$$

*Ecuación 3. Función en el tiempo On*

La variable donde se agrupan los elementos pasivos como inductancias y capacitancias que vienen siendo la matriz principal del sistema representada con la letra  $k$  estas son las constantes del sistema esta se visualiza en la ecuación 4.

$$k = \begin{bmatrix} L1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C2 \end{bmatrix}$$

*Ecuación 4. Matriz global de la variable de elementos pasivos.*

Esta ecuación 5, es lineal y representa a una ecuación diferencial es para mostrar la multiplicación de la matriz  $A1$  y  $B1$  con las funciones  $x(t)$  y  $u(t)$  respectivamente comprendido en intervalo  $t_{on}$

$$k \left( \frac{d}{dx} \right) x(t) = A1x(t) + B1u(t)$$

*Ecuación 5. en el intervalo  $t_{on}$ .*

Entonces, considerando la función de elementos pasivos las matrices quedan de la siguiente manera como se muestra en la ecuación 6, ecuación 7; matriz A1 y B1 respectivamente:

$$A1 = \begin{bmatrix} (-RL1 - Ron) & Ron & 0 & 0 \\ Ron & (-Ron - Rc1 - RL2) & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{Ro} \end{bmatrix}$$

*Ecuación 6. Matriz 4x4 A1*

$$B1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

*Ecuación 7. Matriz 2x4 B1.*

En forma similar en esta ecuación 8, es para mostrar la multiplicación de la matriz A2 y B2 con las funciones x(t) y u(t), representadas en la ecuación 9 y la ecuación 10 respectivamente comprendido en intervalo  $t_{off}$

$$k \left( \frac{d}{dx} \right) x(t) = A2 * x(t) + B2 * u(t)$$

*Ecuación 8. En el tiempo de apagado  $t_{off}$ .*

Entonces tenemos las mismas funciones x(t) y u(t) pero en el tiempo de apagado; por lo tanto, estas matrices vienen quedando

$$A2 = \begin{bmatrix} (-RL1 - RC1) & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -RL2 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{Ro} \end{bmatrix}$$

*Ecuación 9. Valores que tiene la matriz A2.*

$$B2 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

*Ecuación 10. Valores que tiene la matriz B2.*

Al combinar el intervalo ton y toff se obtiene el comportamiento del Cuk al multiplicarlo por su ciclo de trabajo (DC) donde el tiempo de encendido es (D) y el tiempo de apagado es (1-D). y se obtiene dos matrices Ap y Bp.

$$k \left( \frac{d}{dx} \right) x(t) = Ap * x(t) + Bp * u(t)$$

*Ecuación 11. Ecuación combinada relacionada con el ciclo de trabajo.*

El vector Ap se muestra en la ecuación 12; es la multiplicación del vector A1 y A2 por su ciclo de trabajo en el tiempo de encendido y apagado respectivamente.

$$Ap = A1D + A2 (1 - D)$$

*Ecuación 12. Para obtener la matriz Ap.*

Queda de la siguiente forma la multiplicación del vector A1 por el ciclo de trabajo en el tiempo de encendido y del vector A2 por el tiempo de apagado como se ve en la Ecuación 123.

$$Ap = \begin{bmatrix} (DRC1 - RL1 - DRon - RC1) & DRon & D - 1 & 0 \\ DRon & (-RL2 - DRon - DRC1) & -D & -1 \\ 1 - D & D & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{Ro} \end{bmatrix}$$

*Ecuación 13. Obteniendo la matriz Ap.*

El Vector Bp es también la multiplicación del vector B1 y B2 por su ciclo de trabajo en el tiempo de encendido y apagado respectivamente, ver ecuación 14.

$$Bp = B1D + B2(1 - D)$$

*Ecuación 14. Para obtener la matriz Bp.*

Queda de la siguiente forma la multiplicación vector B1 por el ciclo de trabajo en el tiempo de encendido y B2 por el tiempo de apagado en la Ecuación 14.

$$Bp = \begin{bmatrix} 1 & D - 1 \\ 0 & 1 - D \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

*Ecuación 15. Para obtener la matriz Bp.*

Condición en estado estable

Cuando se homogeniza la Ecuación 10 se dice que está en equilibrio, matemáticamente hablando se iguala a cero; esto indica que está balanceada la ecuación como se aprecia la ecuación 16.

$$k \left( \frac{d}{dx} \right) x(t) = (Ap)x(t) + (Bp)u(t) = 0$$

*Ecuación 16. Homogenizando esta ecuación.*

Entonces el resultado se dará en valores de intensidad y voltaje, de acuerdo con sus respectivos elementos pasivos con los que opera el circuito; se obtiene de la siguiente manera la matriz inversa de Ap multiplicada por el vector Bp. Por lo tanto, la función es afectada por un signo negativo como se muestra en la ecuación 17 dando la matriz de resultados.

$$X = -(Ap)^{-1}BpU = \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ V1 \\ V2 \end{bmatrix}$$

*Ecuación 17. Matriz de resultados X.*

El Valor del Vector X se obtiene de la siguiente manera, ver ecuación 18;

$$X = \begin{bmatrix} \frac{(DVg - Vd + DVd)D}{\beta} \\ \frac{(DVg - Vd + DVd)(D - 1)}{\beta} \\ \frac{D^2[Vd(Ro + R_{L1} + R_{L2}) + VgR_{C1}] + D[Vg(Ro - R_{on} - R_{C1} + R_{L2}) - Vd(2Ro + R_{L1} + 2R_{L2}) - (Vg - Vd)(Ro + R_{L2})]}{\beta} \\ \frac{(DVg - Vd + DVd)Ro(D - 1)}{\beta} \end{bmatrix}$$

*Ecuación 18. Matriz de resultados X expandido.*

Donde el Vector U de entrada son los voltajes de la fuente y el diodo presentado por la letra griega  $\beta$  representada en la ecuación 19

$$\beta = R_o - 2R_oD + R_{L2} + D^2(R_{L1} + R_{L2} + R_o - R_{C1}) + DR_{on} + D R_{C1} - 2DR_{L2}$$

*Ecuación 19. Cálculo de beta.*

Con referencia a este trabajo de tesis las condiciones iniciales para el circuito de topología Cuk, son los siguientes: voltajes del panel ( $V_g$ ), Voltaje de Salida ( $V_o$ ), Amperaje de entrada Máxima ( $I_{sc}$ ), Corriente de salida supuesto ( $I_o$ ) Resistencia proporcional de carga o llamada también Impedancia ( $R_o$ ) la frecuencia de conmutación ( $F_s$ ) y el ciclo de trabajo (DC) determinando los valores en la condición de diseño:

Voltaje de entrada  $V_g$ : 37 V

Voltaje de Salida  $V_o$ : 13.8 V

Amperaje de entrada máximo: 8.44 A

Potencia de Salida  $P_o = 27.6$  W

Corriente de salida  $I_o = 2$  A

Resistencia de carga  $R_o = 6.7$  Ohms

Frecuencia de conmutación  $F_s = 100$  KHz

Ciclo de trabajo DC = 27.16 %

Con respecto al valor de  $R_o$  se encuentra con la ecuación de la ley de Ohm, ver ecuación 20

$$R_0 = \frac{V_0}{I_0}$$

*Ecuación 20. Ley de Ohm.*

### 2.4.3. Cálculo del toroide

El toroide es un devanado que al ser energizado fluye por él una corriente que produce un campo magnético, al desconectarla el campo así formado se revierte en forma de energía inversa al circuito.

Los parámetros por considerar en el cálculo del toroide son:

$\mu$  = Permeabilidad del material (características químicas; fundición del núcleo toroidal)

$\mu_0$  = Permeabilidad del aire =  $(0.4 * \pi) E^{-07}$  Tm/A

$\mu_r$  = Permeabilidad relativa del toroide ver tablas del fabricante

B = Inducción Magnética

H= Densidad del Flujo Magnético (Intensidad del Campo Magnético)

Le = longitud media del núcleo del toroide

N = Número de vueltas

$A_c$  = Área transversal (perfil de la sección del toroide)

L = Inductancia

La imagen que se muestra a continuación es un esquemático del perfil de un toroide con los parámetros a encontrar. El área del perfil denominado  $A_c$  del toroide se obtiene realizando un corte y viendo este corte de frente

Figura 4.

Las Ecuaciones para encontrar los diferentes parámetros como es tamaño y número de vueltas a considerar en el diseño de este toroide son:

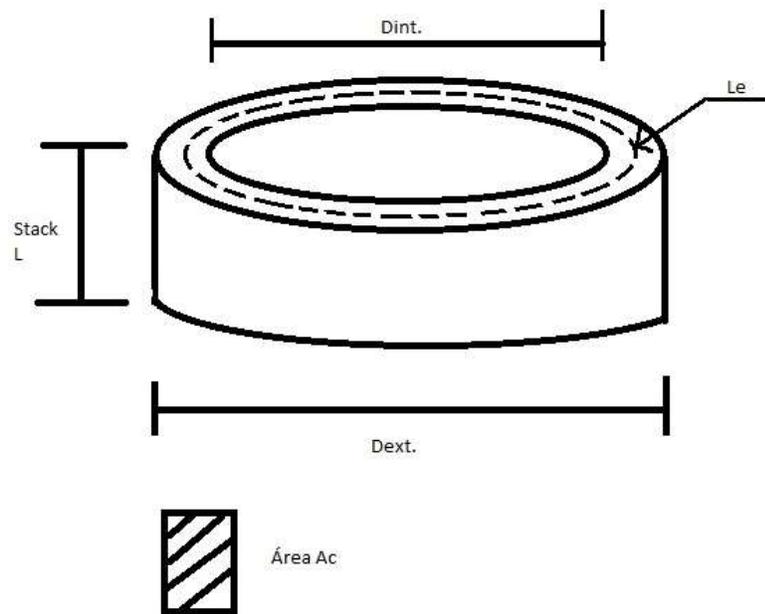


Figura 4. Imagen de un toroide.

La ecuación 21 es utilizada para encontrar la sección del perfil del toroide

$$A_c = \frac{D_{ext} - D_{int}}{2} (Stack)$$

Ecuación 21. Se utiliza para encontrar la sección del perfil del toroide.

Encontrar el valor de la permeabilidad final de un material específicamente teniendo la permeabilidad relativa de este material y la del aire.

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

*Ecuación 22. Permeabilidad del Material.*

Otra manera de encontrar  $\mu$  es con la relación del flujo magnético y densidad del flujo magnético [18] Ecuación 23.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

*Ecuación 23. Permeabilidad de un material.*

Luego se encuentra la longitud media del toroide que tiene las líneas punteadas indicada en la Figura 4 y la ecuación 24 proporciona el valor de  $L_e$  con la siguiente ecuación:

$$L_e = \frac{(D_{ext} + D_{int})}{2} \pi$$

*Ecuación 24. Longitud media del toroide.*

Ahora se encuentra el valor del factor de Inductancia como se representa en la ecuación 25 [17].

$$A_L = \frac{(0.4\pi\mu A_c)}{L_e}$$

*Ecuación 25. Factor de inductancia.*

Teniendo estos valores se calcula el número de vueltas con la inductancia ya obtenida y el factor de inductancia ver ecuacion 26 [17].

$$L = A_L N^2$$

*Ecuación 26. Para encontrar Inductancia.*

Para el valor mínimo del inductor que se desea utilizar se tiene que considerar el valor máximo de rizado de corriente que se debe permitir en el sistema [19]

#### 2.4.4. Calculo para inductancia y capacitancia de un Convertidor Cuk

La capacitancia es el efecto de almacenar una carga reteniéndola hasta que sea necesario transferir esa energía a otro elemento.

El rizo de corriente está presente en la corriente que pasa por el inductor, este influye al realizar una realimentación del sistema por medio de la corriente, se calcula el rizado de corriente en cada uno de los inductores, claro que el que influye en la salida va a ser el del inductor 2, pero se deben mantener ambos rizados al mínimo.

Rizo de corriente en el inductor  $L_1$ :  $\Delta_1 = 0.1 I_1$

*Ecuación 27. Rizo de corriente en el inductor  $L_1$ .*

Rizo de corriente en el inductor  $L_2$ :  $\Delta_2 = 0.15 I_2$

*Ecuación 28. Rizo de corriente en el inductor  $L_2$ .*

El rizo de voltaje está presente en la salida de nuestro circuito, siempre se busca minimizarlo debido a que muchos equipos no permiten voltajes con altas variaciones, el mismo es inversamente proporcional a la frecuencia de conmutación y el valor del capacitor se calcula para minimizar el rizado del voltaje en cada uno de ellos [19].

Rizo en el capacitor  $C_1$ :  $\delta_1 = 0.1 V_1$

*Ecuación 29. Rizo en el capacitor  $C_1$ .*

Rizo en el capacitor  $C_2$ :  $\delta_2 = 0.2 V_2$

*Ecuación 30. Rizo en el capacitor  $C_2$ .*

Teniendo el valor de la inductancia se puede hallar el capacitor requerido con las ecuaciones correspondientes:

$$L_1 = \frac{VgD}{2 \Delta_1 F_s}$$

*Ecuación 31. Cálculo del valor de la bobina  $L_1$ .*

$$L_2 = - \frac{(V_1 + V_o)D}{2 \Delta_2 F_s}$$

*Ecuación 32. Cálculo del valor de la bobina  $L_2$ .*

$$C_1 = -\frac{I_2 D}{2 \delta_1 F S}$$

*Ecuación 33. Cálculo de capacitor C1.*

$$C_2 = \frac{\Delta_2}{8 \delta_2 F S}$$

*Ecuación 34. Cálculo de capacitor C2.*

## 2.5. Relación de impedancia del sistema Cuk con la Impedancia de carga

La importancia que tiene el análisis de la impedancia de la entrada de la topología del sistema Cuk es que esta impedancia representa la carga del panel fotovoltaico. Esta carga en el panel se restringe a ciertos valores en el punto de máxima eficiencia (PMP).

Analizando el voltaje en el tiempo on (dT<sub>s</sub>) ver figura 2

se obtiene

$$V_g = V_{L1} + V_{C1} + V_D$$

*Ecuación 35. Análisis del voltaje total del circuito*

donde  $V_D$  es el voltaje en el diodo

$$V_D = V_{L2} + V_{C2} + V_{R0}$$

*Ecuación 36. Análisis del voltaje total del circuito*

sustituyendo Ec. 35 en Ec. 34

$$V_g = V_{L1} + V_{C1} + V_{L2} + V_{C2} + V_{R0}$$

*Ecuación 37. Análisis del voltaje total del circuito*

Despejando  $V_{L2}$  se obtiene

$$V_{L2} = V_g - (V_{L1} + V_{C1} + V_{C2} + V_{R0})$$

*Ecuación 38. Despeje de  $V_{L2}$ .*

Para el tiempo on se obtiene sustituyendo  $dT_s$

$$V_{L2} = [V_g - (V_{L1} + V_{C1} + V_{C2} + V_{R0})]dT_s$$

*Ecuación 39. Voltaje presente en el circuito.*

Resultado en el tiempo  $t_{on}$

$$V_{L2} = [-(V_{C1})]dT_s$$

*Ecuación 40. Análisis en el tiempo on del voltaje*

Para el tiempo  $t_{off}$  (1-d)  $T_s$  analizando se obtiene

$$V_{L2} = (V_D + V_{C2} + V_0)(1 - d)T_s$$

*Ecuación 41. Análisis en el tiempo off del voltaje*

Igualando el voltaje en el tiempo on y en el tiempo off del inductor dos ( $V_{L2}$ )

$$-V_{C1}dT_S = V_0(1 - d)T_S$$

*Ecuación 42. Igualando voltajes tiempo on-off*

Se obtiene la siguiente ecuación, donde el signo negativo se refiere a que en esta topología el voltaje de salida es negativo

$$V_g = -\frac{(1 - d)}{d}V_{R0}$$

*Ecuación 43. Voltaje de entrada al sistema Cuk con respecto a la carga*

Ahora realizando un análisis similar para la corriente Figura 3.

$$I_g = I_{L1} + I_Q + I_{C1}$$

*Ecuación 44. Corriente de entrada al sistema*

Analizando el nodo  $I_{C1}$

$$I_{C1} = I_D + I_{L2}$$

*Ecuación 45. Corriente que pasa por estos Elementos*

Analizando nodo  $I_{L2}$

$$I_{L2} = I_{C2} + I_{R0}$$

*Ecuación 46. Corriente de salida del inductor L2*

Sustituyendo ec.43 en ec.46

$$I_g = I_{L1} + I_Q + I_D + I_{L2}$$

*Ecuación 47. Sumatoria total de corriente*

Despejando  $I_{L2}$

$$I_{L2} = I_g - (I_{L1} + I_Q + I_D)$$

*Ecuación 48. Corriente que pasa por el Inductor L2*

Para la corriente en el tiempo  $on$   $dT_s$  despejando la ecuación 43.

$$I_{L2} = [I_g - (I_{L1} + I_Q + I_D)]dT_s$$

*Ecuación 49. Corriente en el tiempo  $on$*

Análisis de todos los componentes en el sistema Cuk

$$I_{L2} = [I_g - (I_{L1} + I_Q + I_{C2} + I_{R0})]dT_s$$

*Ecuación 50. Corriente por los elementos en el tiempo  $on$*

Se obtiene la corriente en el tiempo  $t_{on}$

$$I_{L2} = (I_g - I_{R0})dT_s$$

*Ecuación 51. Corriente en el tiempo  $t_{on}$*

Para la corriente en el tiempo  $t_{off}$   $(1-d)T_s$  ver Figura 3

$$(I_{L2} = [I_g - (I_{C2} + I_{RO})] (1 - d)T_S$$

*Ecuación 52. Corriente en el tiempo  $t_{off}$*

Igualando la corriente en el tiempo  $t_{on}$  y en el tiempo  $t_{off}$  del inductor dos ( $I_{L2}$ )

$$(I_g - I_{R0})dT_S = [I_g - (I_{C2} + I_{RO})] (1 - d)T_S$$

*Ecuación 53. Corrientes en el tiempo  $t_{on}$ - $t_{off}$*

se obtiene la ecuación

$$I_g = \frac{d}{(1 - d)} I_{R0}$$

*Ecuación 54. Corriente de entrada en relación a la salida*

Aplicando la ley de Ohm

$$R_g = \frac{V_g}{I_g} = \frac{\frac{(1 - d)}{d} V_{R0}}{\frac{d}{(1 - d)} I_{R0}}$$

*Ecuación 55. Relación de ley de Ohm*

Se tiene este resultado para sistemas con topología tipo Cuk

$$R_g = \left( \frac{(1-d)^2}{d} \right) R_0$$

*Ecuación 56. Relación de impedancia total respecto a la carga*

La literatura dice que un sistema Cuk se comporta como Buck-Boost; como un sistema reductor- elevador al mismo tiempo.

## 2.6. Simulación de circuitos eléctricos con software

En la actualidad se manejan ciertos programas especializados para análisis de circuitos que tienen algoritmos de simulación, los más conocidos son: el MULTISIM [18], SIMULINK [19], OrCAD [20], PsCAD [21], PROTEUS [22], ALTIUM [23], PLECS [24], en esta tesis se presenta la simulación con el programa Psim [25] que tiene la característica de poder trabajar con paneles fotovoltaicos modulares de forma virtual.

La versión utilizada de este software es la versión 12.0.1 con licencia de usuario final sin caducidad, con el módulo activo de energías renovables, módulo de control digital y módulo de simulación de motores

## 3. Metodología

### 3.1. Introducción

Durante el proceso de investigación se usan herramientas de búsqueda, principalmente el uso de internet en fuentes confiables, para agilizar el proceso de adquisición de información disponible en el estado del arte, ayudando en el estudio de las diferentes topologías y desarrollos existentes.

Parte importante en el trabajo de investigación es documentar las actividades de manera que reflejen los avances obtenidos durante cada parte del proceso, para lo cual es útil contar con software especializado en manipulación de variables tal como pueden ser las hojas de cálculo Excel o Libre office [26], Matlab [19], Octave [27] y Scilab [28].

### 3.2. Aplicación de ecuaciones utilizando Scilab.

A continuación el programa desarrollado desde la ecuación uno a la diecisiete planteadas con anterioridad para realizar el cálculo de los elementos pasivos a utilizar en un sistema de topología Cuk realizado con el software en Scilab, los títulos en el programa se ha modificado a color azul para distinguirlos de las instrucciones ver Anexo B.

### 3.3. Caracterización del panel solar en Psim

El panel físico que se utilizará es el que se presenta en la Figura 5 con todas las características del fabricante [29]. A continuación, en la figura 6 se presenta el modelo esquemático para la simulación del comportamiento de este panel fotovoltaico en Psim.



Figura 5. Imagen del modelo del panel fotovoltaico S72PC-315.

Evaluar cómo el cambio de intensidad de la luz afecta la potencia de salida y potencia máxima

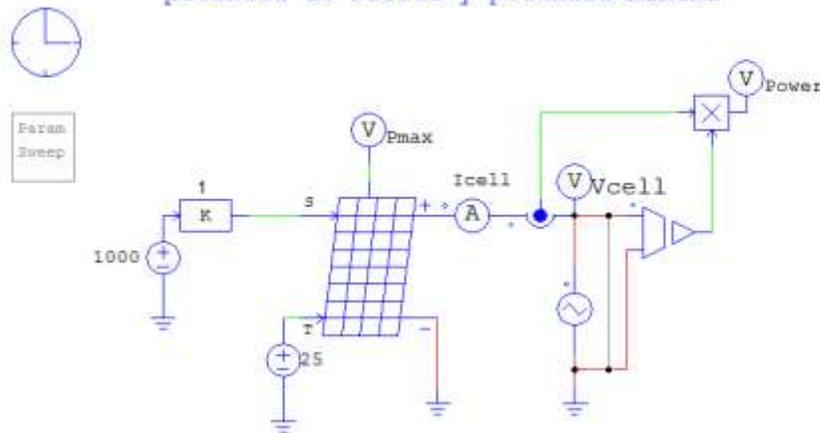


Figura 6. Evaluación del panel.

Los valores insertados en el software Psim con las características del panel fotovoltaico real, se muestran en la Figura 7. En la sección de modelo físico; donde

se visualizan estos valores, salen de los parámetros del panel fotovoltaico en los datos de placa visto en la parte posterior de éste.

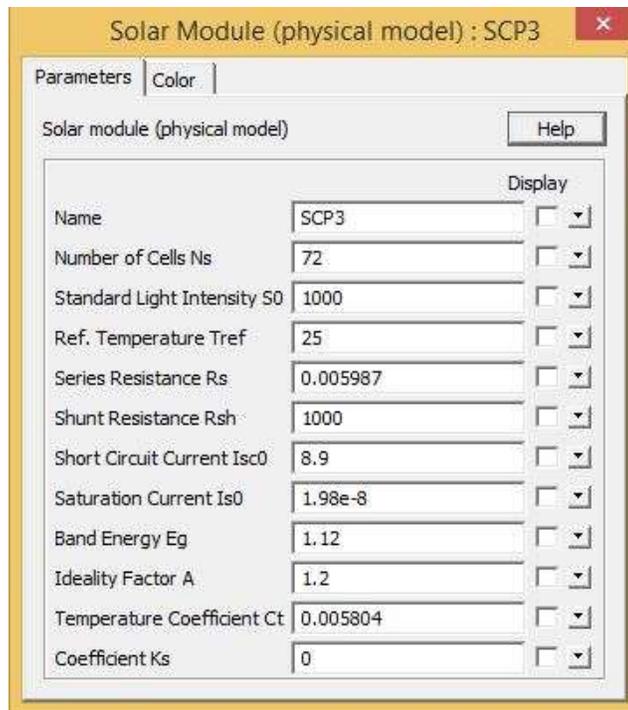


Figura 7. Datos insertados en Psim.

En la figura 8 se muestra el comportamiento después de realizar la simulación del panel fotovoltaico con los parámetros de Icell en amperes, Power en Watts (W) y Vcell está las unidades en Volts (V)

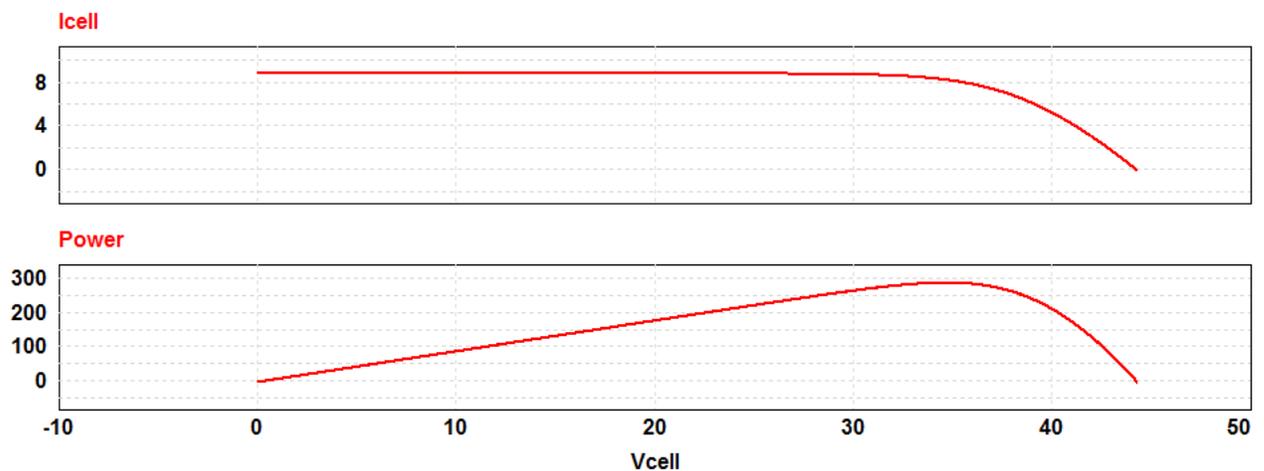


Figura 8. Imagen gráfica de comportamiento del panel fotovoltaico S75PC-315.

### 3.4. Simulación Psim con valores calculados

La figura 9 representa un circuito de topología Cuk con la implementación de Perturbar y Observar con los valores de elementos calculados

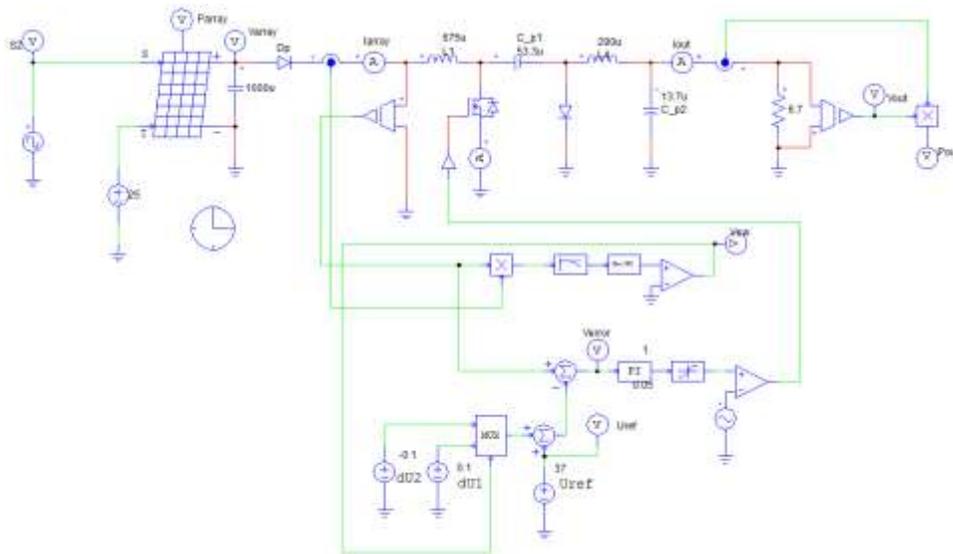


Figura 9. Esquemático de la topología Cuk valores calculados.

### 3.5. Simulación con valores reales del circuito

En la Figura 10 se observa el circuito de topología Cuk con la implementación de perturbar y observar con los valores de elementos físicos reales.

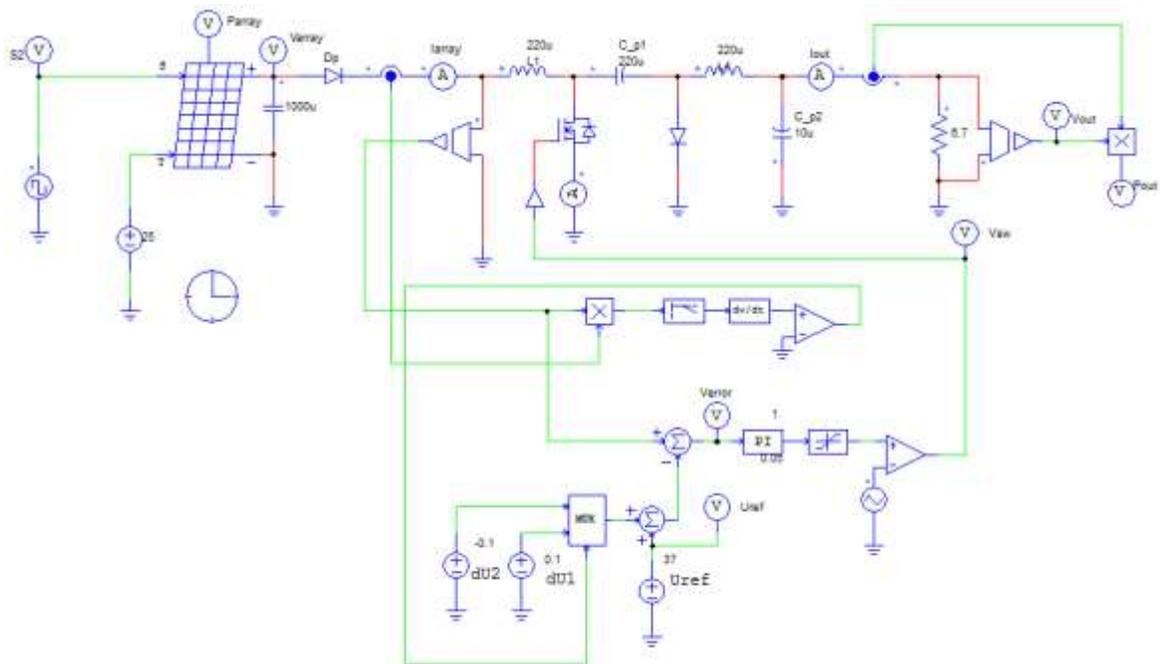


Figura 10. Imagen que visualiza el voltaje y corriente de salida elementos físicos.

### 3.6. Algoritmo y programa MPPT

El algoritmo de perturbar y observar, en la Figura 11, muestra un pseudocódigo de la rutina a realizar para obtener el programa. La tabla 2 nos muestra las variables utilizadas. Imagen tomada de [30]. Esto sirve para tener una comprensión de los pasos a ejecutar con cualquier lenguaje de programación. Se utilizará un microcontrolador de la marca Microchip, de la familia PIC18F4550, este se programará para que ejecute las instrucciones del algoritmo MPPT en campo. El compilador utilizado se llama MikroC [31] y el código se detalla en el Anexo C; la tabla 2 muestra variables usadas

Nomenclatura	Variable Algoritmo	Compilador MikroC
Potencia del panel	$P_P$	PP
Voltaje del panel	$V_P$	VP
Intensidad del panel	$I_P$	IP
Potencia de la carga	$P_A$	PA
Voltaje de la carga	$V_A$	VPA
Intensidad de la carga	$I_A$	VPA
ciclo de trabajo	$D$	DC
Diferencia de ciclo de trabajo	$\Delta D$	DELTADC

Tabla 2. Nomenclatura utilizada en las variables del Algoritmo y en el compilador

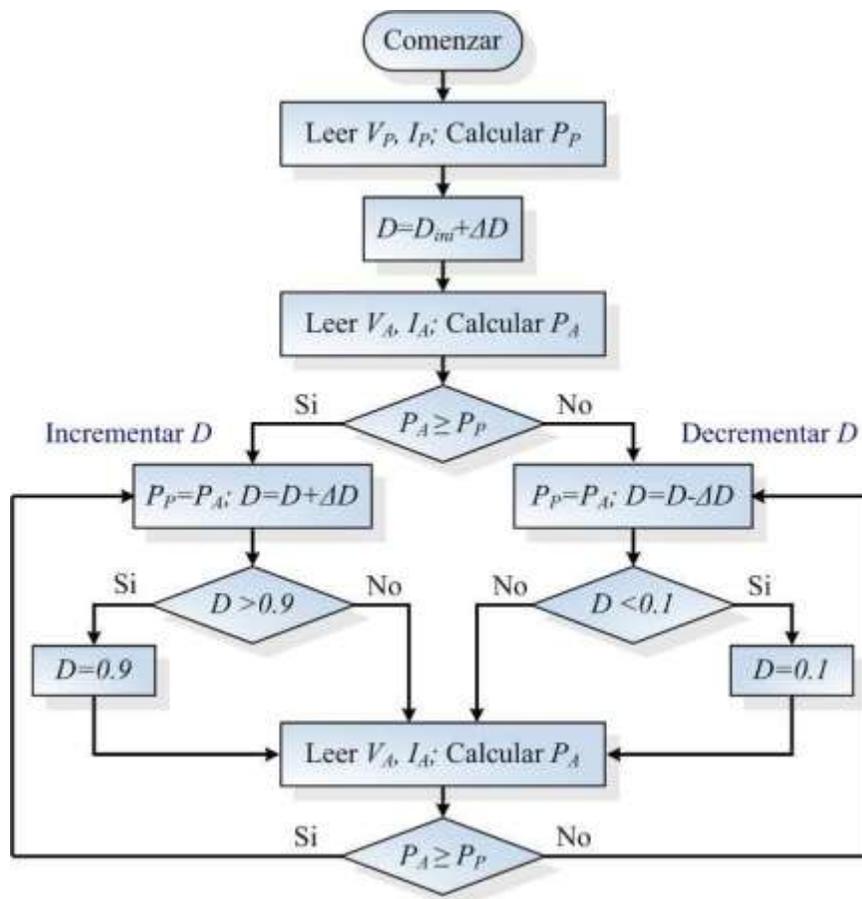


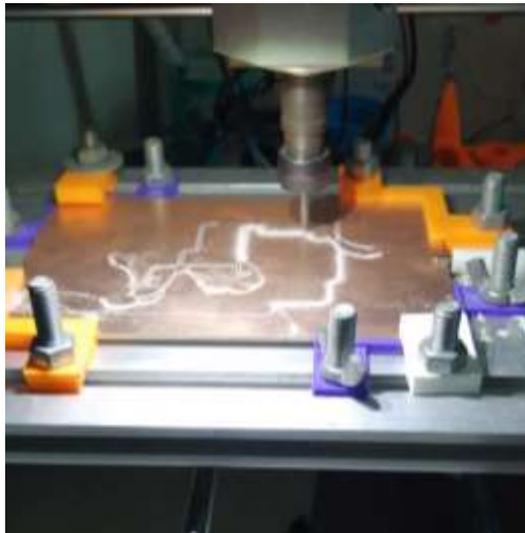
Figura 11. Imagen del algoritmo de perturbar y observar.

MikroC [31], es un compilador de la empresa Mikroelectrónica el cual genera código hexadecimal para cargarlo en el PIC18F4550.

### 3.7. Desarrollo de prototipo PCB

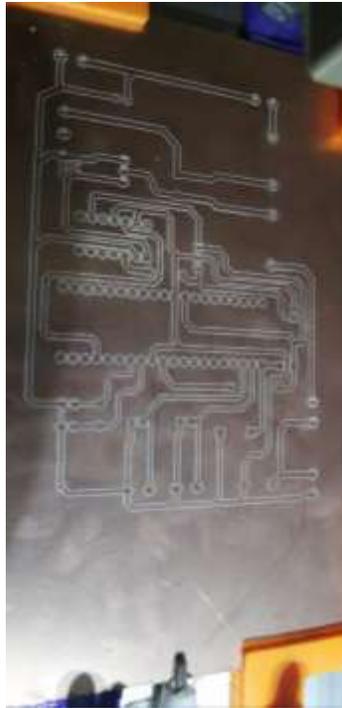
Para elaborar el convertidor de topología Cuk se usaron materiales existentes en el mercado. La tarjeta PCB integra un microcontrolador PIC18F4550 como elemento principal para el control PWM de un transistor tipo MOSFET IRF640, a través de un driver IR2110, un Diodo Schottky de alta frecuencia, dos capacitores electrolíticos, de 220uF y 10uF respectivamente, y dos devanados toroidales con núcleo de polvo hierro PE-53116NL de n220uH.

Un equipo CNC se emplea para el maquinado de las pistas de la tarjeta PCB a utilizar en el ensamble de los componentes, como se muestra en la figura 12. A continuación, se muestra en forma gráfica, En una lista, en el Anexo A, se detallan las partes utilizadas en la construcción del circuito.



*Figura 12. Inicio de maquinado de PCB.*

En las figuras 13 y 14, el avance del proceso de acabado del PCB.

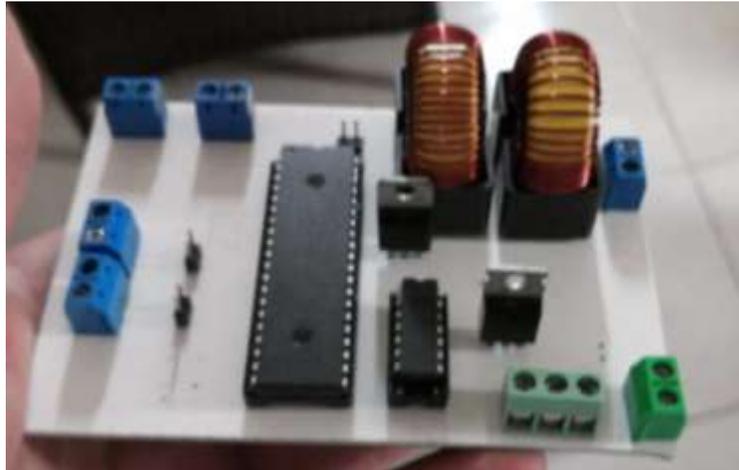


*Figura 13. Prototipo de PCB*



*Figura 14. Implementación con componentes.*

En la figura 15 observamos la tarjeta electrónica con los componentes ensamblados.



*Figura 15. Prototipo final.*

## 4. Resultados

### 4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de operación del convertidor Cuk obtenidos mediante simulación con el software Psim. Se muestran dos condiciones de operación: operación ideal y la operación real. Los resultados incluyen grafica del comportamiento de las tensiones y corrientes de salida del convertidor, para condiciones de valores reales e ideales, y la comparativa entre ellos.

### 4.2. Resultados de simulación con elementos ideales

En la Figura 16 se visualiza el voltaje de salida del convertidor, con su unidad de medida en Volts (V) y corriente de salida en Amperes (A). Esta simulación incluye a los elementos calculados mediante el análisis de las ecuaciones de estado.

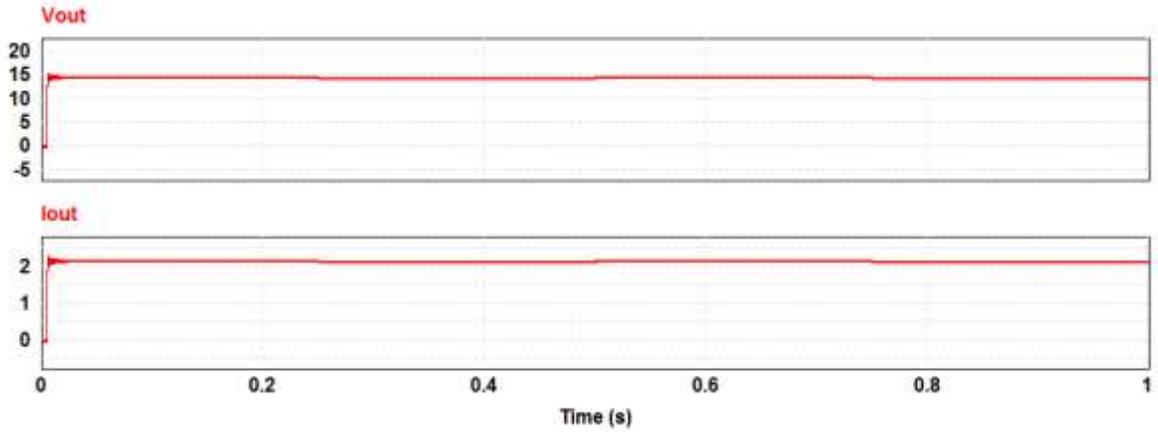


Figura 16. Voltaje e intensidad de salida del Cuk hacia la carga.

La figura 17 muestra el comportamiento de Potencia del panel fotovoltaico en Watts y la potencia de salida de la carga, con la misma unidad de medición, cuando la irradiancia sobre el panel se perturba durante en un determinado tiempo en segundos (s) por un efecto en la condición solar. La irradiancia cambia de 800 a 200 W/m<sup>2</sup>

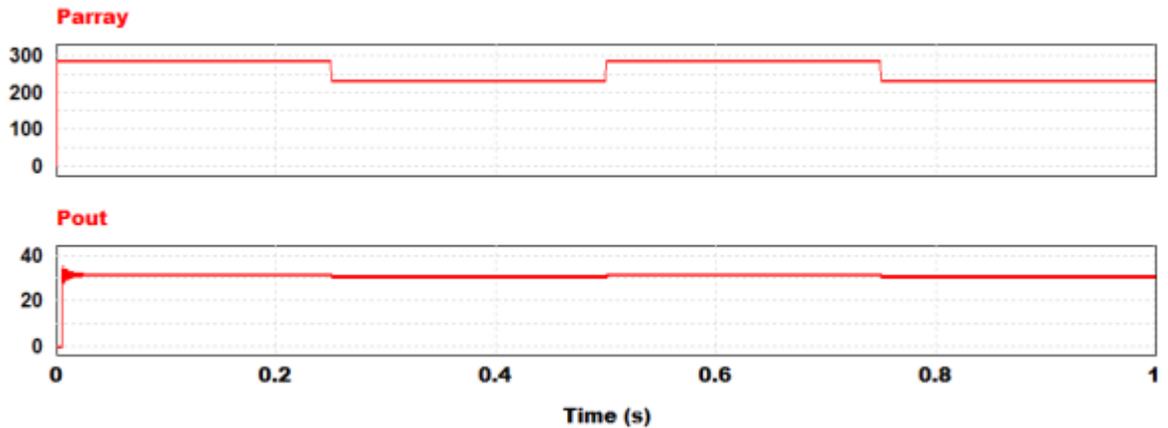


Figura 17. Relación de potencia del panel fotovoltaico y potencia de salida.

#### 4.3. Simulación en Psim con valores reales utilizados

En la Figura 18 se muestran los valores de voltaje en volts (V) y corriente a la salida del convertidor Cuk en Amperes (A) empleando los elementos físicos que se colocaran en la tarjeta PCB.

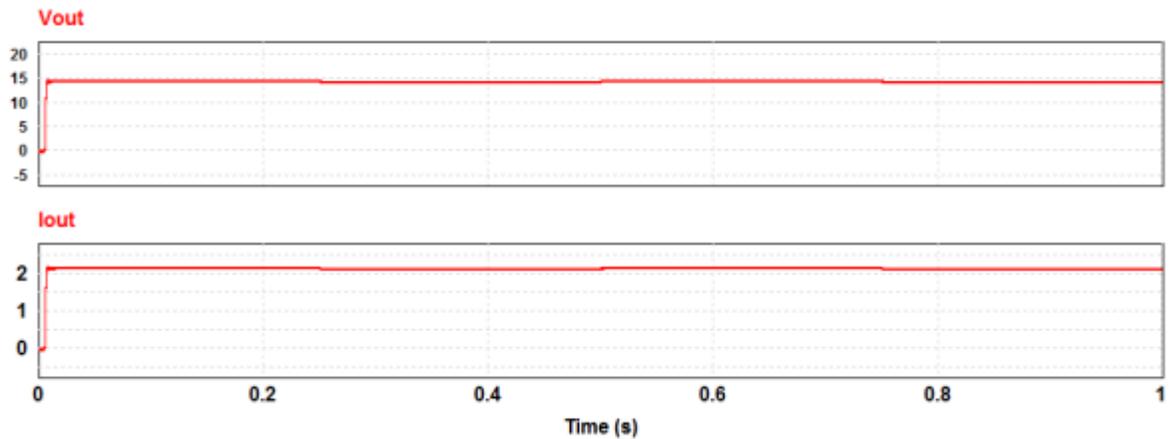


Figura 18. Salida voltaje e intensidad del Cuk hacia la carga.

La Figura 19 muestra el comportamiento de la potencia del panel fotovoltaico en Watts y la potencia de la carga con la misma unidad de medida; considerando la utilización de los elementos reales.

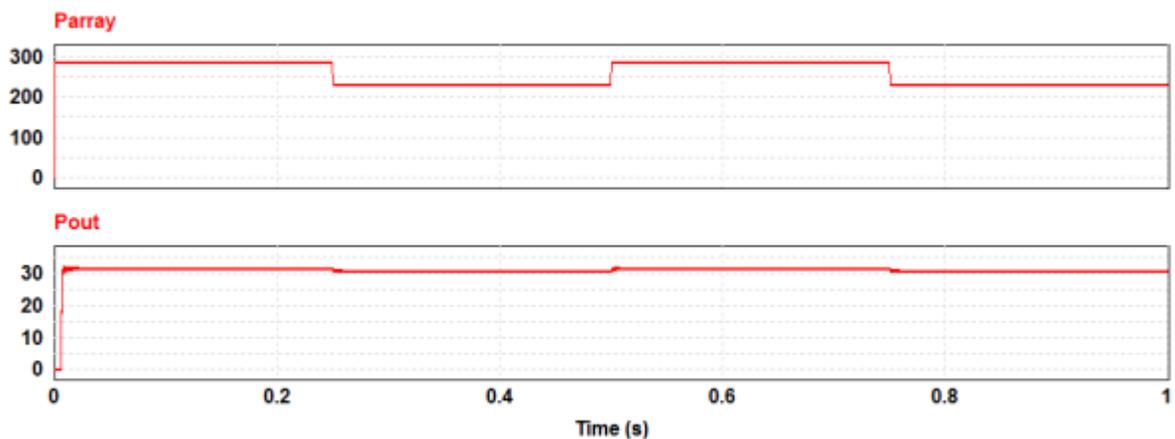


Figura 19. Relación de potencia del panel fotovoltaico y potencia de salida.

#### 4.4. Comparativa entre resultados

La comparativa entre estos resultados es la siguiente:

El voltaje y la corriente se mantienen en las condiciones de diseño al igual que la potencia de salida del convertidor Cuk con la carga propuesta de 6.7 Ohms, tanto en la simulación con elementos ideales o reales, en la tabla 3 se muestra los componentes utilizados en la simulación en condiciones ideales como condiciones reales.

Componentes pasivos	Operación ideal	Operación real
	Valores calculados en Scilab	componentes existentes
L1	675uH	220uH
L2	290uH	220uH
C1	53.3uF	220uF
C2	13.7uF	10uF

Tabla 3. Valores de elementos pasivos Calculados y componentes existentes.

En la figura 20, 21 y 22 se muestra el modelo físico del panel con los valores de Potencia Máxima, Voltaje Máximo e Intensidad máxima que adquiere el panel fotovoltaico con las diferentes irradiancias, obtenidas con el software Psim en la configuración del modelo físico del panel fotovoltaico.

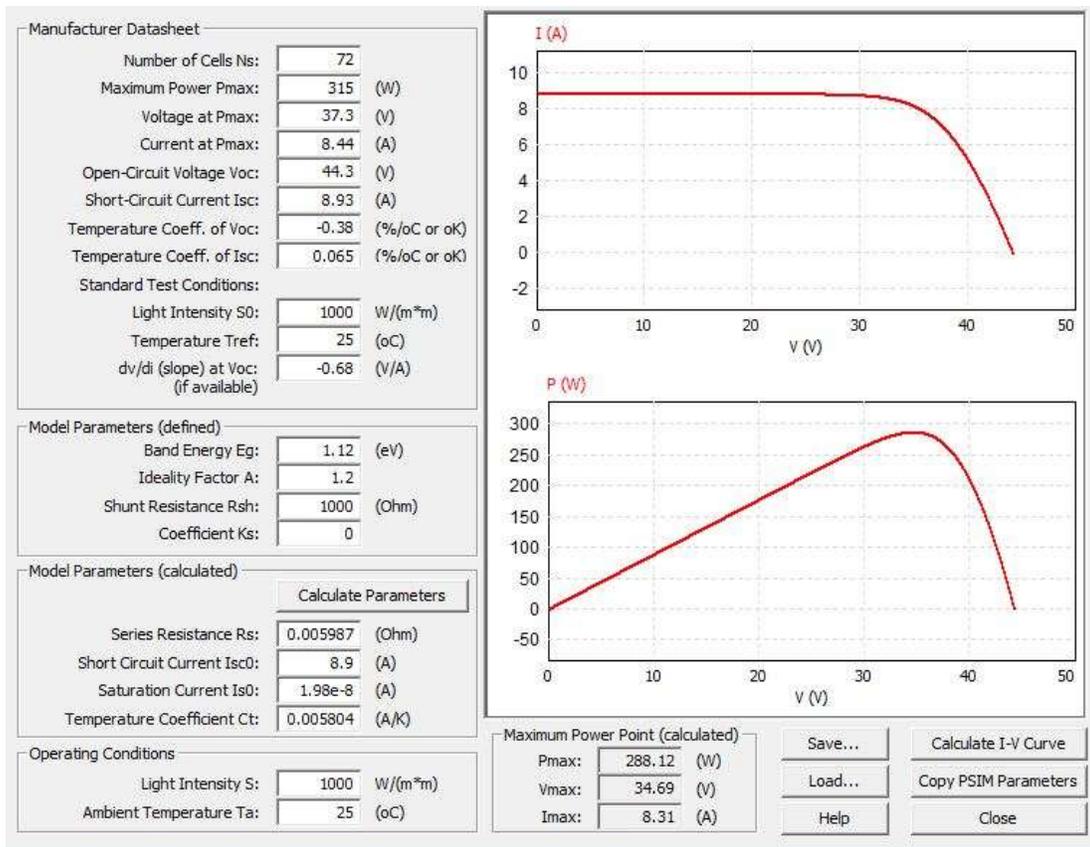


Figura 20. Modelo físico del panel con una Irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>

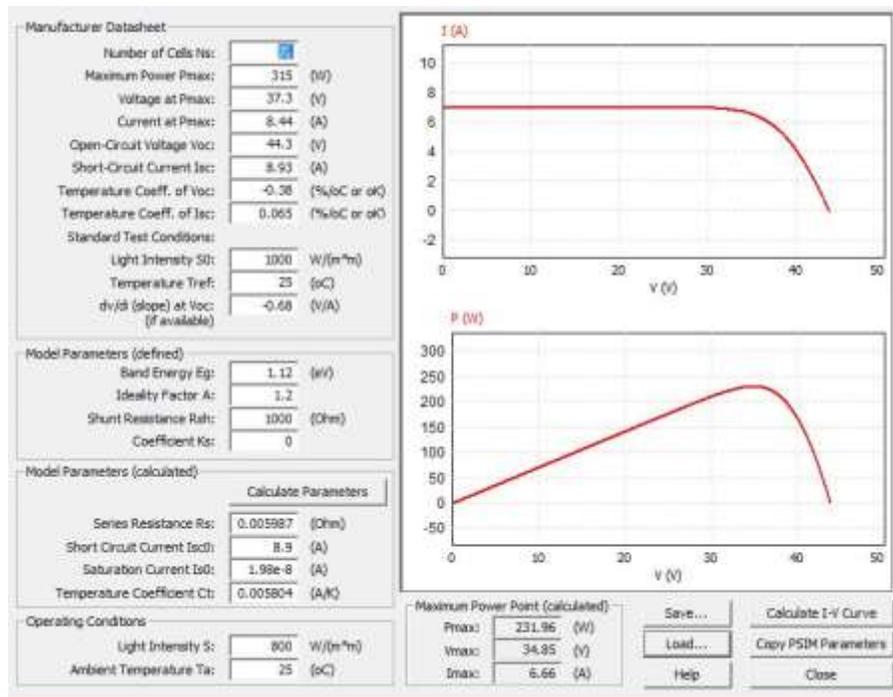


Figura 21. Modelo físico del panel con una irradiancia de 800 W/m<sup>2</sup>

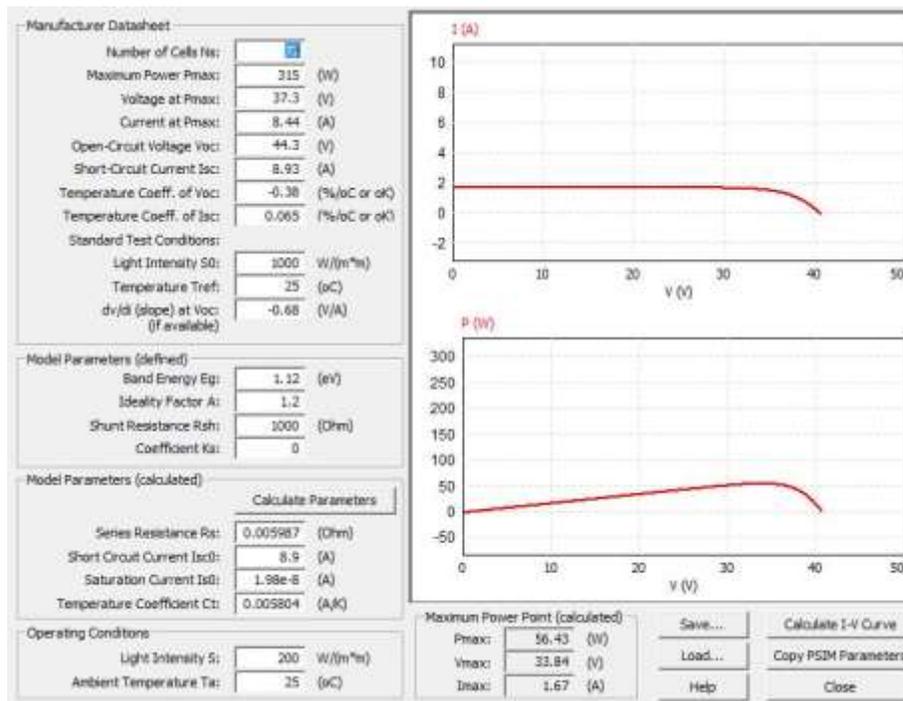


Figura 22. Modelo físico del panel con una irradiancia de 200 W/m<sup>2</sup>

En la figura 23 se muestra el cambio en la irradiancia que incide sobre el panel, desde 1000 hasta 800 W/m<sup>2</sup>. La simulación del punto de operación de la potencia entregada por el panel muestra que bajo esta perturbación se sigue operando en el MPP.

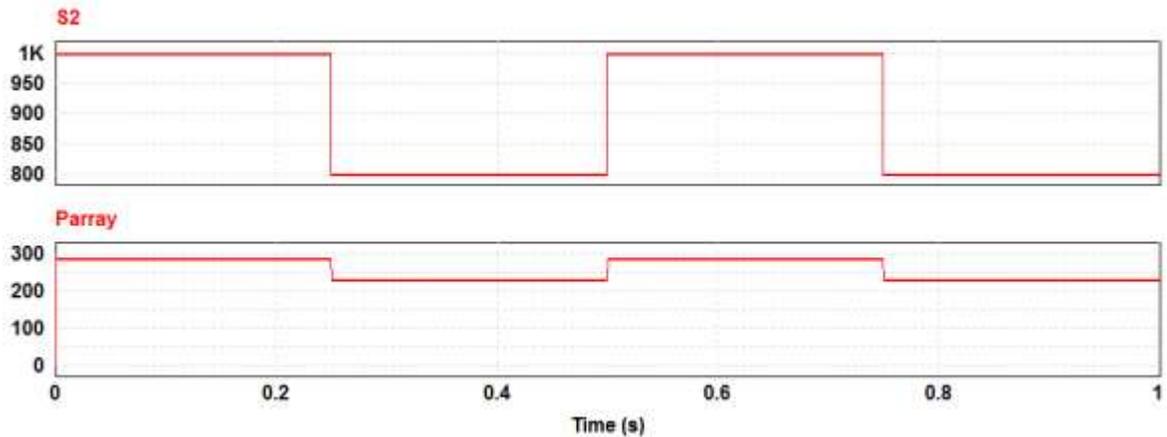


Figura 23. Irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup> y potencia del panel fotovoltaico

En la figura 24 se nos muestra que continúa operando el panel en su punto de MPP, pero ahora con un decremento en la irradiancia de 800 a 200 W/m<sup>2</sup>.

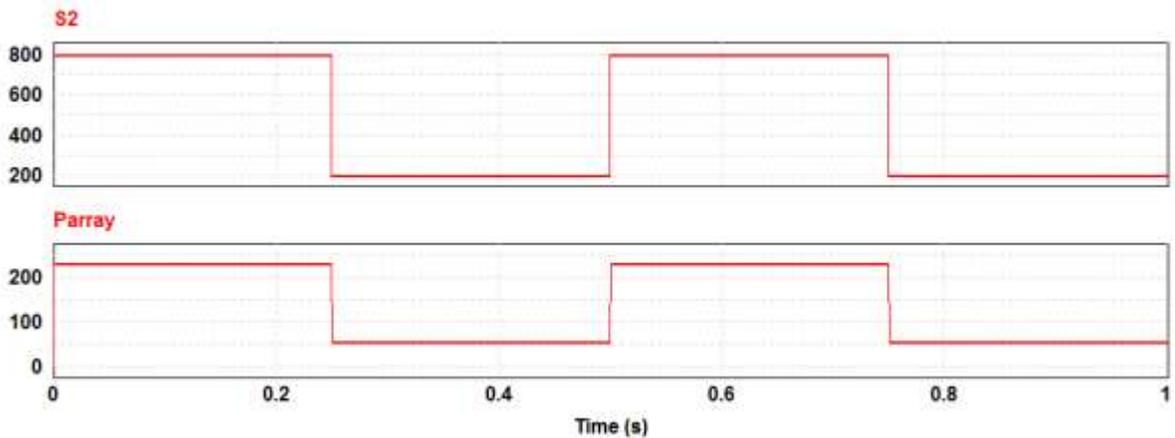


Figura 24. Irradiancia de 800 W/m<sup>2</sup> y potencia del panel fotovoltaico

Todo lo anterior se corrobora mediante la observación de los datos del MPP descritos en las figuras 23 y 24. Podemos observar que la rapidez de respuesta del sistema es suficiente para cambios en las condiciones de irradiancia con las que opera el panel.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se describe el diseño de un convertidor DC-DC Cuk, el cual opera bajo el algoritmo de perturbar y observar, para asegurar el funcionamiento de un panel fotovoltaico en su punto de transferencia de máxima potencia.

Durante del desarrollo de este proyecto de tesis se investigó el funcionamiento del convertidor DC-DC Cuk mediante la revisión del estado del arte determinando los criterios de diseño del convertidor. Se validó la topología del convertidor DC-DC Cuk mediante simulaciones en el software Psim, verificando su correcto funcionamiento.

Mediante el programa Scilab se diseñó una herramienta para el cálculo automático de los componentes del sistema.

Adicionalmente, se detalla el diseño de los toroides considerando la geometría y el material del núcleo, permitiendo con esto dejar documentación de referencia y un precedente para futuros trabajos.

Se implementó el algoritmo de perturbar y observar, para asegurar la operación del panel en el MPP, en un microcontrolador de la familia PIC18F4550. Este es usado para controlar el ciclo de trabajo, a través de unos drivers, del MOSFET del circuito convertidor Cuk. De esta forma modificamos la resistencia de entrada del convertidor, la cual representa la carga del panel fotovoltaico, y aseguramos la máxima transferencia de energía. Se presenta el análisis de como la resistencia de entrada es dependiente del ciclo de trabajo.

Se diseñó y construyó un prototipo en PCB del sistema para las primeras pruebas experimentales.

### 5.1 Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro se plantea la evaluación del comportamiento en campo del convertidor DC-DC de topología Cuk, que se desarrolló en esta tesis, bajo diferentes condiciones de operación: variación de irradiancia, temperatura y diferentes tipos de carga.

La medición de eficiencia en la conversión de energía también es otro tema de gran relevancia a considerarse en investigaciones futuras.

## Referencias

- [1] Smartbitt, «Radiación solar,» 2017. [En línea]. Available: <http://energiasolar.smartbitt.com/radiacion-solar/>. [Último acceso: 05 2019].
- [2] G. d. Chile, «Generadoras de Chile,» [En línea]. Available: <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-eolica#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20e%C3%B3lica%20es%20una,del%20viento%20en%20energ%C3%ADa%20mec%C3%A1nica..> [Último acceso: 02 2019].
- [3] Twenergy, «Twenergy Geotermica,» [En línea]. Available: <https://twenergy.com/energia/energia-geotermica/>. [Último acceso: 02 2019].
- [4] T. hidraulica, «Twenergy hidraulica,» [En línea]. Available: <https://twenergy.com/energia/energia-hidraulica/>. [Último acceso: 02 2019].
- [5] P. U. C. d. Chile, «Evolución de Costos ERNC,» 06 2012. [En línea]. Available: [http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/D.\\_Mare.html](http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/D._Mare.html). [Último acceso: 02 2019].
- [6] G. Copesa, «¿Qué es la energía de la biomasa y en qué región de Chile se utiliza?,» [En línea]. Available: <http://www.icarito.cl/2009/12/que-es-la-energia-de-la-biomasa-y-en-que-region-de-chile-se->

utiliza.shtml/#:~:text=Energ%C3%ADa%20de%20biomasa,ser%20usada%20directamente%20como%20combustible.. [Último acceso: 02 2020].

- [7] Acciona, «Energía solar fotovoltaica,» [En línea]. Available: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/>. [Último acceso: 02 2009].
- [8] S. d. energía, «NOM-001-SEDE-2012,» *Diario oficial de la federación*, pp. [http://www.upt.edu.mx/Contenido/Certificaciones/pdf/iso/2/ReqLegales/Federal/06\\_NOM-001-SEDE-2012.pdf](http://www.upt.edu.mx/Contenido/Certificaciones/pdf/iso/2/ReqLegales/Federal/06_NOM-001-SEDE-2012.pdf), 2012.
- [9] E. P. Organisation, «Espacenet,» [En línea]. Available: <https://worldwide.espacenet.com/>. [Último acceso: 02 2020].
- [10] DeltaVolt, «Paneles Solares de Silicio,» [En línea]. Available: <https://deltavolt.pe/energia-renovable/energia-solar/panel-solar-cristalino>. [Último acceso: 03 2019].
- [11] F. J. L. / E. R. Segura, «ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR CUK PARA ILUMINACIÓN LED,» n° 120, p. Pistas educativas, 2016.
- [12] ScienceDirect, «A review of global maximum power point tracking techniques of photovoltaic system under partial shading conditions,» [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118303149?via%3Dihub>. [Último acceso: 03 2019].

- [13] S. d. gobernación, «PROY-NOM-008-SCFI-2017,» 24 07 2018. [En línea]. Available: PROY-NOM-008-SCFI-2017 . [Último acceso: 03 2019].
- [14] C. M. M. Herrera, «Seguidor de punto de máxima potencia de un sistema fotovoltaico con redes neuronales,» de *Seguidor de punto de máxima potencia de un sistema fotovoltaico con redes neuronales*, Mérida, [https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1366/1/PCER\\_D\\_2016\\_Tesis\\_Carlos\\_Morcillo.pdf](https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1366/1/PCER_D_2016_Tesis_Carlos_Morcillo.pdf), 2016.
- [15] INEGI, «Información de México para niños,» [En línea]. Available: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/territorio/clima.aspx#:~:text=La%20temperatura%20media%20anual%20es,en%20el%20mes%20de%20enero.> [Último acceso: 09 2019].
- [16] M. H. Rashid, *Electrónica de potencia circuitos dispositivos y aplicaciones* (2da. Edición), Prentice hall hispanoamerica S.A., 1995.
- [17] Magnetics, «Design Guides,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.mag-inc.com/Design/Design-Guides>. [Último acceso: 09 2019].
- [18] N. Instruments, «Multisimlive,» National Instruments, 2020. [En línea]. Available: <https://www.multisim.com/>. [Último acceso: 10 01 2020].
- [19] Mathwork, «<https://es.mathworks.com/products/simulink.html>,» Mathwork, 2020. [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>. [Último acceso: 10 01 2020].

- [20] I. Cadence Design Systems, «Orcad,» [En línea]. Available: <https://www.orcad.com/>. [Último acceso: 10 01 2020].
- [21] D. p. M. H. I. Ltd., «PSCAD,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.pscad.com/>. [Último acceso: 10 01 2020].
- [22] L. Electronics, «Proteo,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.labcenter.com/>. [Último acceso: 10 01 2020].
- [23] A. Limited, «Altium,» [En línea]. Available: <https://www.altium.com/es>. [Último acceso: 11 01 2020].
- [24] P. e. e. software, «Plexim,» 2020, [En línea]. Available: <https://www.plexim.com/products/plecs>. [Último acceso: 11 01 2020].
- [25] P. Inc, «Psim,» Powersim Inc. , 2020. [En línea]. Available: <https://powersimtech.com/try-psim/>. [Último acceso: 11 01 2020].
- [26] Apache, «OpenOffice,» Apache, 2020. [En línea]. Available: <https://www.openoffice.org/es/>. [Último acceso: 12 01 2020].
- [27] J. W. Eaton, «GNU Octave,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.gnu.org/software/octave/index>. [Último acceso: 11 01 2020].
- [28] «Scilab,» Scilab, 2020. [En línea]. Available: <https://www.scilab.org/>. [Último acceso: 13 01 2020].

- [29] Solartec, «Solartec S72PC datasheet,» Solartec, 2020. [En línea]. Available: <https://static1.squarespace.com/static/5bddd959372b96643fbc1b18/t/5be0dc af8a922de13e240bf5/1541463217313/S72PC.pdf>. [Último acceso: 03 10 2018].
- [30] M. G. Molina, «ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE ALGORITMOS DE CONTROL PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/266870166\\_Investigador\\_CONICE\\_T\\_ANALISIS\\_Y\\_SIMULACION\\_DE\\_ALGORITMOS\\_DE\\_CONTROL\\_PARA\\_EL\\_SEGUIMIENTO\\_DEL\\_PUNTO\\_DE\\_MAXIMA\\_POTENCIA\\_DE\\_SISTEMAS\\_SOLARES\\_FOTOVOLTAICOS\\_CONECTADOS\\_A\\_LA\\_RED\\_ELECTRICA](https://www.researchgate.net/publication/266870166_Investigador_CONICE_T_ANALISIS_Y_SIMULACION_DE_ALGORITMOS_DE_CONTROL_PARA_EL_SEGUIMIENTO_DEL_PUNTO_DE_MAXIMA_POTENCIA_DE_SISTEMAS_SOLARES_FOTOVOLTAICOS_CONECTADOS_A_LA_RED_ELECTRICA). [Último acceso: 07 2020].
- [31] M. doo, «Mikro C Pro,» MikroElektronika doo, 2020. [En línea]. Available: <https://www.mikroe.com/mikroc-pic>. [Último acceso: 15 01 2020].
- [32] I. B. Costalago, «Energías renovables,» [En línea]. Available: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos/>. [Último acceso: 02 2019].
- [33] «steemit,» 2017. [En línea]. Available: <https://steemit.com/stem-espanol/@xdaastroxd/electronica-de-potencia-conversores-de-voltaje-dc-dc-cuk-converter>. [Último acceso: 03 2020].

## Anexo A Hojas de datos

### Introducción

En este anexo se presentarán las hojas de datos de los componentes utilizados en el diseño de la tarjeta electrónica, permitiendo tener una evidencia documental del funcionamiento de cada uno de ellos y sus características.



**MICROCHIP PIC18F2455/2550/4455/4550**

**28/40/44-Pin, High-Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with nanoWatt Technology**

**Universal Serial Bus Features:**

- USB V2.0 Compliant
- Low Speed (1.5 Mb/s) and Full Speed (12 Mb/s)
- Supports Control, Interrupt, Isochronous and Bulk Transfers
- Supports up to 32 Endpoints (16 bidirectional)
- 1-Kbyte Dual Access RAM for USB
- On-Chip USB Transceiver with On-Chip Voltage Regulator
- Interface for Off-Chip USB Transceiver
- Streaming Parallel Port (SPP) for USB streaming transfers (40/44-pin devices only)

**Power-Managed Modes:**

- Run: CPU on, peripherals on
- Idle: CPU off, peripherals on
- Sleep: CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8  $\mu$ A typical
- Sleep mode currents down to 0.1  $\mu$ A typical
- Timer1 Oscillator: 1.1  $\mu$ A typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 2.1  $\mu$ A typical
- Two-Speed Oscillator Start-up

**Flexible Oscillator Structure:**

- Four Crystal modes, including High Precision PLL for USB
- Two External Clock modes, up to 48 MHz
- Internal Oscillator Block:
  - 8 user-selectable frequencies, from 31 kHz to 8 MHz
  - User-tunable to compensate for frequency drift
- Secondary Oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Dual Oscillator options allow microcontroller and USB module to run at different clock speeds
- Fail-Safe Clock Monitor:
  - Allows for safe shutdown if any clock stops

**Peripheral Highlights:**

- High-Current Sink/Source: 25 mA/25 mA
- Three External Interrupts
- Four Timer modules (Timer0 to Timer3)
- Up to 2 Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
  - Capture is 16-bit, max. resolution 5.2 ns ( $T_{CY}/16$ )
  - Compare is 16-bit, max. resolution 83.3 ns ( $T_{CY}$ )
  - PWM output: PWM resolution is 1 to 10-bit
- Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) module:
  - Multiple output modes
  - Selectable polarity
  - Programmable dead time
  - Auto-shutdown and auto-restart
- Enhanced USART module:
  - LIN bus support
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module supporting 3-wire SPI (all 4 modes) and I<sup>2</sup>C™ Master and Slave modes
- 10-bit, up to 13-channel Analog-to-Digital Converter module (A/D) with Programmable Acquisition Time
- Dual Analog Comparators with Input Multiplexing

**Special Microcontroller Features:**

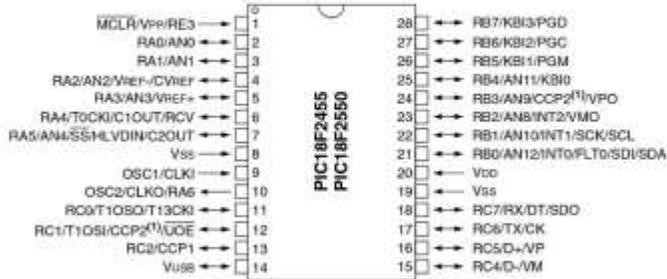
- C Compiler Optimized Architecture with optional Extended Instruction Set
- 100,000 Erase/Write Cycle Enhanced Flash Program Memory typical
- 1,000,000 Erase/Write Cycle Data EEPROM Memory typical
- Flash/Data EEPROM Retention: > 40 years
- Self-Programmable under Software Control
- Priority Levels for Interrupts
- 8 x 8 Single-Cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
  - Programmable period from 41 ms to 131s
- Programmable Code Protection
- Single-Supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
- Optional dedicated ICD/ICSP port (44-pin devices only)
- Wide Operating Voltage Range (2.0V to 5.5V)

Device	Program Memory		Data Memory		IO	10-Bit A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EAUSART	Comparators	Timers 8/16-Bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI	Master I <sup>2</sup> C™			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

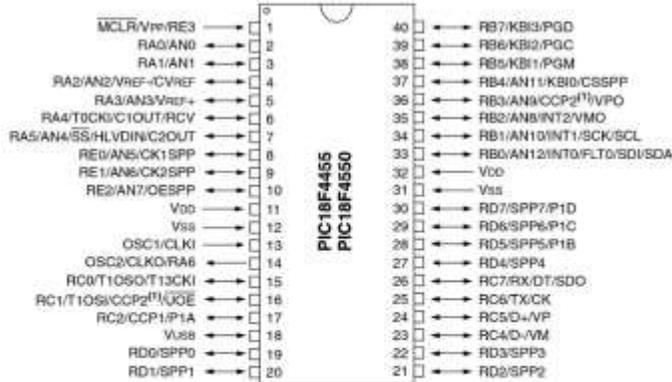
# PIC18F2455/2550/4455/4550

## Pin Diagrams

### 28-Pin PDIP, SOIC



### 40-Pin PDIP



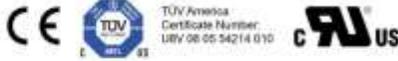
Note 1: RB3 is the alternate pin for CCP2 multiplexing.



**Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor  
with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor**

**Features and Benefits**

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the new FILTER pin
- 5  $\mu$ s output rise time in response to step input current
- 80 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% at  $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 m $\Omega$  internal conductor resistance
- 2.1 kVRMS minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Railometric output from supply voltage



**Package: 8 Lead SOIC (suffix LC)**



Approximate Scale 1:1

**Description**

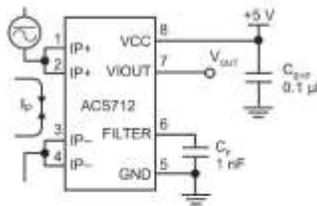
The Allegro<sup>®</sup> ACS712 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in industrial, commercial, and communications systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switched-mode power supplies, and overcurrent fault protection.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall sensor circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which is sensed by the integrated Hall IC and converted into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

The output of the device has a positive slope ( $>V_{\text{OUT}(Q)}$ ) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sensing. The internal resistance of this conductive path is 1.2 m $\Omega$  typical, providing low power

*Continued on the next page...*

**Typical Application**

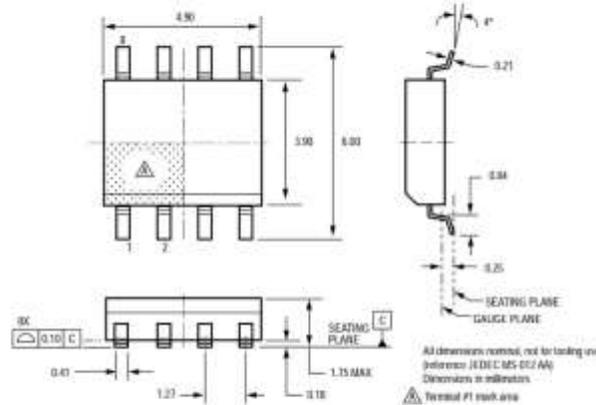


Application 1. The ACS712 outputs an analog signal,  $V_{\text{OUT}}$ , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sensed current,  $I_p$ , within the range specified.  $C_f$  is recommended for noise management, with values that depend on the application.

# ACS712

Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with  
2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

## Package LC, 8-pin SOIC



## Package Branding

Two alternative patterns are used



ACS712T RLCPPP YYWWA	ACS	Allegro Current Sensor
	712	Device family number
	T	Indicator of 100% matte tin leadframe plating
	R	Operating ambient temperature range code
	LC	Package type designator
	PPP	Primary sensed current
	YY	Date code: Calendar year (last two digits)
	WW	Date code: Calendar week
	A	Date code: Shift code

ACS712T RLCPPP L...L YYWW	ACS	Allegro Current Sensor
	712	Device family number
	T	Indicator of 100% matte tin leadframe plating
	R	Operating ambient temperature range code
	LC	Package type designator
	PPP	Primary sensed current
	L...L	Lot code
	YY	Date code: Calendar year (last two digits)
	WW	Date code: Calendar week

Copyright ©2006, 2007, Allegro MicroSystems, Inc.

The products described herein are manufactured under one or more of the following U.S. patents: 5,045,920; 5,264,783; 5,442,283; 5,389,889; 5,581,179; 5,517,112; 5,619,137; 5,621,319; 5,650,719; 5,686,894; 5,694,038; 5,729,130; 5,917,320; and other patents pending.

Allegro MicroSystems, Inc. reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the performance, reliability, or manufacturability of its products. Before placing an order, the user is cautioned to verify that the information being relied upon is current.

Allegro's products are not to be used in life support devices or systems, if a failure of an Allegro product can reasonably be expected to cause the failure of that life support device or system, or to affect the safety or effectiveness of that device or system.

The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, Inc. assumes no responsibility for its use, nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use.

For the latest version of this document, visit our website:

[www.allegromicro.com](http://www.allegromicro.com)



Allegro MicroSystems, Inc.  
115 Northeast Cliff  
Worcester, Massachusetts 01815-0038 U.S.A.  
1.508.853.5000; [www.allegromicro.com](http://www.allegromicro.com)

## Inductors Designed for National's 50 kHz Simple Switcher™



- Designed for use with National's device numbers LM2574/LM2575/LM2576
- Base material meets flammability requirements of UL 94V-0
- Performance verified by National Semiconductor

Electrical Specifications @ 25°C— Operating Temperature -40° to +130° C								
Part Identification		Reference Operating Values <sup>1</sup>			Design Control Values			
Part Number	Inductor Code	Inductance Typical (µH)	I <sub>dc</sub> (Amps)	E <sub>Top</sub> (V-µSec)	Inductance No DC <sup>2</sup> (µH ± 20%)	DCR (Ω MAX)	Package Style	Lead Diameter
PE-53T12NL	L47	47	3.0	90	38	0.05	KM-2.0	.025
PE-92T14KNL	L68	36	5.0	90	56	0.02	KM-4.0	.040
PE-92T08KNL	L100	100	3.0	90	91	0.04	KM-4.0	.052
PE-53T15NL	L150	150	2.0	90	130	0.10	KM-4.0	.025
PE-52626NL	L220	220	1.4	90	230	0.38	Low Profile	.025 SQ.
PE-53T45NL	L220	220	1.4	90	176	0.34	KM-3.0	.020
PE-52627NL	L330	330	0.9	90	302	0.74	Low Profile	.025 SQ.
PE-53T46NL	L330	330	0.9	90	267	0.38	KM-3.0	.020
PE-53T14NL	L470	470	0.64	90	426	0.16	KM-4.0	.025
PE-52629NL	L680	680	.85	90	657	1.25	Low Profile	.025 SQ.
PE-53T15NL	H150	150	3.0	200	136	0.10	KM-4.0	.025
PE-53T16NL	H220	220	3.0	200	167	0.07	KM-5.0	.052
PE-53T17NL	H330	330	3.0	200	292	0.15	KM-5.0	.025
PE-53T18NL	H470	470	2.0	200	369	0.17	KM-5.0	.025
PE-53T19NL	H680	680	1.3	200	562	0.20	KM-5.0	.025
PE-53T20NL	H1000	1000	0.95	200	762	0.24	KM-5.0	.025
PE-53T21NL	H1500	1500	0.62	200	1150	1.00	Case	.052
PE-53T22NL	H220	2200	0.42	200	1896	1.80	Case	.052

**NOTES:**

1. Typical inductance occurs at the I<sub>dc</sub> and E<sub>Top</sub> values shown.
2. The control value of inductance is measured at B<sub>op</sub> equal to or less than 10 gauss without DC current.
3. Inductance decreases with higher values of DC current and increases with lower values of DC current.
4. Inductance increases with increase in B<sub>op</sub> or E<sub>Top</sub>.
5. SIMPLE SWITCHER™ is a trademark of National Semiconductor Corporation.

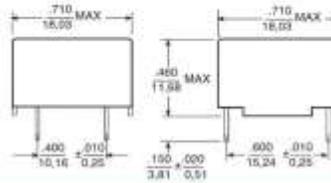
# Inductors Designed for National's 50 kHz Simple Switcher™



## Mechanicals

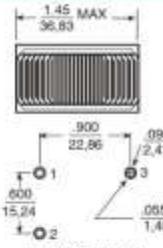
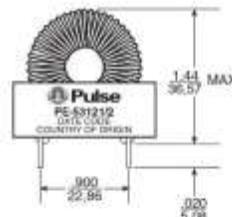
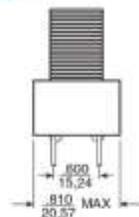
## Schematics

### Low Profile Series



SUGGESTED PAD LAYOUT

### Case Series



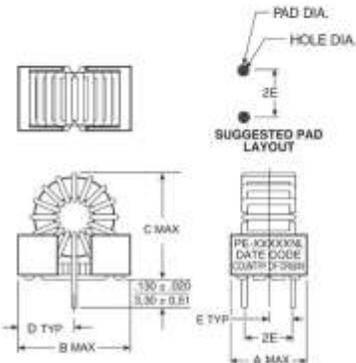
SCHEMATIC

SUGGESTED PAD LAYOUT

### KlipMount Series

PKG	A	B	C	D	E
KM-2.0	.450	.650	.700	.525	.350
	11.43	16.51	17.78	13.33	8.91
KM-3.0	.450	.850	.950	.485	.350
	11.43	21.59	24.13	12.54	8.91
KM-4.0	.610	.910	1.10	.475	.225
	15.50	23.14	27.94	12.07	5.71
KM-5.0	.710	1.10	1.40	.625	.250
	18.03	28.02	35.56	15.88	6.35

LEAD DIA.	HOLE DIA.	PAD DIA.
.025	.035	.060
.025 SQ.	.048	.074
.032	.045	.070
.040	.056	.080



Dimensions in inches  
mm  
Unless otherwise specified,  
all tolerances are ± .001  
I.S.

## For More Information

**Pulse Worldwide Headquarters**  
12220 World Trade Drive  
San Diego, CA 92128  
U.S.A.

**Pulse Europe**  
Pulse Electronics GmbH  
Am Rottland 12  
58540 Meinerzhagen  
Germany

**Pulse China Headquarters**  
B402, Shenzhen Academy of  
Aerospace Technology Bldg.  
10th Kejisan Road  
High-Tech Zone  
Nanshan District  
Shenzhen, PR China 518057

**Pulse North China**  
Room 2704/2705  
Super Ocean Finance Ctr.  
2067 Yan An Road West  
Shanghai 200336  
China

**Pulse South Asia**  
135 Joo Seng Road  
#05-02  
PM Industrial Bldg.  
Singapore 368365

**Pulse North Asia**  
3F, No. 198  
Zhongyuan Road  
Zhongli City  
Taoyuan County 320  
Taiwan R. O. C.

Tel: 658 634 8000  
Fac: 658 634 8262

Tel: 49 2354 777 100  
Fac: 49 2354 777 168

Tel: 86 755 33966678  
Fac: 86 755 33966700

Tel: 86 21 62707060  
Fac: 86 2162706975

Tel: 65 6287 8998  
Fac: 65 6287 8998

Tel: 886 3 4356768  
Fac: 886 3 4356823 (Pulse)  
Fac: 886 3 4356820 (FRE)

Performance warranty of products offered on this data sheet is limited to the parameters specified. Data is subject to change without notice. Other brand and product names mentioned herein may be trademarks or registered trademarks of their respective owners. © Copyright, 2016, Pulse Electronics, Inc. All rights reserved.



Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY	
V <sub>DS</sub> (V)	200
R <sub>DS(on)</sub> (Ω)	V <sub>GS</sub> = 10 V 0.40
Q <sub>g</sub> (Max.) (nC)	43
Q <sub>gs</sub> (nC)	7.0
Q <sub>gd</sub> (nC)	23
Configuration	Single

FEATURES

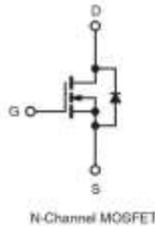
- Dynamic dV/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC



RoHS\* COMPLIANT

DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness. The TO-220AB package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220AB contribute to its wide acceptance throughout the industry.



ORDERING INFORMATION	
Package	TO-220AB
Lead (Pb)-free	IRF630PbF SiHF630-E3
SnPb	IRF630 SiHF630

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T <sub>C</sub> = 25 °C, unless otherwise noted)					
PARAMETER			SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage			V <sub>DS</sub>	200	V
Gate-Source Voltage			V <sub>GS</sub>	± 20	
Continuous Drain Current	V <sub>GS</sub> at 10 V	T <sub>C</sub> = 25 °C	I <sub>D</sub>	9.0	A
		T <sub>C</sub> = 100 °C		5.7	
Pulsed Drain Current <sup>a</sup>			I <sub>DM</sub>	36	
Linear Derating Factor				0.59	W/°C
Single Pulse Avalanche Energy <sup>b</sup>			E <sub>AS</sub>	250	mJ
Repetitive Avalanche Current <sup>c</sup>			I <sub>AR</sub>	9.0	A
Repetitive Avalanche Energy <sup>d</sup>			E <sub>AR</sub>	7.4	mJ
Maximum Power Dissipation	T <sub>C</sub> = 25 °C		P <sub>D</sub>	74	W
Peak Diode Recovery dV/dt <sup>e</sup>			dV/dt	5.0	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range			T <sub>J</sub> , T <sub>stg</sub>	- 55 to + 150	°C
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s			300 <sup>f</sup>	
Mounting Torque	5-32 or M3 screw			10	lbf · in
				1.1	N · m

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- V<sub>DD</sub> = 50 V, starting T<sub>J</sub> = 25 °C, L = 4.6 mH, R<sub>g</sub> = 25 Ω, I<sub>AS</sub> = 9.0 A (see fig. 12).
- I<sub>SD</sub> ≤ 9.0 A, di/dt ≤ 120 A/μs, V<sub>DD</sub> ≤ V<sub>DS</sub>, T<sub>J</sub> ≤ 150 °C.
- 1.6 mm from case.

\* Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

Document Number: 91031  
S11-0509-Rev. B, 21-Mar-11

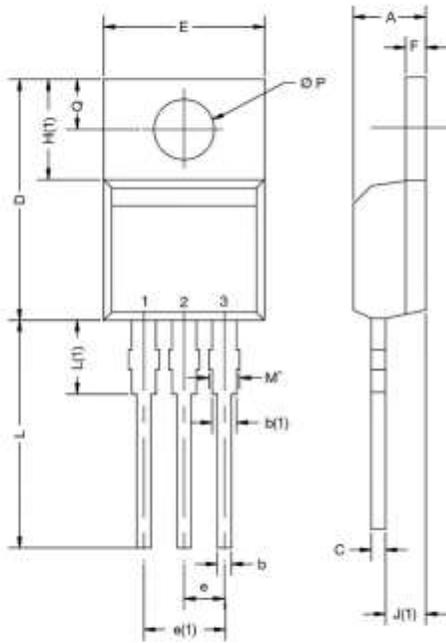
www.vishay.com

This datasheet is subject to change without notice.

THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT [www.vishay.com/doc?91000](http://www.vishay.com/doc?91000)



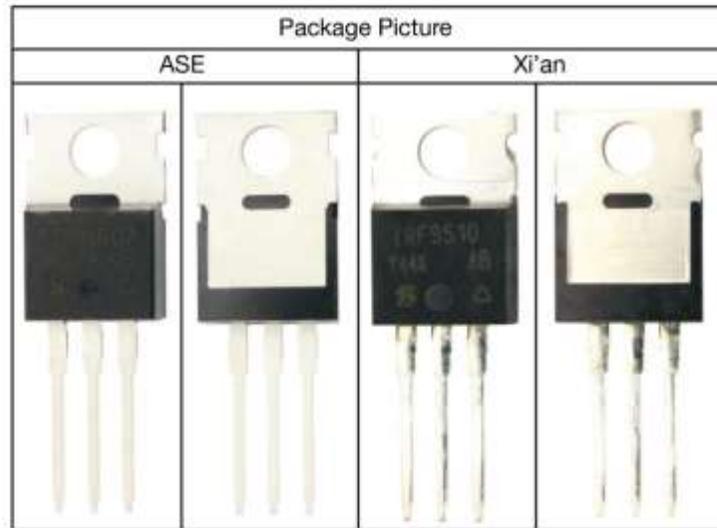
TO-220-1



DIM.	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
A	4.24	4.65	0.167	0.183
b	0.69	1.02	0.027	0.040
b(1)	1.14	1.78	0.045	0.070
c	0.36	0.61	0.014	0.024
D	14.33	15.85	0.564	0.624
E	9.96	10.52	0.392	0.414
e	2.41	2.67	0.095	0.105
e(1)	4.88	5.28	0.192	0.208
F	1.14	1.40	0.045	0.055
H(1)	6.10	6.71	0.240	0.264
J(1)	2.41	2.92	0.095	0.115
L	13.36	14.40	0.526	0.567
L(1)	3.33	4.04	0.131	0.159
Ø P	3.53	3.94	0.139	0.155
Q	2.54	3.00	0.100	0.118

ECN: X15-0364-Rev. C, 14-Dec-15  
DWG: 6031

**Note**  
 • M\* = 0.052 inches to 0.064 inches (dimension including protrusion), heatsink hole for HVM



## 3.0 A Positive Voltage Regulators

The LM323.A are monolithic integrated circuits which supply a fixed positive 5.0 V output with a load driving capability in excess of 3.0 A. These three-terminal regulators employ internal current limiting, thermal shutdown, and safe-area compensation. The A-suffix is an improved device with superior electrical characteristics and a 2% output voltage tolerance. These regulators are offered with a  $0^{\circ}$  to  $+125^{\circ}\text{C}$  temperature range in a low cost plastic power package.

Although designed primarily as a fixed voltage regulator, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents. These devices can be used with a series pass transistor to supply up to 15 A at 5.0 V.

- Output Current in Excess of 3.0 A
- Available with 2% Output Voltage Tolerance
- No External Components Required
- Internal Thermal Overload Protection
- Internal Short Circuit Current Limiting
- Output Transistor Safe-Area Compensation
- Thermal Regulation and Ripple Rejection Have Specified Limits

## LM323, LM323A

### 3-AMPERE, 5 VOLT POSITIVE VOLTAGE REGULATORS

#### SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

T SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 221A

Pin 1. Input  
2. Ground  
3. Output

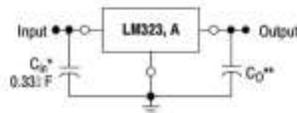


Heatsink surface is connected to Pin 2.

#### ORDERING INFORMATION

Device	Output Voltage Tolerance	Operating Temperature Range	Package
LM323T	4%	$T_J = 0^{\circ}$ to $+125^{\circ}\text{C}$	Plastic Power
LM323AT	2%		

#### Simplified Application



A common ground is required between the input and the output voltages. The input voltage must remain typically 2.5 V above the output voltage even during the low point on the input ripple voltage.

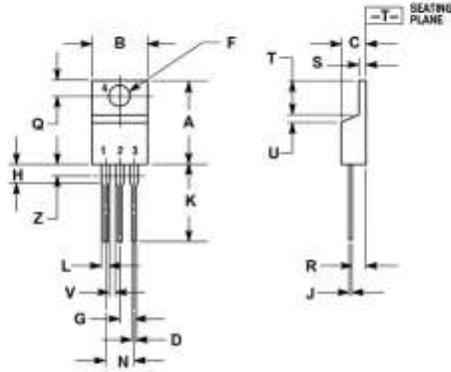
\* $C_{IN}$  is required if regulator is located an appreciable distance from power supply filter. (See Applications Information for details.)

\*\* $C_O$  is not needed for stability; however, it does improve transient response.

# LM323, LM323A

## PACKAGE DIMENSIONS

T SUFFIX  
 PLASTIC PACKAGE  
 CASE 221A-09  
 ISSUE AA



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1992
  2. CONTROLLING DIMENSION: INCH
  3. DIMENSION Z DEFINES A ZONE WHERE ALL BODY AND LEAD IRREGULARITIES ARE ALLOWED.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.570	0.620	14.48	15.75
B	0.380	0.405	9.65	10.28
C	0.160	0.190	4.07	4.82
D	0.035	0.035	0.84	0.88
F	0.142	0.147	3.61	3.73
G	0.035	0.105	0.89	2.66
H	0.110	0.155	2.80	3.93
J	0.031	0.035	0.79	0.89
K	0.500	0.900	12.70	22.87
L	0.045	0.050	1.15	1.27
M	0.190	0.210	4.83	5.33
Q	0.100	0.120	2.54	3.04
R	0.060	0.100	1.52	2.54
S	0.045	0.055	1.15	1.39
T	0.325	0.255	8.27	6.47
U	0.050	0.030	1.27	0.76
V	0.045	---	1.15	---
Z	---	0.005	---	0.127



September 2014

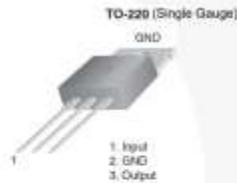
## LM78XX / LM78XXA 3-Terminal 1 A Positive Voltage Regulator

### Features

- Output Current up to 1 A
- Output Voltages: 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 24 V
- Thermal Overload Protection
- Short-Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Protection

### Description

The LM78XX series of three-terminal positive regulators is available in the TO-220 package and with several fixed output voltages, making them useful in a wide range of applications. Each type employs internal current limiting, thermal shut-down, and safe operating area protection. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1 A output current. Although designed primarily as fixed-voltage regulators, these devices can be used with external components for adjustable voltages and currents.



### Ordering Information<sup>(1)</sup>

Product Number	Output Voltage Tolerance	Package	Operating Temperature	Packing Method
LM7805CT	±4%	TO-220 (Single Gauge)	-40°C to +125°C	Rail
LM7806CT				
LM7808CT				
LM7809CT				
LM7810CT				
LM7812CT				
LM7815CT				
LM7818CT				
LM7824CT	±2%		0°C to +125°C	
LM7805ACT				
LM7809ACT				
LM7810ACT				
LM7812ACT				
LM7815ACT				

#### Note:

1. Above output voltage tolerance is available at 25°C.

Physical Dimensions

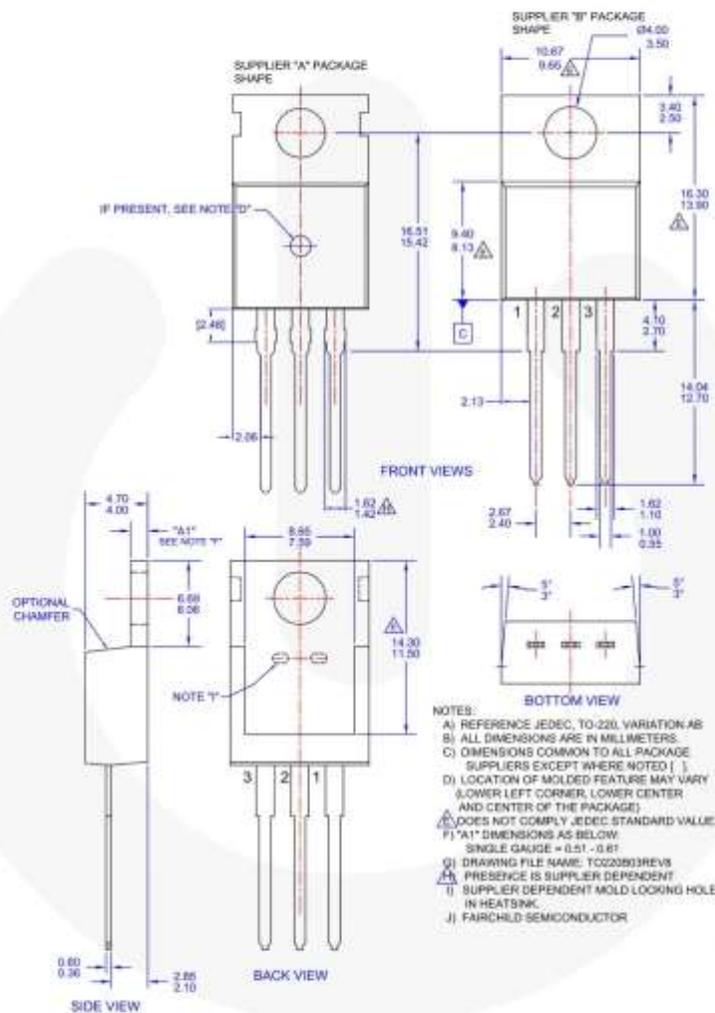


Figure 19. TO-220, MOLDED, 3-LEAD, JEDEC VARIATION AB (ACTIVE)

**HIGH AND LOW SIDE DRIVER**

**Features**

- Floating channel designed for bootstrap operation  
 Fully operational to +500V or +600V  
 Tolerant to negative transient voltage  
 dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible  
 Separate logic supply range from 3.3V to 20V  
 Logic and power ground ±5V offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs

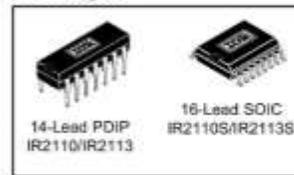
**Product Summary**

$V_{OFFSET}$ (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
$I_{O+/-}$	2A / 2A
$V_{OUT}$	10 - 20V
$t_{on/off}$ (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

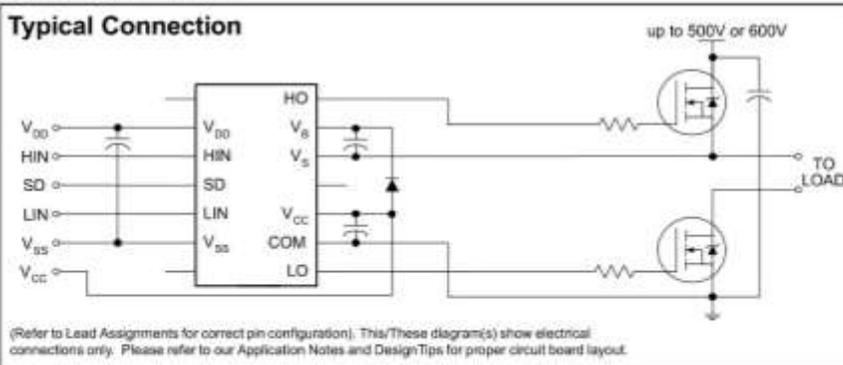
**Description**

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

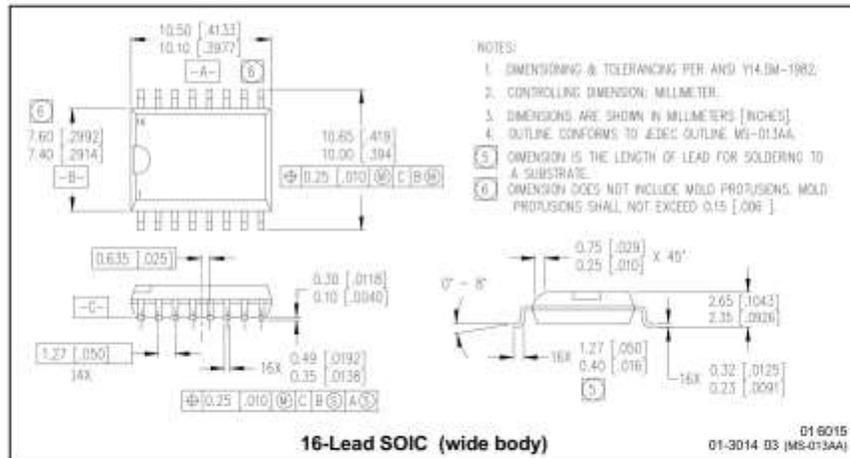
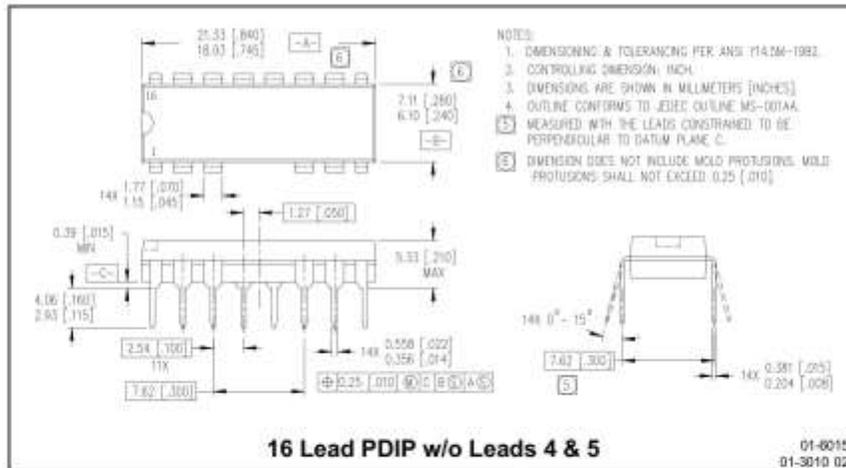
**Packages**



**Typical Connection**



IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF



## Anexo B Programa en Scilab para cálculo de valores

// Declarando variables y parámetros

Vg = 37;

Vo = 13.8;

Po = 27;

Io = 2;

Fs = 100000;

Vd = 0;

//Variables a declarar de componentes ya ensamblados inicializándolas valor 0

RL1= 0;

RL2= 0;

RC1= 0;

Ron= 0;

Ro = abs(Vo/Io);

D = (Vo/(Vo+Vg));

Beta =Ro-2\*Ro\*D+RL2+((RL1+RL2+Ro-RC1)\*D^2)+D\*Ron+D\*RC1-2\*D\*RL2

//Calculo independiente de valores para vector X

I1 =(D\*Vg-Vd+D\*Vd)\*D/Beta;

$$I2 = (D \cdot Vg - Vd + D \cdot Vd) \cdot (D - 1) / \text{Beta};$$

$$V1\_1 = (D^2) \cdot (Vd \cdot (Ro + RL1 + RL2) + Vg \cdot RC1);$$

$$V1\_2 = D \cdot (Vg \cdot (Ro - Ron - RC1 + RL2) - Vd \cdot (2 \cdot Ro + RL1 + 2 \cdot RL2));$$

$$V1\_3 = (Vg - Vd) \cdot (Ro + RL2);$$

$$V1 = - (V1\_1 + V1\_2 - V1\_3) / \text{Beta};$$

$$V2 = (D \cdot Vg - Vd + D \cdot Vd) \cdot Ro \cdot (D - 1) / \text{Beta};$$

// vector X

$$X = [I1, I2, V1, V2];$$

//Valores de Rizo

$$\text{Delta1} = 0.1 \cdot I1; \text{//Rizo de corriente en L1}$$

$$\text{Delta2} = 0.15 \cdot I2; \text{//Rizo de corriente en L2}$$

$$\text{Sigma1} = 0.1 \cdot V1; \text{//Rizo del capacitor C1}$$

$$\text{Sigma2} = 0.002 \cdot V2; \text{// Rizo del capacitor C2}$$

//Calculo de componentes L1,L2,C1,C2

$$L1 = (Vg \cdot D) / (2 \cdot \text{Delta1} \cdot Fs);$$

$$L2 = - (V1 + Vo) \cdot D / (2 \cdot \text{Delta2} \cdot Fs);$$

$$C1 = - (I2 \cdot D) / (2 \cdot \text{Sigma1} \cdot Fs);$$

$$C2 = (\text{Delta2}) / (8 \cdot Fs \cdot \text{Sigma2});$$

//Cálculo del nuevo ciclo de trabajo

Vd=1.8;// Voltaje MOSFET de conmutación

$$a = R_o*(V_g-V_o+V_d) + V_o*(R_{C1}-R_{L1}-R_{L2});$$

$$b = V_o*(2*R_o-R_{on}-R_{C1}+2*R_{L2})-R_o*(V_g+2*V_d);$$

$$c = R_o*(V_d-V_o)-V_o*R_{L2}$$

$$D1 = ((-b+(b*b-4*a*c)^{0.5})/(2*a));$$

$$D2 = ((-b-(b*b-4*a*c)^{0.5})/(2*a));$$

## Anexo C Algoritmo de MPPT

```
double IP, VP, PP, PA, IPA, VPA, X;
```

```
//extern unsigned char DC;
```

```
int DELTADC;
```

```
void main() {
```

```
    DELTADC = 2;
```

```
    ADCON1 = 0b00001010; //0x0A  definir analogicos
```

```
    TRISB = 0X00;
```

```
    PORTB = 0X00;
```

```
    delay_ms(1000);
```

```
    PWM1_init(100000);
```

```
    PWM1_Set_Duty(0);
```

```
    PWM1_Start();
```

```
    VP = ADC_Read(2);    //voltaje de salida
```

```
    VP = (VP/1023) * 50; //voltaje de salida, conversion a volts
```

```
    delay_us(50);
```

```
    IP = ADC_Read(3);    //intensidad de salida
```

```
    IP = (IP/378) * 10;  //intensidad de salida, conversion a ampere
```

```

PP = VP * IP;

while(1){

X = 127;

VPA = ADC_Read(2); //voltaje de salida

VPA = (VPA/1023) * 50; //voltaje de salida, conversión a volts

delay_us(50);

IPA = ADC_Read(3); //intensidad de salida

IPA = (IPA/378) * 10; //intensidad de salida, conversión a ampere

//DC = 10 + DELTADC;

PA = VPA * IPA;

if (PA >= PP ) {PP=PA; X=X+2;}

if (PA < PP) {PP=PA; X=X-2;}

//if (X > 40 ) DC *= DELTADC; // DC = DC * DELTADC Equivalente a incrementar
el DC para alcanzar a los 230

if (X >= 230) X = 230; // 90%

if (X < 25) X = 25; // 10%

PWM1_Set_Duty(X);

PWM1_Start();

}

}

```