

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA ELECTRONICA**



**DESARROLLO DE UN ALGORITMO  
PARA MEJORAR LA TRANSFERENCIA  
DE POTENCIA EN UN SISTEMA PICO  
FOTOVOLTAICO DOMICILIARIO A SER  
APLICADO EN ZONAS RURALES**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

Alfredo Alex Osorio Vela

CALLAO - SETIEMBRE - 2017

PERÚ





**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA ELECTRONICA**

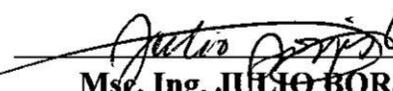
**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO**

**“DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA MEJORAR LA  
TRANSFERENCIA DE POTENCIA EN UN SISTEMA PICO  
FOTOVOLTAICO DOMICILIARIO A SER APLICADO EN ZONAS  
RURALES”**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER:  
ALFREDO ALEX OSORIO VELA**

**ASESOR:  
ING. JAIME VALLEJOS LAOS**

**CALIFICACIÓN:  
16(DIECISÉIS)**

  
**Msc. Ing. JULIO BORJAS  
CASTAÑEDA**  
Presidente Jurado

  
**Ing. LUIS ERNESTO  
CRUZADO MONTAÑEZ**  
Secretario

  
**Msc. Ing. RUSSELL CÓRDOVA RUIZ**  
Vocal

**CALLAO – PERÚ  
2017**

### **DEDICATORIA**

Esta tesis dedico a mis padres  
Juan Osorio Polo y Loidith  
Vela Vásquez por el amor y  
cariño que me tienen y por  
motivarme siempre a cumplir  
mis metas.

A mí novia Milagros Muedas  
por el apoyo durante el tiempo  
de estudio en la Universidad.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por brindarme salud y sabiduría para lograr culminar este trabajo.

A mis padres, por el apoyo incondicional y por sus oraciones en momentos de dificultad.

Al Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones de la Universidad Nacional de Ingeniería (INICTEL-UNI) y a la empresa Kallpa Global S.A.C por brindarme las instalaciones de sus laboratorios para el desarrollo de la presente tesis.

Al INNOVATE-PERU por financiar el proyecto DESARROLLO DE UN EFICIENTE SISTEMA FOTOVOLTAICO DOMICILIARIO PARA ZONAS RURALES con código PIMEN-10-P-133-219-15.

A mis asesores, Ing. Jaime Vallejos e Ing. Javier Samaniego por su amistad y guiarme para el desarrollo del presente Trabajo.

A los ingenieros del INICTEL-UNI Rolando Adriano y Marco Quispe por su apoyo, comprensión y cooperación.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION.....	12
1.1: Identificación del problema.....	13
1.2: Formulación de los problemas:.....	14
1.2.1: Problema General.....	14
1.2.2: Problemas Específicos.....	14
1.3: Objetivos de la investigación.....	14
1.3.1: Objetivo General.....	14
1.3.2: Objetivos Específicos.....	14
1.4: Justificación.....	14
1.5: Hipótesis.....	15
1.6: Metodología.....	15
2. ESTADO DE ARTE.....	16
2.1: Estructura del sistema a Desarrollar.....	17
2.2: Energía solar.....	17
2.2.1: Radiación Electromagnética.....	17
2.2.2: Espectro Electromagnético.....	18
2.2.3: Radiación Solar.....	18
2.3: Célula y Panel fotovoltaico.....	19
2.3.1: Célula Fotovoltaica.....	19
2.3.2: Panel fotovoltaico.....	20
2.3.3: Tipos de células Solares.....	21
2.3.4: Circuito equivalente de una célula solar.....	22
2.3.5: Efecto Fotovoltaico.....	23
2.3.6: Efecto de la irradiancia y la temperatura.....	23
2.4: Sistema Pico Fotovoltaico.....	24
2.5: Controlador de Carga Solar.....	25
2.5.1: Tipos de controladores.....	25
2.5.2: Controlador PWM.....	25
2.5.3: Controlador MPPT.....	25

2.5.4: Análisis del Convertidor Buck Síncrono (CBS) en Modo C''''onducción Continuo (MCC).....	26
2.6: Baterías.....	33
2.6.1: Tipos de batería para Sistemas Fotovoltaicos.....	34
2.6.2: Baterías Plomo-Acido.....	34
2.7: Simulador Solar.....	35
2.8: Algoritmos MPPT.....	35
2.8.1: Perturbación y Observación (P&O).....	36
2.8.2: Conductancia Incremental (CI).....	38
2.8.3: Constante de Tensión y de Corriente.....	39
2.8.4: Célula piloto.....	40
2.8.5: Basado en Lógica Difusa.....	41
3. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL CONTROLADOR DE CARGA DE BATERIAS DE Pb.....	43
3.1: Diseño del controlador básico.....	44
3.1.1: Diseño del circuito integrado CN3717.....	44
3.1.2: Componentes de controlador básico.....	46
3.1.3; Circuito esquemático del controlador básico.....	46
3.1.4: Tarjeta electrónica de controlador básico.....	47
3.2: Diseño de controlador MPPT.....	47
3.2.1: Especificaciones generales del Prototipo.....	47
3.2.2: Diseño del controlador MPPT.....	48
3.2.3: Componentes del controlador MPPT.....	56
3.2.3: Circuito esquemático del controlador MPPT.....	58
3.2.3: Tarjeta electrónica del MPPT.....	59
3.6: Construcción del Prototipo.....	60
3.6.1: Protocolo de pruebas de la placa de Pruebas.....	60
3.6.2 Tarjetas electrónicas.....	60
4. DESARROLLO DE ALGORITMOS PARA EL CONTROLADOR DE CARGA.....	62
4.1: Algoritmo de funcionamiento eficiente.....	63
4.1.1: Desarrollo del algoritmo del controlador.....	63
4.1.2: Diagrama de flujo del algoritmo del controlador de carga.....	64
4.1.3: Codificación del algoritmo del controlador.....	65
4.2: Algoritmos MPPT para controlador.....	65

4.2.1: Desarrollo del algoritmo P&O .....	65
4.2.2: Desarrollo del algoritmo CONDINC .....	67
4.2.3: Desarrollo del algoritmo lógica difusa.....	68
5. PRUEBAS DE LOS ALGORITMOS EN EL CONTROLADOR DE CARGA.....	71
5.1: Variables evaluadas en las pruebas.....	72
5.2: Instrumentos de Medición y equipos .....	72
5.2.1: Solarímetro (Radiómetro) .....	72
5.2.2: Multímetro .....	73
5.2.3: Sensor de temperatura.....	73
5.2.4: Simulador Solar .....	74
5.3: Prueba de sobredescarga y sobrecarga de la batería .....	74
5.3.1: Prueba de sobredescarga de la batería.....	74
5.3.2: Prueba de sobrecarga de la batería.....	76
5.4: Prueba de tensión en led y puerto USB.....	78
5.4.1: Prueba de tensión con driver led .....	78
5.4.2: prueba de tensión de puerto USB.....	80
5.5: Prueba de Eficiencia y Estabilidad de los Algoritmos.....	80
5.5.1: Adquisición de radiación solar.....	80
5.5.2: Algoritmo Perturba y Observa .....	83
5.5.3: Algoritmo Conductancia Incremental.....	85
5.5.4: Algoritmo Lógica Difusa .....	87
5.5.5: Comparación de estabilidad de algoritmos .....	89
5.6: Eficiencia controlador básico y controlador con MPPT .....	91
5.6.1: Eficiencia de controlador básico .....	91
5.6.2: Eficiencia de controlador MPPT .....	91
5.6.3: Comparación de eficiencia con respecto a la potencia .....	93
5.7: Evaluación de SPFV comerciales .....	94
5.7.1: SPFV comerciales .....	94
5.7.2: Pruebas en simulador solar a SPFV comerciales .....	95
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	101
ANEXOS .....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de bloques del SPFV.....	17
Figura 2.2 Espectro electromagnético. [Proyecto académico con el radiotelescopio de Nasa en robledo. Cap. I.].....	18
Figura 2.3 Espectro de radiación Solar estándar en el vacío a la distancia media entre el sol y la tierra. [Instalaciones Fotovoltaicas. Cap. I. pág. 13.] .....	19
Figura 2.4 Célula fotovoltaica. [Hoja de Datos. MI Solar]. .....	20
Figura 2.5 Panel fotovoltaico. [Hoja de datos. Solar world.].....	20
Figura 2.6 Curva característica I-V. de un panel fotovoltaico. ....	21
Figura 2.7 Circuito equivalente célula solar ideal (derecha) y real (izquierda). ....	22
Figura 2.8 Efecto fotovoltaico. [Grupo IDEA. Curso solar.].....	23
Figura 2.9 Sistema pico fotovoltaico (Pico lamp recreation/emergency kit).[Phocos, página oficial] .....	24
Figura 2.10 Convertidor buck con parásitos resistivos. ....	26
Figura 2.11 Circuitos esquemáticos equivalentes del CBS en MCC. ....	27
Figura 2.12 Formas de onda del CBS en MCC. [Juan C. Tesis M. Cap. III. Pág. 29]. .....	28
Figura 2.13 Batería de plomo ácido. [Hoja de datos de Oxford]. .....	35
Figura 2.14 Simulador Solar. [LEISTUNGSELEKTRONIK JENA GMBH, página oficial].....	35
Figura 2.15 a) Característica I-V en función a la radiación solar. b) Características P-V en función a la temperatura. [Daniel G. (2003). Tesis doctoral. Cap. II. p.68] .....	36
Figura 2.16 Características P-V de un generador fotovoltaico para distintos niveles de radiación. [J. Manuel E. (2011). Tesis doctoral. Cap. II. p.70] .....	37
Figura 2.17 Curva P-V bajo seguimiento del MPP con algoritmo Conductancia Incremental.....	39
Figura 2.18 Diagrama de flujo de constante de tensión y corriente.....	40
Figura 2.19 Esquema de control Difuso para el conversor DC/DC.....	41
Figura 2.20 Configuración del controlador Difuso. ....	42
Figura 3.1 Aplicación típica del CN3717. ....	44
Figura 3.2 Termistor NTC de 10k $\Omega$ . ....	46
Figura 3.3 Inductor de 18 $\mu$ H. ....	46
Figura 3.4 Chip CN3717.....	46
Figura 3.5 Esquemático de controlador de carga básico.....	47

Figura 3.6 Tarjeta de controlador de carga básico. ....	47
Figura 3.7 Divisor de tensión. ....	49
Figura 3.8 Amplificador operacional LM358 en configuración restador. ....	49
Figura 3.9 Filtro pasa bajo. ....	50
Figura 3.10 Diagrama esquemático completo del sensor de corriente con resistencia shunt. ....	51
Figura 3.11 Driver IR2111. ....	52
Figura 3.12 Conexión típica del driver IR2111. ....	53
Figura 3.13 Diseño del driver IR2111. ....	53
Figura 3.14 MOSFET IRF Z44. ....	54
Figura 3.15 Topología Tipo BUCK. ....	54
Figura 3.16 Diseño esquemático del LM2596 para 5 voltios. ....	55
Figura 3.17 Diseño esquemático del microcontrolador Atmega 328. ....	55
Figura 3.18 Resistencia de carbón. ....	56
Figura 3.19 Amplificador Operacional LM 358. ....	56
Figura 3.20 Microcontrolador ATMEGA 328P-PU. [Página oficial de ATMEL]. ....	57
Figura 3.21 Chip MP1584. ....	58
Figura 3.22 Curva de eficiencia del convertidor MP1584. ....	58
Figura 3.23 Esquemático de algoritmo MPPT y control de usb, led. ....	59
Figura 3.24 PCB de controlador con Algoritmo MPPT. ....	59
Figura 3.25 Tarjeta real de controlador básico. ....	60
Figura 3.26 Tarjeta electrónica real de cargador MPPT. ....	61
Figura 4.1 Diagrama de flujo de control de led. ....	64
Figura 4.2 Diagrama de flujo del controlador. ....	65
Figura 4.3 Diagrama de flujo del algoritmo P & O. ....	66
Figura 4.4 Diagrama de flujo del algoritmo Conductancia Incremental. ....	67
Figura 4.5 Funciones de membresía: a) entrada E, b) entrada CE y c) salida <b>Dd</b> . ....	69
Figura 4.6 Diagrama de flujo del algoritmo lógica difusa. ....	70
Figura 5.1 Solarímetro SM 206. ....	72
Figura 5.2 Multímetro UNI-T modelo UT61E. ....	73
Figura 5.3 Multímetro FLUKE 179 True RMS Multimeter. ....	73
Figura 5.4 Simulador solar con lámparas dicroicas. ....	74

Figura 5.5 Sobredescarga de batería con foco led.....	75
Figura 5.6 Aumento de imagen de sobredescarga de batería con foco led. ....	75
Figura 5.7 Tensión de carga de panel fotovoltaico y batería. ....	76
Figura 5.8 Aumento de la figura 5.25. ....	77
Figura 5.9 Corriente de carga de panel. ....	77
Figura 5.10 Tensión panel, batería y corriente en miliamperios dividido entre 10.....	78
Figura 5.11 Tensión con 3 focos leds. ....	78
Figura 5.12 Tensión con 2 foco leds. ....	79
Figura 5.13 Tensión con 1 foco led.....	79
Figura 5.14 Tensión de puerto USB.....	80
Figura 5.15 Regresión lineal. ....	81
Figura 5.16 Corriente de panel.....	81
Figura 5.17 Radiación solar. ....	82
Figura 5.18 Tensión de panel fotovoltaico y batería con algoritmo P&O. ....	83
Figura 5.19 Tensión de panel fotovoltaico y batería.....	83
Figura 5.20 A) Radiación Solar. B) Corriente del panel fotovoltaico con algoritmo P&O. C) Potencia de panel fotovoltaico con algoritmo P&O.....	84
Figura 5.21 Tensión de panel fotovoltaico y batería con algoritmo CI. ....	85
Figura 5.22 A) Radiación Solar. B) Corriente del panel fotovoltaico con algoritmo CI. C) Potencia de panel fotovoltaico con algoritmo CI.....	86
Figura 5.23 Tensión de panel fotovoltaico y batería con algoritmo lógica difusa. ....	87
Figura 5.24 A) Radiación Solar. B) Corriente del panel fotovoltaico con algoritmo CI. C) Potencia de panel fotovoltaico con algoritmo CI.....	88
Figura 5.25 A) Radiación Solar. B) Potencia del panel fotovoltaico con algoritmo P&O, CI y lógica difusa.....	89
Figura 5.26 Potencia en la batería entre controlador básico y MPPT.....	92
Figura 5.27 Comparación de eficiencia entre controlador básico y MPPT. ....	93
Figura 5.28 SPFV DC Lighting Kit. ....	94
Figura 5.29 SPFV Digital Lighting Kit.....	94
Figura 5.30 Potencia de entrada y salida de DC Lighting kit. ....	95
Figura 5.31 Eficiencia del sistema DC Lighting kit.....	96
Figura 5.32 Potencia de entrada y salida de Digital Lighting kit.....	97
Figura 5.33 Eficiencia del sistema Digital Lighting Kit. ....	98

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N° 2.1 CONDICIONES ESTÁNDAR DE MEDIDA (STC). .....	23
TABLA N° 2.2 CONDICIONES DE TEMPERATURA DE OPERACIÓN NOMINAL DE LA CÉLULA (TONC). .....	24
TABLA N° 3.1 ESPECIFICACIONES GENERALES DEL CBS. ....	51
TABLA N° 4.1 BASE DEL CONOCIMIENTO DEL CONTROLADOR DIFUSO. ....	69
TABLA N° 5.1 Datos del solarímetro. ....	73
TABLA N° 5.2 SUMA DE ENERGÍA DIARIA CON ALGORITMO P&O. ....	90
TABLA N° 5.3 SUMA DE ENERGÍA DIARIA CON ALGORITMO CI. ....	90
TABLA N° 5.4 SUMA DE ENERGÍA DIARIA CON ALGORITMO LÓGICA DIFUSA. ....	90
TABLA N° 5.5 COMPARACIÓN DE ENERGÍA TOTAL DE ALGORITMOS .....	90
TABLA N° 5.6 PORCENTAJE DE ERROR EN SIMULADOR SOLAR DESARROLLADO. ....	91
TABLA N° 5.7 PORCENTAJE DE ERROR EN SIMULADOR SOLAR DESARROLLADO. ....	92
TABLA N° 5.8 PORCENTAJE DE EFICIENCIA EN EL SIMULADOR SOLAR DESARROLLADO. ....	93
TABLA N° 5.9 DC LIGHTING KIT POTENCIA PARA DISTINTOS NIVELES DE RADIACIÓN SOLAR. ....	95
TABLA N° 5.10 DIGITAL LIGHTING KIT POTENCIA PARA DISTINTOS NIVELES DE RADIACIÓN SOLAR. ....	97

## **RESUMEN**

Los sistemas pico fotovoltaicos representan una opción de generación de energía en las zonas rurales en las que el potencial solar es importante. Estos sistemas no implementan por lo general controladores de carga con algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia por lo que no son eficientes, sin embargo, en sistemas convencionales si existe controladores con este algoritmo y su costo es elevado. Para desarrollo del controlador se evaluaron 3 algoritmos, los cuales son: algoritmo Perturba y Observa (P&O), Conductancia Incremental(CONDINC) y Lógica Difusa. Para poder evaluar la eficiencia de estos algoritmos se desarrolló un simulador solar con focos microicos, se realizó pruebas en condiciones ambientales reales y la adquisición de datos para observar el comportamiento de cada algoritmo mencionado. En este sentido la presente tesis describe el desarrollo, implementación y la evaluación del controlador con algoritmo de búsqueda del punto de máxima potencia. Entre los resultados indican que aumenta la eficiencia del sistema entre el 10-14% lo cual representa que es más eficiente en comparación que una solución comercial.

## **ABSTRACT**

Peak photovoltaic systems represent an option for generating power in rural areas where solar potential is important. These systems do not usually implement load controllers with maximum power point search algorithms so they are not efficient, however, in conventional systems if there are controllers with this algorithm and their cost is high. For the development of the controller 3 algorithms were evaluated, which are: Pertuba and Observes (P & O), Incremental Conductance (CONDINC) and Fuzzy Logic. In order to evaluate the efficiency of these algorithms a solar simulator with dichroic foci was developed, tests were carried out under real environmental conditions and data acquisition to observe the behavior of each mentioned algorithm. In this sense the present thesis describes the development, implementation and evaluation of the controller with algorithm of search of the point of maximum power. Results indicate that they increase the efficiency of the system by 10-14%, which is more efficient compared to a commercial solution.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo trata sobre el desarrollo de un controlador de carga con algoritmo para el seguimiento del punto de máxima potencia para ser implementado en un **Sistema Pico Fotovoltaico (SPFV)**, además este trabajo es producto de un proyecto solventado por Innóvate Perú realizado en las instalaciones de INICTEL-UNI y por encargo de la empresa Kallpa Global S.A.C.

Los SPFV son iguales a los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) pero en versión pequeña, en tamaño y bajas potencias, estos se desarrollan con el fin de llevar energía eléctrica a las zonas más alejadas. Básicamente lo que se pretende es que los pobladores rurales tengan iluminación por las noches y que puedan realizar la carga de sus celulares; de esa manera ya no se verían en la necesidad de comprar velas, mecheros o alguna otra forma de obtener iluminación por las noches.

Además, los SPFV a la larga resultan ser económicos debido a que no se tendría la necesidad de adquirir velas regularmente.

Debido a su mayor eficiencia, los SPFV utilizan luminarias LED debido a que producen la misma o mayor luminosidad que las lámparas incandescentes, consumiendo menor energía eléctrica.

Los SPFV están conformados por un arreglo de celdas solares, las cuales capturan la energía que proviene del sol, una batería, y un controlador de carga de batería. Dada la importancia de su uso, se están realizando muchos trabajos de investigación y desarrollo con el fin de mejorar el rendimiento de los elementos que conforman los SPFV. Así, por ejemplo, se están experimentando con nuevos materiales en la implementación de celdas solares con el fin de mejorar la eficiencia de conversión de energía solar a eléctrica; en el caso de los controladores solares se busca mejorar los algoritmos para el seguimiento del punto de máxima potencia que muchos de ellos implementan con el fin de aprovechar al máximo la energía entregada por el panel solar a las baterías. En ese mismo sentido continuamente se va perfeccionando las pérdidas de los conversores de corriente directa a corriente directa (DC/DC). Por otro lado, se está experimentando con nuevos materiales en la elaboración de baterías con el fin de obtener mayores densidades de almacenamiento de energía (mayor capacidad en menor tamaño), cargas más rápidas y utilizar materiales que no contaminen demasiado el medio ambiente cuando termine su vida útil.

Los SPFV tienen un controlador de carga que tiene la función de transferir la energía suministrada por el panel solar a la batería. El controlador consta de 2 partes: un convertidor DC/DC y un microcontrolador. El convertidor DC/DC se encarga de realizar la adaptación de impedancia mediante las señales que le envía el microcontrolador. El microcontrolador es el elemento encargado de controlar el proceso de transferencia de la potencia del panel fotovoltaico a la batería mediante la ejecución de un programa que tiene embebido. Dicho algoritmo hace uso de la

información de la tensión y corriente entregada por el panel a partir de la energía que brinda el Sol.

El presente trabajo de tesis se ha dividido en las siguientes partes:

Capítulo I: Planteamiento de la investigación, que comprende la identificación del problema, formulación de problemas, objetivos de la investigación, justificación, hipótesis y finalmente la metodología.

Capítulo II: Estado de arte, que comprende la estructura del sistema a desarrollar, efecto fotovoltaico, SPFV, simulador solar, célula y panel fotovoltaico, controlador de carga solar, baterías, algoritmos MPPT.

Capítulo III: Diseño y construcción del controlador con MPPT, que comprende componentes y dispositivos electrónicos, diseño de MPPT, diseño esquemático y construcción del PCB del prototipo.

Capítulo IV: Desarrollo de los algoritmos seleccionados.

Capítulo V: Pruebas de controlador con algoritmo MPPT.

Capítulo VI: Conclusiones

# Capítulo I

## 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION

---

### Introducción

---

En este primer capítulo se describe la identificación y formulación del problema, objetivos de las investigación, justificación, hipótesis y metodología empleada para desarrollar la investigación.

## 1.1: Identificación del problema

Actualmente el uso de la energía eléctrica constituye un factor muy importante en la vida diaria y en los últimos años en el Perú se realizan importantes esfuerzos por dotar de electricidad a las zonas rurales, pero hasta hoy en día, hay más de 6 millones de pobladores en nuestro país que aún no cuentan con el acceso básico de electricidad. (Rural, 2015)

Existen sistemas fotovoltaicos (SFV) en el mercado sin embargo su uso no está extendido debido a que los elementos que los conforman (baterías, paneles fotovoltaicos y controladores) son relativamente caros, lo que hace prohibitiva su aplicación masiva en zonas rurales. Debido a ello se está promoviendo en los últimos años el uso de sistemas pico fotovoltaicos (SPFV). La aplicación efectiva de dicho tipo de sistemas resulta ser conveniente en la actualidad debido a que dispositivos tales como focos LED y celulares son cada vez más eficientes, consumiendo menor cantidad de energía para lograr el mismo propósito.

La energía capturada por los paneles solares a partir de la radiación solar debe ser almacenada en baterías. Para que este proceso se realice de forma eficiente se requiere de un controlador de carga que debe ser económico para no encarecer el costo del sistema pico fotovoltaico. Los sistemas fotovoltaicos convencionales incluyen un módulo de carga eficiente lo que no es muy común de encontrar en sistemas pico fotovoltaicos. Ello a pesar de que los sistemas pico fotovoltaicos se han introducido masivamente en el mercado, éstos no son fabricados generalmente bajo el criterio de maximizar la transferencia de energía entre el panel fotovoltaico y la batería con el cual se podría capturar hasta un 15% más de energía. (Inictel, 2014)

En la actualidad existen varios controladores de carga para sistemas fotovoltaicos y ellos usan diferentes formas para realizar sus cargas, algunas son más eficientes que los otros, pero cada una tiene una forma particular de carga. Entre ellos destacaremos la forma de carga mediante algoritmos de control los cuales brindarán una mejor eficiencia. Entre los algoritmos más conocidos de carga se encuentran los siguientes: El algoritmo Perturba y Observa (P&O) que es el más básico ya que trabaja mediante 2 sensores con los cuales se controla de forma adecuada el punto de potencia de operación. Este algoritmo tiene como principales inconvenientes a las oscilaciones en estado permanente las que no pueden ser eliminadas y una pobre respuesta frente a variaciones ambientales rápidas. Por otro lado, se tiene el algoritmo de Conductancia Incremental (CONDINC), el que también trabaja con 2 sensores, pero presenta mejoras con respecto al algoritmo P&O, debido a que su respuesta frente a variaciones rápidas en las condiciones atmosféricas es mejor y, en teoría, las oscilaciones en estado permanente son eliminadas. Como desventaja, se puede mencionar una mayor complejidad computacional. (Ambiente)

En el presente proyecto de tesis se plantea el desarrollo de un algoritmo que permita realizar una eficiente transferencia de energía entre el panel solar y la batería de un Sistema Pico Fotovoltaico.

## **1.2: Formulación de los problemas:**

### **1.2.1: Problema General**

¿Es posible que mediante un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia se obtenga un cargador solar eficiente y portable para un SPFV?

### **1.2.2: Problemas Específicos**

¿En qué cantidad mejora la eficiencia el algoritmo del seguimiento del punto de máxima de potencia a ser implementado en un SPFV?

¿En cuánto afecta la variación de la radiación solar a la eficiencia del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia para la transferencia de energía del panel fotovoltaico a la batería?

## **1.3: Objetivos de la investigación**

### **1.3.1: Objetivo General**

Desarrollar un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia para mejorar la eficiencia en la transferencia de energía eléctrica de un panel fotovoltaico a una batería de un SPFV.

### **1.3.2: Objetivos Específicos**

Determinar la eficiencia por el uso del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia implementado en un SPFV.

Evaluar experimentalmente el efecto de la variación de la radiación solar sobre la eficiencia del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia.

## **1.4: Justificación**

Esta tesis permitirá demostrar la utilidad que tiene el implementar el algoritmo seguidor del punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés Maximum Power Point Tracker) en sistemas pico fotovoltaicos de tal manera que se logre un mejor aprovechamiento de la energía eléctrica entregada por un panel solar de pequeñas dimensiones. En comparación a los controladores tradicionales, el módulo desarrollado permitirá disponer de mayor cantidad de energía almacenada en una menor cantidad de tiempo. Como consecuencia se obtendrá un sistema más económico que permitirá que las personas utilicen iluminación tipo LED en las noches y puedan realizar la carga de sus teléfonos móviles.

Existen diversos algoritmos para SFV que permiten realizar la transferencia de energía eléctrica del panel solar a la batería no obstante dichos algoritmos no son generalmente implementados en SPFV, este trabajo utiliza algoritmos en los SPFV para hacerlos eficientes y utilizarlos de forma portátil en zonas alejadas.

### **1.5: Hipótesis**

El algoritmo del Seguimiento del Punto de Máxima Potencia implementado en un circuito cargador pico fotovoltaico económico, permite una mejora de la eficiencia de por lo menos un 5% con respecto a los existentes en el mercado.

### **1.6: Metodología**

Para poder lograr los objetivos planteados para la tesis y verificar la hipótesis planteada, se prosigió con la siguiente metodología:

1. Estudio del efecto de la introducción de un controlador con algoritmo MPPT en la mejora de transferencia de potencia en los sistemas pico fotovoltaicos.
2. Investigación sobre diseños electrónicos de controladores de carga de baterías.
3. Estudio de las ventajas y desventajas de utilizar controladores con algoritmo MPPT.
4. Investigación sobre los algoritmos MPPT y su implementación en lenguaje de programación C.
5. Selección de la estructura adecuada del diseño electrónico (placa de pruebas de algoritmos), que proporcione la mejor evaluación de los algoritmos a implementar.
6. Análisis comparativo de eficiencias entre algoritmos evaluados en la placa de pruebas, análisis comparativo con SPFV existentes en el mercado.
7. Prueba de todo el sistema controlador con algoritmo MPPT en laboratorio y en condiciones ambientales reales.

# Capítulo II

## 2. ESTADO DE ARTE

---

### Introducción

---

El presente capítulo está dividido en 8 subcapítulos, donde primeramente se da a conocer el diagrama de bloques del SPFV a desarrollar, luego se abarcan conceptos desde la generación de energía eléctrica mediante el sol, descripción de partes de un SPFV (panel solar, baterías y controlador de carga), simulador solar y por último un análisis de los algoritmos MPPT.

## 2.1: Estructura del sistema a Desarrollar

Con el siguiente esquema resumimos el SPFV realizado.

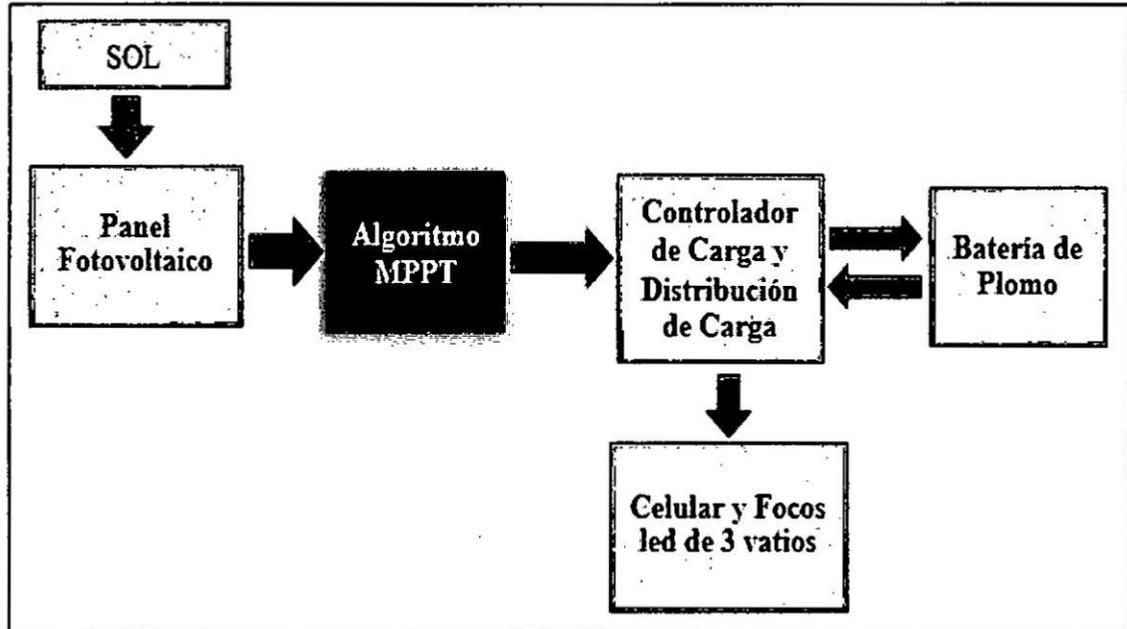


Figura 2.1 Diagrama de bloques del SPFV.

**Sol:** emite radiación solar que será transformada en energía eléctrica continua.

**Panel Fotovoltaico:** se encarga de transformar la energía solar en energía eléctrica.

**Algoritmo MPPT:** mejora la eficiencia de transferencia de potencia.

**Controlador de carga y distribución de carga:** realiza la carga correcta de la batería y distribuye de manera eficiente la energía eléctrica.

**Celular y focos LED de 3 watts:** brinda energía con salida USB (5 voltios) a un celular y nos brinda iluminación para 3 focos LED.

**Batería de Plomo:** encargada de almacenar la energía eléctrica, obtenida del sol mediante el panel fotovoltaico.

## 2.2: Energía solar

### 2.2.1: Radiación Electromagnética

La radiación electromagnética es un tipo de campo electromagnético variable, es decir, una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. Desde el punto de vista clásico la radiación electromagnética son las ondas electromagnéticas generadas por las fuentes del campo.

## 2.2.2: Espectro Electromagnético

Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de ondas electromagnéticas.

El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio.

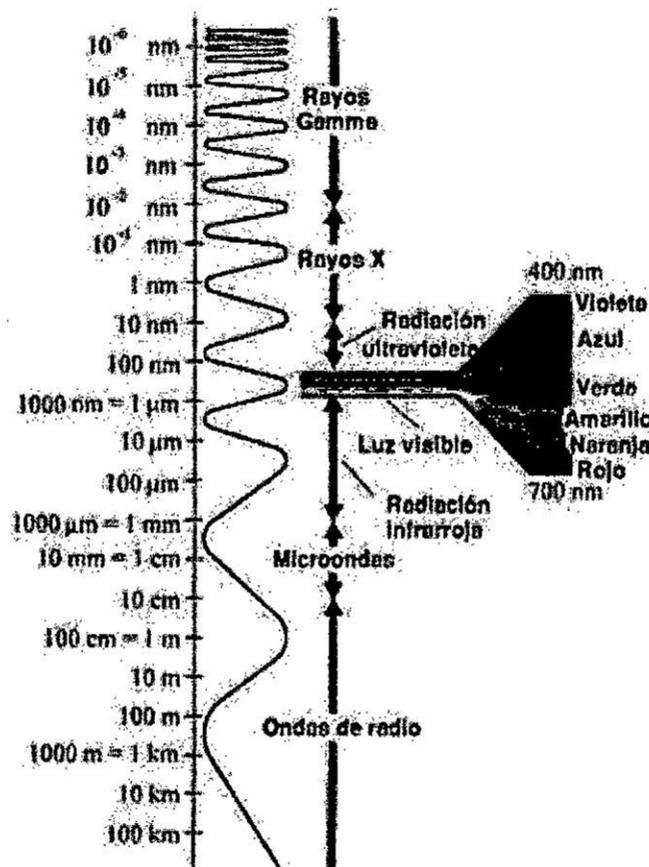


Figura 2.2 Espectro electromagnético. [Proyecto académico con el radiotelescopio de Nasa en robledo. Cap. I.]

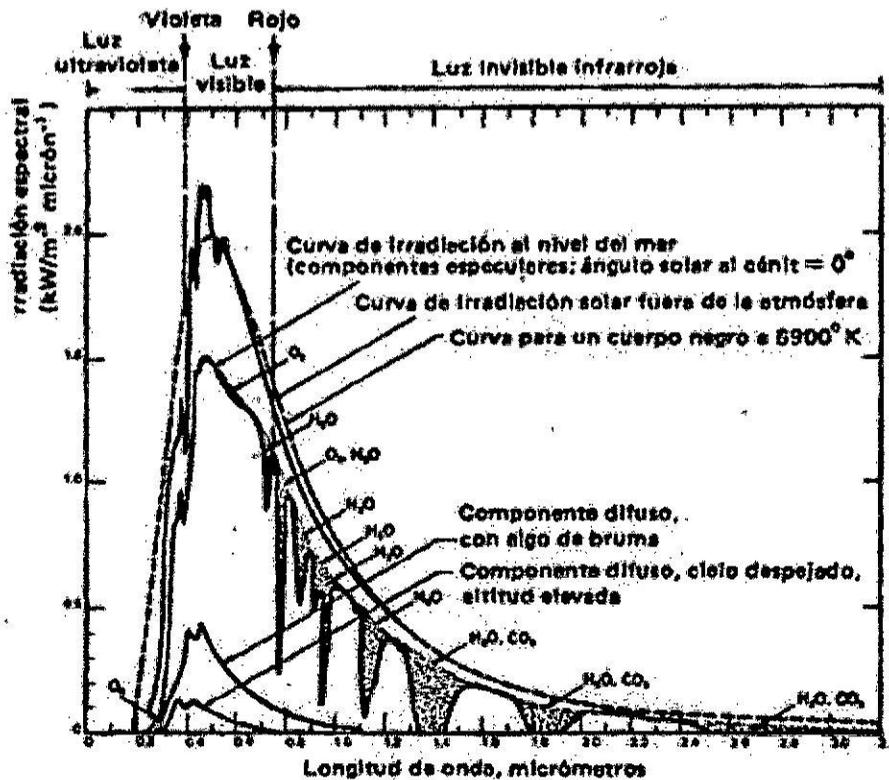
## 2.2.3: Radiación Solar

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas de diferentes frecuencias emitidas por el sol. Este conjunto lo conforma la radiación ultravioleta (200-360nm), luz visible (360-760nm) y radiación infrarroja (760-4000nm). La magnitud que mide la radiación solar es la irradiancia, su unidad es ( $w/m^2$ ).

Tipos de radiación solar:

- **Radiación directa:** radiación que no sufre ningún cambio en su dirección, a través de la atmosfera.

- **Radiación difusa:** radiación que sufre cambios en su dirección, a causa de la reflexión y difusión atmosférica.
- **Albedo:** es la radiación directa y difusa que se refleja en el suelo u otras superficies.



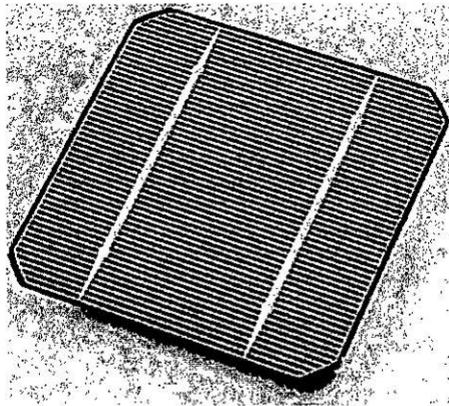
**Figura 2.3** Espectro de radiación Solar estándar en el vacío a la distancia media entre el sol y la tierra. [Instalaciones Fotovoltaicas. Cap. I. pág. 13.]

La radiación emitida por el sol se distribuye en un espectro amplio de longitudes de onda, correspondiendo la mayor parte de la energía radiada a la porción comprendida entre 0,2 y 3,0  $\mu\text{m}$ .

## 2.3: Célula y Panel fotovoltaico

### 2.3.1: Célula Fotovoltaica

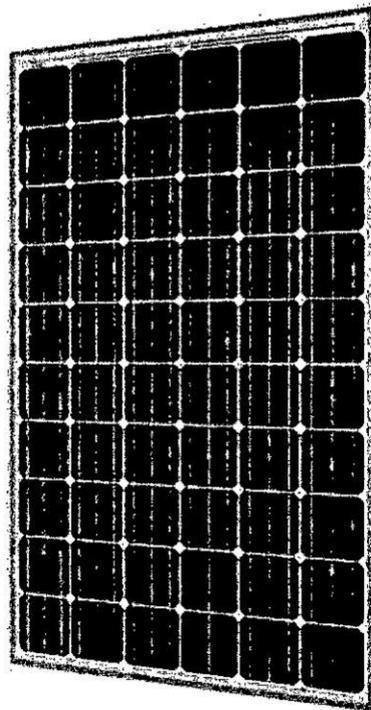
La célula fotovoltaica es un dispositivo formado por una placa delgada de material semiconductor capaz de convertir la luz en electricidad de forma directa e inmediata. Fabricada generalmente por silicio correctamente tratada.



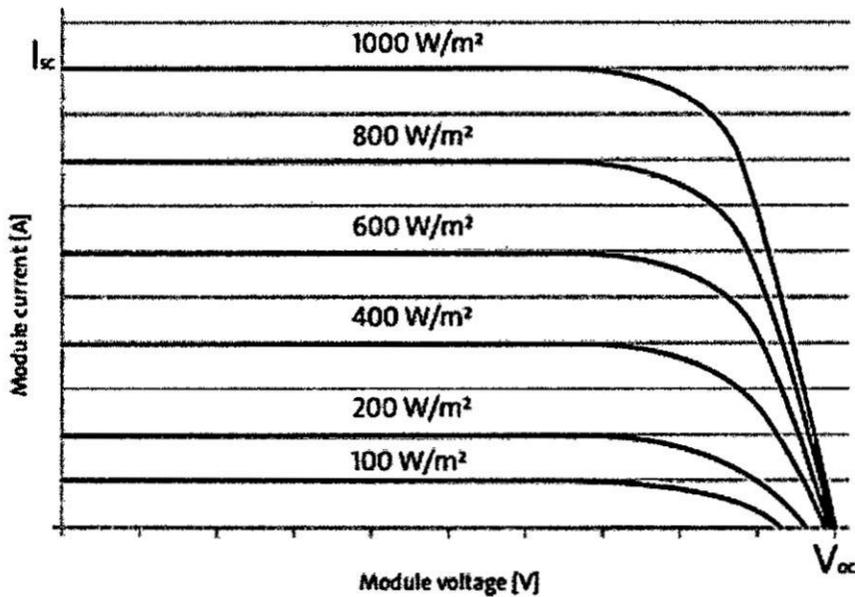
**Figura 2.4** Célula fotovoltaica. [Hoja de Datos. MI Solar].

### **2.3.2: Panel fotovoltaico**

El panel fotovoltaico es la unión de células fotovoltaicas que se interconectan entre ellas en serie y paralelo, para obtener potencias requeridas como ejemplo panel de 3, 5, 10 vatios, etc.



**Figura 2.5** Panel fotovoltaico. [Hoja de datos. Solar world.]



**Figura 2.6** Curva característica I-V. de un panel fotovoltaico.

[Hoja de datos. Solar world.]

### 2.3.3: Tipos de células Solares

La célula solar presenta los siguientes tipos:

- a) **Silicio Monocristalino.** - conformado por un cristal de silicio que luego se corta en capas delgadas que dan lugar a las células. Presentan un color azul uniforme debido al único cristal que las compone.  
Las ventajas son: las más eficientes (15-18% eficiencia), vida útil más larga, con poca luz funcionan mejor que las polis cristalinas y sus rendimientos a altas temperaturas es mucho mejor.  
Las desventajas son: presentan mayor costo, sensibles a averías por sombreado y requieren mayor cantidad de silicio en su fabricación.
- b) **Silicio Policristalino.** - conformado por varios cristales de silicio que no se encuentran en la misma dirección por lo que presentan un color azul, pero de diferentes tonalidades debido a los diferentes cristales que la componen.  
Las ventajas son: su fabricación es más simple por ellos menor costo, requiere menos silicio en su fabricación.  
Las desventajas son: menor resistencia al calor en comparación a la monocristalina, presenta una eficiencia de 13-16% que es menor a la monocristalina y requieren mayor espacio.
- c) **Silicio Amorfo.** - el fundamento de estos paneles es depositar varias capas de material fotovoltaico en una base.

Las ventajas son: fabricación más sencilla por ellos más baratas, rendimiento no es afectado por las sombras y altas temperaturas y son flexibles por lo tanto se adapta a cualquier superficie.

### 2.3.4: Circuito equivalente de una célula solar

Una célula fotovoltaica puede ser modelada mediante una fuente de corriente  $I_L$ , debida a la generación de portadores por la iluminación, conectada en paralelo a un diodo, cuya corriente  $I_D$  es debida exclusivamente a la recombinación de portadores como consecuencia de la tensión entre sus extremos  $V$ .

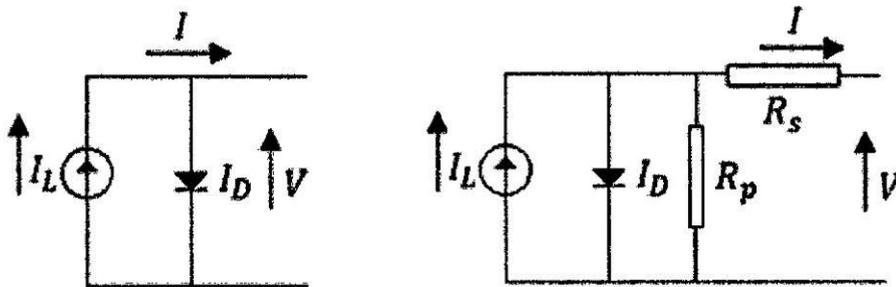


Figura 2.7 Circuito equivalente célula solar ideal (derecha) y real (izquierda).

Se representan mediante las siguientes ecuaciones:

$$I = I_L - I_D \left( \exp \left[ \frac{qV}{mKT} \right] - 1 \right) \quad (2.1)$$

$$I = I_L - I_D \left( \exp \left[ \frac{qV}{mKT} \right] - 1 \right) - \left( \frac{V - IR_s}{R_p} \right) \quad (2.2)$$

Donde:

- $I_L$  = corriente fotogenerada
- $I_D$  = corriente de saturación inversa del diodo
- $m$  = factor de idealidad del diodo
- $K$  = constante de Boltzmann
- $q$  = carga del electron
- $T$  = temperatura de la célula solar
- $R_s$  = resistencia en serie
- $R_p$  = resistencia en paralelo

### 2.3.5: Efecto Fotovoltaico

Es la emisión de electrones mediante un material cuando se hace incidir una radiación electromagnética. Cuanto mayor sea la cantidad de fotones que golpean la célula, tanto más numerosas serán las parejas electrón-hueco producidas por el efecto fotovoltaico y por lo tanto serán más elevada la cantidad de corriente producida.

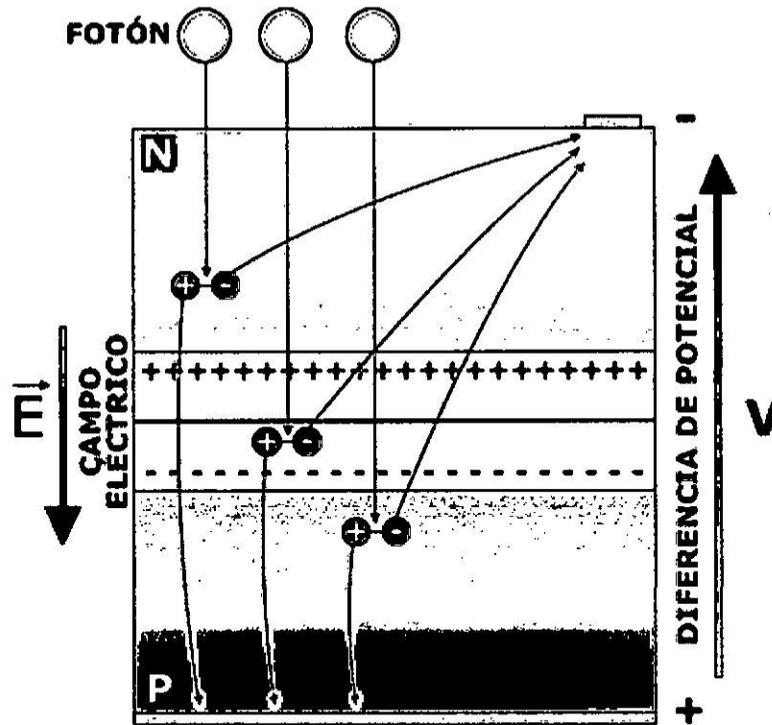


Figura 2.8 Efecto fotovoltaico. [Grupo IDEA. Curso solar.]

### 2.3.6: Efecto de la irradiancia y la temperatura

Los efectos de la irradiancia y la temperatura en el desempeño de un panel fotovoltaico se expresan de la siguiente manera mediante las siguientes ecuaciones y se utilizan las tablas que se muestran a continuación, donde  $\beta$  y  $\gamma$  son proporcionadas por el fabricante.

TABLA N° 2.1 CONDICIONES ESTÁNDAR DE MEDIDA (STC).

Irradiancia	1000W/m <sup>2</sup>
Distribución espectral	AM 1.5
Incidencia	Normal
T ° de la célula	25°C

**TABLA N° 2.2** CONDICIONES DE TEMPERATURA DE OPERACIÓN NOMINAL DE LA CÉLULA (TONC).

Irradiancia	800W/m <sup>2</sup>
Distribución espectral	AM 1.5
Incidencia	Normal
T ° de la célula	20°C

$$v_{oc} = v_{oc,STC} - \beta(T - T_{STC}) \quad (2.3)$$

$$I_{sc} = I_{sc,STC} \left( \frac{G}{G_{STC}} \right) \quad (2.4)$$

$$PM = PM_{STC} \left( \frac{G}{G_{STC}} \right) [1 - \gamma(T - T_{STC})] \quad (2.5)$$

$$T = T_{amb} + G \left( \frac{T_{amb,TONC} - T_{amb}}{G_{TONC}} \right) \quad (2.6)$$

#### 2.4: Sistema Pico Fotovoltaico

Un SPFV es aquel sistema que sirve para generar energía eléctrica de baja potencia a partir de la radiación solar que existe en nuestro planeta.

Se dice que los SPFV utilizan paneles que se encuentran en el rango desde 3-20 watts además usan cargas que consuman pequeñas energías como por ejemplo la tecnología led. (Horn, 2011)



**Figura 2.9** Sistema pico fotovoltaico (Pico lamp recreation/emergency kit).[Phocos, página oficial]

Este sistema cuenta con los siguientes elementos:

- Células fotovoltaicas en el rango de 3-20 watts.
- Controlador de Carga.
- Baterías de Plomo o Ion Litio

## **2.5: Controlador de Carga Solar**

Es un aparato electrónico que es un intermediario entre el panel y las baterías y tiene las siguientes funciones:

- Evitar que la batería se sobre descargue.
- Evitar que la batería de sobrecargue es decir exceso de energía eléctrica o descargue más de lo necesario.
- Realizar el proceso de carga correcta, para alargar el tiempo de vida de la batería.

### **2.5.1: Tipos de controladores**

Existen diferentes tipos de controladores para realizar la carga de baterías entre ellas tenemos:

- Control PWM
- Control MPPT

### **2.5.2: Controlador PWM**

Son controladores que fuerzan al panel fotovoltaico a trabajar a la tensión que este presentando la batería. La potencia en la entrada es casi igual a la potencia de salida del controlador es decir los valores de corriente y tensión de entrada son casi iguales a los de salida. De tal modo que cuando la tensión de la batería va aumentando la corriente va decreciendo hasta llegar a los 13.5 o 14 voltios, según la batería que se esté cargando y es donde este realiza el corte para evitar la sobrecarga del controlador.

Este controlador es capaz de cargar por completo a una batería porque ingresa la carga de forma gradual, es decir a pulsos de tensión en la fase de flotación.

### **2.5.3: Controlador MPPT**

Son controladores que no fuerzan al panel fotovoltaico a trabajar a la tensión de la batería, más bien al contrario, hacen que la diferencia de potencial que existe entre el panel fotovoltaico y la batería al momento de realizar una carga se convierta en corriente. Es decir, la potencia de entrada es casi igual a la potencia de salida, pero con la diferencia que la tensión de entrada es mayor a la tensión de salida y la corriente de entrada es menor a la corriente de salida.

Para lograr esto utilizan:

**Convertidor CC-CC:** que es quien se encarga de realizar la adaptación de impedancia.

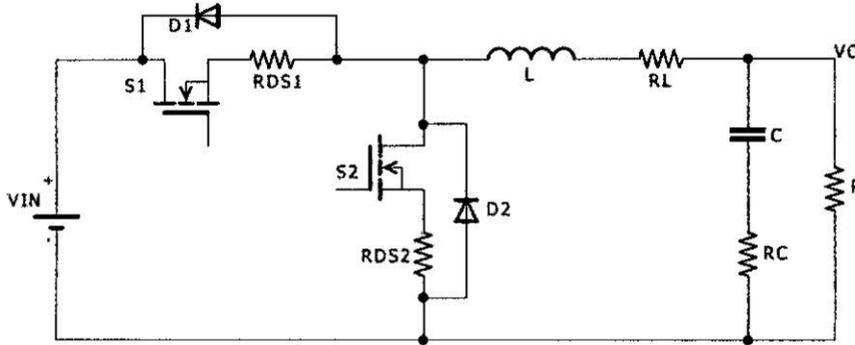
**Sensores:** se utiliza un sensor de tensión y corriente.

**Microcontrolador:** realiza el algoritmo de adaptación de impedancia controlando el PWM ya sea e frecuencia o ancho de pulso.

El controlador MPPT mejora la transferencia de potencia del sistema.

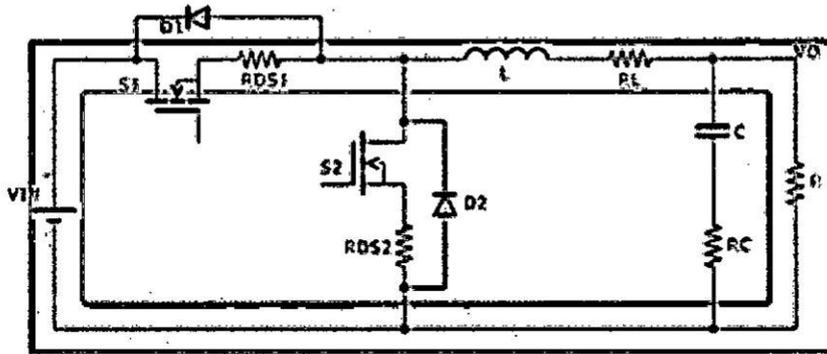
#### 2.5.4: Análisis del Convertidor Buck Síncrono (CBS) en Modo Conducción Continuo (MCC)

En la siguiente figura 2.10 se muestra el circuito esquemático del CBS y cada uno con sus respectivos parásitos resistivos. Estos parásitos contribuyen a las pérdidas de corriente continua en el convertidor. Por consiguiente, se hace un análisis más preciso al considerar los parásitos resistivos para acercarse mejor al análisis real.

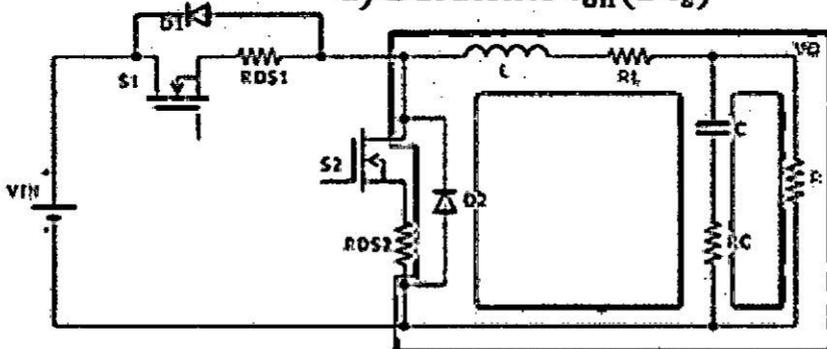


**Figura 2.10** Convertidor buck con parásitos resistivos.

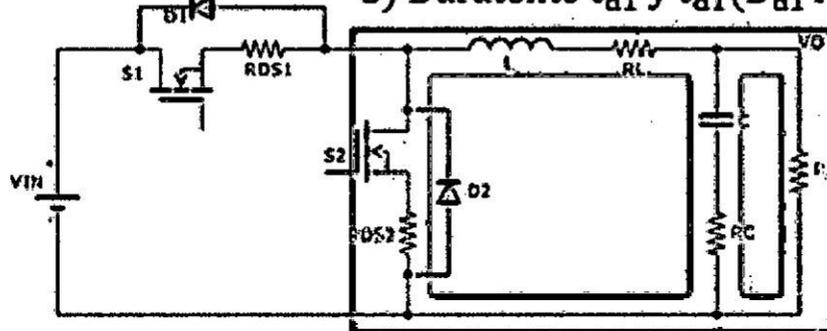
En la operación de MCC, el CBS presenta 3 circuitos equivalentes que explican de una mejor manera su funcionamiento. Los cuales corresponden a la conducción del MOSFET  $S1$  ( $t_{on}$ ), la conducción del diodo parasitario del MOSFET  $S2$  ( $t_{d1}$  y  $t_{d2}$ ) y la conducción del canal MOSFET  $S2$  ( $t_2$ ). Estos circuitos se presentan en la siguiente figura N° 2.12.



a) Durante  $t_{on} (D T_s)$



b) Durante  $t_{d1}$  y  $t_{d2} (D_{d1} T_s$  y  $D_{d2} T_s)$



c) Durante  $t_2 (D_2 T_s)$

Figura 2.11 Circuitos esquemáticos equivalentes del CBS en MCC.

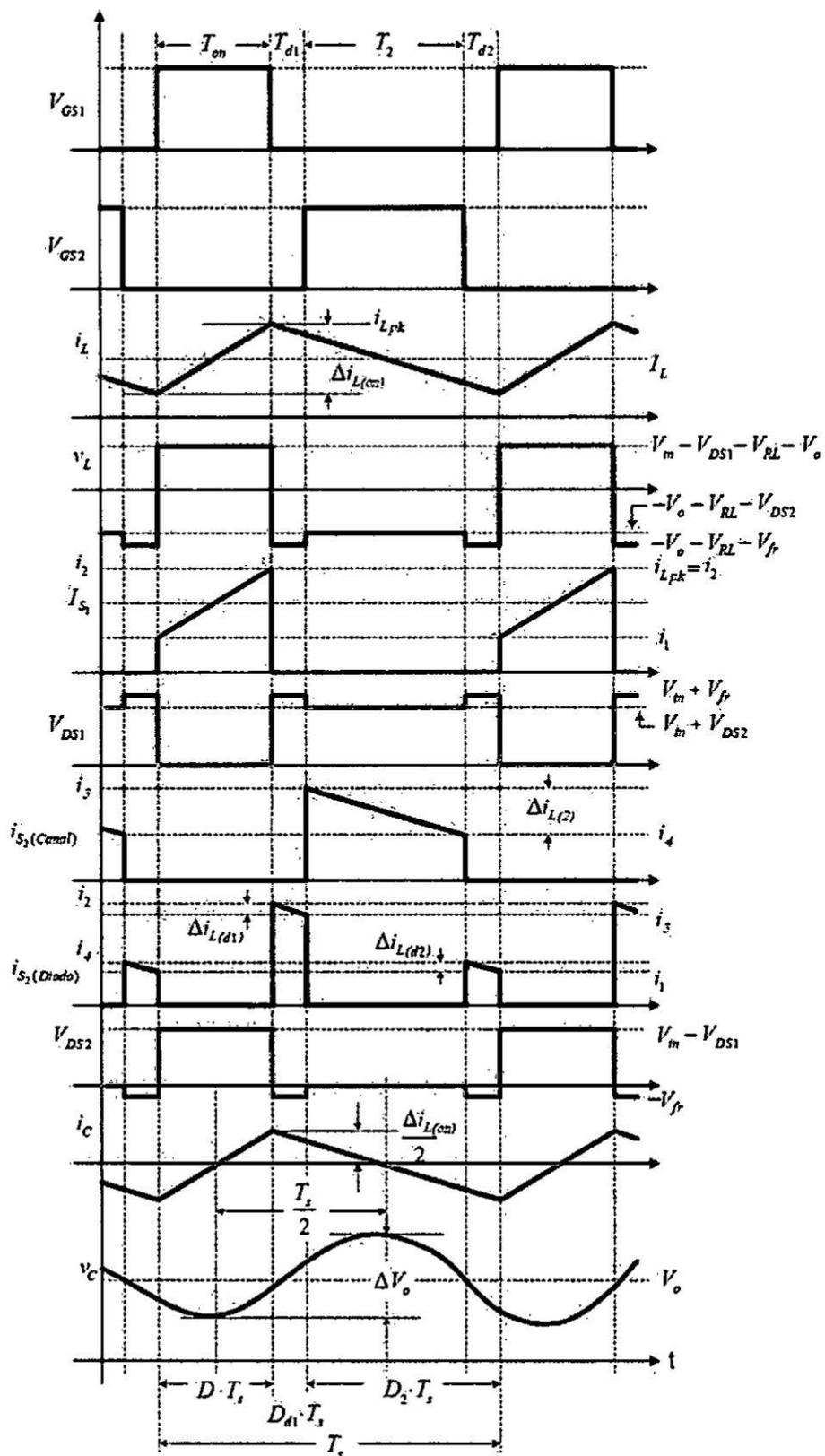


Figura 2.12 Formas de onda del CBS en MCC. [Juan C. Tesis M. Cap. III. Pág.29].

### a) Ganancia de convertidor buck en MCC

Se calculará los rizados de corriente en cada uno de los 3 tiempos, partiendo de la ecuación de tensión del inductor.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.7)$$

Según la figura 2.11 a, durante el tiempo de encendido del MOSFET S1( $t_{on}$ ) se obtiene:

$$v_{in} - v_0 - I_0(R_{DS1} + R_L) = L \frac{\Delta i_{L(on)}}{t_{on}} \quad (2.8)$$

$$\Delta i_{L(on)} = \frac{v_{in} - v_0 - I_0(R_{DS1} + R_L)}{L} t_{on} \quad (2.9)$$

$$\Delta i_{L(on)} = \frac{D[v_{in} - v_0 - I_0(R_{DS1} + R_L)]}{Lf_s} t_{on} \quad (2.10)$$

Según la figura 2.11 b, durante el tiempo de apagado del MOSFET S2( $t_{d1}$  y  $t_{d2}$ ) y se obtiene 2 tiempos muertos dentro del periodo de MCC, donde  $v_{fr}$  se refiere a la caída de tensión del diodo parasito de S2, se obtiene:

$$\Delta i_{L(d1)} = - \frac{D_{d1}[v_0 - v_{fr} + R_L I_0]}{Lf_s} \quad (2.11)$$

$$\Delta i_{L(d2)} = - \frac{D_{d2}[v_0 - v_{fr} + R_L I_0]}{Lf_s} \quad (2.12)$$

Según la figura 2.11 c, durante el tiempo de encendido del MOSFET S2( $t_2$ ) se obtiene:

$$\Delta i_{L(2)} = - \frac{D_2[v_0 - I_0(R_{DS2} + R_L)]}{Lf_s} \quad (2.13)$$

Donde:

$$D_2 = 1 - D - D_{d1} - D_{d2} \quad (2.14)$$

Para obtener la ecuación de la ganancia de corriente directa, se igualan las expresiones de los rizados.

$$\Delta i_{L(on)} = -\Delta i_{L(d1)} - \Delta i_{L(d1)} - \Delta i_{L(2)} \quad (2.15)$$

Luego para obtener la ganancia de corriente continua en el convertidor buck está dado por:

$$M = \frac{v_0}{v_{in}} \rightarrow v_0 = Mv_{in} \quad (2.16)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.10), (2.11), (2.12), (2.13) a (2.15) y en (2.16) despejando M se obtiene:

$$M = D - \frac{DI_0(R_{DS1} - R_{RDS2}) + I_0(R_{DS2} + R_L) - (D_{d1} + D_{d2})(v_{fr} - I_0R_{DS2})}{v_{in}} \quad (2.17)$$

Si se considera que ambos tiempos muertos son iguales ( $D_{dd} = D_{d1} = D_{d2}$ ), se obtiene:

$$M = D - \frac{DI_0(R_{DS1} - R_{RDS2}) + I_0(R_{DS2} + R_L) - 2D_{dd}(v_{fr} - I_0R_{DS2})}{v_{in}} \quad (2.18)$$

La ecuación (2.18) servirá para establecer la condición de frontera entre el modo de conducción continua y discontinua, despejando D de la ecuación, se obtiene una expresión para el ciclo de trabajo MCC.

$$D = \frac{Mv_{in} + I_0(R_{DS2} - R_L) + (D_{d1} + D_{d2})(v_{fr} - I_0R_{DS2})}{v_{in} - I_0(R_{DS1} - R_{DS2})} \quad (2.19)$$

### b) Inductor

Despejamos L de la ecuación (2.9) para el rizo durante el encendido de  $S_1$ ,

$$L = \frac{D[v_{in} - v_0 - I_0(R_{DS1} + R_L)]}{\Delta i_{L(on)}f_s} \quad (2.20)$$

### c) Capacitor

Para obtener el valor del condensador partimos de la ecuación de tensión del capacitor:

$$v_c = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (2.21)$$

De acuerdo a la figura 2.12 la expresión anterior se puede aproximar a la ecuación (2.22) despejando C, se obtiene la expresión para el capacitor dada por la ecuación (2.23):

$$\Delta v_0 = \frac{1}{C} \left( \frac{1}{2} \frac{T_s}{2} \frac{\Delta i_{L(on)}}{2} \right) \quad (2.22)$$

$$C = \frac{\Delta i_{L(on)}}{8f_s \Delta v_0} \quad (2.23)$$

Si se desea, también se puede sustituir la expresión del rizo de corriente en el inductor ecuación (2.10), con lo que se obtiene la expresión para el capacitor dada por la ecuación (2.24).

$$C = \frac{D[v_{in} - v_0 - I_0(R_{DS1} + R_L)]}{8\Delta v_0 L f_s^2} \quad (2.24)$$

La tensión que debe soportar el capacitor, como se puede ver en la figura 2.11 y en la figura 2.12 es la tensión de salida más del rizo de tensión, por lo tanto:

$$V_c = V_0 + \Delta V_0 \quad (2.25)$$

#### d) Esfuerzos eléctricos en el MOSFET superior (S<sub>1</sub>)

El MOSFET S<sub>1</sub> conduce la corriente del inductor durante t<sub>on</sub>, por lo que su corriente promedio está dada por:

$$I_{S1} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_{S1}(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} i_{S1}(t) dt = \frac{1}{T_s} \left[ \frac{(i_1 + i_2)}{2} (DT_s) \right] \quad (2.26)$$

De acuerdo a la figura 2.12, i<sub>1</sub> e i<sub>2</sub> están dadas por:

$$i_2 = i_{pk} = I_0 + \frac{\Delta i_{L(on)}}{2} \quad (2.27)$$

$$i_1 = I_0 - \frac{\Delta i_{L(on)}}{2} \quad (2.28)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.27) y (2.28) en la ecuación (2.26) y simplificando, se obtiene la expresión para la corriente promedio a través de S<sub>1</sub>.

$$I_{S1} = DI_0 \quad (2.29)$$

La corriente pico del transistor es la misma que la del inductor, por lo tanto:

$$i_{S1pk} = I_0 + \frac{\Delta i_{L(on)}}{2} = I_0 + D \left[ \frac{V_{in} - V_0 - I_0(R_{DS1} + R_L)}{2Lf_s} \right] \quad (2.30)$$

De las formas de onda de la Fig.2.12, se observa que el esfuerzo máximo de tensión ocurre durante los tiempos muertos,  $t_1$  y  $t_2$ , cuando:

$$V_{DS1off} = V_{D1} + V_{fr} \quad (2.31)$$

### e) Esfuerzos eléctricos en el MOSFET inferior ( $S_2$ )

El MOSFET  $S_2$  conduce la corriente del inductor en tres tiempos: 2 tiempos a través del diodo parásito durante  $t_{d1}$  y  $t_{d2}$  y 1 tiempo a través del canal del MOSFET durante  $t_2$ , la corriente promedio a través del diodo parásito es:

$$I_D = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_D(t) dt = \frac{1}{T_s} \left[ \int_0^{D_{d1}T_s} i_D(t) dt + \int_0^{D_{d2}T_s} i_D(t) dt \right] \quad (2.32)$$

$$I_D = \frac{1}{T_s} \left[ \frac{(i_2 + i_3)}{2} D_{d1} T_s + \frac{(i_4 - i_1)}{2} D_{d2} T_s \right] \quad (2.33)$$

De acuerdo a la figura 2.12,  $i_3$  e  $i_4$  están dadas por:

$$i_3 = i_0 + \frac{\Delta i_{L(on)}}{2} - \Delta i_{L(d1)} \quad (2.34)$$

$$i_4 = i_0 - \frac{\Delta i_{L(on)}}{2} - \Delta i_{L(d2)} \quad (2.35)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.34) y (2.35) en la (2.33), se obtiene:

$$I_D = i_0(D_{d1} + D_{d2}) + \frac{D_{d1}(\Delta i_{L(on)} - |\Delta i_{L(d1)}|)}{2} + \frac{D_{d1}(-\Delta i_{L(on)} + |\Delta i_{L(d2)}|)}{2} \quad (2.36)$$

Si ambos tiempos muertos son iguales ( $D_{dd} = D_{d1} = D_{d2}$ ), la ecuación (2.36) se simplifica a :

$$I_D = 2D_{dd}I_0 \quad (2.37)$$

La corriente máxima en el diodo parásito también es igual a  $i_{Lpk}$ ,

$$i_{Dpk} = i_{Lpk} = I_0 + \frac{\Delta i_{L(on)}}{2} \quad (2.38)$$

La máxima tensión de bloqueo que debe soportar el diodo parásito es:

$$V_{AKS2} = V_{in} - I_0 R_{DS1} \quad (2.39)$$

La conducción de la corriente del inductor a través del canal de  $S_2$  ocurre durante  $t_2$ , por lo tanto, la corriente promedio es:

$$I_{S2} = \frac{1}{T_s} \int_0^{D_2 T_s} i_{S2}(t) dt = \frac{1}{T_s} \left[ \frac{(i_3 + i_4)}{2} D_2 T_s \right] \quad (2.40)$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.34 y 2.35 en la 2.40, se obtiene:

$$I_{S2} = D_{d2} I_0 + \frac{D_2}{2} (|\Delta i_{L(d2)}| - |\Delta i_{L(d1)}|) \quad (2.41)$$

Del mismo modo, si ambos tiempos muertos son iguales ( $D_{dd} = D_{d1} = D_{d2}$ ), la ecuación 2.41 se simplifica a:

$$I_{S2} = D_2 I_0 \quad (2.42)$$

El pico de corriente a través del canal de  $S_2$  es:

$$i_{S2pk} = I_0 + \frac{\Delta i_{L(on)}}{2} - |\Delta i_{L(d1)}| \quad (2.43)$$

La tensión máxima de bloqueo que debe soportar el canal de  $S_2$ , es igual a la del diodo parásito:

$$V_{DS1OFF} = V_{in} - I_0 R_{DS1} \quad (2.44)$$

## 2.6: Baterías

Una batería, también llamada acumulador, es un dispositivo que consiste en una o más celdas electroquímicas conectadas en serie que pueden convertir la energía química almacenada en energía eléctrica. Cada celda consta de un electrodo positivo, o ánodo y un electrodo negativo, o cátodo y electrolitos que permiten que los iones se muevan entre los electrodos, facilitando que la corriente fluya fuera de la batería para llevar a cabo su función.

Es un elemento crítico en un sistema fotovoltaico aislado debido a que su precio es elevado y suele ser el primer componente del sistema que se reemplaza. Requieren

de un mantenimiento periódico y de ciertas consideraciones de diseño para aumentar el número de ciclos que son capaces de funcionar. Por otro lado, es uno de los elementos más contaminantes y peligrosos del sistema fotovoltaico debido a los materiales con los que se fabrica. Por estos motivos es de gran importancia realizar un buen diseño del banco de baterías que garantice tanto la vida máxima de la misma como unas condiciones de operación que no supongan un riesgo para la salud.

### 2.6.1: Tipos de batería para Sistemas Fotovoltaicos

Existen varios tipos de batería nombraremos los que se usan para aplicaciones fotovoltaicas, pero nos centraremos en las de plomo ácido.

- Batería de plomo ácido
- Batería de placas tubulares OPzS y OPzV
- Batería de ion-litio

### 2.6.2: Baterías Plomo-Ácido

Para aplicaciones fotovoltaicas se emplean generalmente las baterías de plomo por su buena relación con el precio. La mayoría de baterías de plomo ácido se asemejan a los usados en automóviles, pero estas están optimizadas para una aplicación diferente.

Están compuestas de celdas de 2 voltios nominales que se unen en serie para obtener 6, 12, 24 voltios. En sistemas fotovoltaicos encontramos distintos tipos que su diferencia radica en su composición interna, que las divide en sus respectivas categorías.

- Baterías líquidas:** estas baterías emplean placas de plomo, un electrolito de ácido sulfúrico y separadores para placas resistentes al ácido. Por lo general no están selladas y no se recombinan los gases en su interior, por lo que estos expulsan mediante respiraderos al ambiente en el que se encuentre la batería.  
Estas baterías tienen una buena relación de capacidad y precio, pero requieren más trabajo de mantenimiento.
- Baterías reguladas por válvula:** son baterías selladas de plomo ácido. Debido a su construcción no requiere ventilación, pudiéndose montar en cualquier orientación. No requieren de mantenimiento constante. Se presentan 2 tipos de batería VRLA que son las de celdas de gel y AGM.



Figura 2.13 Batería de plomo ácido. [Hoja de datos de Oxford].

## 2.7: Simulador Solar

Estas fuentes de luz a la medida fueron desarrolladas para simular la irradiación solar para el ensayo de componentes fotovoltaicos en el laboratorio o en la planta de producción. El objetivo es exponer una mayor superficie muy uniforme a la irradiación por la luz estable paralelo, la intensidad de la irradiación y la composición espectral que corresponde a un lugar geográfico definido. Para la comparación internacional, los dispositivos se agrupan de acuerdo con la norma IEC y cuatro criterios.

Las lámparas tradicionalmente utilizadas son las de xenón, aunque actualmente la tendencia es utilizar focos.

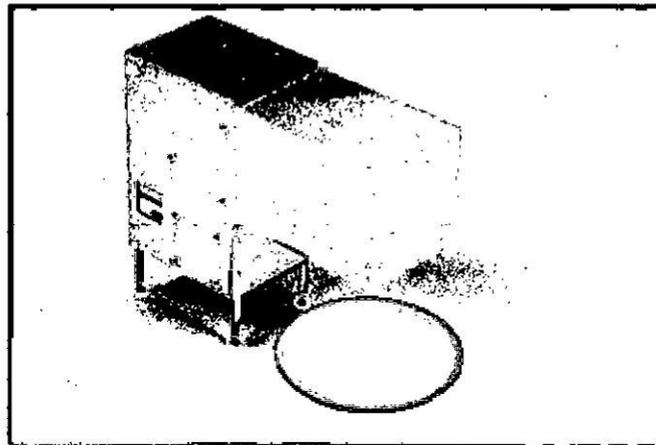
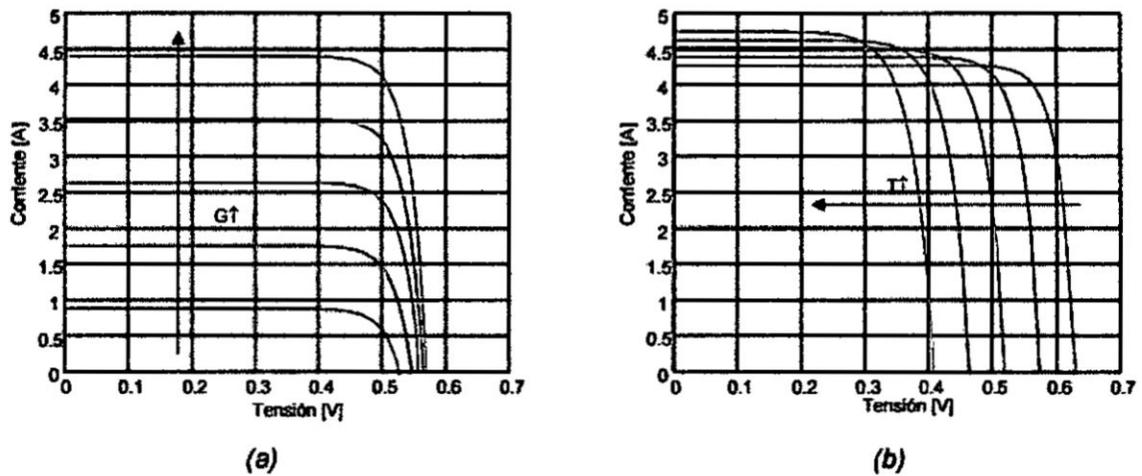


Figura 2.14 Simulador Solar. [LEISTUNGSELEKTRONIK JENA GMBH, página oficial].

## 2.8: Algoritmos MPPT

Un SPFV cuenta con un panel fotovoltaico que funcionan en distintas condiciones de radiación y temperatura. Ellos nos presentan una curva característica Intensidad de corriente vs tensión (I-V) y potencia vs tensión (P-V) del que puede observarse que existe un único punto denominado punto de máxima potencia (MPP, maximum power point), en el cual el generador fotovoltaico proporciona la potencia máxima posible para ciertas condiciones ambientales.

Cuando se conecta directamente una carga a un generador fotovoltaico (acoplamiento directo), el punto de operación viene definido por la intersección de sus características I-V, tal y como se muestra en la figura 2.15.



**Figura 2.15** a) Característica I-V en función a la radiación solar. b) Características P-V en función a la temperatura. [Daniel G. (2003). Tesis doctoral. Cap. II. p.68]

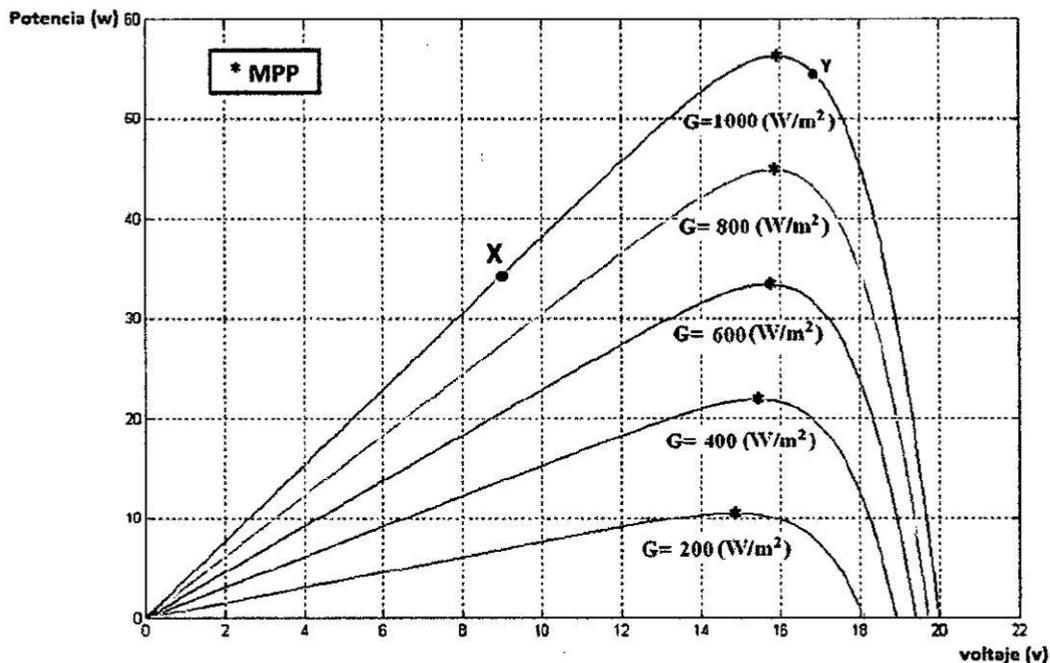
Para aprovechar al máximo la potencia que nos brinda un panel solar se inserta entre el generador fotovoltaico y la carga un convertidor DC/DC provisto de un algoritmo para el ajuste automático de su ciclo de trabajo, dando lugar a lo que se conoce como sistema MPPT. Así, el MPPT controla la tensión y corriente del generador fotovoltaico con independencia de la carga, tratando de situarlo en el MPP. Presentamos diferentes algoritmos para encontrar el MPPT los cuales son: Perturbación y Observación, conductancia incremental y controlador basada en lógica difusa.

### 2.8.1: Perturbación y Observación (P&O)

Es uno de los algoritmos más usado en la práctica debido a que es el más sencillo en su implementación a nivel hardware y software.

Como ventaja que brinda es que no requiere de un riguroso modelaje del panel fotovoltaico, tampoco necesita sensores para medir la radiación solar ni la temperatura, solo necesitamos saber la tensión y corriente de entrada para poder encontrar el MPP.

El método se basa en modificar la tensión de entrada de forma continua, para que el panel fotovoltaico trabaje siempre lo más cerca al MPP.



**Figura 2.16** Características P-V de un generador fotovoltaico para distintos niveles de radiación. [J. Manuel E. (2011). Tesis doctoral. Cap. II. p.70]

Como ejemplo, si se supone que el panel fotovoltaico opera en el punto X o Y de la figura 2.16, se observa que se encuentra lejos del MPP. Como consecuencia el algoritmo P & O tendrá que perturbar la tensión variando el ciclo de trabajo del CC-CC en un pequeño intervalo, este intervalo se presentará dada las condiciones de operación del MPP.

Si  $\Delta P > 0$  se tendrá que aumentar el ciclo de trabajo del CC-CC en la misma dirección, pero Si  $\Delta P < 0$  se tendrá que disminuir la tensión de trabajo en la misma dirección de esta manera mantener el punto de operación lo más cerca y estable.

Este algoritmo también presenta desventajas que reducen la eficiencia del seguimiento como por ejemplo cuando la radiación solar decae, la curva P-V se vuelve menos pronunciada como podemos observar en la figura 2.13 Entonces es más difícil de encontrar el MPP ya que los cambios en la potencia son pequeños.

Otra desventaja es que no se logra determinar cuándo se encuentra el MPP ya que se encuentra siempre oscilando en torno a él. [10].

También se observa que el algoritmo presenta errores ante cambios rápidos de radiación solar. [10].

Para este algoritmo, a raíz de las desventajas que presentan muchos autores, se han propuesto mejoras como, por ejemplo: adicionar un tiempo de espera si el sistema detecta una serie de cambios en la perturbación, de esa manera indicar que se

encontró el MPP, sin embargo, esto vuelve muy lento al algoritmo y seguiría presentados errores en días nublados.

Otra mejora sería medir 2 veces la potencia para poder observar si el MPP cambio, pero este cambio también volvería más lento al algoritmo y por consecuencia seguiría presentando errores en días nublados.

### 2.8.2: Conductancia Incremental (CI)

El algoritmo de conductancia incremental [12] se basa en la diferenciación de la potencia proporcionada por el panel solar con respecto a la tensión. Dicha derivada debe ser cero para situarse en el MPP. Este hecho se muestra en la ecuación:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \quad (2.45)$$

Arreglando los términos de la ecuación:

$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \quad (2.46)$$

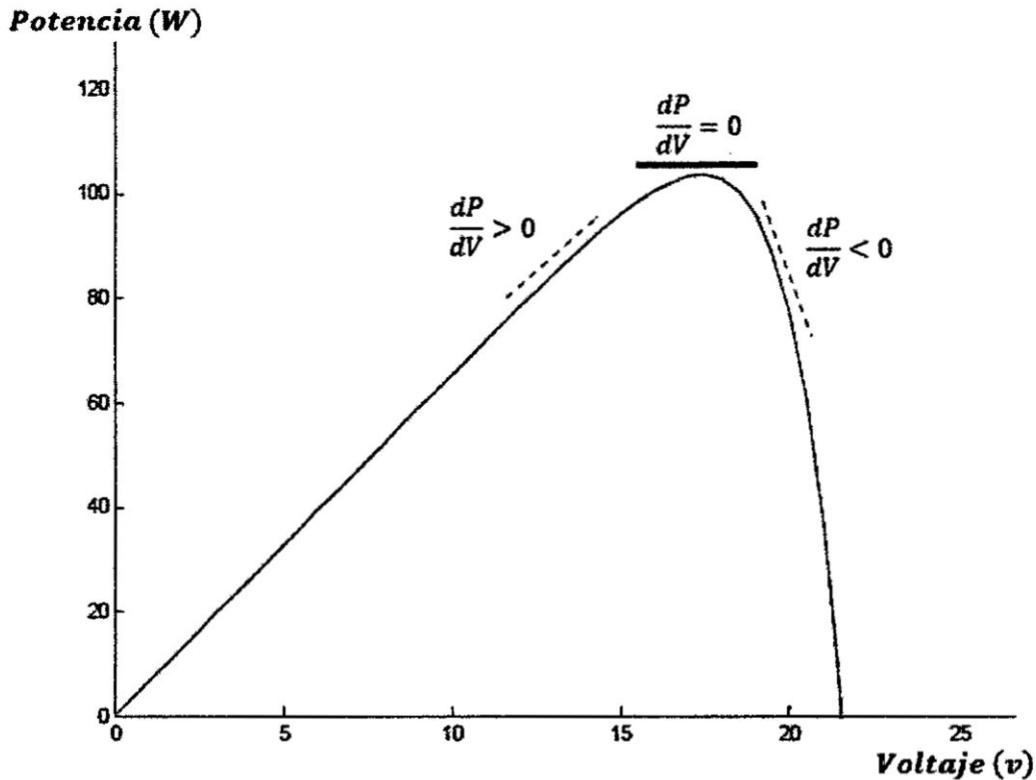
Cabe señalar que el lado izquierdo de la ecuación (2.46) representa la conductancia instantánea del panel solar, mientras que el lado derecho representa la conductancia incremental. Así, para situarse en el punto de máxima potencia, estas dos cantidades deben ser iguales en magnitud, pero opuestos en signo. Si el punto al que se encuentra operando el panel solar, se encuentra lejos del punto de máxima potencia, se puede obtener un conjunto de ecuaciones provenientes de la ecuación que indican si la tensión de operación del panel está cerca o lejos del MPP. [6].

Estas ecuaciones son resumidas en las ecuaciones para los siguientes casos:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}; \left( \frac{dP}{dV} = 0 \right) \quad (2.47)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}; \left( \frac{dP}{dV} > 0 \right) \quad (2.48)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}; \left( \frac{dP}{dV} < 0 \right) \quad (2.49)$$



**Figura 2.17** Curva P-V bajo seguimiento del MPP con algoritmo Conductancia Incremental.

Las ecuaciones mencionadas son utilizadas para determinar la dirección en la cual debe ocurrir una perturbación para mover el punto de operación lo más cercano al MPP, y la perturbación se ha de repetir hasta lograr que la derivación sea igual a 0.

Una vez localizado el MPP, el MPPT continúa operando en este punto hasta existir algún cambio en la corriente medida. Este cambio en la medición de corriente indica que ha variado el nivel de radiación solar incidente a carga constante. Para compensar el movimiento del MPP, el MPPT debe incrementar o disminuir la tensión de operación del panel solar.

Como ventaja principal del algoritmo Conductancia Incremental con respecto al P&O, se puede calcular en cada momento la dirección del punto de trabajo del panel fotovoltaico para estar lo más cerca al MPP, como también se puede determinar el momento en que se alcanza el MPP. En consecuencia, el algoritmo al ser sometido a cambios rápidos no tomará una dirección errónea para el cambio y además no se encontrará oscilando.

### 2.8.3: Constante de Tensión y de Corriente

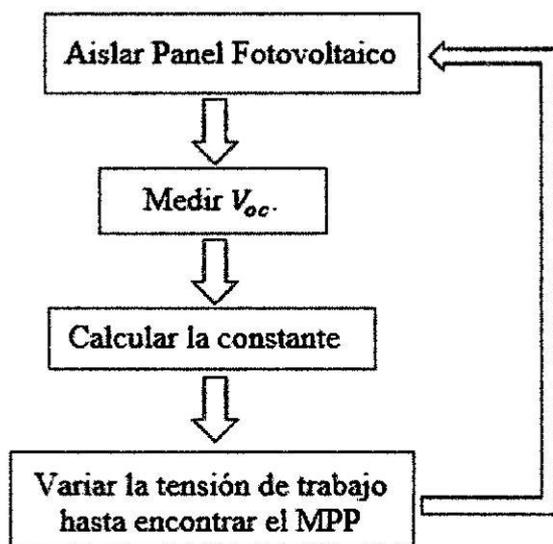
Este algoritmo utilizado en la referencia [11], se basa en la tensión MPP ( $V_{MPP}$ ) y de tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) del panel fotovoltaico. Si observamos en la

ecuación 2.50 vemos que la relación entre  $V_{MPP}$  y  $V_{oc}$  es aproximadamente una constante.

Es la siguiente:

$$\frac{V_{MPP}}{V_{oc}} \cong k < 1 \quad (2.50)$$

La operación de este algoritmo es de la siguiente manera: tenemos que aislar temporalmente al panel fotovoltaico para poder medir el  $V_{oc}$ . Se presenta el diagrama de flujo para construir el siguiente algoritmo.



**Figura 2.18 Diagrama de flujo de constante de tensión y corriente.**

A pesar de que este sistema es muy simple resulta difícil la elección del valor de  $k$ .

#### **2.8.4: Célula piloto**

Este algoritmo es una mejora al algoritmo constante de tensión y corriente pero no exitosa, ya que ahora insertamos al sistema una célula piloto que tenga las mismas características que presente el panel fotovoltaico que generara la energía. En este caso ya no se interrumpirá al sistema generador de energía ya que se medirá el  $V_{oc}$  constantemente mediante la célula piloto con esto se mejora las pérdidas que se puede generar por desconexión del sistema, pero el problema de establecer la constante  $k$  permanece.

El inconveniente que presenta es que el parámetro de la célula piloto debe estar cuidadosamente igual al del panel generador.

### 2.8.5: Basado en Lógica Difusa

La configuración del controlador difuso para un convertor DC/DC está dado por la figura 2.18. En dicha figura se observa que tanto la corriente y la tensión son censados, y luego llevados a los canales A/D del microcontrolador, para luego obtener el error el cual es una de las entradas del controlador difuso, dicho error se obtiene según la ecuación:

$$E(k) = \frac{dP}{dV} = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (2.51)$$

Donde  $P(k)$  y  $V(k)$  son la potencia y la tensión del panel fotovoltaico respectivamente. Por lo tanto, para obtener la máxima potencia foto generada  $E(k)$  debe ser cero.

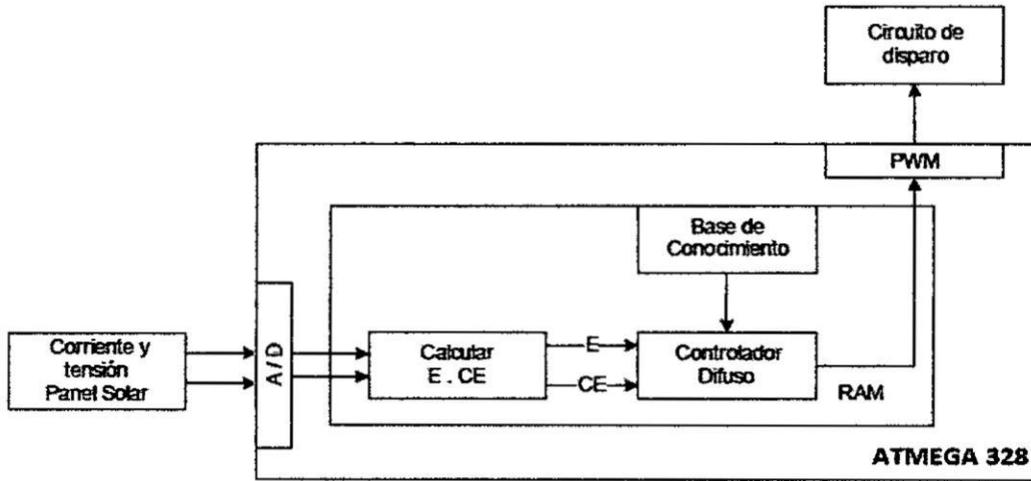


Figura 2.19 Esquema de control Difuso para el convertor DC/DC.

La entrada restante al controlador difuso corresponde al denominado cambio de error, el cual se determina haciendo la diferencia entre el valor actual del error y su valor anterior:

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (3.52)$$

El algoritmo de control difuso se divide en tres etapas. La primera etapa consiste en la **fuzzificación**, en ella los datos son transformados para ser trabajados en un ambiente difuso. Posteriormente, en la **etapa de inferencia y toma de decisiones** se definen las reglas del sistema y se evalúan para obtener una salida del tipo difusa. Finalmente, la salida difusa ingresa a la etapa de **desfuzzificación**, en donde la salida obtenida es nuevamente transformada en una variable concreta entendible por el resto del sistema.



**Figura 2.20** Configuración del controlador Difuso.

Finalmente, en esta figura 2.20 se muestra la configuración del controlador difuso, el cual está compuesto de un escalamiento en la entrada y la salida, fuzzificación, toma de decisiones (inferencia), desfuzzificación. Los factores de escala SE, SCE Y SdD cambia las entradas y salida proporcionalmente. La salida dD se obtiene a partir del estado de las variables E y CE donde cada uno se deriva de la señal actual dividiendo por el factor de escala respectivo. La variable de salida es desfuzzificada y multiplicada por el factor de escala SdD para construir la señal de control PWM. Su papel es afinar el controlador difuso para obtener el seguimiento del punto de máxima potencia de un sistema fotovoltaico.

## **Capítulo III**

---

### **3. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL CONTROLADOR DE CARGA DE BATERIAS DE Pb**

---

#### **Introducción**

Este capítulo describe el diseño electrónico, selección de componentes electrónicos, diseño de las tarjetas electrónicas, construcción y prueba de funcionalidad de armado del controlador básico y MPPT. Esto se realiza con el objetivo de desarrollar los algoritmos MPPT, grabarlos al microcontrolador, probarlos para compararlos y elegir el más eficiente en el caso de un SPFV.



$$\frac{I_{eoc}}{I_{ch}} = \frac{1.278(14350 + R3)}{0.12 * 10^6} \quad (3.2)$$

Tenemos  $\frac{I_{eoc}}{I_{ch}} = 0.38$  y remplazamos en la ecuación (3.2) y obtenemos  $R3 = 21.3k$   
 Para el termistor recomiendan en la hoja de datos usar un termistor tipo NTC de  $10K\Omega$ .

### c) Calculo de R7, C7 Y R6

De la hoja de datos obtenemos la siguiente fórmula para calcular R7, C7 y R6.

$$V_{bat} = 3.69 * \left(1 + \frac{R7}{R6}\right) + IB * R7 \quad (3.3)$$

Tenemos  $R7 = 500K$ ,  $IB = 40nA$ ,  $V_{bat} = 14.8v$  y remplazamos en la ecuación (3.3) entonces obtenemos  $R6 = 166K$ .

Luego para obtener C7.

$$C7 = 8 * \left(\frac{R7}{R6}\right) pf \quad (3.4)$$

Remplazando R6 y R7 en la ecuación (3.4) y obtenemos a  $C7 = 2.66pf$ .

### d) MOSFET's M1

Para seleccionar el MOSFET's se seleccionó el valor sugerido en la hoja de datos.

### e) Diodos D1 y D2

El tipo de diodo usado en el diseño es un diodo schottky, se seleccionó el STPS5L25B-TR ya que cumplía con la sugerencia de la hoja de datos.

### f) Calculo del inductor Rcs y el inductor L

Para calcular el inductor se usó la siguiente formula de la hoja de datos.

$$L = \frac{1}{(f)(\Delta I_L)} V_{BAT} \left(1 - \frac{V_{BAT}}{V_{CC}}\right) \quad (3.5)$$

Remplazando  $\Delta I_L = 0.487$ ,  $f = 300KHZ$ ,  $V_{BAT} = 14.8v$ ,  $V_{CC} = 18v$  en la ecuación (3.5) obtenemos el valor de  $L = 18\mu H$ .

Para calcular Rcs se usó la siguiente formula que se encuentra en la hoja de datos.

$$R_{cs} = \frac{120\text{mV}}{I_{\text{constantChargerCurr}}} \quad (3.6)$$

Para obtener una carga constante de 1.2A como máximo reemplazamos en la formula (3.6) y obtenemos un  $R_{cs} = 0.1\Omega$ .

### 3.1.2: Componentes de controlador básico

Para realizar el controlador básico como se mencionó en el diseño, se utilizó el CN3717 con componentes externos como resistencias, capacitores y diodos rectificadores donde todos ellos son componentes superficiales, además se utilizó un inductor y un termistor NTC (coeficiente de temperatura negativa), todos ellos son componentes DIP.



Figura 3.2 Termistor NTC de 10kΩ.



Figura 3.3 Inductor de 18μH.

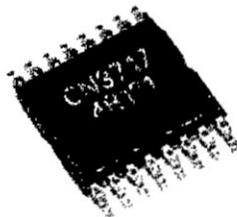


Figura 3.4 Chip CN3717.

### 3.1.3; Circuito esquemático del controlador básico

Este circuito esquemático se realizó para poder construir el PCB o tarjeta electrónica de nuestro controlador básico.

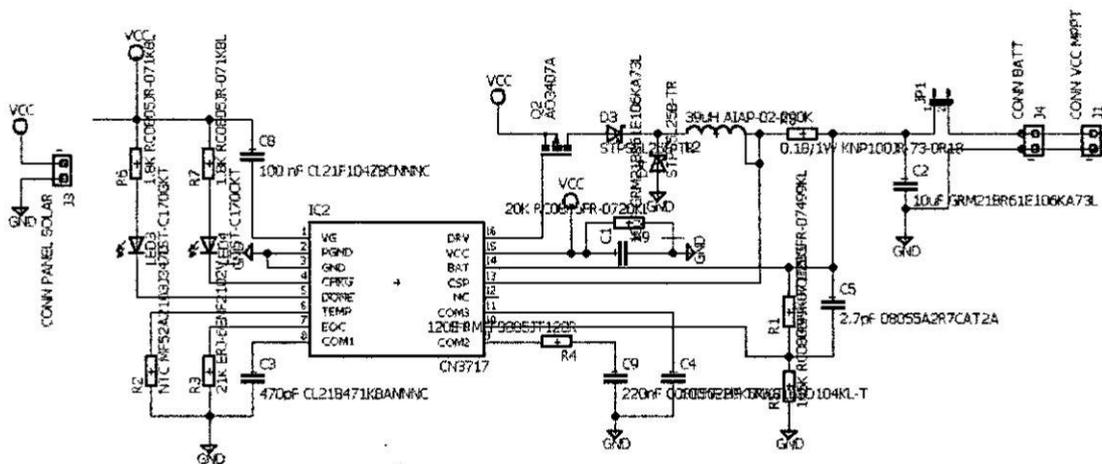


Figura 3.5 Esquemático de controlador de carga básico.

### 3.1.4: Tarjeta electrónica de controlador básico

Se realizó la tarjeta electrónica en el software Eagle.

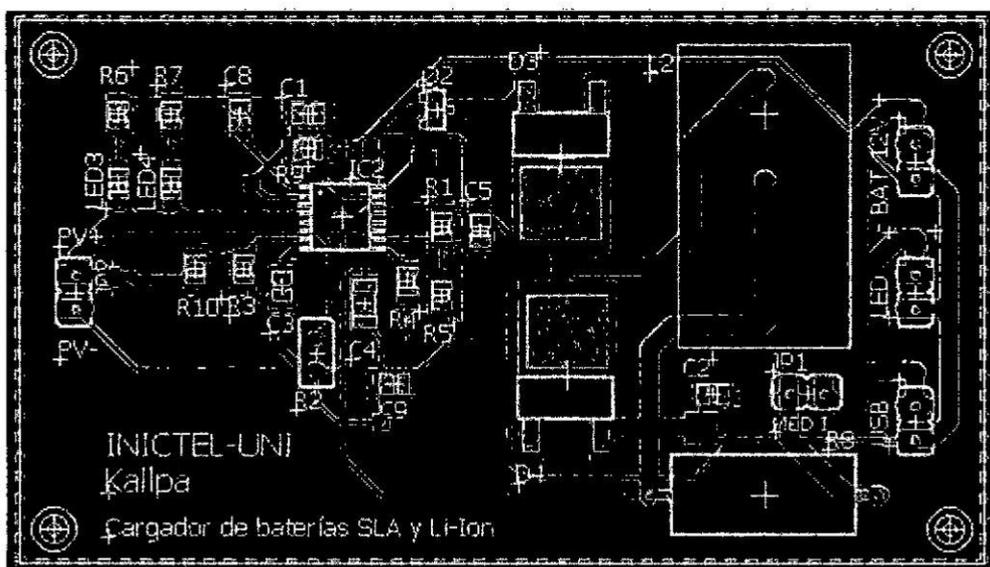


Figura 3.6 Tarjeta de controlador de carga básico.

## 3.2: Diseño de controlador MPPT

### 3.2.1: Especificaciones generales del Prototipo

El controlador consta de las siguientes características:

- Potencia máxima de 20 vatios.
- Corriente de entrada máxima de 1 amperio.
- Tensión de entrada máxima de 25 voltios.

- Frecuencia de conmutación de 57 KHz.
- Algoritmo MPPT.
- Driver limitador de tensión para focos tipo led.
- 1 salida de USB con alta eficiencia (75-88%).
- Carga baterías de 12 voltios.

### 3.2.2: Diseño del controlador MPPT

#### a) Sensores

Se realizó el diseño para el censado de corriente y tensión.

#### Sensor de Tensión

Para el censado de la tensión se utilizó un divisor resistivo. Los valores para R1 y R2 se determinarán con la siguiente ecuación:

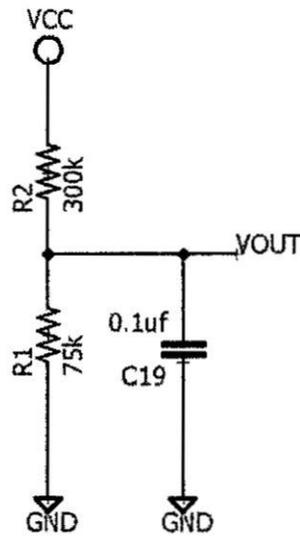
$$V_{out} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{cc} \quad (3.7)$$

Tenemos un  $V_{out}$  máximo de 5 voltios y como nuestro panel nos brinda una tensión en circuito abierto de 21- 22 voltios, por ello se eligió  $V_{cc} = 25$  voltios.

$$5 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot 25 \quad (3.8)$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1x}{4x} \quad (3.9)$$

De esta relación se elige  $x = 75k$  entonces  $R_1 = 75k$  y  $R_2 = 300k$  respectivamente como se muestra en la fig. N°3.9 y estos valores son comerciales.

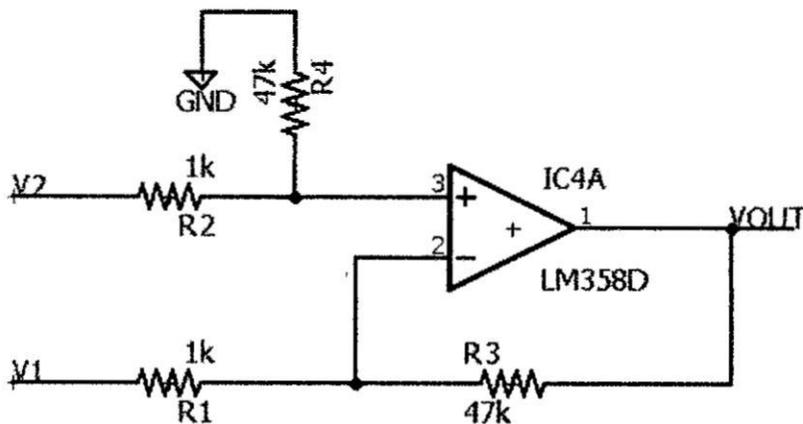


**Figura 3.7** Divisor de tensión.

Además, como se muestra en la figura 3.9 se observa un condensador de 0.1 uf que sirve como filtro para limpiar a la señal que recibirá nuestro microcontrolador con esto evitar los ruidos.

### Sensor de Corriente

Para censar la tensión se utilizó el amplificador Operacional LM358 en configuración restador y para determinar la ganancia se realizó las siguientes ecuaciones:



**Figura 3.8** Amplificador operacional LM358 en configuración restador.

Sabemos que el amplificador es ideal y tenemos  $v_+ = v_-$  del grafico procedemos a encontrar primero el valor de  $v_+$  y vemos que en  $v_2$  se encuentra un divisor de tensión.

$$v_+ = v_- = \left( \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) v_2 \quad (3.10)$$

También la corriente en los nodos su suma debe ser 0.

$$\frac{v_1 - v_-}{R_1} + \frac{v_- - v_{out}}{R_3} = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{v_2 - v_+}{R_2} + \frac{v_+ - 0}{R_4} = 0 \quad (3.12)$$

Operamos consideramos  $R_1 = R_2$  obtenemos:

$$v_{out} = \left( \frac{R_3}{R_1} \right) (v_2 - v_1) \quad (3.13)$$

Se requiere un censado desde 0 a 1 amperio. Para lo cual se necesitaba una ganancia de 50 para que nuestro intervalo sea de 0 a 5 voltios. Para lo cual se requiere una  $R_3 = 50k$  y  $R_1 = 1k$ .

También añadimos un filtro pasa bajo para eliminar el ruido que se generaba como se observa en la figura 3.9.

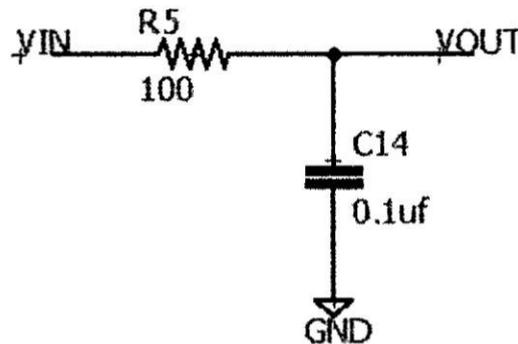
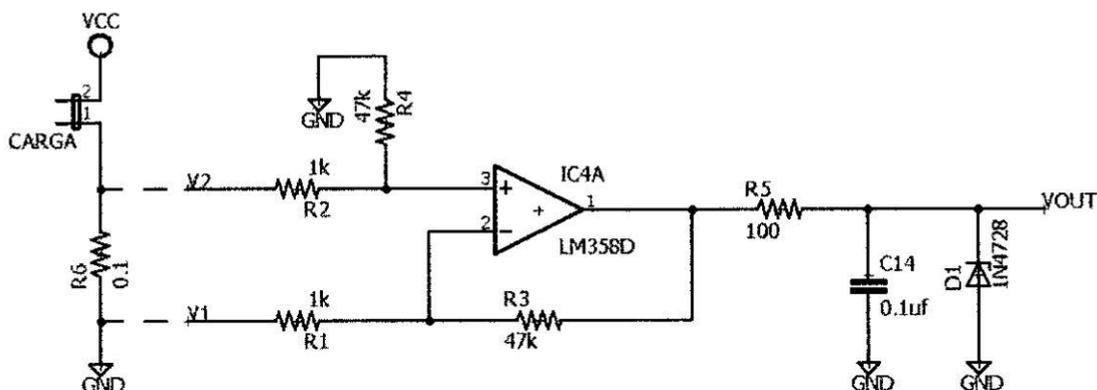


Figura 3.9 Filtro pasa bajo.

$$F_0 = \left( \frac{1}{2\pi RC} \right) \quad (3.14)$$

$$F_0 = \left( \frac{1}{2\pi * 100 * 01uf} \right) \quad (3.15)$$

Obtenemos una frecuencia de corte  $F_0 = 16khz$ .



**Figura 3.10** Diagrama esquemático completo del sensor de corriente con resistencia shunt.

En la figura 3.10 se observa un diodo zener de 5.1v el cual sirve de protección del microcontrolador en caso quiera sobrepasarse la tensión de entrada del ADC.

## B) Convertidor buck síncrono (CBS)

### Especificaciones del CBS

El convertidor tipo buck sirvió para realizar la adaptación de impedancia, por lo tanto, para definir las especificaciones del prototipo, nos basamos en las características generales del panel fotovoltaico. En la siguiente tabla presentamos las características del CBS.

**TABLA N° 3.1** ESPECIFICACIONES GENERALES DEL CBS.

Parámetro	Símbolo	Valor
Tensión de entrada	$v_{in}$	18v
Tensión de salida	$v_{out}$	13v
Rizo de tensión de entrada	$\Delta v_0$	2mV
Frecuencia de conmutación	$f_s$	57 KHz
Corriente de salida	$I_0$	1.5 A
Rizo de corriente en el inductor	$\Delta i_L$	192mV
Potencia de salida	$P_0$	19.5

### Frecuencia de operación

La frecuencia de operación del convertidor se calcula en base a varios parámetros como tensión de entrada y salida, rizado de inductor, ciclo de trabajo de PWM, de este análisis se obtuvo una frecuencia de 57Khz.

### Calculo del inductor

De la ecuación 2.16 del capítulo II, se obtiene el valor del inductor. Reemplazando los valores:

$$L = \frac{0.72[18 - 13 - 1.5(0.0175 + 0.01)]}{0.1875 * 42 \cdot 10^3}$$

Obtenemos un inductor de 326.6 mH obtenemos comercialmente 330 mH.

### Calculo del capacitor

De la ecuación 2.19 del capítulo II, se obtiene el valor del inductor. Reemplazando los valores:

$$C = \frac{192 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 42 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}$$

Obtenemos un capacitor de 210.8 uH obtenemos comercialmente 220 uF.

### Driver de MOSFET

Para poder activar a los MOSFET en CBS, se utilizó el integrado IR2111 que es un driver que realiza este trabajo y además que se ajustaba a los requerimientos de nuestro convertidor tipo Buck.

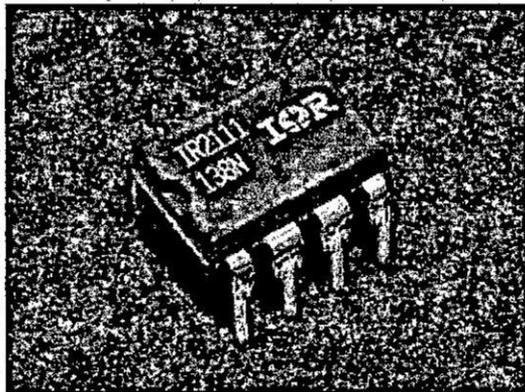


Figura 3.11 Driver IR2111.

La configuración que se utilizó de este driver es la configuración recomendada por el fabricante el cual es de la siguiente manera:





Figura 3.14 MOSFET IRF Z44.

En el siguiente esquema se presenta el diseño como se utilizó los MOSFET's y también a la ves presenta el esquemático del CBS con su respectiva bobina e inductor.

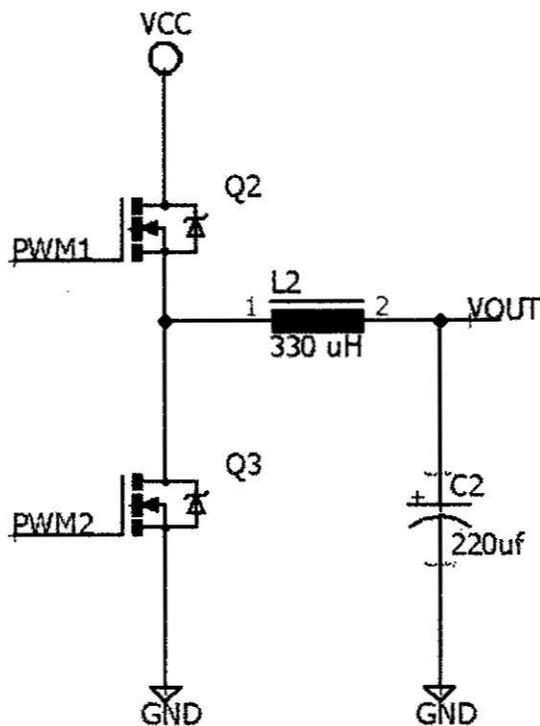


Figura 3.15 Topología Tipo BUCK.

### C) Diseño de circuito de alimentación de 5 voltios

Para el funcionamiento de nuestro microcontrolador se necesitó una tensión de 5 voltios, pero nuestra fuente de energía que son las baterías disponía de 12 voltios para ello requerimos el uso de un convertidor DC-DC que realiza dicha tarea de reducir la tensión, se utilizó circuito integrado LM2596 que es un integrado step-down switching regulador.

En la siguiente figura se presenta el diseño esquemático para el funcionamiento de este integrado.

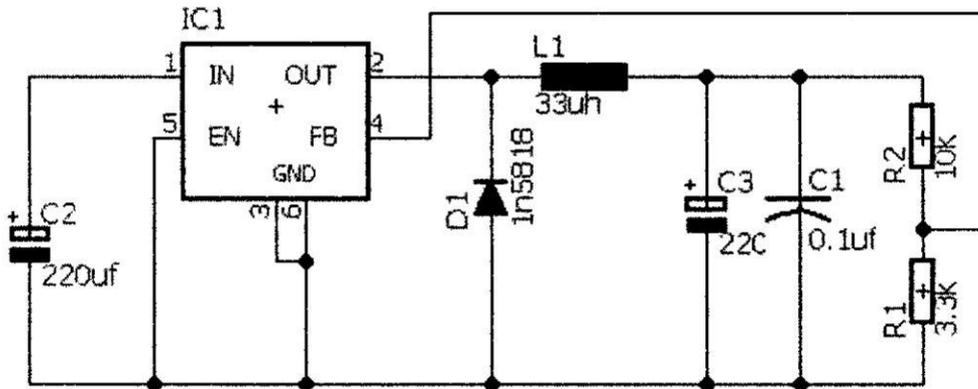


Figura 3.16 Diseño esquemático del LM2596 para 5 voltios.

#### D) Diseño del microcontrolador

Para realizar el algoritmo MPPT el microcontrolador realizo un papel muy importante ya que es donde se realiza el código, por ello se realizó de la siguiente manera las conexiones de nuestro microcontrolador, se presenta el diagrama esquemático del microcontrolador.

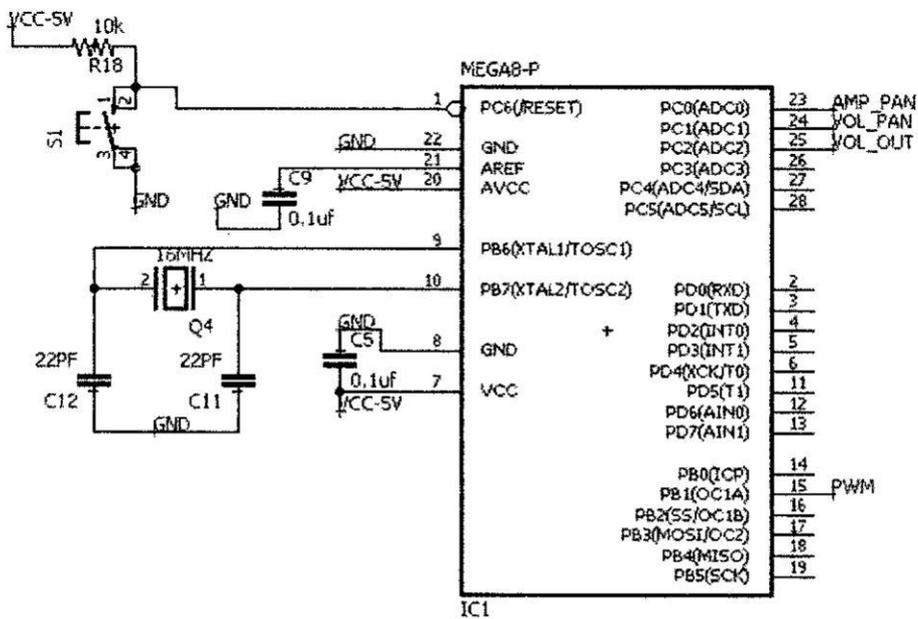


Figura 3.17 Diseño esquemático del microcontrolador Atmega 328.

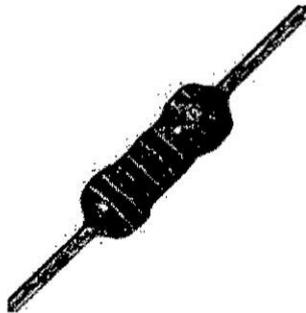
En la figura 3.20 se muestra un reset para el sistema, la frecuencia de trabajo es de 16MHz, la patita 15 del microcontrolador que nos genera señales PWM, las patitas 23,24,25 son entradas ADC para el censado de tensión y corriente.

### 3.2.3: Componentes del controlador MPPT

#### a) Componentes de los sensores

##### Sensor de tensión

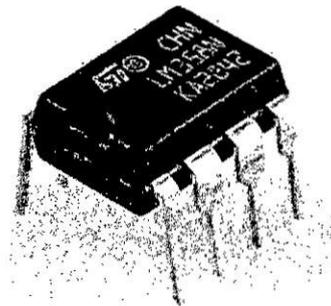
Para realizar el censado de la tensión utilizamos un divisor de tensión conformado por 2 resistencias en serie.



**Figura 3.18** Resistencia de carbón.

##### Sensor de Corriente

Para realizar el censado de la corriente se vio conveniente usar el amplificador operacional LM358 acompañado de sus componentes externos como resistencias y capacitores.



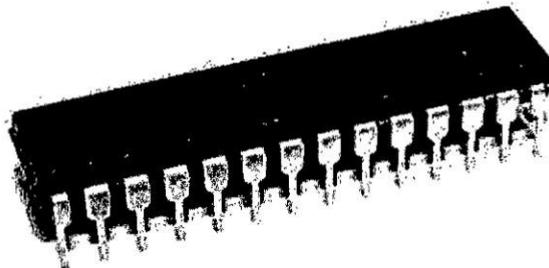
**Figura 3.19** Amplificador Operacional LM 358.

## b) Microcontrolador

Para realizar el algoritmo MPPT y el control de tensión de foco led y USB, se requería un microcontrolador que cuente con las siguientes características:

- 4 canales ADC.
- 2 canales PWM.
- Puerto serial.
- 1 salida digital.
- Frecuencia de 16 MHz.
- Memoria flas de 20 Kbyte
- Resolución de ADC de 10 byte.
- Tensión de operación de 5 voltios.
- CPU de 8 byte.
- SRAM de 2 Kbyte.

Evaluando en los distintos microcontroladores se eligió al atmega328P-PU por cumplir los requerimientos necesarios. Adicionalmente para el funcionamiento del microcontrolador se requirió un oscilador de cristal, capacitores, resistencias y un pulsador reset para el adecuado funcionamiento.



**Figura 3.20** Microcontrolador ATMEGA 328P-PU. [Página oficial de ATMEL].

## c) Convertidor DC-DC para MPPT

Para seleccionar el tipo de convertidor DC-DC del controlador MPPT, los factores determinantes fueron la tensión de la batería (12 voltios) y la tensión del panel (18 voltios) con carga, como vemos tenemos que disminuir la tensión de entrada con respecto a la salida, de esa manera se aumenta la corriente a la salida aplicando el algoritmo MPPT se obtiene mayor eficiencia y pueda cargar nuestra batería, de esta manera definimos que el tipo de nuestro convertidor DC-DC usado es el CBS el cual requiere de pulsos continuos sin necesidad de tiempos muertos en el punto (3.3.2) se detalla con más profundidad acerca el diseño y los dispositivos que se usaron para este convertidor.

#### d) Convertidor DC-DC para USB

Para seleccionar nuestro convertidor DC-DC para USB utilizamos el integrado MP 1584 que es un convertidor STEP-DOWN, funciona con una frecuencia de conmutación de 500 KHZ, además cuenta con una patita de activación(enable) que nos sirvió para activar y desactivar a nuestro convertidor cuando la batería este en el límite de su descarga máxima, internamente ya cuenta con señal PWM como también cuenta con componentes externos como resistencias, capacitores y bobina a él para realizar su funcionamiento, presenta una eficiencia que abarca desde los 75-88% y además tiene un autoconsumo de 0.2 mA.



Figura 3.21 Chip MP1584.

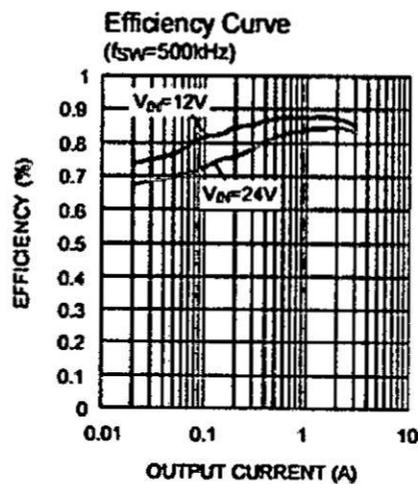


Figura 3.22 Curva de eficiencia del convertidor MP1584.

#### 3.2.3: Circuito esquemático del controlador MPPT

Dentro ello se resalta el esquemático de algoritmo MPPT y control de usb, led ya que es donde se centra el trabajo de tesis, el diseño se realizó en el software Eagle.

### 3.6: Construcción del Prototipo

Después de haber diseñado nuestros circuitos electrónicos se prosiguió a realizar la construcción del prototipo y para realizar la construcción se hizo el uso de una estación de soldadura, cables para las conexiones entre placas y dispositivos electrónicos mencionados en el punto (3.2).

#### 3.6.1: Protocolo de pruebas de la placa de Pruebas

Para realizar las pruebas a la placa se realizó los siguientes pasos:

- 1) Se imprimió las placas de prueba.
- 2) Se verifico que cada una de las placas no tenga alguna discontinuidad en sus pistas.
- 3) Se soldó cada uno de los dispositivos electrónicos respectivamente en su lugar adecuado guiándome de los esquemáticos realizados.
- 4) Se puso a prueba cada una de las placas implementadas verificando que realicen las funciones respectivas.
- 5) Después de haber verificado que nuestra placa de pruebas este correcta, proseguimos a realizar la codificación y grabado de los algoritmos MPPT en el microcontrolador.

#### 3.6.2 Tarjetas electrónicas

Después de concluir con el protocolo de pruebas, finalmente se obtiene la tarjeta final soldada y probada como se mostrará en las siguientes figuras:

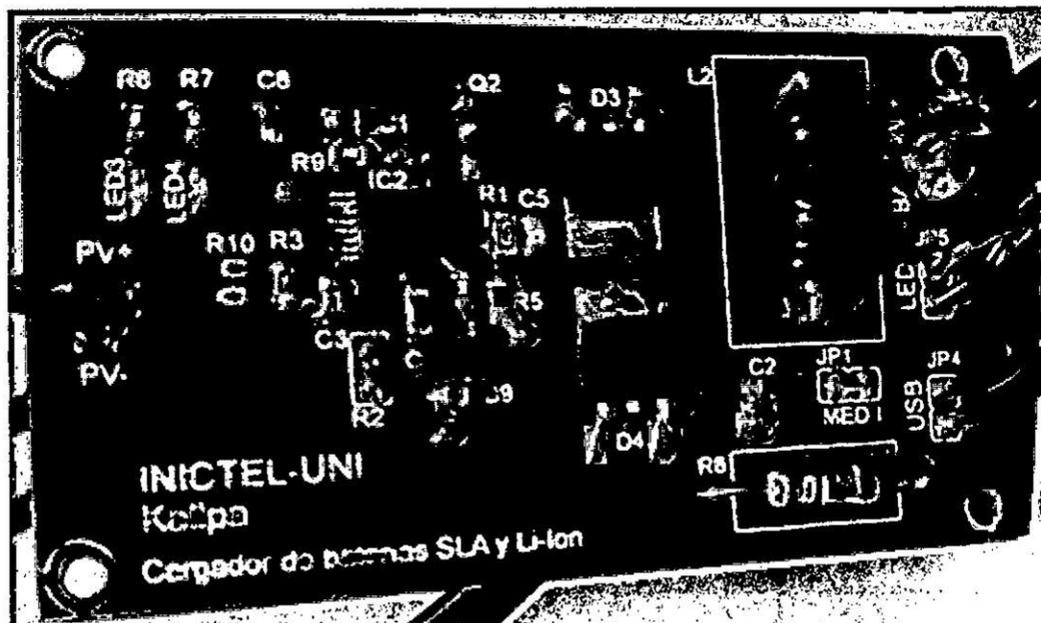
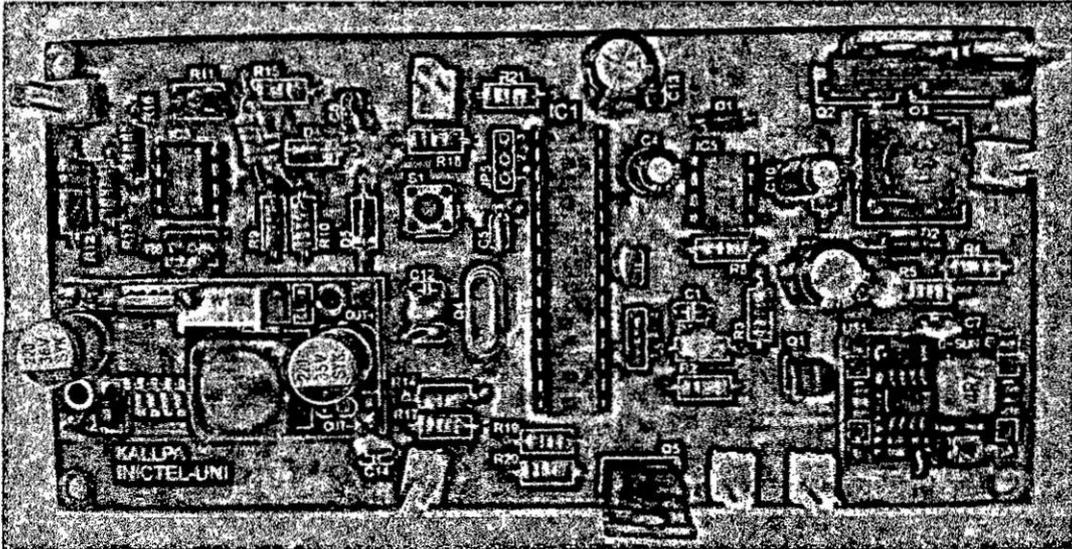


Figura 3.25 Tarjeta real de controlador básico.

En la siguiente figura 3.25 se muestra el acabado final de la tarjeta electrónica de cargador básico con los componentes superficiales que se mencionó anteriormente.



**Figura 3.26** Tarjeta electrónica real de cargador MPPT.

En la siguiente figura3,26 se muestra la tarjeta electrónica real del controlador MPPT con los respectivos componentes DIP.

## Capítulo IV

---

### 4. DESARROLLO DE ALGORITMOS PARA EL CONTROLADOR DE CARGA

---

#### Introducción

En este capítulo, trata sobre los algoritmos MPPT desarrollados como también el algoritmo para el control de las sobrecargas y sobre descargas para mejorar el tiempo de vida de la batería, control de la activación del algoritmo MPPT ya que con ello el sistema será eficiente.

Como ya se mencionó en el capítulo II la potencia que generan los paneles solares dependen de la temperatura y el nivel de radiación solar incidente. Debido a ello es necesario estar constantemente en la búsqueda MPP ya que la temperatura y niveles de radiación están en constante cambio. Por ello el propósito de los algoritmos MPPT a desarrollar es forzar la tensión del panel lo más cerca posible al MPP. Por lo mencionado anteriormente se han propuesto muchos métodos para alcanzar el MPP de los cuales se seleccionó a los siguientes: algoritmo perturba y observa, algoritmo conductancia incremental y algoritmo de lógica difusa para ser evaluados y usar en nuestro SPFV, ya que con ellos se obtiene una mayor eficiencia del sistema.

## **4.1: Algoritmo de funcionamiento eficiente**

### **4.1.1: Desarrollo del algoritmo del controlador**

El algoritmo del controlador que se desarrolló fue con la finalidad de obtener un control sobre los siguientes puntos:

#### **a) Energía que genera el panel fotovoltaico.**

Realiza el control de la energía eléctrica que ingresa a la batería, en caso de que la batería se encuentre completamente cargada este actúa bloqueando la recepción de energía del panel fotovoltaico con ello evitando que sufra una sobrecarga y dañe el tiempo de vida de la batería.

#### **b) Energía almacenada en la batería.**

Realiza el control de la distribución de la energía eléctrica almacenada en la batería, para evitar descargas profundas que disminuya el tiempo de vida de la batería, la manera que realiza este control es medir constantemente la tensión de la batería y cuando este se encuentre con la tensión mínima permitida el controlador actúa bloqueando la tensión de salida de los focos led y salida de puerto usb de esta manera el controlador pide que se recargue a la batería y evita la descarga profunda.

#### **c) Control de tensión en el foco led de 12 voltios.**

Realiza el control de la tensión con la cual es alimentada el foco led, con este control se evita que el foco led tenga una tensión mayor a la que trabaja y aumenta el tiempo de vida del foco led. El control se realiza controlando niveles de señal PWM evaluando los siguientes casos: cuando la tensión de la batería es mayor a 12 voltios se disminuye el nivel de PWM hasta obtener 12 voltios y cuando la tensión de la batería sea inferior a los 12 voltios el nivel de PWM se mantiene al máximo.

#### **d) Control de activación del algoritmo MPPT.**

Realiza el control de la activación del algoritmo MPPT, ya que solo es necesario activar el MPPT cuando haya sol de esa manera se ahorra la energía que se consumiría al estar activado el algoritmo MPPT todo el día de manera innecesaria. El control se realiza de la siguiente manera: se mide la tensión que tiene panel fotovoltaico, si esta es mayor a la mitad de la tensión que genera el panel fotovoltaico quiere decir que hay presencia de sol entonces activaremos a nuestro algoritmo MPPT y en caso contrario el algoritmo MPPT estará desactivado.

#### 4.1.2: Diagrama de flujo del algoritmo del controlador de carga

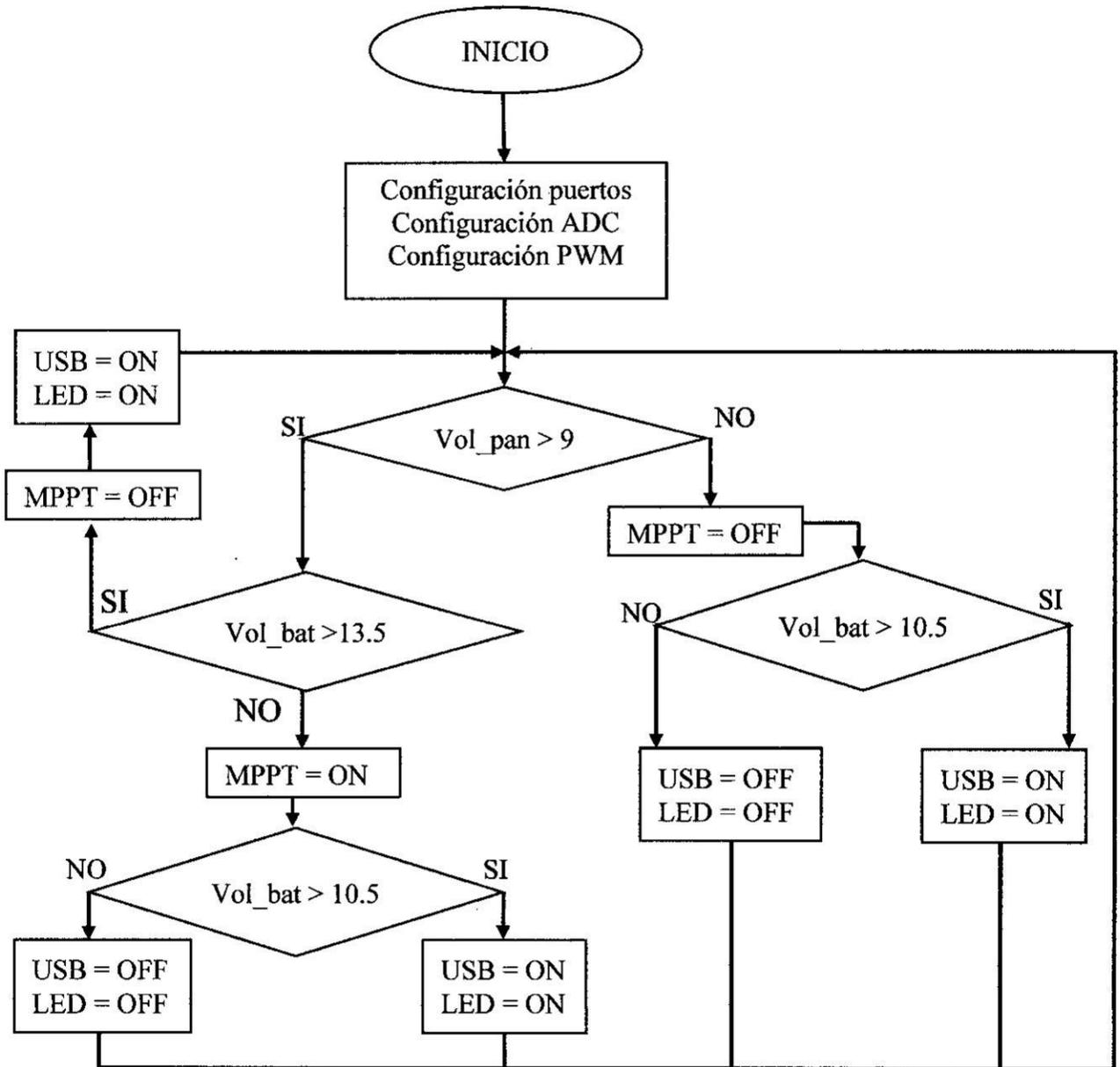
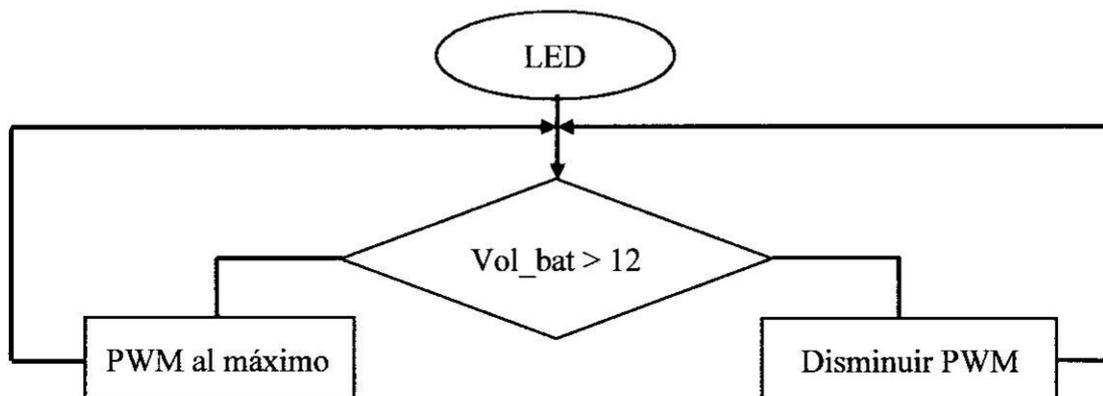


Figura 4.1 Diagrama de flujo del controlador.



**Figura 4.2** Diagrama de flujo de control de led.

#### **4.1.3: Codificación del algoritmo del controlador**

Se realizó la codificación del algoritmo del controlador en el compilador de arduino versión 1.6.8 este código es la representación del diagrama de flujo presentada en la figura 4.1 y figura 4.2, en esta parte del código no está incluida los algoritmos que se desarrollan en los siguientes puntos, pero se deja creada la subrutina para ingresar el código y ejecute su función. El código se presenta en el anexo A.

### **4.2: Algoritmos MPPT para controlador**

#### **4.2.1: Desarrollo del algoritmo P&O**

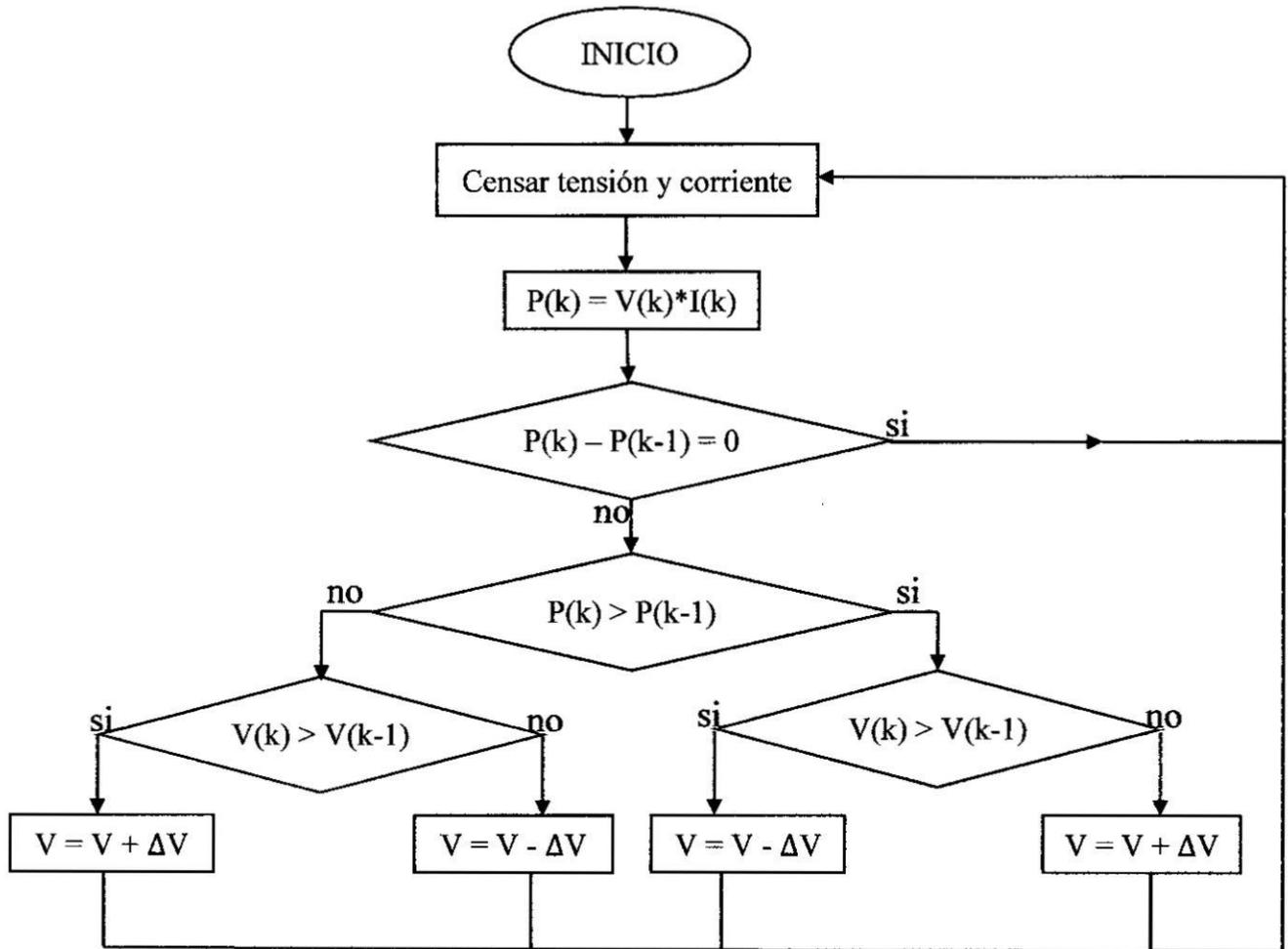
Se desarrolló el algoritmo P&O tomando en cuenta los conocimientos teóricos mencionados en el capítulo II punto (2.8.1). Este algoritmo se basa en la comparación del valor de la medición de una potencia actual  $P(k)$  y una potencia anterior  $P(k-1)$ , además  $V(k)$ ,  $V(k-1)$  representan la tensión del panel fotovoltaico y obteniendo estos valores de potencia se presentan los siguientes casos:

Si se cumple que  $P(k) > P(k-1)$ , entonces se evalúa la tensión, si  $V(k) > V(k-1)$  se disminuye el ciclo de trabajo caso contrario se incrementa el ciclo de trabajo del CBS.

Si se cumple que  $P(k) < P(k-1)$ , entonces se evalúa la tensión, si  $V(k) > V(k-1)$  se incrementa el ciclo de trabajo caso contrario se disminuye el ciclo de trabajo del CBS.

Para realizar el algoritmo se debe censar continuamente el valor de la tensión  $V(k)$  y corriente  $I(k)$  del panel fotovoltaico y esta será procesada en el microcontrolador.

### a) Diagrama de flujo del algoritmo P&O



**Figura 4.3** Diagrama de flujo del algoritmo P & O.

Observamos el diagrama de flujo del algoritmo donde  $P(k)$  y  $P(k-1)$  representan a potencia,  $V(k)$  y  $V(k-1)$  representan a tensión y  $\Delta V$  representa a variación de la tensión del panel fotovoltaico.

### b) Codificación del algoritmo P&O

Se realizó el código del algoritmo P&O el cual fue implementado en el compilador de arduino versión 1.6.8, en el código se incluye una transmisión serial el cual sirvió para hacer monitoreo y verificar que al algoritmo esté funcionando correctamente. El código se presenta en el anexo B.

#### 4.2.2: Desarrollo del algoritmo CONDINC

Se desarrolló el algoritmo conductancia incremental tomando en cuenta los conocimientos teóricos mencionados en el capítulo II punto (2.9.2). Este algoritmo se basa en obtener la diferenciación de la potencia con respecto a la tensión que genera el panel fotovoltaico. Para desarrollar el algoritmo conductancia incremental se debe censar continuamente la tensión y corriente del panel fotovoltaico, con ello se obtiene el diferencial de la tensión ( $dV$ ) y de corriente ( $dI$ ). Se presenta los siguientes casos: Si se cumple que  $dI$  y  $dV$  son iguales a 0 esto quiere decir que se encuentra en el MPP. Si se cumple que  $dV = 0$  y  $dI > 0$  quiere decir que la radiación aumento entonces se debe disminuir la tensión de referencia para estar cerca del nuevo MPP. Si se cumple que  $dV = 0$  y  $dI < 0$  quiere decir que la radiación disminuyo entonces se debe aumentar la tensión de referencia para estar cerca del nuevo MPP. Si se cumple que  $dI$  y  $dV$  son diferentes de 0 se presenta los siguiente casos: Si  $dI/dV > -I/V$ , esto quiere que el  $dP/dV > 0$  que indica que el panel se encuentra operando en a la izquierda del MPP de la curva P-V entonces la tensión de referencia será disminuida y en caso contrario la tensión de referencia será incrementada.

##### a) Diagrama de flujo del algoritmo CONDINC

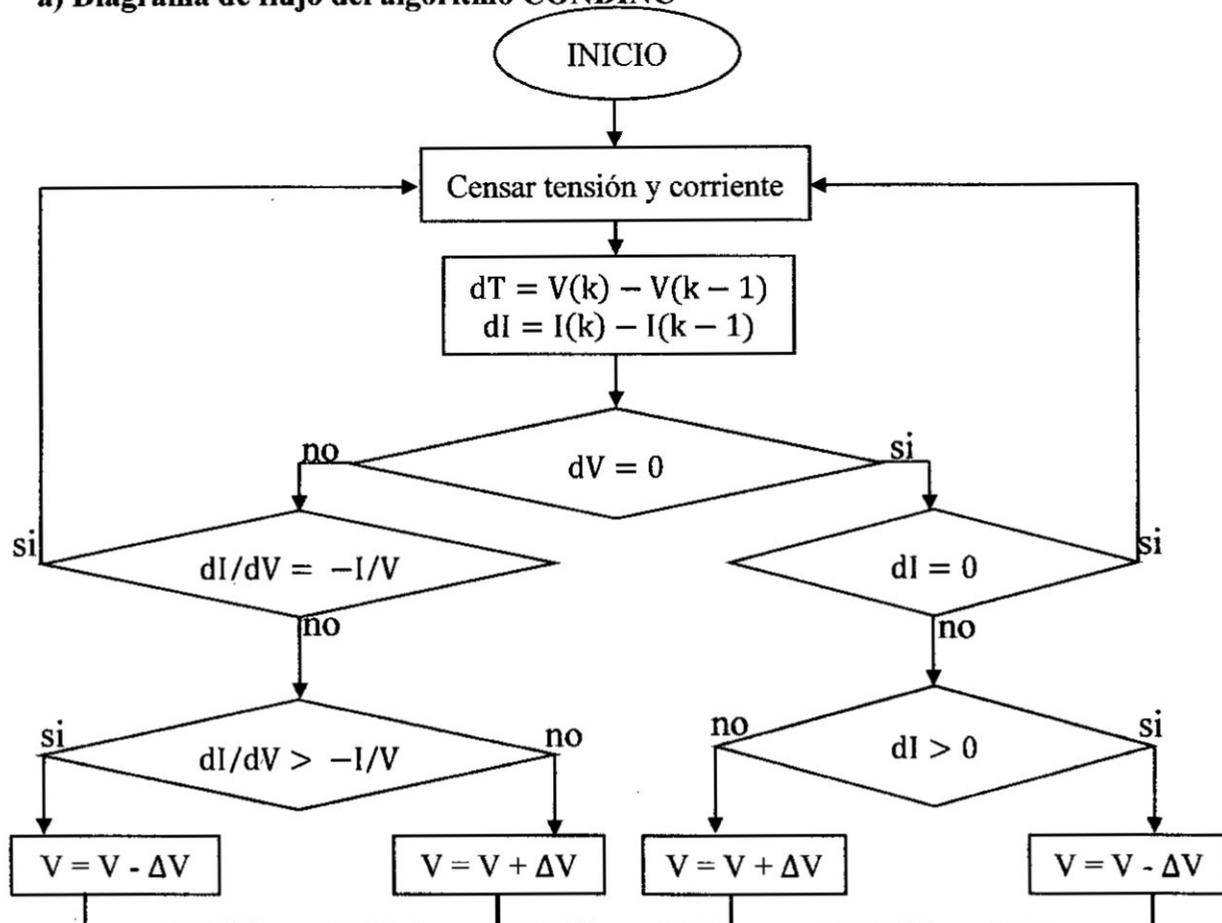


Figura 4.4 Diagrama de flujo del algoritmo CONDINC.

## **b) Codificación del algoritmo conductancia incremental**

Se realizó el código del algoritmo conductancia incremental el cual fue implementado en el compilador de arduino versión 1.6.8, en el código se incluye una transmisión serial el cual sirvió para hacer monitoreo y verificar que al algoritmo esté funcionando correctamente. El código se presenta en el anexo C.

### **4.2.3: Desarrollo del algoritmo lógica difusa**

Se desarrolló el algoritmo de lógica difusa tomando en cuenta los conocimientos teóricos mencionados en el capítulo II punto (2.9.3). Para hallar el MPP de un panel fotovoltaico con CBS, se debe censar la tensión y corriente del panel fotovoltaico continuamente para estos ser llevados al microcontrolador y ser procesados mediante los requerimientos de la lógica difusa.

Para obtener el error  $E(k)$ , que tiene que ser 0, para obtener la máxima potencia del panel fotovoltaico, el cual es una de nuestras entradas del controlador difuso, se obtuvo de la siguiente manera:

$$E(k) = \frac{dP}{dV} = \frac{P(k) - P(k - 1)}{V(k) - V(k - 1)} \quad (4.1)$$

La ecuación (4.1) es la misma del (2.9) pero se repetirá para mejorar el entendimiento del desarrollo del algoritmo, además  $P(k)$  representa a la potencia y  $V(k)$  representa la tensión del panel fotovoltaico.

Nuestra segunda entrada corresponde al cambio de error, el cual se obtuvo haciendo la diferencia entre el error actual y error antiguo y se representa de la siguiente manera:

$$CE(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (4.2)$$

Obteniendo las entradas se procede a realizar las 3 etapas que realiza el controlador difuso:

#### **a) Fuzzificador**

Las variables de entrada  $E(k)$  y  $CE(k)$  serán expresadas en términos lingüísticos o etiquetas como: PB (positivo grande), PS(positivo pequeño), ZO(cero), NS(negativo pequeño), NB(negativo grande) y para ellos utilizamos subconjuntos difusos.

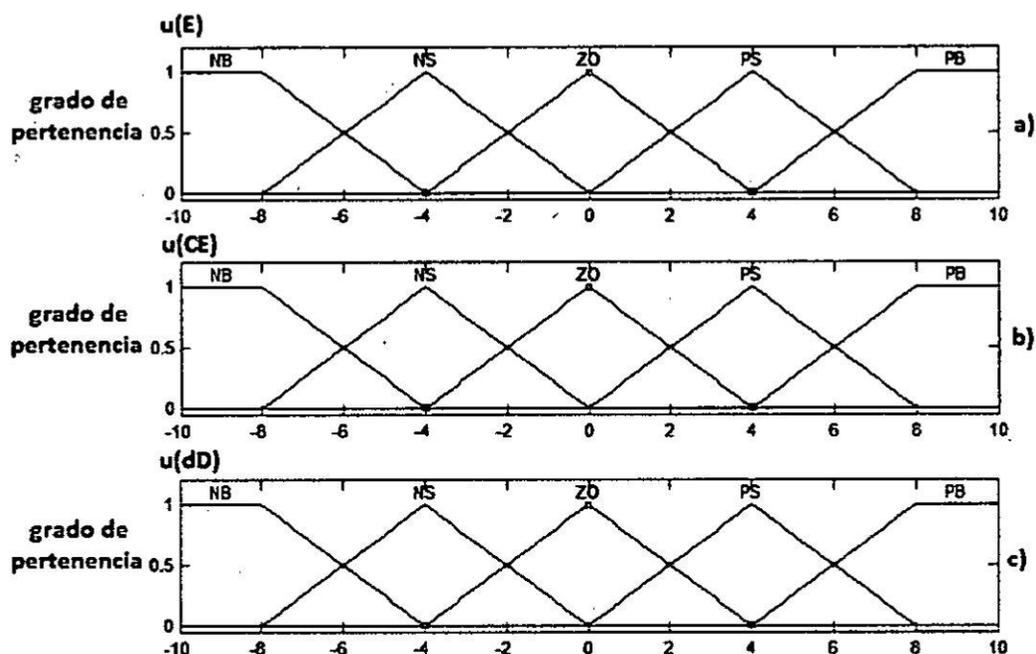


Figura 4.5 Funciones de membresía: a) entrada E, b) entrada CE y c) salida Dd.

### b) Inferencias

En la siguiente tabla N°4.1 se muestra las reglas del controlador difuso, en el cual se obtiene todas las combinaciones posibles de las entradas E y CE, esta presenta 25 reglas correspondientes a las posibles salidas del controlador.

TABLA N° 4.1 BASE DEL CONOCIMIENTO DEL CONTROLADOR DIFUSO.

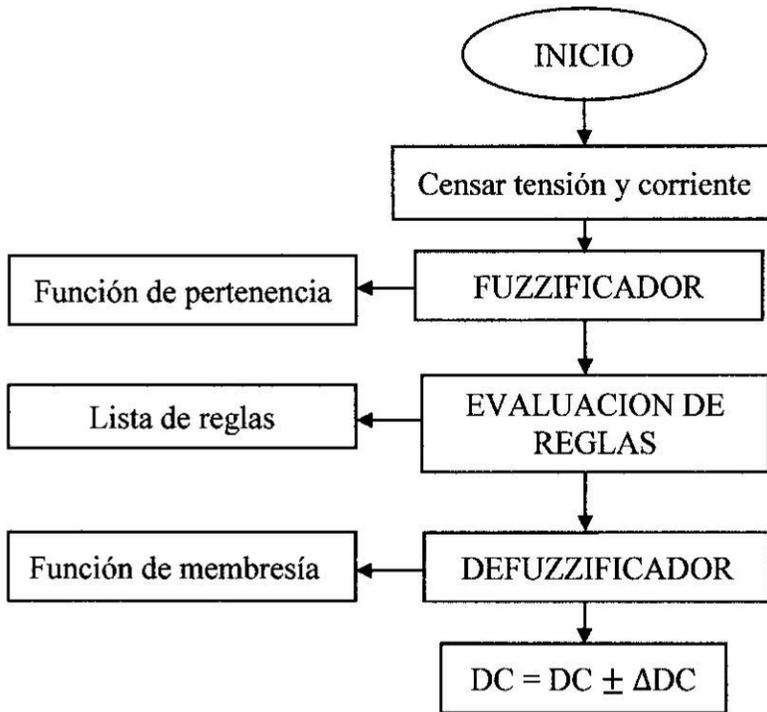
E \ AE	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	ZO	ZO	NB	NB	NB
NS	ZO	ZO	NS	NS	NS
ZO	NS	ZO	ZO	ZO	PS
PS	PS	PS	PS	ZO	ZO
PB	PB	PB	PB	ZO	ZO

El método de inferencia utilizado en la obtención del consecuente a partir de los antecedentes fue el de Mandani.

### c) Defuzzificador

Después de realizar las inferencias, la salida del controlador difuso es un subconjunto difuso de control. El sistema requiere un valor de control no difuso(concreto) es por ello que se requiere defuzzificar. El método que se usará para la defuzzificación será el del centro de gravedad.

#### d) Diagrama de flujo del algoritmo lógica difusa



**Figura 4.6** Diagrama de flujo del algoritmo lógica difusa.

#### e) Codificación del algoritmo lógica difusa

Se realizó el código del algoritmo lógica difusa el cual fue implementado en el compilador de arduino versión 1.6.8, este es una de las codificaciones más extensas debido a los procesos que exige el procesamiento de la lógica difusa, en el código se incluye una transmisión serial el cual sirvió para hacer monitoreo y verificar que al algoritmo esté funcionando correctamente. El código se presenta en el anexo D.

## Capítulo V

---

### 5. PRUEBAS DE LOS ALGORITMOS EN EL CONTROLADOR DE CARGA

---

#### Introducción

En el presente capítulo trata sobre las pruebas a las que se sometió los algoritmos en el controlador, pero ante ello primero se dará a conocer las variables que fueron evaluadas, como también los instrumentos de medición que se utilizaron en dichas pruebas, los equipos (así como el simulador solar diseñado e implementado construido). Luego de ello se describirán las pruebas que sirvieron para evaluar al controlador con los algoritmos desarrollados. Los cuales fueron las siguientes: pruebas de sobrecargas y sobredescargas de batería, prueba de tensión en led y puerto USB, prueba de eficiencia de y estabilidad de algoritmos MPPT, eficiencia entre controladores y por ultimo evaluación de SPFV comerciales.

### 5.1: Variables evaluadas en las pruebas

Las variables independientes que fueron evaluadas son:

- Tensión (panel fotovoltaico y batería)
- Corriente (panel fotovoltaico y batería)
- Irradiación solar
- Temperatura de panel fotovoltaico

Las variables dependientes que fueron evaluadas son:

- Potencia eléctrica (panel fotovoltaico y batería)
- Radiación solar
- Eficiencia del sistema picofotovoltaico

### 5.2: Instrumentos de Medición y equipos

Para realizar satisfactoriamente las pruebas se hizo el uso de los siguientes instrumentos:

#### 5.2.1: Solarímetro (Radiómetro)

Este instrumento de medición se utilizó para obtener la radiación solar en cada punto del simulador solar desarrollado como también la radiación en el ambiente.



**Figura 5.1** Solarímetro SM 206.

En la siguiente tabla 5.1 presentamos las características más importantes del solarímetro:

**TABLA N° 5.1** Datos del solarímetro.

Rango	1 – 3999 $W/m^2$ (Btu)
Resolución	0.1 $W/m^2$
Exactitud	$\pm 5\%$ de la lectura
Alimentación	Batería de 9 VDC
Rango de error	$\pm 10W/m^2$ [ $\pm 3 Btu(ft^2 - h)$ ] o $\pm 5\%$ del valor de medida.

### 5.2.2: Multímetro

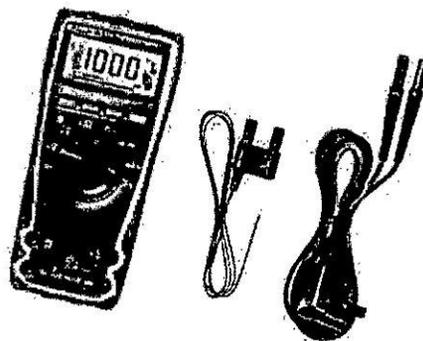
El multímetro de la figura 5.2 se utilizó para realizar pruebas en el diseño del controlador, por ejemplo, medición de tensión y corriente en el simulador solar desarrollado para encontrar la curva de los paneles fotovoltaicos y además para realizar la adquisición de datos en los días de prueba del controlador MPPT.



**Figura 5.2** Multímetro UNI-T modelo UT61E.

### 5.2.3: Sensor de temperatura

Como instrumento de diseño y sensor de temperatura se utilizó el multímetro fluke de la figura 5.3, con su termopar se realizó mediciones de temperatura del panel fotovoltaico.



**Figura 5.3** Multímetro FLUKE 179 True RMS Multimeter.

### 5.2.4: Simulador Solar

En la figura 5.4 se muestra al simulador construido. Para ver más detalles de la construcción y calibración del simulador solar se presenta el anexo E.

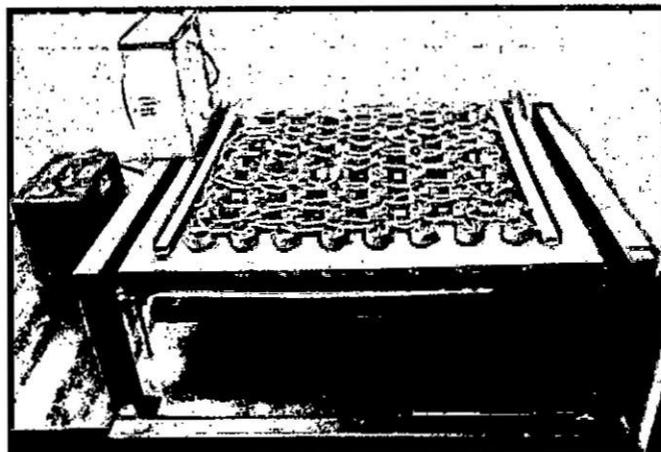


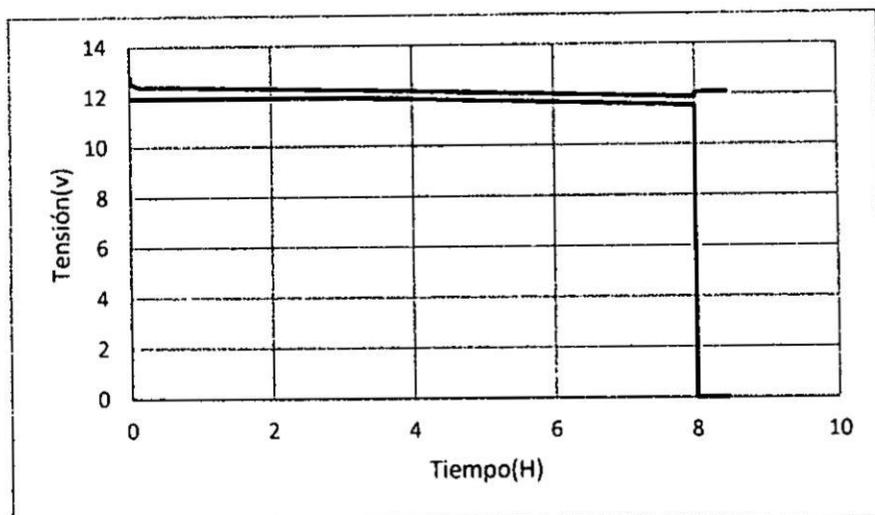
Figura 5.4 Simulador solar con lámparas dicroicas.

### 5.3: Prueba de sobredescarga y sobrecarga de la batería

Esta prueba se realizó para verificar la funcionalidad del algoritmo del controlador mencionado en el punto 4.1 que consistió en someter al controlador a sobredescargas (deficiencia de energía eléctrica en la batería) y sobrecarga (exceso de energía eléctrica en la batería).

#### 5.3.1: Prueba de sobredescarga de la batería

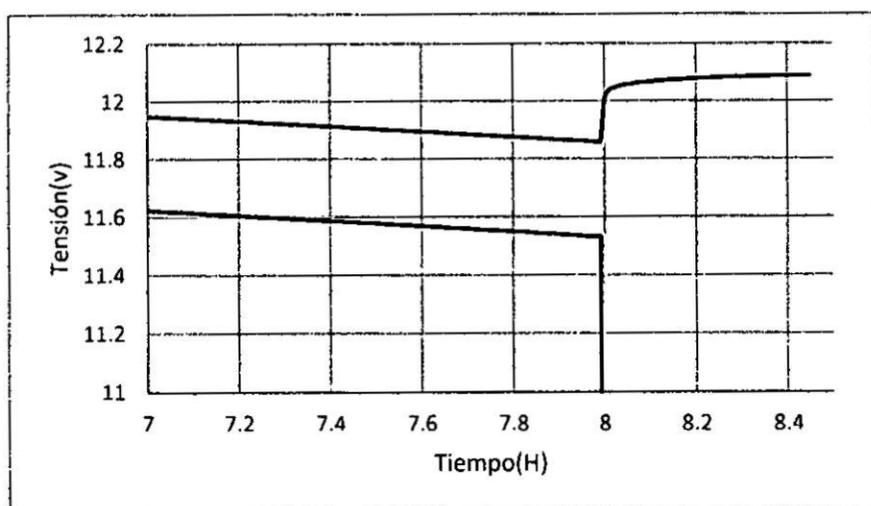
Esta prueba se realizó con la ayuda del multímetro mencionado en el punto 5.2.2 que fue usado para adquirir datos, la carga que se utilizó para realizar esta prueba fueron 3 focos de 12 voltios tipo led de 3 watts de potencia cada uno. Con esta prueba se demostrará que nuestro controlador está preparado para proteger a nuestra batería de las sobredescargas cortando la tensión de las cargas (foco tipo led y/o puerto USB) cuando la tensión de la batería llega a los 11.8 voltios además se observará el tiempo que demora en descargarse la batería hasta llegar a los 11.8 voltios.



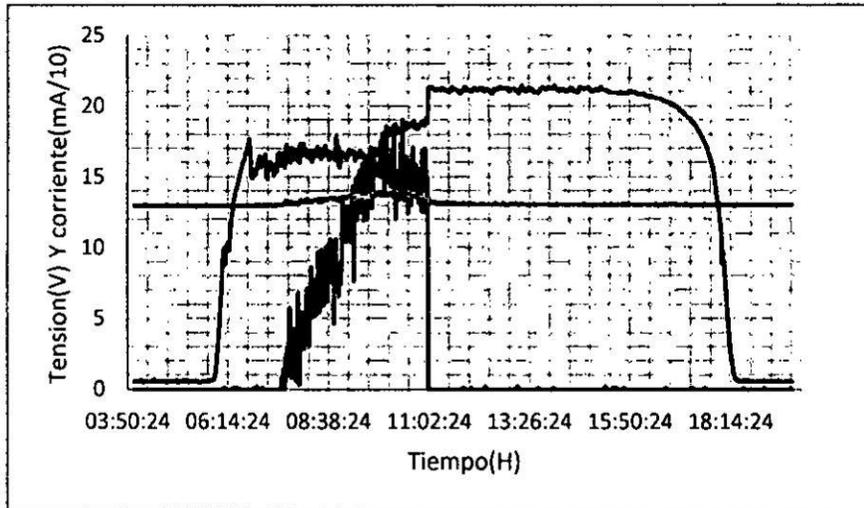
**Figura 5.5** Sobre descarga de batería con foco led.

En la figura 5.5 la línea de color azul representa la tensión de descarga de la batería y la línea de color naranja representa la tensión con que trabaja el foco led, ambas en función al tiempo. La batería comenzó esta prueba completamente cargada, además se observa cómo se va descargando la batería por un tiempo de 8 horas luego de las 8 horas la tensión del foco led cae a 0 voltios lo cual indica que se bloquea la entrega de energía, de esta manera se demuestra la funcionalidad de nuestro controlador, también se observa que la tensión del foco led nunca sobrepasa los 12 voltios lo cual nos brinda mayor tiempo de vida al foco led.

Para establecer el punto de corte de la batería se tomó en cuenta varios aspectos tales como: la hoja de datos de la batería, se realizó una descarga profunda de la batería con una carga resistiva que consumía 3 amperios del cual se analizó la curva que obtuvimos y por último el dimensionado que se realizó tomando en cuenta la radiación solar y las cargas a la que iba a ser sometido el controlador.



**Figura 5.6** Aumento de imagen de sobre descarga de batería con foco led.



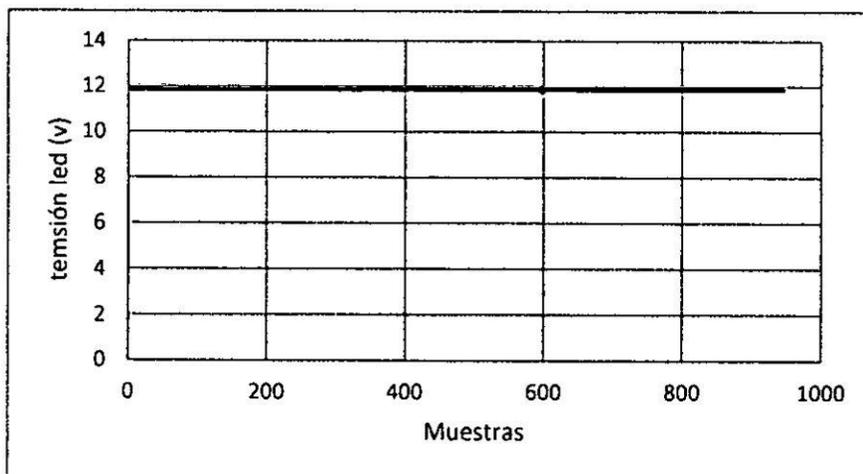
**Figura 5.10** Tensión panel, batería y corriente en miliamperios dividido entre 10.

En la figura 5.10 la línea azul representa la tensión de panel fotovoltaico, la línea color naranja representa la tensión de la batería y la línea verde corriente de panel fotovoltaico. Se realizó esta grafica para poder observar con más claridad como nuestro controlador corta la corriente (línea de color verde) que entrega el panel fotovoltaico cuando la tensión de la batería llega a los 13.8 voltios, en esta grafica se forzó al dibujo para poder observar ese punto de corte ya que en las anteriores figuras se describe de grafica en gráfica.

#### 5.4: Prueba de tensión en led y puerto USB

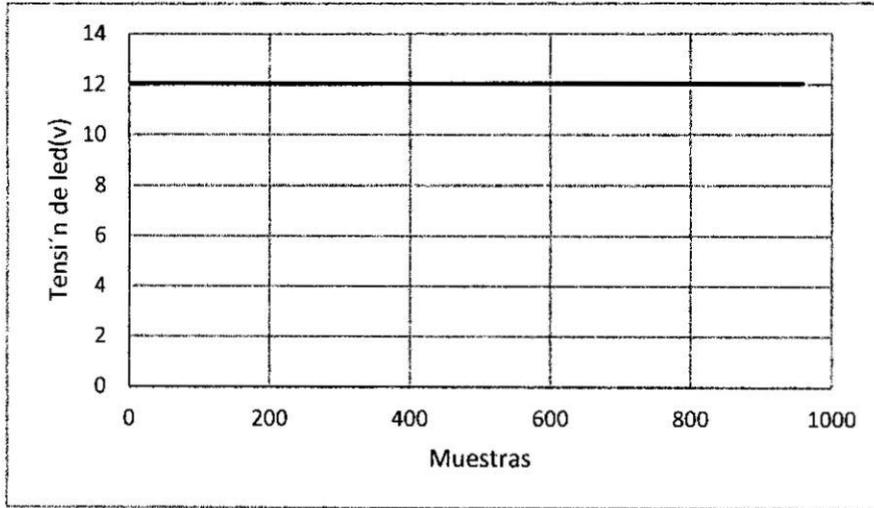
##### 5.4.1: Prueba de tensión con driver led

Esta prueba se realiza para observar el comportamiento de la tensión que llega al foco led, con ello demostrar el funcionamiento de nuestro driver de led. Se obtuvieron 959 muestras para cada uno de las siguientes pruebas con un periodo de muestreo de 500 ms.



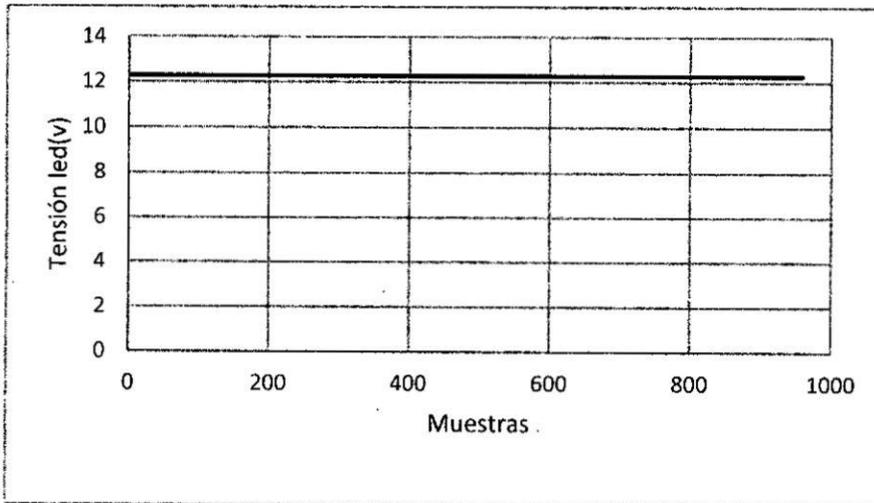
**Figura 5.11** Tensión con 3 focos leds.

En la figura 5.11 la línea de color azul representa la tensión de 3 focos leds en el cual se observa que la tensión es de 11.9 voltios que se encuentra lo más cerca de 12 voltios.



**Figura 5.12** Tensión con 2 foco leds.

En la figura 5.12 la línea de color azul representa la tensión de 2 focos leds en el cual se observa que la tensión es de 12 voltios.



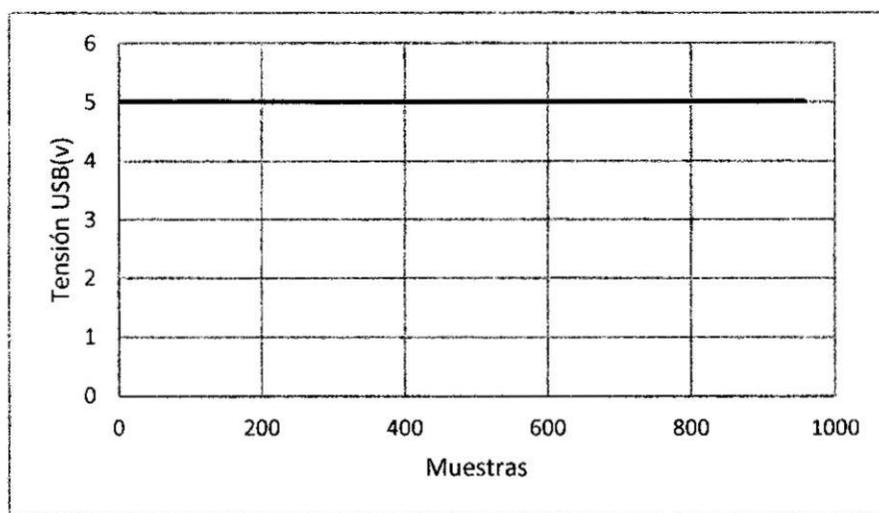
**Figura 5.13** Tensión con 1 foco led.

En la figura 5.13 la línea de color azul representa la tensión de 1 foco led en el cual se observa que la tensión es de 12.2 voltios que no se encuentra tan lejos a los 12 voltios y es un límite aceptable para el foco led.

Con las gráficas obtenidas en las figuras 5.11, 5.12, 5.13 se demuestra que nuestro controlador aumentara el tiempo de vida de los focos led.

### 5.4.2: prueba de tensión de puerto USB

Esta prueba se realizó para demostrar que nuestro controlador nos brinda los 5 voltios al puerto USB de esta manera se garantiza no dañar algún dispositivo que utilice el puerto USB. Esta prueba se realizó para 959 muestras con un periodo de muestreo de 500 ms por cada muestra



**Figura 5.14** Tensión de puerto USB.

En la figura 5.14 la línea color azul representa la tensión de salida USB. También se muestra que la tensión proporcionada por el convertidor MP1584 es muy estable.

## 5.5: Prueba de Eficiencia y Estabilidad de los Algoritmos

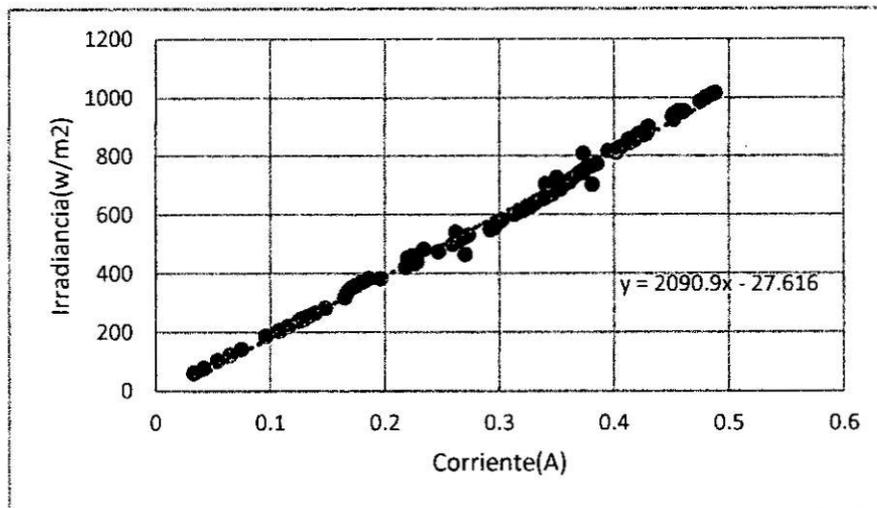
### 5.5.1: Adquisición de radiación solar

Para poner a prueba la eficiencia y estabilidad de los algoritmos desarrollados en el capítulo 4 era necesario encontrar la radiación solar que se presentaba en los días que se realizó las pruebas. Para medir la radiación solar se hizo uso del solarímetro presentado en el punto 5.2.1, pero este solarímetro no contaba con una comunicación serial con una computadora para realizar el proceso de adquisición de datos durante todo el periodo de prueba, por ello se obtuvo la radiación solar indirectamente con la ayuda de la medición de corriente de un pequeño panel de 3 W mediante el multímetro mencionado en el punto 5.2.2 que contaba con comunicación serial con la computadora y realizaba el proceso de adquisición de datos.

La corriente producida por un panel fotovoltaico es directamente proporcional a la radiación emitida por el sol, por eso se realizó una regresión lineal para medir indirectamente la radiación solar durante todo el periodo de prueba. se realizó este proceso de la siguiente manera: se ubicó al panel fotovoltaico y radiómetro en una parte alta libre de sombras y se conectó al multímetro para leer corriente, luego se

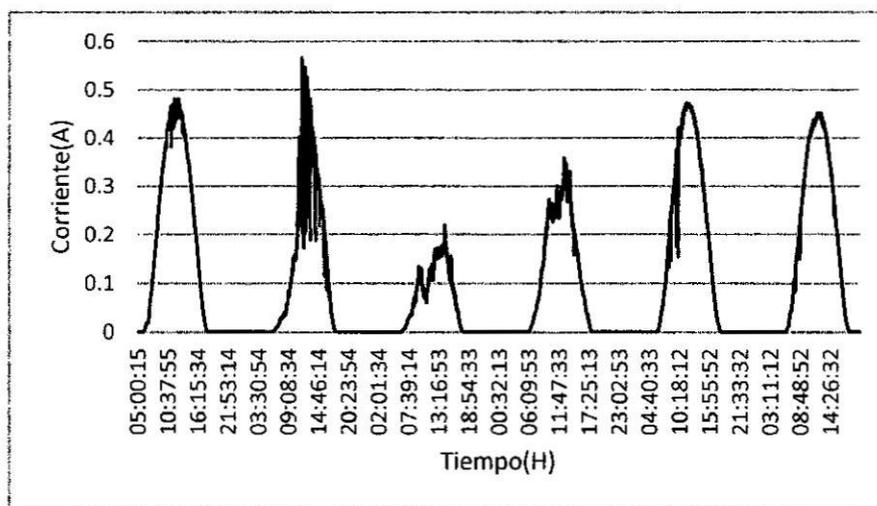
comenzó a recolectar los datos anotando la corriente que producía cada radiación obtenida con el solarimetro, de ahí se generó la base de datos que sirvió para la regresión lineal. El periodo de recolección de datos fue cada 5 minutos desde la 7:00 am hasta las 3:30 pm.

Se presenta tabla con las muestras adquiridas para realizar la regresión lineal en el anexo F que se representa en la siguiente figura 5.15.



**Figura 5.15** Regresión lineal.

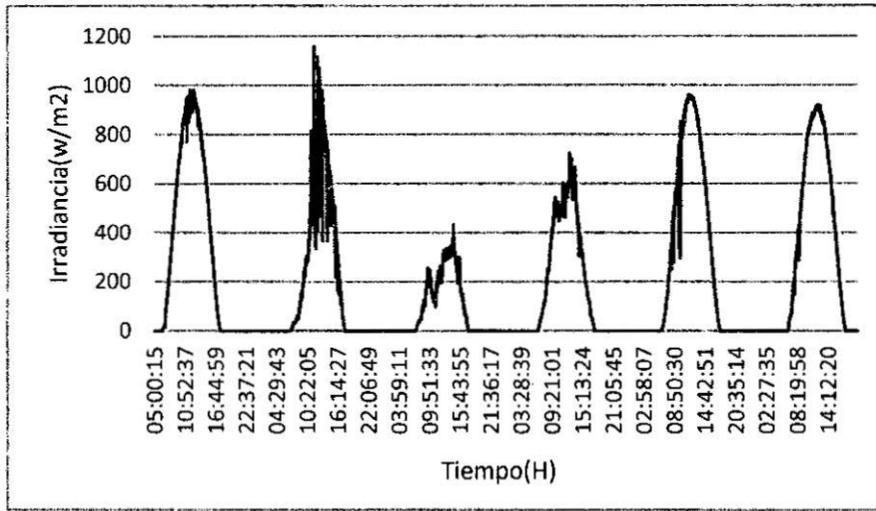
En la figura 5.15 los puntos de color celeste representan las muestras adquiridas, los puntos de color naranja representa la tendencia lineal y en el gráfico también se muestra la ecuación de tendencia lineal.



**Figura 5.16** Corriente de panel.

En la figura 5.16 la línea color naranja representa la corriente obtenida con el panel de 3 W en los 6 días de prueba que se sometió el controlador.

En la figura 5,17 se graficó las muestras que están en función a corriente, pero el objetivo de esta prueba fue obtener la radiación solar no la corriente que produce el panel, para ello se realizó la regresión lineal a corriente de panel fotovoltaico versus solarimetro, después de ello lo único que se hizo fue remplazar las muestras de la figura 5.16 en la ecuación que se obtuvo de la regresión lineal del cual se obtuvo una nueva grafica que se muestra en la figura 5.17 que es en función a la irradiancia.



**Figura 5.17** Radiación solar.

En la figura 5.17 la línea azul representa la radiación solar obtenida mediante la regresión lineal en el cual se puede observar días de buena radiación como días de baja radiación solar lo cual fue favorable para poder realizar la comparación de los algoritmos desarrollados.

### 5.5.2: Algoritmo Perturba y Observa

Se realizó la prueba al algoritmo P&O para los 6 días y se obtuvo las siguientes graficas que presentamos.

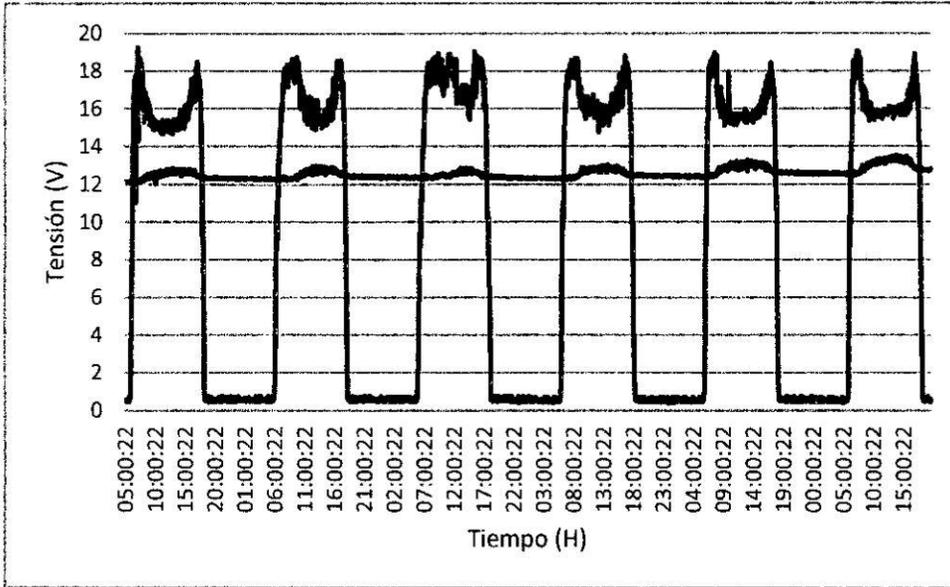


Figura 5.18 Tensión de panel fotovoltaico y batería con algoritmo P&O.

En la figura 5.18 la línea color azul representa la tensión del panel fotovoltaico y la línea color naranja representa la tensión de la batería. En esta figura observamos como el algoritmo adapta la tensión del panel fotovoltaico a cada día, también observamos como la tensión de la batería aumenta cada día.

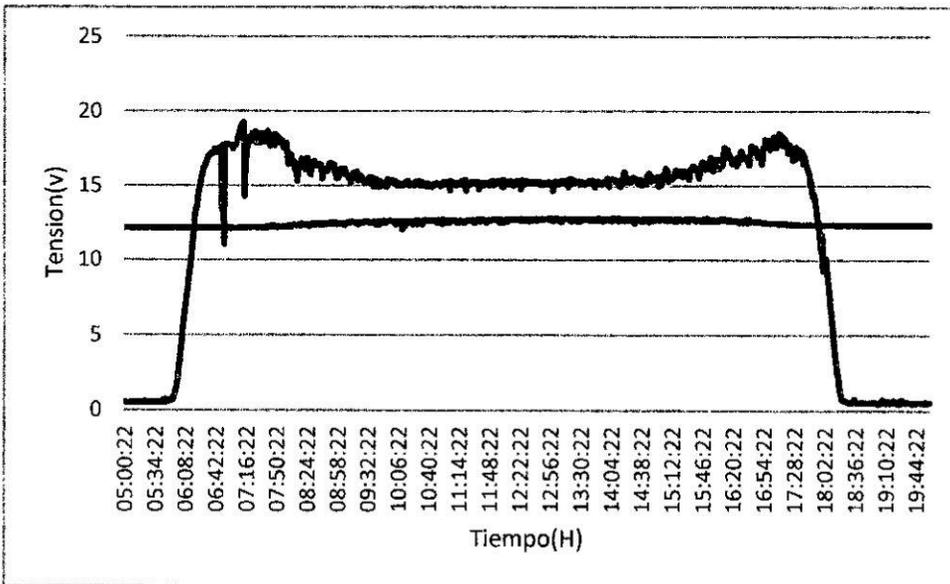
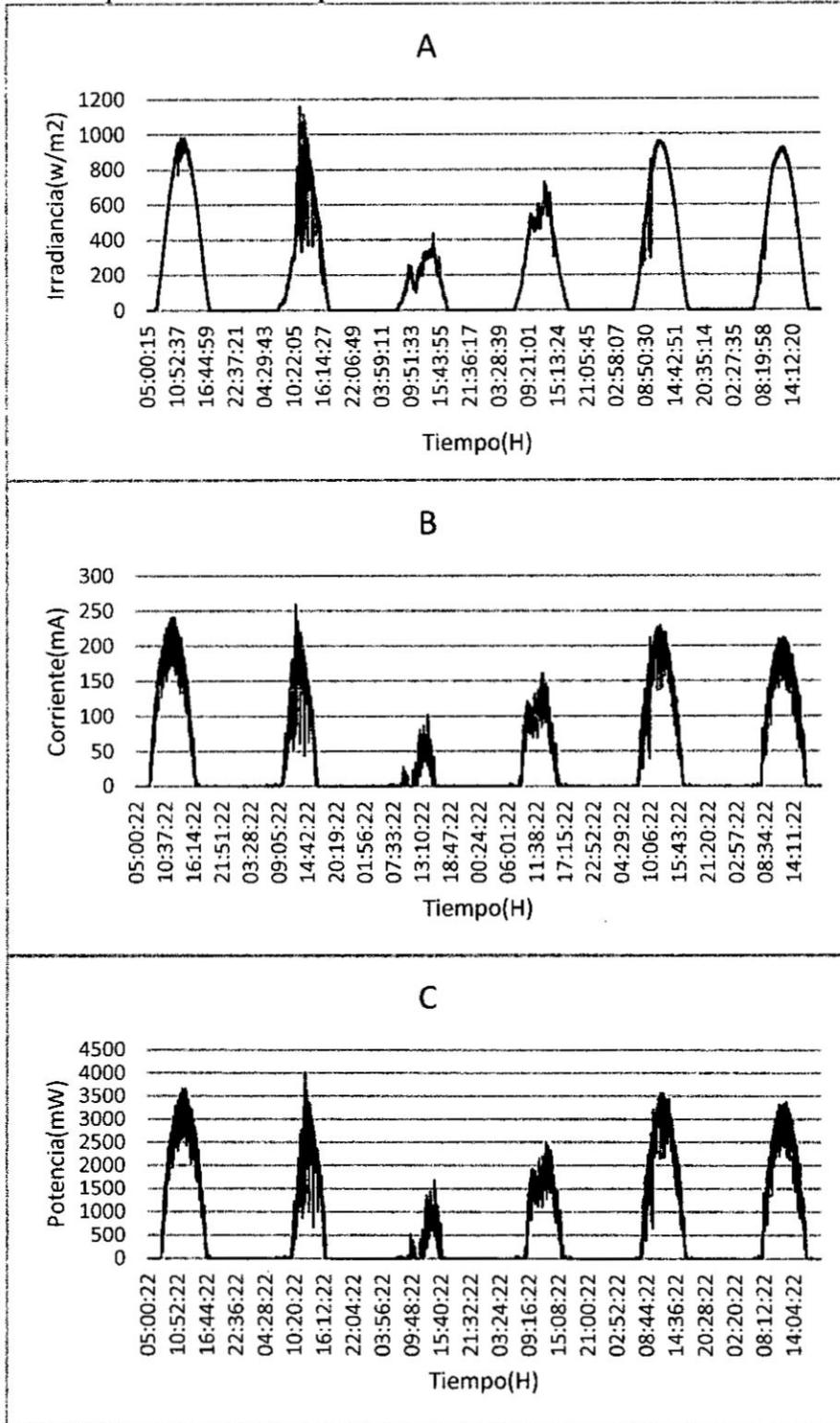


Figura 5.19 Tensión de panel fotovoltaico y batería.

En la figura 5.19 se muestra la gráfica de tensión de panel fotovoltaico solamente del primer día que se realizó las pruebas.

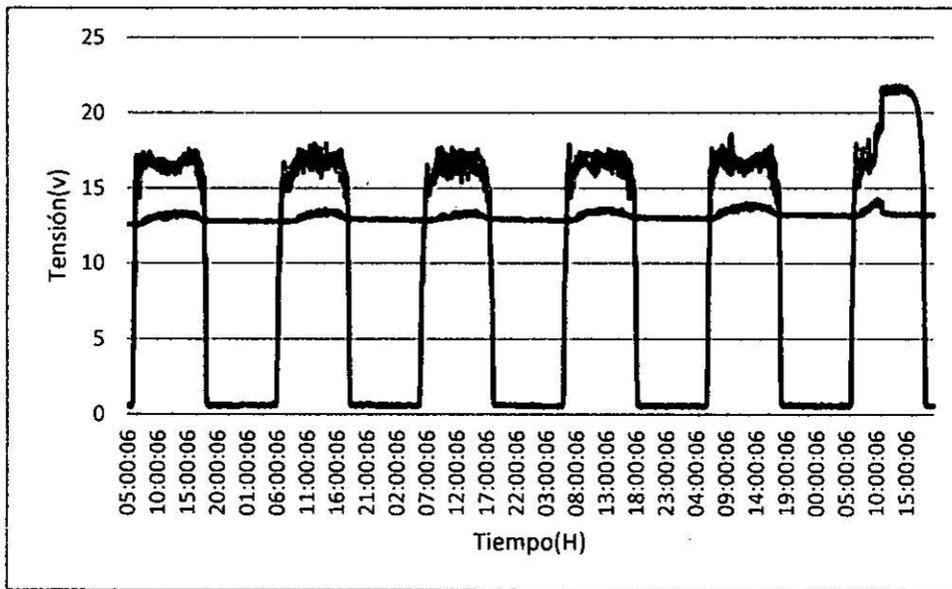


**Figura 5.20** A) Radiación Solar. B) Corriente del panel fotovoltaico con algoritmo P&O. C) Potencia de panel fotovoltaico con algoritmo P&O.

En la figura 5.20 la línea de color azul representa la radiación solar, la línea verde la corriente del panel fotovoltaico y la línea naranja la potencia que entrega el panel fotovoltaico. Como podemos observar claramente que la corriente (B) y la potencia(C) del panel fotovoltaico siguen a la radiación solar(A) que se presentó en los 6 días de prueba.

### 5.5.3: Algoritmo Conductancia Incremental

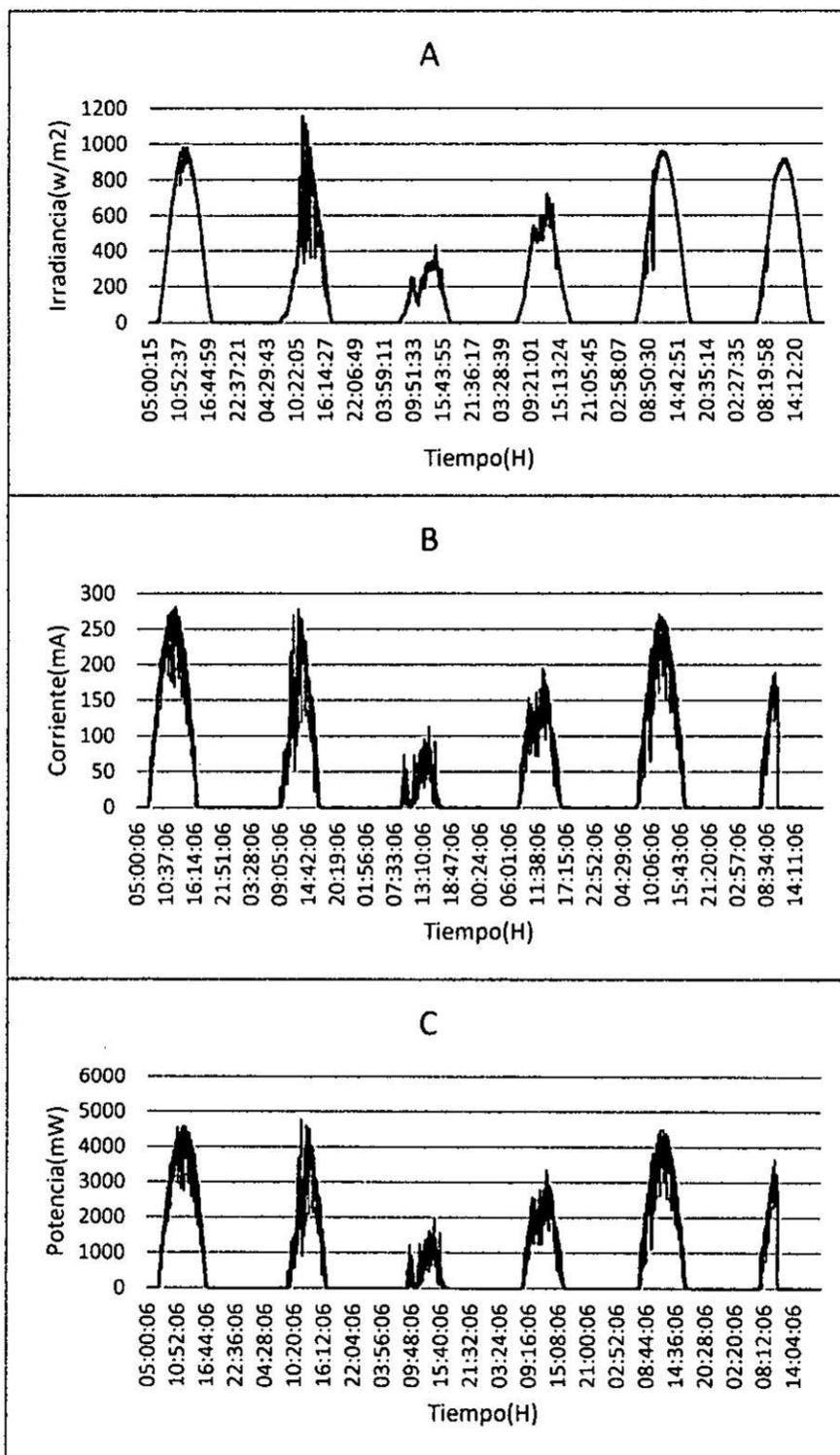
Se realizó la prueba al algoritmo CI para los 6 días y se obtuvo las siguientes gráficas que presentamos.



**Figura 5.21** Tensión de panel fotovoltaico y batería con algoritmo CI.

En la figura 5.21 la línea color azul representa la tensión del panel fotovoltaico y la línea color naranja representa la tensión de la batería. En esta figura se observa como el algoritmo adapta la tensión del panel fotovoltaico a cada día, y la adaptación en tensión es más estable que la del algoritmo P&O también se observa cómo la tensión de la batería aumenta cada día.

En el último día de prueba se logra observar que la tensión tiene una elevación el cual indica que se cargó a la batería al 100% por ello el controlador desactiva al MPPT para evitar la sobrecarga de la batería, al desactivar el panel queda como desconectado por ello se observa su tensión elevada.



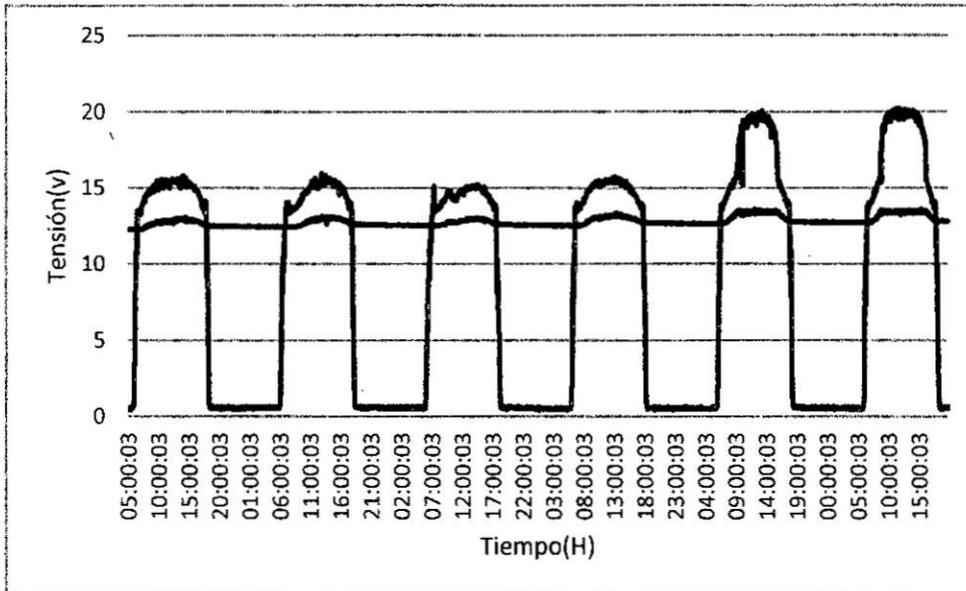
**Figura 5.22** A) Radiación Solar. B) Corriente del panel fotovoltaico con algoritmo CI. C) Potencia de panel fotovoltaico con algoritmo CI.

En la figura 5.22 la línea de color azul representa la radiación solar, la línea verde la corriente del panel fotovoltaico y la línea naranja la potencia que entrega el panel fotovoltaico. Como podemos observar claramente que la corriente (B) y la

potencia(C) del panel fotovoltaico siguen a la radiación solar(A) que se presentó en los 6 días de prueba.

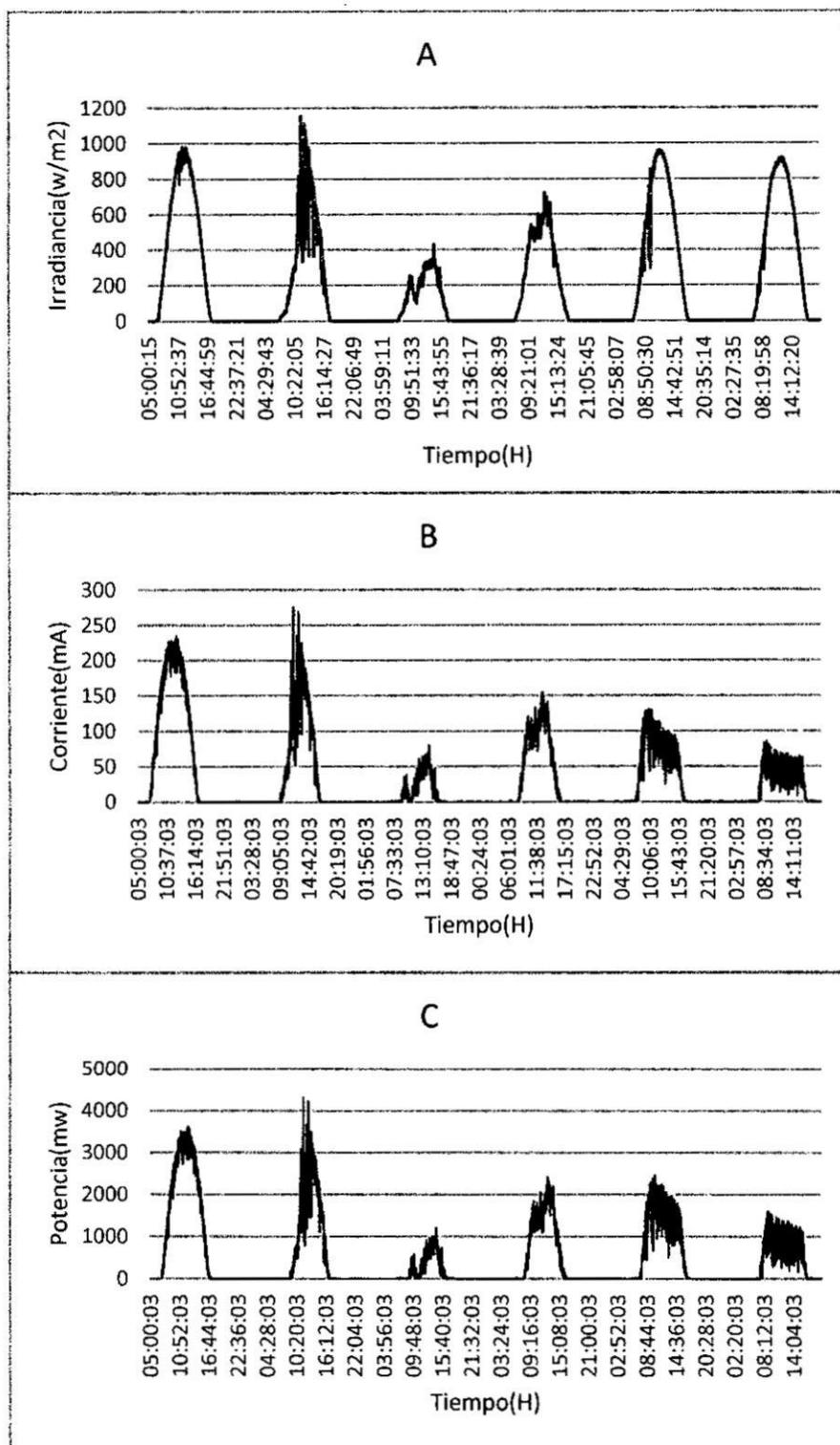
#### 5.5.4: Algoritmo Lógica Difusa

Se realizó la prueba al algoritmo CI para los 6 días y se obtuvo las siguientes gráficas que presentamos.



**Figura 5.23** Tensión de panel fotovoltaico y batería con algoritmo lógica difusa.

En la figura 5.23 la línea color azul representa la tensión del panel fotovoltaico y la línea color naranja representa la tensión de la batería. En esta figura observamos como el algoritmo adapta la tensión del panel fotovoltaico a cada día, pero esta adaptación no supera a la del algoritmo CI, también observamos como la tensión de la batería aumenta cada día.



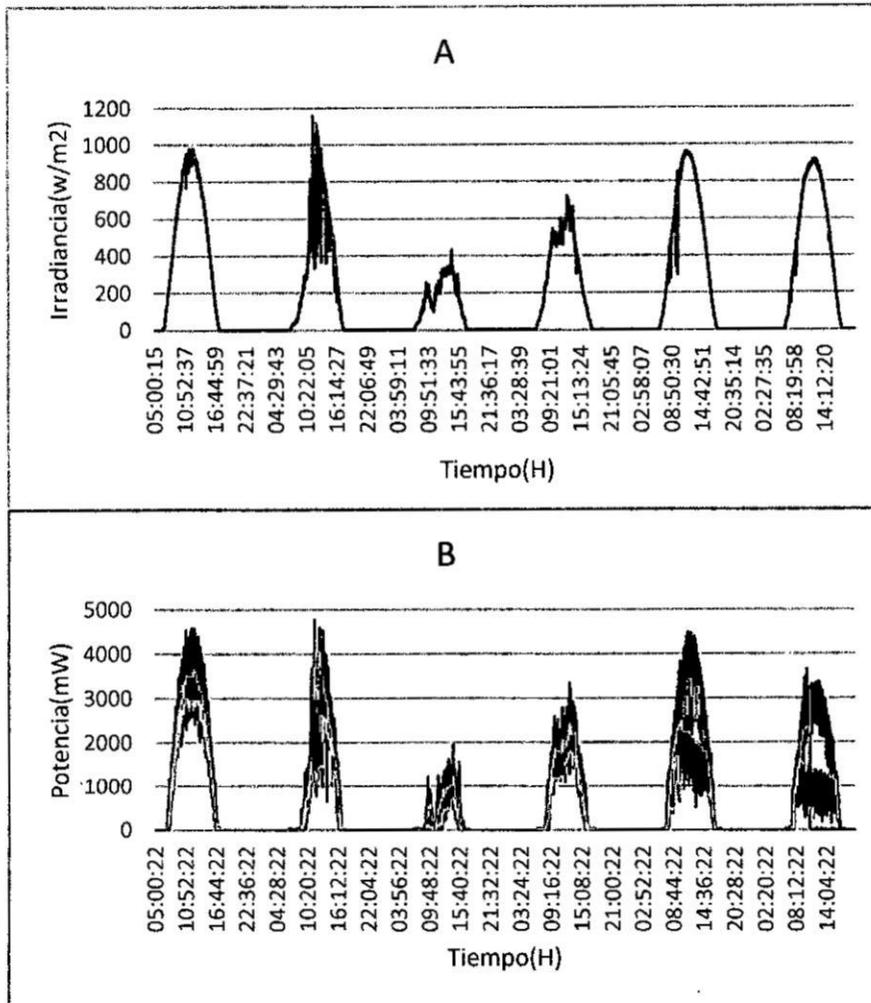
**Figura 5.24** A) Radiación Solar. B) Corriente del panel fotovoltaico con algoritmo CI. C) Potencia de panel fotovoltaico con algoritmo CI.

En la figura 5.24 la línea de color azul representa la radiación solar, la línea verde la corriente del panel fotovoltaico y la línea naranja la potencia que entrega el panel fotovoltaico. Como podemos observar claramente que la corriente (B) y la

potencia(C) del panel fotovoltaico siguen a la radiación solar(A) que se presentó en los 6 días de prueba.

### 5.5.5: Comparación de estabilidad de algoritmos

Esta prueba se realizó juntando las gráficas de potencia presentadas anteriormente para poder realizar un análisis visual como también matemático y determinar quién de ellos fue el mejor.



**Figura 5.25** A) Radiación Solar. B) Potencia del panel fotovoltaico con algoritmo P&O, CI y lógica difusa.

En la figura 5.25 la línea celeste representa a la radiación solar, la línea azul, verde y naranja representan potencia para el algoritmo P&O, CI y lógica difusa respectivamente. Se observa que el algoritmo CI es el más estable, significa que está más cerca al punto de máxima potencia que los otros algoritmos por lo cual es el que brinda más entrega de potencia a la batería.

Las siguientes tablas muestran en análisis matemático que se realizó a las pruebas.

**TABLA N° 5.2 SUMA DE ENERGÍA DIARIA CON ALGORITMO P&O.**

Potencia diaria	Suma potencia(J)
día 1	1215575.914 J
día 2	703309.9731 J
día 3	173320.0806 J
día 4	615248.3065 J
día 5	1115474.516 J
día 6	1098462.688 J
total	4921391.478 J

**TABLA N° 5.3 SUMA DE ENERGÍA DIARIA CON ALGORITMO CI.**

Potencia diaria	Suma potencia(J)
día 1	1590511.667 J
día 2	933322.6882 J
día 3	283191.0484 J
día 4	813723.2258 J
día 5	1438207.688 J
día 6	403955.7796 J
total	5462912.097 J

**TABLA N° 5.4 SUMA DE ENERGÍA DIARIA CON ALGORITMO LÓGICA DIFUSA.**

Potencia diaria	Suma potencia(J)
día 1	1245778.28 J
día 2	719108.8172 J
día 3	182055.4032 J
día 4	605029.3817 J
día 5	733453.1989 J
día 6	435084.7043 J
total	3920509.785 J

**TABLA N° 5.5 COMPARACIÓN DE ENERGÍA TOTAL DE ALGORITMOS**

algoritmo	P&O	CI	Lógica difusa
Potencia total	4921391.478 J	5462912.097 J	3920509.785 J

Las tablas 5.2, 5.3, 5.4 muestran información de cuanto carga diaria se obtiene mediante cada algoritmo y la suma total. En la tabla 5.5 se resume las energías totales obtenidas por cada algoritmo y se llega a la conclusión que el algoritmo Conductancia Incremental es el que mejora más la transferencia de potencia.

### 5.6: Eficiencia controlador básico y controlador con MPPT

Se realizó esta prueba con el simulador solar desarrollado que se menciona en el anexo E del presente trabajo de tesis que esta calibrado para 6 niveles de radiación y con un panel fotovoltaico de 10 vatios.

Esta es una de las pruebas más importante del presente trabajo de tesis con la cual se demuestra que nuestra hipótesis fue muy bien planteada. Es aquí donde se observa cómo se realiza el proceso de adaptación de impedancia mediante la intervención de algoritmos MPPT.

#### 5.6.1: Eficiencia de controlador básico

Se realizó la prueba al controlador básico, el cual es un circuito que no cuenta con adaptación de impedancia de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la tabla 5.6.

**TABLA N° 5.6 PORCENTAJE DE ERROR EN SIMULADOR SOLAR DESARROLLADO.**

	Irradiancia(w/m <sup>2</sup> )	Iin(A)	Vin(V)	Pin(W)	Iout(A)	Vout(V)	Pout(W)	Eficiencia
R1	500	0.291	13.93	4.05363	0.28	12.6	3.528	87.03%
R2	600	0.35	14.09	4.9315	0.333	12.75	4.24575	86.09%
R3	700	0.415	14.24	5.9096	0.378	12.8	4.8384	81.87%
R4	800	0.478	14.43	6.89754	0.437	12.83	5.60671	81.29%
R5	900	0.52	14.48	7.5296	0.48	12.84	6.1632	81.85%
R6	1000	0.583	14.61	8.51763	0.54	12.91	6.9714	81.85%

Analizando la tabla 5.6 se observa que hay perdidas de energía debido a que no existe un proceso de adaptación de impedancia mediante algún algoritmo.

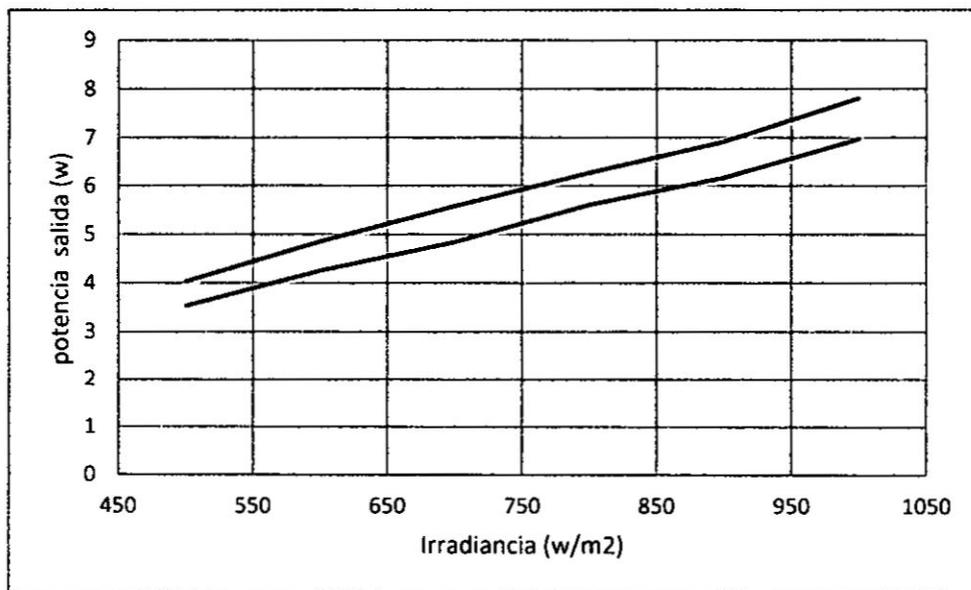
#### 5.6.2: Eficiencia de controlador MPPT

Se realizó la prueba al controlador básico más el controlador MPPT, donde si se realiza la adaptación de impedancia y se utilizó el algoritmo CI del resultado de la prueba anterior que fue el que mejor realizaba la transferencia de potencia, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la tabla 5.7.

**TABLA N° 5.7 PORCENTAJE DE ERROR EN SIMULADOR SOLAR DESARROLLADO.**

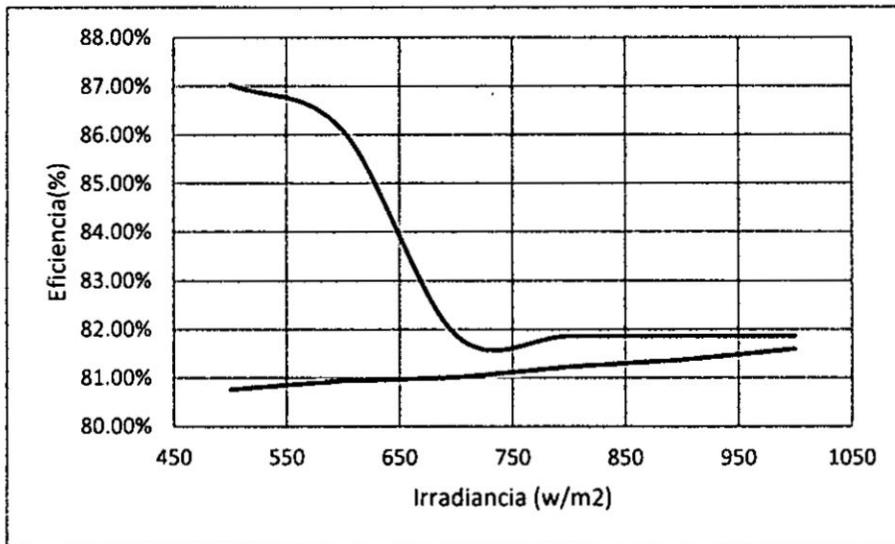
	Irradiancia(w/m <sup>2</sup> )	Iin(A)	Vin(V)	Pin(W)	Iout(A)	Vout(V)	Pout(W)	Eficiencia
R1	500	0.285	17.52	4.9932	0.32	12.6	4.032	80.75%
R2	600	0.338	17.74	5.99612	0.38	12.77	4.8526	80.93%
R3	700	0.404	17.25	6.969	0.44	12.83	5.58105	81.00%
R4	800	0.447	17.3	7.7331	0.488	12.87	6.26769	81.22%
R5	900	0.501	16.9	8.4669	0.534	12.9	6.9144	81.36%
R6	1000	0.533	17.99	9.58867	0.606	12.91	7.81055	81.59%

Analizando la tabla 5.7 se observa claramente como nuestro bloque MPPT actúa adaptando al panel fotovoltaico a trabajar en el punto de máxima potencia, como ejemplo si nos fijamos en la fila de R1 la corriente de entrada es menor que la corriente de salida y la tensión de entrada es mayor que la tensión de salida con lo cual se demuestra el funcionamiento de nuestro controlador MPPT. A diferencia cuando se usa solo el controlador básico no se observa este tipo de comportamiento de adaptación de impedancia.



**Figura 5.26 Potencia en la batería entre controlador básico y MPPT.**

En la figura 5.26 la línea azul representa la potencia que llega a la batería del controlador básico y la línea naranja la potencia del controlador MPPT con respecto a la radiación solar como también se observa que la potencia de carga de la batería al utilizar controlador MPPT es mucho mayor a no usarlo.



**Figura 5.27** Comparación de eficiencia entre controlador básico y MPPT.

En la figura 5.27 la línea azul representa la eficiencia del controlador básico y la línea naranja la eficiencia del controlador MPPT con respecto a la radiación solar como también se observa que el controlador básico tiene un pico en la eficiencia, pero conforme aumenta la radiación solar, esta disminuye, en cambio en el controlador MPPT la eficiencia aumenta conforme la radiación solar va aumentando.

### 5.6.3: Comparación de eficiencia con respecto a la potencia

Se tomó los datos de potencia de batería de las tablas 5.6 y 5.7, luego se procedió a calcular la eficiencia que se presentó al utilizar controlador MPPT.

**TABLA N° 5.8** PORCENTAJE DE EFICIENCIA EN EL SIMULADOR SOLAR DESARROLLADO.

	Irradiancia(w/m <sup>2</sup> )	básico	MPPT	% eficiencia
R1	500	3.528	4.032	13%
R2	600	4.24575	4.8526	13%
R3	700	4.8384	5.58105	13%
R4	800	5.60671	6.26769	11%
R5	900	6.1632	6.9144	11%
R6	1000	6.9714	7.81055	11%

De la tabla 5.8 se observa que utilizar controlador MPPT mejora entre 11-13 % la eficiencia de nuestro controlador.

## 5.7: Evaluación de SPFV comerciales

### 5.7.1: SPFV comerciales

Para realizar esta prueba se contaron con 2 sistemas solares comerciales de las siguientes marcas:

- DC Lighting kit

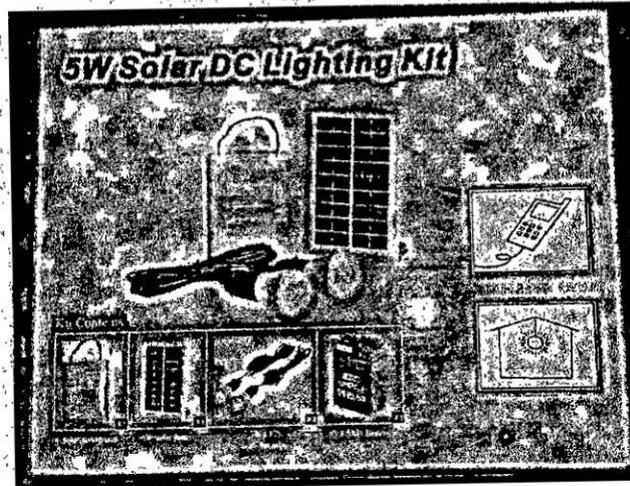


Figura 5.28 SPFV DC Lighting Kit.

En la figura 5.28 se muestra este kit que cuenta con un panel de 5 watts, una batería de 6 voltios, 4.5 A/h, una salida USB y 2 focos tipo led.

- Digital Lighting kit



Figura 5.29 SPFV Digital Lighting Kit.

En la figura 5.29 se muestra este kit que utiliza un panel de 5 watts, una batería de 6 voltios y 4 Ah, una salida USB y 3 focos tipo LED.

### 5.7.2: Pruebas en simulador solar a SPFV comerciales

Se realizó las siguientes pruebas para medir la eficiencia y rendimiento de los sistemas comerciales.

Se realizó las pruebas al SPFV comercial en el simulador solar, para los 6 niveles de radiación al igual que se realizaron las pruebas al sistema desarrollado.

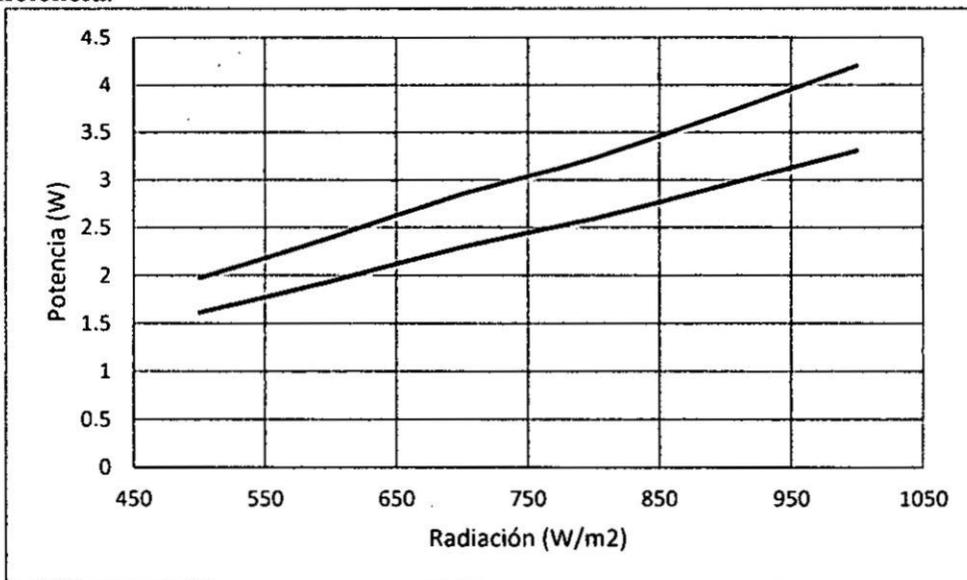
#### a) DC Lighting kit

Después de realizar las mediciones de potencia de panel fotovoltaico y batería se presenta la siguiente tabla 5.9.

**TABLA N° 5.9 DC LIGHTING KIT POTENCIA PARA DISTINTOS NIVELES DE RADIACIÓN SOLAR.**

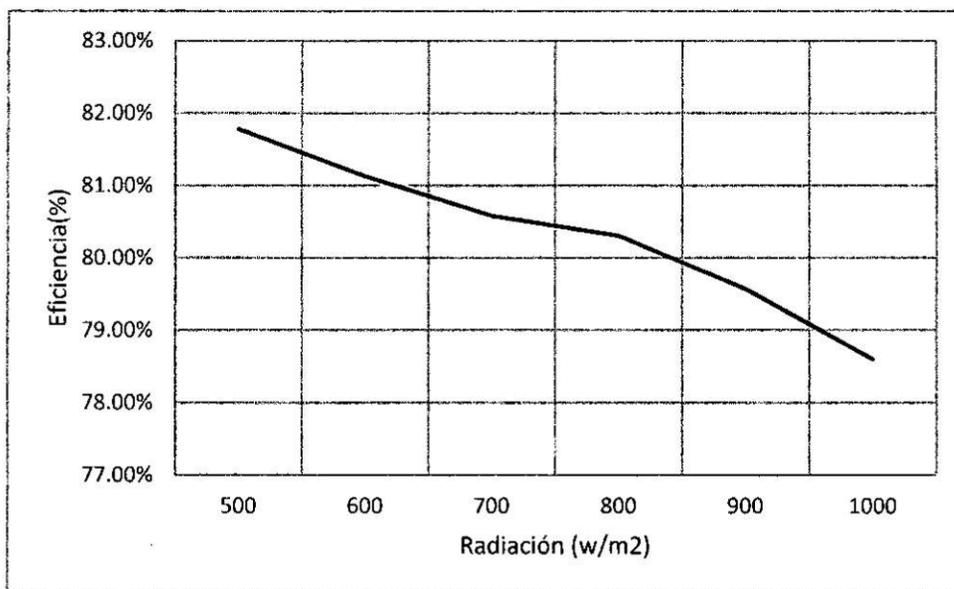
	Irradiancia(w/m <sup>2</sup> )	Iin(A)	Vin(V)	Pin(W)	Iout(A)	Vout(V)	Pout(W)	Eficiencia
R1	500	0.273	7.22	1.97106	0.266	6.06	1.61196	81.78%
R2	600	0.324	7.38	2.39112	0.318	6.1	1.9398	81.13%
R3	700	0.382	7.46	2.84972	0.374	6.14	2.29636	80.58%
R4	800	0.429	7.51	3.22179	0.42	6.16	2.5872	80.30%
R5	900	0.487	7.6	3.7012	0.475	6.2	2.945	79.57%
R6	1000	0.54	7.78	4.2012	0.53	6.23	3.3019	78.59%

La tabla 5.9 muestra los valores obtenidos directamente mediante mediciones de tensión y corriente, como los valores obtenidos indirectamente tales como potencia y eficiencia.



**Figura 5.30** Potencia de entrada y salida de DC Lighting kit.

En la figura 5.30 la línea azul representa a la potencia de entrada o potencia de panel fotovoltaico y la línea naranja a la potencia de salida o potencia de batería para distintos niveles de radiación solar como también se observa como disminuye la potencia salida de este controlador conforme aumenta la radiación solar.



**Figura 5.31** Eficiencia del sistema DC Lighting kit.

En la figura 5.31 la línea azul representa la eficiencia del sistema DC Lighting con respecto a los distintos niveles de radiación solar que fue sometido como también se observa como disminuye la eficiencia del controlador conforme aumenta la radiación solar.

De la tabla 5.9 se realiza un análisis del cual se observa que la tensión y corriente de salida para los diferentes niveles de radiación con respecto a la de entrada siempre es menor y no se toma en cuenta el punto de máxima potencia que tiene un panel fotovoltaico para estos sistemas comerciales.

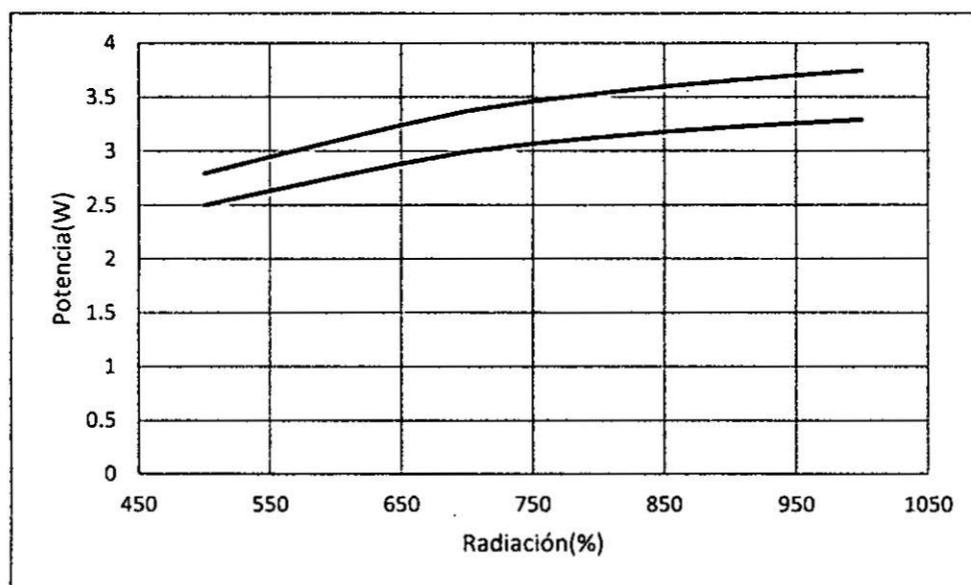
#### **b) Sistema Digital Lighting Kit**

Después de realizar las mediciones de potencia de panel fotovoltaico y batería se presenta la siguiente tabla 5.10.

**TABLA N° 5.10 DIGITAL LIGHTING KIT POTENCIA PARA DISTINTOS NIVELES DE RADIACIÓN SOLAR.**

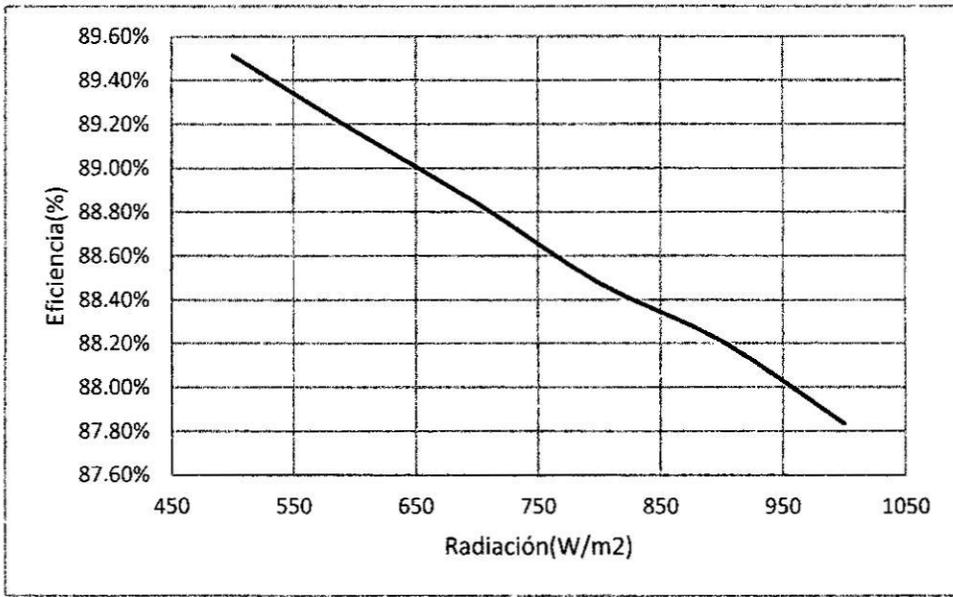
	Irradiancia( $w/m^2$ )	$I_{in}(A)$	$V_{in}(V)$	$P_{in}(W)$	$I_{out}(A)$	$V_{out}(V)$	$P_{out}(W)$	Eficiencia
R1	500	0.416	6.71	2.79136	0.413	6.05	2.49865	89.51%
R2	600	0.457	6.77	3.09389	0.453	6.09	2.75877	89.17%
R3	700	0.493	6.83	3.36719	0.488	6.13	2.99144	88.84%
R4	800	0.514	6.87	3.53118	0.508	6.15	3.1242	88.47%
R5	900	0.529	6.9	3.6501	0.521	6.18	3.21978	88.21%
R6	1000	0.54	6.93	3.7422	0.531	6.19	3.28689	87.83%

La tabla 5.10 muestra los valores obtenidos directamente mediante mediciones de tensión y corriente, como los valores obtenidos indirectamente tales como potencia y eficiencia.



**Figura 5.32 Potencia de entrada y salida de Digital Lighting kit.**

En la figura 5.32 la línea azul representa a la potencia de entrada o potencia de panel fotovoltaico y la línea naranja a la potencia de salida o potencia de batería como también se observa cómo disminuye la potencia salida de este controlador conforme aumenta la radiación solar.



**Figura 5.33** Eficiencia del sistema Digital Lighting Kit.

En la figura 5.33 la línea azul representa la eficiencia del sistema Digital Lighting Kit con respecto a los distintos niveles de radiación solar que fue sometido como también se observa como disminuye la eficiencia del controlador conforme aumenta la radiación solar, pero en comparación al sistema anterior este es mucho más eficiente.

De la tabla 5.10 se realiza un análisis al igual que para el anterior controlador comercial del cual se observa que la tensión y corriente de salida para los diferentes niveles de radiación con respecto a la de entrada siempre es menor y no se toma en cuenta el punto de máxima potencia que tiene un panel fotovoltaico para estos sistemas.

## **Capítulo VI**

---

### **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

## **Conclusiones**

- Se concluye que utilizar algoritmo MPPT en un SPFV incrementa la transferencia de potencia entre un 10 y 14 % en comparación a no utilizar ningún algoritmo, como también de los 3 algoritmos evaluados en la presente tesis, se llegó a la conclusión que el algoritmo más adecuado para SPFV es el Conductancia Incremental debido a que se obtuvo mejores resultados según las gráficas obtenidas, como también se sabe que el algoritmo CI requiere menos instrucciones de código por lo cual el autoconsumo de energía es mucho menor en comparación a utilizar el algoritmo con lógica difusa y la comparación con respecto al algoritmo P&O es que este algoritmo oscila cerca al punto de máxima potencia sin embargo el CI se encuentra más cerca con mínimas oscilaciones al punto de máxima potencia.
- Con los resultados obtenidos en las pruebas de carga y descarga de batería se concluye que nuestro controlador protege y aumenta el tiempo de vida a nuestra batería.
- Con los resultados obtenidos del control de tensión de foco led y USB se concluye que el controlador administra de manera eficiente la energía almacenada en la batería.
- Se concluye que un controlador MPPT funciona mejor a temperaturas frías.

## **Recomendaciones**

- Se recomienda utilizar algoritmo MPPT CI para SPFV debido a que brinda una mejor eficiencia a la carga de la batería y no encarece al sistema al ser económico.
- Se recomienda de una vez encendido el sistema conectar a un panel fotovoltaico para de esa manera mantener su autonomía.
- Se recomienda utilizar foco de 3 watts tipo led para no afectar la autonomía del sistema.
- Se recomienda instalar al panel fotovoltaico libre de sombras.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Borja Galán, J. (2012). “Estudio experimental del comportamiento de un módulo fotovoltaico en condiciones de sombreado con distintas configuraciones de diodos bypass”. Valencia.
- [2] Carlos Alejandro Ramírez Gómez (2016) “METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN CONVERTIDOR DC-DC APLICADO A AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA”. Colombia.
- [3] Dirección de Electrificación Rural (2015). Lima.
- [4] Gustavo A. Ruiz Robredo (2001) “ELECTRÓNICA BÁSICA PARA INGENIEROS”. 1ª Edición. Textos Universitarios. España.
- [5] Hussein K. H, Muta I, Hoshino T, Osaka M. (1995). “Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions, IEE Proc. Generation Transmission. Distribution”, vol. 142, no.1, pp. 59-64.
- [6] John Rojas Paredes, Rolando Adriano Peña, Marco Quispe Choquehuanca, Rafael Espino Campos, Rubén Acosta Jacinto (2014). “DISEÑO DE UN CIRCUITO CARGADOR SOLAR PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO DE POTENCIA DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PEQUEÑO MEDIANTE UN CONVERTIDOR TIPO BUCK”. XXI Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente. Puno.
- [7] Juan Manuel Enrique Gómez (2011). “DISEÑO, MODELADO Y OPTIMIZACION DE SISTEMAS DE SEGUIMIENTOS DEL PUNTO DE MAXIMA POTENCIA DE GENERADORES FOTOVOLTAICOS MEDIANTE CONVERTIDORES DC-DC”. España.
- [8] Marcos Gabriel Judewicz, Jorge Luis Strack, Sergio Alejandro González (2014). “ALGORITMO MPPT DE CONDUCTANCIA INCREMENTAL”. Congreso Adecá. Argentina.
- [9] Manfred Horn (2011). “PARA QUE SIRVEN LOS SISTEMAS PICO – FV?”. Encuentro de Física. Lima.
- [10] Varillas, Hugo Miguel Villegas (2016). “EVALUACION DE CONVERTIDORES DC/DC Y SISTEMAS DE CONTROL PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS”. Chile.
- [11] Schoeman J.J., van Wyk J.D. (1982). “A simplified maximal power controller for terrestrial photovoltaic panel arrays. IEEE Power Electronics Specialists Conference. PESC ‘82Record”. New York.

- [12] Sergio García Hortal (2009). "ESTUDIO DE CONTROL DE BUSQUEDA DEL EXTREMO EN MPPT PARA PANELES SOLARES". España.

# **ANEXOS**

## ANEXO A: Algoritmo del Controlador

```
#include <avr/wdt.h>

int pwm1 = 9; // Salida pwm 1
int pwm2 = 10; // Salida pwm 2
int usb = 11; // On/off usb

float pwm = 0; // variable interna para el control del foco led
float var = 0; // variable interna para el control del foco led
float const a = 0.0244; // constante para lectura de tensión
float const l = 40.92; // constante para evaluar led
float tension_panel = 0.0; // lectura de tensión de panel
float corriente_panel = 0.0; // variable de corriente de panel
float tension_mppt = 0.0; // lectura de tensión de MPPT
float tension_bateria = 0.0; // lectura de tensión de batería
int corriente_panel = 0; // variable de corriente panel
float tension_antigua = 0.0; // variable para MPPT
float tension_actual = 0.0; // variable para MPPT
int corriente_actual = 0.0, corriente_antigua = 0.0; // variable de corriente actual y antigua
float potencia_antigua = 0.0; // Variable para MPPT
float potencia_actual = 0.0; // Variable para MPPT
float const tension_min_panel = 10.0; // 409; // ---> constante para 10.0 voltios
float const tension_min_bateria = 10.5; // 430; // ---> constante para 10.5 voltios
float const tension_max_bateria = 13.5; // 552; // ---> constante para 13.5 voltios
float const tension_max_led = 12.0; // 491; // ---> constante para 12.0 voltios
int off_controlador = 0; // apaga y protege a la batería
int bloqueo_cargas = 0;

void setup() {
    wdt_disable(); // Desactivar el watchdog mientras se configura
    TCCR1B = 1;
    configurar_pwm(); // Configurar pwm a 57khz
    Serial.begin(9600); // Transmisión de datos serial

    pinMode(usb, OUTPUT); // declarar puerto como salida
    pinMode(pwm1, OUTPUT); // declarar puerto como salida
    pinMode(pwm2, OUTPUT); // declarar puerto como salida

    OCR1A = 280; // Duty Cycle inicial
    Serial.println(" Reset Controlador P&O ");
    wdt_enable(WDTO_2S); // Configurar a 2 segundos
}
```

```

void loop() {

wdt_reset(); // Actualizar el watchdog para que no produzca un reinicio

tension_panel = analogRead(A1)*a;// adquirir tensión de panel
if(tension_panel > tension_min_panel)
{
    tension_bateria = analogRead(A3)*a;
    if(tension_bateria > tension_max_bateria)
    {
        Serial.println("muy cargado ");
        //MPPT OFF
        //++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
        TCCR1A = 0b00100010;// Desactivo MPPT
        //++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
        digitalWrite(usb, HIGH); //Activo el USB
        //++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
        var = tension_bateria*I;
        pwm = (491 / var); // pwm = (12*255)/ Vbat
        OCR1B = 380 * pwm;
        //++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
    }
    else
    {
        while(bloqueo_cargas == 1)
        { wdt_reset(); // Actualizar el watchdog para que no produzca un reinicio
          MPPT();
          tension_bateria = analogRead(A3)*a;
          Serial.println("Cargando");
          if( tension_bateria >= 12.0)
          {bloqueo_cargas = 0;}
          tension_panel = analogRead(A1)*a;
          if( tension_panel <= 1)
          {bloqueo_cargas = 0;}}
          MPPT();
          Serial.println("Cargando");
          tension_bateria = analogRead(A3)*a;
          if(tension_bateria > tension_min_bateria)
          { digitalWrite(usb, HIGH); // Activo el USB
            TCCR1A = 0b11100010; //Activo led
            if (tension_bateria > tension_max_led)
            {
                var = tension_bateria*I;
                pwm = (491 / var); // pwm = (12*255)/ Vbat
                OCR1B = 380 * pwm;}
            else

```

```
}
```

## ANEXO B: Algoritmo Perturba y Observa

```
int pwm1 = 9; // variable salida de pwm
float a = 0.0244; // constante para lectura de tensión
float tension_panel = 0.0; // variable de tensión de panel
float corriente_panell = 0.0; // variable de corriente de panel
float tension_mppt = 0.0; // variable de tensión de mppt
int corriente_panel = 0; // variable de corriente panel
float potencia_actual = 0.0, potencia_antigua = 0.0; // variable de potencia actual
y antigua
float tension_actual = 0.0, tension_antigua; // variable de tensión actual y antigua
int corriente_actual = 0, corriente_antigua = 0; // variable de corriente actual y
antigua

void setup() {
  TCCR1B = 1;
  configurar_pwm(); // Configurar PWM
  Serial.begin(9600); // Transmisión de datos serial
  pinMode(pwm1, OUTPUT); // Asigna el pin PWM OCR1A como salida
  OCR1A = 280; // Duty Cycle inicial
  delay(1000); // Retardo inicial
}
void loop() {
  potencia_antigua = potencia_actual; // igualar potencia antigua a potencia actual
  tension_antigua = tension_actual; // igualar tensión antigua a tensión actual
  ///----- censar corriente de panel -----
  corriente_panell = 0;
  for(int i=1; i<=300; i++)
  { corriente_panell = analogRead(A0) + corriente_panell;
    delay(1); }
  corriente_panell = corriente_panell/300;
  corriente_panel = (int)corriente_panell;
  ///-----fin censar corriente de panel-----
  ///----- censar tensión de panel -----
  tension_panel = 0.0;
  for(int i=1; i<=100; i++)
  { tension_panel = analogRead(A1)*a + tension_panel;
    delay(1); }
  tension_panel = tension_panel/100;
  ///-----fin censar tensión de panel-----
  ///----- censar tensión de salida MPPT -----
  tension_mppt = 0.0;
  for(int i=1; i<=100; i++)
  { tension_mppt = analogRead(A2)*a + tension_mppt;
    delay(1); }
```

```

    tension_mppt = tension_mppt/100;
    ///-----fin censar tensión de MPPT -----

    potencia_actual = corriente_panel*tension_panel; //potencia actual igual antigua
    tension_actual = tension_panel; // tension actual igual antigua
    //-----
    //-----Algoritmo MPPT P & O -----
    if(potencia_actual > potencia_antigua)
    {if(tension_actual > tension_antigua)
        {OCR1A = OCR1A - 1;}
        else
        {OCR1A = OCR1A + 1;}}
    if(potencia_actual < potencia_antigua)
    {if(tension_actual > tension_antigua)
        {OCR1A = OCR1A + 1;}
        else
        {OCR1A = OCR1A - 1;}}
    delay(5);
    // ---- condición que haga que no baje de 13 voltios ----
    if(OCR1A >= 378 )
    {OCR1A = 377 ;}
    if(OCR1A < 274 )
    {OCR1A = 275 ;}
    //-----Enviar datos de sensores a la PC-----
    Serial.print(corriente_panel);
    Serial.print(" mA ");
    Serial.print(" , ");
    Serial.print(tension_panel);
    Serial.print(" V ");
    Serial.print(" , ");
    Serial.print(tension_mppt);
    Serial.print(" V ");
    Serial.print(" , ");
    Serial.print(potencia_actual);
    Serial.print(" mW ");
    Serial.print(" , ");
    Serial.print(potencia_antigua);
    Serial.print(" mW ");
    Serial.print(" , ");
    Serial.println(OCR1A);
    //-----Fin de enviar datos de la PC-----
}
void configurar_pwm(void)
{ TCCR1A=0b11000010;//modo 14
TCCR1B|=(1<<WGM13|1<<WGM12|0<<CS12|0<<CS11|1<<CS10);
ICR1=380;}

```

## ANEXO C: Algoritmo Conductancia Incremental

```
int pwm1 = 9; // variable salida de pwm
float a = 0.0244; // constante para lectura de tensión
float dv, di; // variable del diferencial de tensión y corriente
float tension_panel = 0.0; // variable de tensión de panel
float corriente_panell = 0.0; // variable de corriente de panel
float tension_mppt = 0.0; // variable de tensión de mppt
int corriente_panel = 0; // variable de corriente de panel
float potencia_actual = 0.0, potencia_antigua = 0.0; // variable de potencia actual
y antigua
float tension_actual = 0.0, tension_antigua; // variable de tensión actual y antigua
int corriente_actual = 0.0, corriente_antigua = 0.0; // variable de corriente actual y
antigua
void setup() {
  TCCR1B = 1;
  configurar_pwm(); // Configurar PWM
  Serial.begin(9600); // Transmisión de datos serial
  pinMode(pwm1, OUTPUT); // Asigna el pin pwm OCR1A como salida
  OCR1A = 280; // Duty Cycle inicial
  delay(1000); // Retardo inicial
}
void loop() {
  potencia_antigua = potencia_actual; // potencia antigua igual al actual
  tension_antigua = tension_actual; // tensión antigua igual al actual
  corriente_antigua = corriente_actual; // corriente antigua igual a la actual
  ///----- censar corriente de panel -----
  corriente_panell = 0.0;
  for(int i=1; i<=300; i++)
  { corriente_panell = analogRead(A0) + corriente_panell;
    delay(1); }
  corriente_panell = corriente_panell/300;
  corriente_panel = (int)corriente_panell;
  ///-----fin censar corriente de panel-----
  ///----- censar tensión de panel -----
  tension_panel = 0.0;
  for(int i=1; i<=100; i++)
  { tension_panel = analogRead(A1)*a + tension_panel;
    delay(1); }
  tension_panel = tension_panel/100;
  ///-----fin censar tensión de panel-----
  ///----- censar tensión de MPPT -----
  tension_mppt = 0.0;
  for(int i=1; i<=100; i++)
  { tension_mppt = analogRead(A2)*a + tension_mppt;
```

```

    delay(1);}
tension_mppt = tension_mppt/100;
////-----fin censar tensión de MPPT -----
potencia_actual = corriente_panel*tension_panel; //potencia actual
tension_actual = tension_panel; // tension actual igual a la antigua
corriente_actual = corriente_panel; // corriente actual igual a la del panel
//-----
//----- Algoritmo Conductancia incremental -----
dv = tension_actual - tension_antigua; // diferencial de la tensión
di = corriente_actual - corriente_antigua; // diferencial de la corriente
if(dv == 0)
{if(di == 0){;}
else
{if(di > 0)
{OCR1A = OCR1A + 1;}
else
{OCR1A = OCR1A - 1;}}
else
{if( (di/dv) == -(corriente_actual/tension_actual)){;}
else
{ if((di/dv) > -(corriente_actual/tension_actual))
{OCR1A = OCR1A - 1;}
else
{OCR1A = OCR1A + 1;}}}
delay(50);
//-----
// ---- condición que haga que no baje de 13 voltios ----
if(OCR1A >= 378 ) {OCR1A = 377;}
if(OCR1A < 274 ) {OCR1A = 275;}
// enviar datos de sensores a la PC
Serial.print(corriente_panel);
Serial.print(" A , ");
Serial.print(tension_panel);
Serial.print(" V , ");
Serial.print(tension_mppt);
Serial.print(" V , ");
Serial.print(potencia_actual);
Serial.print(" W , ");
Serial.print(potencia_antigua);
Serial.print(" W , ");
Serial.println(OCR1A); // fin de enviar datos de la PC
}
void configurar_pwm(void)
{TCCR1A=0b11000010;//modo 14
TCCR1B=(1<<WGM13|1<<WGM12|0<<CS12|0<<CS11|1<<CS10);
ICR1=380;}

```

## ANEXO D: Algoritmo Lógica Difusa

```
float vp = 0.0, ip = 0.0, vb = 0.0, ip_old = 0.0, pk_old = 0.0;
float peerror[2],pderror[2],c[7],regla[7][7],fdu[3],pdu[3],minimo = 0.0, maximo =
0.0;
float fin[90],pout = 0;
int feerror[2], fderror[2];
float xxx = 0.0, yyy = 0.0, xx = 0;
float a = 0.0244; // constante para conversion de tension

float ek = 0.0, pk = 0.0, ek_old = 0.0, cek = 0.0, dd = 0.0, fduty = 0.0 ,ffduty =
274.0, num = 0.0, den = 0.0;

float tension_panel = 0.0 ,corriente_panel1 = 0.0, tension_mppt = 0.0;
int corriente_panel = 0;

float potencia_actual = 0.0, potencia_antigua = 0.0;
float tension_actual = 0.0, tension_antigua;
float corriente_actual =0.0, corriente_antigua = 0.0;
int pwm1 = 9;
int indice;
int dutymaximo = 378;
int dutyminimo = 0;
int duty;

//*****
//          Funciones de Pertencia
//*****
int const NB=0; // NEGATIVE BIG
int const NM=1; // NEGATIVE MEDIUN
int const NS=2; // NEGATIVE SMALL
int const ZO=3; // ZERO
int const PS=4; // POSITIVE SMALL
int const PM=5; // POSITIVE MEDIUN
int const PB=6; // POITIVE BIG

//*****
//          Fin de Funciones de pertencia
//*****
void setup() {

    TCCR1B = 1;          // configurar pwm
    conf_pwm();         // configurar el pwm
    Serial.begin(9600); // Transmision de datos serial
    pinMode(pwm1, OUTPUT); // Asigna el pin pwm OCR1A como salida
```

```

int iii = 0, jjj = 0;
for( iii = 0 ; iii < 90 ; iii++ )
{ fin[iii] = 0.0; } // inicializar el vector fin []

for( iii = 0 ; iii < 2 ; iii++ )
{ peerror[iii] = 0.0;
  pderror[iii] = 0.0;
  feerror[iii] = 0.0;
  fderror[iii] = 0.0; } // inicializar vectores peerror, pderror, feerror, fderror

for( iii = 0 ; iii < 3 ; iii++ )
{ pdu[iii] = 0.0;
  fdu[iii] = 0.0; } // inicializar vectores pdu, fdu

/*****
//          Centro de las funciones de pertenencia
/*****
c[NB] = -6.0;
c[NM] = -4.0;
c[NS] = -2.0;
c[ZO] = 0.0;
c[PS] = -c[NS];
c[PM] = -c[NM];
c[PB] = -c[NB];
/*****

/*****
//          Creación de las funciones de pertenencia de entrada
/*****
for( iii = 0 ; iii < 16 ; iii++ )
{
  xx = (1.0 -(iii/15.0));
  fin[iii] = xx;
  fin[15 + iii] = xx;
  fin[30 + iii] = xx;
  fin[45 + iii] = xx;
  fin[60 + iii] = xx;
  fin[75 + iii] = xx;
  fin[15] = 1.0;
  fin[30] = 1.0;
  fin[45] = 1.0;
  fin[60] = 1.0;
  fin[75] = 1.0; }
/*****

```

```

//*****
//          Reglas del controlador de fuzzy logic
//*****
for( iii = 0; iii<4 ; iii++ )
{
  for( jjj = 0; jjj<(4-iii) ; jjj++ )
  {
    regla[iii][jjj] = NB;
    regla[6-iii][6-jjj] = PB;}
}
for( iii = 0; iii<5 ; iii++ )
{
  regla[iii][4-iii] = NM;
  regla[iii+2][6-iii] = PM;
}

for( iii = 0; iii<6 ; iii++ )
{
  regla[iii][5-iii] = NS;
  regla[iii+1][6-iii] = PS;
}

for( iii = 0; iii<7 ; iii++ )
{
  regla[iii][6-iii] = ZO;
}

}

void loop() {

potencia_antigua = potencia_actual;
corriente_antigua = corriente_panel1;
tension_antigua = tension_panel;

////----- censar corriente de panel -----
  corriente_panel1 = 0.0;
for(int i=1;i<=300;i++)
{ corriente_panel1 = analogRead(A0) + corriente_panel1;
  delay(1);}
  corriente_panel1 = corriente_panel1/300;
  corriente_panel = (int)corriente_panel1;
  corriente_panel1 = (float)corriente_panel;
  corriente_panel1 = corriente_panel1/1000;
////-----fin sensar corriente de panel-----

```

```

////----- censar tensión de panel -----
tension_panel = 0.0;
for(int i=1;i<=100;i++)
{ tension_panel=analogRead(A1)*a + tension_panel;
  delay(1);}
tension_panel = tension_panel/100;
////-----fin sAensar tension de panel-----

////----- censar tensión de mppt -----
tension_mppt = 0.0;
for(int i=1;i<=100;i++)
{ tension_mppt=analogRead(A2)*a + tension_mppt;
  delay(1);}
tension_mppt = tension_mppt/100;
////-----fin sensar tension de mppt -----

potencia_actual = tension_panel * corriente_panell;
tension_actual = tension_panel;
corriente_actual = corriente_antigua;

ek = ( potencia_actual - potencia_antigua)/(tension_actual - tension_antigua);
Serial.println(ek);
ek = 3.4*ek;
cek = ek-ek_old;
Serial.println(cek);
cek = 3.4*cek;
ek_old = ek;

//*****
//          Fusificacion E(K)
//*****
if((ek > -6.0 )&&(ek < 6.0))
{
  indice = (int)(ek + 6.0)*7.5;
  peerror[0] = fin[indice];
  peerror[1] = 1-peerror[0];
  feerror[0] = (int)(indice/15.0);
  feerror[1] = feerror[0]+1;}

if(ek <= -6.0)
{
  peerror[0] = 1.0;
  peerror[1] = 0.0;
  feerror[0] = NB;
  feerror[1] = NM;}

```

```

if(ek >= 6.0)
{
    peerror[0] = 1.0;
    peerror[1] = 0.0;
    feerror[0] = PB;
    feerror[1] = PM;}
//*****

//*****
//                               fusificacion CE(K)
//*****
if((cek > -6.0) && (cek < 6.0))
{
    indice = (int)((cek + 6.0)*7.5);
    pderror[0] = fin[indice];
    pderror[1] = 1 - pderror[0];
    fderror[0] = (int)(indice/15.0);
    fderror[1] = fderror[0] + 1;}
if(cek <= -6.0)
{
    pderror[0] = 1.0;
    pderror[1] = 0.0;
    fderror[0] = NB;
    fderror[1] = NM;}
if(cek >= 6.0)
{
    pderror[0] = 1.0;
    pderror[1] = 0.0;
    fderror[0] = PB;
    fderror[1] = PM;}
//*****

//*****
//                               Toma de decisi3n
//*****
fdu[0] = regla[feerror[0]][fderror[0]];
fdu[1] = regla[feerror[0]][fderror[1]];
fdu[2] = regla[feerror[1]][fderror[1]];
pdu[0] = min(peerror[0],pderror[0]);
pdu[1] = max(min(peerror[0],pderror[1]),min(peerror[1],pderror[0]));
pdu[2] = min(peerror[1],pderror[1]);
//*****

//*****
//                               Desfusificacion
//*****

```

```

den = (pdu[0] + pdu[1] + pdu[2]);
num = c[(int)((fdu[0])*pdu[0])] + c[(int)((fdu[1])*pdu[1])] +
c[(int)((fdu[2])*pdu[2])];
dd = 1.4*(num/den);
//*****

//*****
                                Enviar señal PWM
//*****
fduty = ffduty + dd;
if( fduty > dutymaximo)
{fduty = dutymaximo;}else
if( fduty < dutyminimo)
{fduty = dutyminimo;}else

{ffduty = fduty;}
duty = (int)fduty;
OCR1A = duty;

//*****
Serial.print(corriente_panel1);
Serial.print(" A ");
Serial.print(" , ");
Serial.print(tension_panel);
Serial.print(" V ");
Serial.print(" , ");
Serial.print(tension_mppt);
Serial.print(" V ");
Serial.print(" , ");
Serial.print(potencia_actual);
Serial.print(" W ");
Serial.print(" , ");
Serial.print(potencia_antigua);
Serial.print(" W ");
Serial.print(" , ");
Serial.println(duty);
delay(50);
}

void conf_pwm()
{ TCCR1A = 0b11110010; //modo 14
  TCCR1B |= (1 << WGM13 | 1 << WGM12 | 0 << CS12 | 0 << CS11 | 1 <<
CS10);
  ICR1 = 380;}

```

**ANEXO E:** Simulador solar.

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SIMULADOR SOLAR DE BAJO  
COSTO PARA SISTEMAS PICO FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO  
LÁMPARAS DICROICAS HALÓGENAS**

## **Introducción**

En el siguiente anexo se describe la construcción de un simulador solar el cual sirvió para la evaluación de los algoritmos MPPT desarrollados en el presente trabajo de tesis, donde se muestran desde los materiales usados, la estructura del simulador realizada, diagramas de bloques total del sistema, calibración del sistema y resultados de la evaluación de paneles fotovoltaicos. El diseño y la construcción de dicho simulador solar se presentó en XXIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXIII- SPES), Huancayo, 14 -19.11.2016.

## E.1 Construcción del simulador solar

Para el desarrollo del simulador solar se utilizó un variac que tenía un rango de 0 - 10 niveles de regulación, con el cual se controlaba la irradiación que producía el simulador solar.

Se realizó la calibración del simulador con ayuda del solarímetro mencionado en el punto 5.2.1 de la presente tesis, mediante la toma de 240 muestras con el radiómetro para distintos niveles del rango del variac. De estas muestras se calculó un promedio para obtener una tabla de equivalencia entre el nivel de irradiación y la tensión de alimentación de las lámparas, la cual era controlado por medio del variac.

### A.- Lámpara dicroica Halógena

Se desarrolló un simulador solar con lámparas dicroicas halógenas de 50 vatios y 220VAC. En la figura E.1 se muestra la lámpara dicroica utilizada, en la tabla E.1 se muestra las características técnicas más resaltantes de la lámpara dicroica halógena y también el espectro de la lámpara.

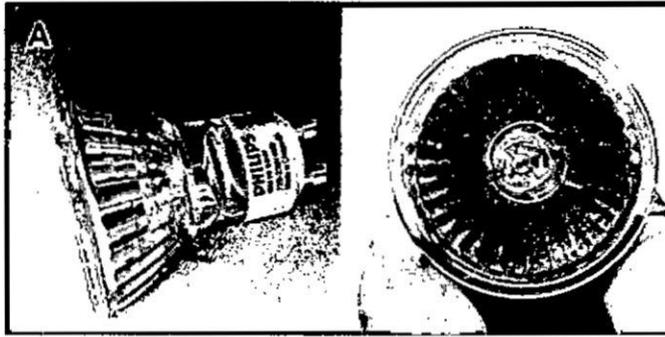


Figura E.1 Lámpara dicroica utilizada en la implementación del simulador solar.

Tabla E.1

Principales características técnicas de la lámpara utilizadas en la implementación del simulador solar.

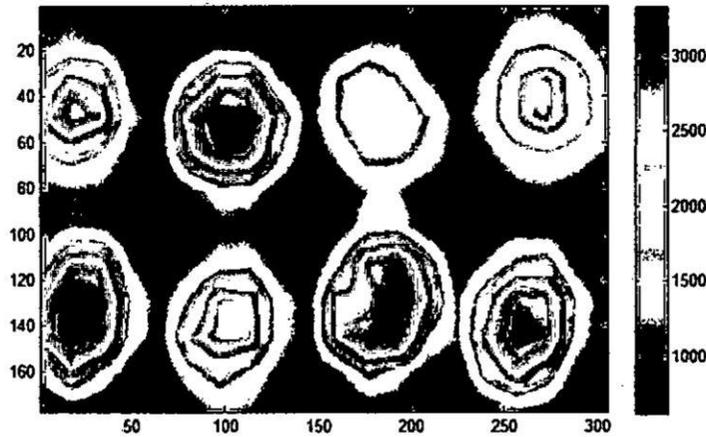
Características	Unidad	Valor
Flujo luminoso total	lm	404
Potencia	w	48.9
Factor de potencia	-	1.00
Eficacia	lm/W	8.3
Intensidad de corriente	mA	214
Tensión	V	228
CCT	K	2680
CRI(Ra)	-	99

Con ellos comprobamos existe una relación proporcional y podemos regular a nuestro simulador a valores de radiación de 500, 600, 700, 800, 900, 1000  $w/m^2$ .

A continuación, presentamos las distribuciones de irradiancia para esos valores mencionados:

**1) grafica para una radiación de 500  $w/m^2$**

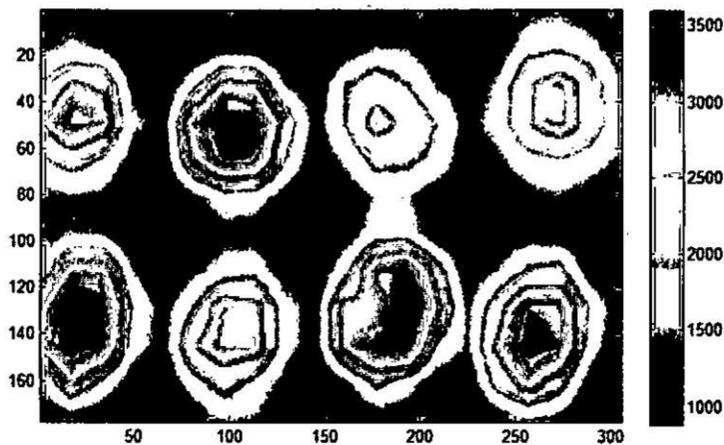
De las cuales obtuvimos como irradiancia promedio de 1351  $w/m^2$ .



**Figura E.7** Distribución de irradiancia a 1351  $w/m^2$  promedio.

**2) grafica para una radiación de 600  $w/m^2$**

De las cuales obtuvimos como irradiancia promedio de 1621  $w/m^2$ .



**Figura E.8** Distribución de irradiancia a 1621  $w/m^2$  promedio.

**3) grafica para una radiación de 700  $w/m^2$**

De las cuales obtuvimos como irradiancia promedio de 1891  $w/m^2$ .

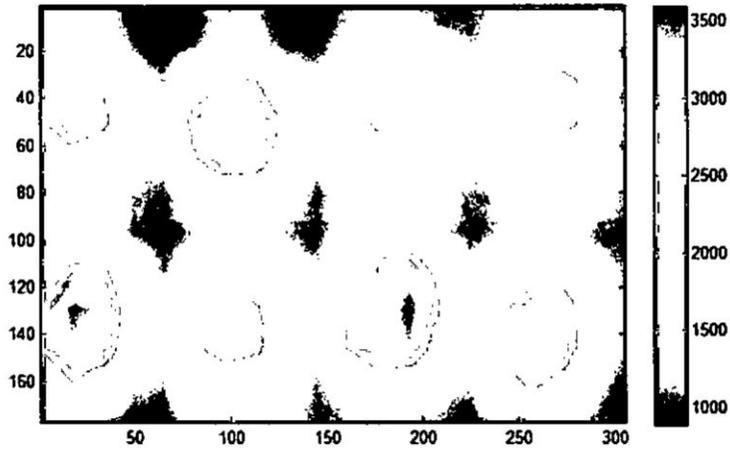


Figura E.9 Distribución de irradiancia a  $1891 \text{ w/m}^2$  promedio.

**4) grafica para una radiación de  $800 \text{ w/m}^2$**

De las cuales obtuvimos como irradiancia promedio de  $2162 \text{ w/m}^2$ .

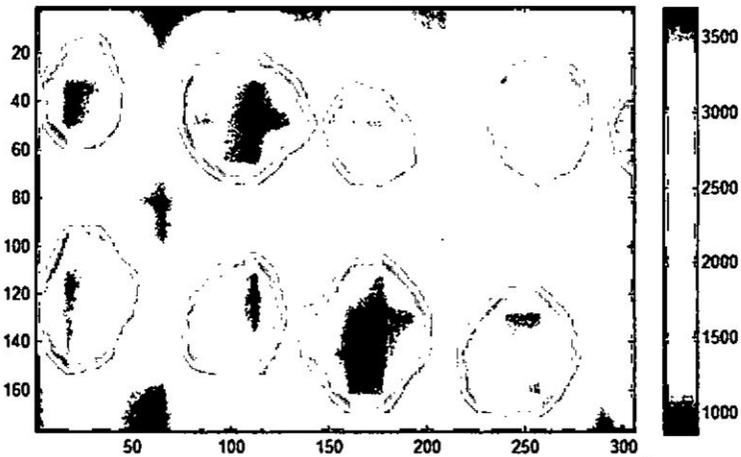


Figura E.10 Distribución de irradiancia a  $2162 \text{ w/m}^2$  promedio.

**5) grafica para una radiación de  $900 \text{ w/m}^2$**

De las cuales obtuvimos como irradiancia promedio de  $2430 \text{ w/m}^2$ .

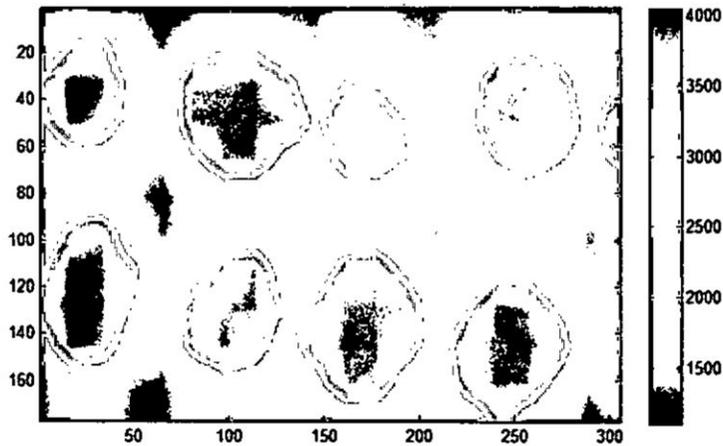
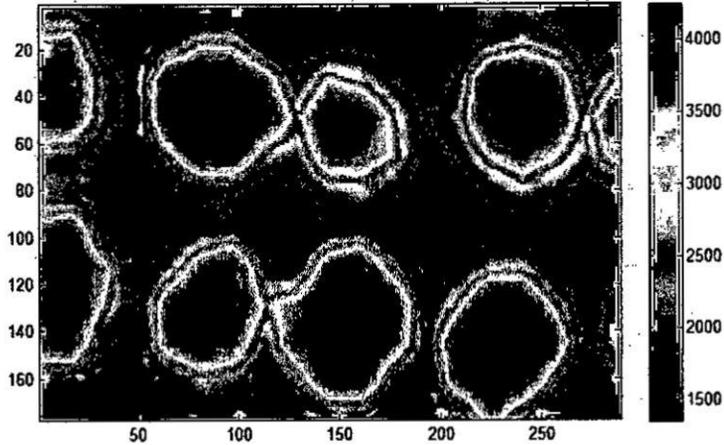


Figura E.11 Distribución de irradiancia a  $2430 \text{ w/m}^2$  promedio.

**6) grafica para una radiación de  $1000 \text{ w/m}^2$**

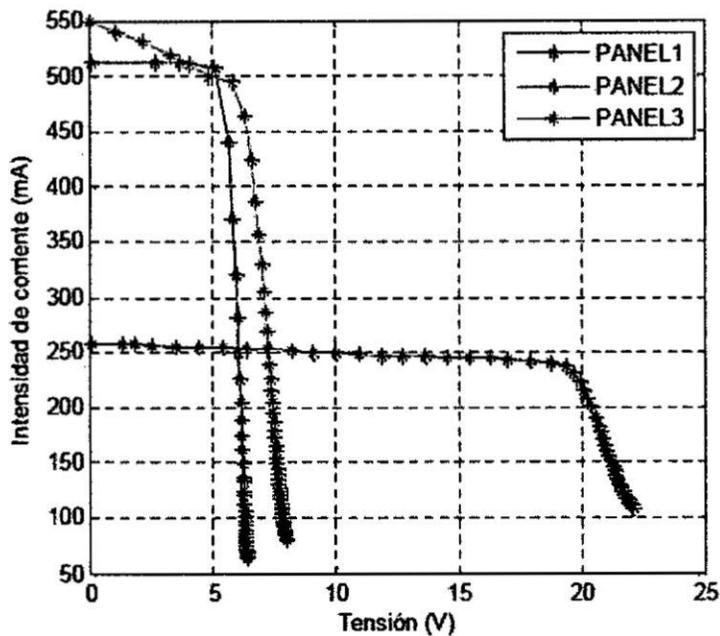
De las cuales obtuvimos como irradiación promedio de  $2702 \text{ w/m}^2$ .



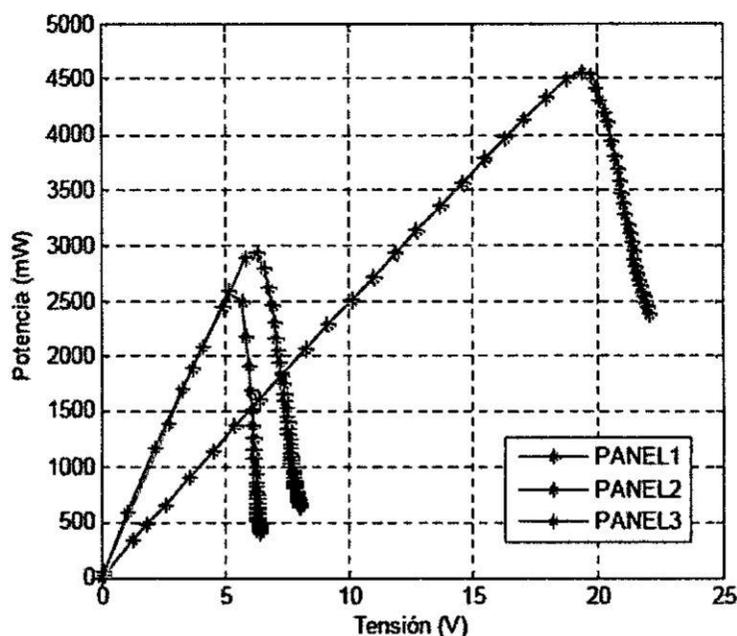
**Figura E.12** Distribución de irradiancia a  $2702 \text{ w/m}^2$  promedio.

**E) Evaluación del simulador solar para algunos paneles**

Para evaluar al simulador solar se realizaron las pruebas a 3 paneles fotovoltaicos de diferentes marcas y potencias, con la ayuda de una resistencia de 100 ohmios a 100 vatios del cual se obtuvieron las siguientes curvas.



**Figura E.13** Curvas I-V de paneles solares evaluados.



**Figura E.14** Curva P-V de paneles solares evaluados.

En la figura E.13 y figura E.14 se muestran las curvas I-V y P-V respectivamente, obtenidas con nuestro simulador implementado.

Para validar nuestro sistema se realizó una comparación de los valores obtenido en el simulador solar con respecto a los valores nominales presentados en la hoja de datos de cada uno de los paneles. De esta manera observamos que porcentaje de error presenta nuestro sistema.

**TABLA N° E.2**

VALORES NOMINALES DE 3 PANELES COMPARADOS CON VALORES HALLADOS EN LABORATORIO UTILIZANDO SIMULADOR SOLAR.

	PANEL1		PANEL2		PANEL3	
	Nominal	Valor hallado	Nominal	Valor hallado	Nominal	Valor hallado
<b>Potencia pico(W)</b>	3	2.45	5	4.56	3.5	2.93
<b>Vca(V)</b>	8.2	6.51	22.7	22.33	8.64	8.32
<b>Icc(mA)</b>	540	511	0.32	247	550	523

**TABLA N° E.3**

PORCENTAJE DE ERROR EN SIMULADOR SOLAR.

	VALOR NOMINAL	VAALOR EN SIMULADOR	% ERROR
<b>Potencia pico PANEL1 (W)</b>	3	2.45	18
<b>Potencia pico PANEL2 (W)</b>	5	4.56	9
<b>Potencia pico PANEL3 (W)</b>	3.5	2.93	16

De acuerdo a la tabla 5.3, los valores de  $V_{ca}$ ,  $I_{cc}$  y de potencia de panel, hallados en laboratorio se aproxima a los valores nominales. Ello determina que el simulador propuesto puede ser utilizado para evaluar la eficiencia de algoritmos MPPT como también caracterizar paneles solares comerciales a pesar de que la distribución de la irradiancia no es uniforme.

Los errores para hallar la potencia pico de los paneles PFV fueron de 9,16 y 18% del valor nominal.

La irradiancia es estable en el tiempo, esto permite dentro de la implementación de controladores de carga realizar pruebas.

La temperatura del sistema se mantiene a  $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Esto permite una adecuada evaluación de los paneles y algoritmos MPPT.

**ANEXO F: Muestras de corriente e irradiación.**

hora	Multímetro (mA)	Radiómetro (w/m <sup>2</sup> )
07:00	0.033	61
07:05	0.034	63
07:10	0.032	59
07:15	0.042	77
07:20	0.075	142
07:25	0.054	103
07:30	0.065	122
07:35	0.096	187
07:40	0.107	205
07:45	0.125	238
07:50	0.116	220
07:55	0.131	250
08:00	0.133	254
08:05	0.139	265
08:10	0.109	207
08:15	0.127	245
08:20	0.148	282
08:25	0.129	245
08:30	0.165	318
08:35	0.196	383
08:40	0.228	439
08:45	0.26	502
08:50	0.226	434
08:55	0.218	421
09:00	0.247	474
09:05	0.259	499
09:10	0.273	530
09:15	0.266	515
09:20	0.263	510
09:25	0.27	525
09:30	0.292	548
09:35	0.292	550
09:40	0.294	558
09:45	0.295	553
09:50	0.299	574
09:55	0.302	582
10:00	0.313	601

10:05	0.315	605
10:10	0.321	615
10:15	0.324	624
10:20	0.328	630
10:25	0.331	638
10:30	0.338	654
10:35	0.341	660
10:40	0.346	670
10:45	0.353	686
10:50	0.353	691
10:55	0.354	693
11:00	0.355	698
11:05	0.353	694
11:10	0.361	712
11:15	0.361	710
11:20	0.356	705
11:25	0.364	724
11:30	0.363	722
11:35	0.369	739
11:40	0.372	745
11:45	0.373	743
11:50	0.375	757
11:55	0.373	751
12:00	0.38	766
12:05	0.385	773
12:10	0.4	816
12:15	0.401	818
12:20	0.402	811
12:25	0.406	830
12:30	0.413	856
12:35	0.425	870
12:40	0.428	874
12:45	0.429	881
12:50	0.422	875
12:55	0.413	843
13:00	0.418	854
13:05	0.224	460
13:10	0.167	334
13:15	0.373	808

13:20	0.459	950
13:25	0.461	953
13:30	0.452	923
13:35	0.452	943
13:40	0.456	952
13:45	0.381	702
13:50	0.43	892
13:55	0.35	726
14:00	0.262	540
14:05	0.22	453
14:10	0.18	371
14:15	0.174	358
14:20	0.186	383
14:25	0.17	349
14:30	0.48	1000
14:35	0.485	1010
14:40	0.488	1015
14:45	0.487	1013
14:50	0.475	986
14:55	0.451	933
15:00	0.34	704
15:05	0.27	464
15:10	0.234	482
15:15	0.43	900
15:20	0.426	880
15:25	0.42	868
15:30	0.395	816

**ANEXO G: Matriz de consistencia.**

<b>PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>HIPOTESIS</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>POBLACION</b>
<p><b>Problema general</b></p> <p>¿Es posible que mediante un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia se obtenga un cargador solar eficiente y portable para un SPFV?</p> <p><b>Problemas Específicos</b></p> <p>¿En qué cantidad mejora la eficiencia el algoritmo del seguimiento del punto de máxima de potencia a ser implementado en un SPFV?</p> <p>¿En cuánto afecta la variación de la radiación solar a la eficiencia del algoritmo para la transferencia de energía del panel a la batería?</p>	<p><b>Objetivo General</b></p> <p>Desarrollar un algoritmo seguimiento del punto de máxima potencia para mejorar la eficiencia en la carga de un SPFV a ser aplicado en zonas rurales.</p> <p><b>Objetivos específicos</b></p> <p>Evaluar el algoritmo implementado en un SPFV para determinar o identificar la mejora de la eficiencia.</p> <p>Evaluar experimentalmente el efecto de la variación de la radiación solar sobre la eficiencia del algoritmo.</p>	<p>El algoritmo del Seguimiento del Punto de Máxima Potencia implementado en un circuito cargador pico fotovoltaico, permite una mejora de la eficiencia del 5% con respecto a los existentes en el mercado.</p>	<p>Para el desarrollo de la tesis, aplicaremos los niveles descriptivo y experimental.</p> <p><b>Nivel descriptivo:</b> mediante el cual identificamos las características más importantes de los elementos del SPFV y los algoritmos MPPT que serán materia de nuestro análisis.</p> <p><b>Nivel experimental:</b> mediante la manipulación de la variable dependiente se identifica los valores de máxima transferencia del SPFV.</p>	<p><b>Población:</b> La población de nuestro estudio de investigación estará compuesta por los diferentes puntos de operación de las celdas fotovoltaicas que se presentan debido a la Variación de radiación durante el día.</p> <p><b>Muestra:</b> Son los valores de los puntos que se aproximan al punto de máxima potencia de la celda fotovoltaica.</p>