



ENE 2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**UNIDAD INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**“CONTROLADOR DE SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA  
POTENCIA EN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO CON LOGICA  
FUZZY”**

**AUTOR: M.Sc.ING. JACOB ASTOCONDOR VILLAR**

**PERIODO DE EJECUCIÓN: 01 de JULIO del 2016 al 30 de SETIEMBRE del 2017**

**Resolución de aprobación: R.R. N°594-2016R**

**Callao, noviembre del 2017**  
**PERÚ**



<b>INDICE</b>	<b>pag.</b>
<b>I. ÍNDICE</b>	
1.1 TABLAS DE CONTENIDO	3
<b>II. RESUMEN</b>	4
<b>III. INTRODUCCIÓN</b>	6
<b>IV. ANTECEDENTES</b>	7
4.1. MARCO HISTORICO Y FILOSOFICO	7
4.2.OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION	8
<b>4.2.1 GENERALES</b>	8
<b>3.3.2 ESPECIFICOS</b>	8
4.3. ALCANCES DE LA INVESTIGACION	9
4.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
4.5. HIPOTESIS	13
4.6. OPERACIONALIZACION DE LAS VARIABLES	14
<b>V. MARCO TEÓRICO</b>	15
5.1 CONCEPTOS BÁSICOS EN EL CONTROLADOR DE CARGA MPPT	15
5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL MPPT FOTOVOLTAICO	18
5.3 MODELO MATEMÁTICO DEL PANEL FV	19
5.4 SIMULACIÓN DEL PANEL FOTOVOLTAICO	22
5.5 CONTROLADOR PARA EL SISTEMA	28
5.5.1. CONVERTIDOR BOOST	30
5.5.2. MODELO MATEMÁTICO DEL CONVERTIDOR BOOST.	32
5.6 CONTROLADOR FUZZY PARA MPPT	35
5.6.1. UNIVERSO DE DISCURSO	38
5.6.2. FUNCIONES DE MEMBRESÍA Y VARIABLES LINGÜÍSTICAS	39
5.6.3. REGLAS DIFUSAS	40
5.6.4. PROCESO DE FUZIFICACIÓN	40
<b>VI. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	43
6.1. HARDWARE GENERAL DEL SISTEMA.	44
6.2. MICROCONTROLADOR	44
6.3. SENSORES	45
6.3.1. SENSORES DE VOLTAJE	45

6.3.2. sensores de corriente.	47
6.3.3. sensores de temperatura	49
6.4. pantalla LCD-I2C 20x4	50
6.5. hardware del convertidor DC-DC buck	50
6.5.1. selección del inductor	52
6.5.1. selección del capacitor	53
6.6. simulación del convertidor DC-DC	54
6.7. simulación del controlador difuso	55
6.8. simulación del sistema en lazo cerrado	55
<b>VII. RESULTADOS</b>	57
7.1 resultados para condiciones de prueba estándar	57
7.2 resultados para cambios en la irradiación	58
7.3 resultados para cambios en la temperatura	59
7.4 resultados para cambios en la temperatura y la irradiación	59
<b>VIII. DISCUSIÓN</b>	61
<b>IX. REFERENCIALES</b>	63
<b>X APÉNDICE</b>	65
<b>Apéndice 1: algoritmo de control MPPT usado en el ATmega328P</b>	66
<b>XI. ANEXOS</b>	76
ANEXO 1: matriz de consistencia	77
ANEXO 2: resolución decanal	78



## TABLAS DE CONTENIDO

Figura1	CORRIENTE Y VOLTAJE DEL PANEL SOLAR	15
Figura 2	VARIACION DE CORRIENTE Y VOLTAJE DEL PANEL SOLAR	16
Figura 3	CURVA EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA: MPPT	16
Figura 4	DIAGRAMA GENERAL DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CON MPPT	19
Figura 5	MODELO DE LAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	19
Figura 6	CIRCUITO SIMPLIFICADO DE LA FOTOCELDA IDEAL	21
Figura 7	CARACTERÍSTICAS I-V y P-V. EN DIFERENTES TEMPERATURAS	25
Figura 8	CURVA DE I-V Y P-V IRRADIANCIA VARIABLE	26
Figura 9	SISTEMA DE CONVERTIDOR Y CONTROLADOR	29
Figura 10	SEÑAL DE CONTROL DE CONMUTACIÓN DEL CONVERTIDOR	30
Figura 11	CONVERTIDOR BOOST	31
Figura 12	CONVERTIDOR BOOST CON MOSFET EN CONDUCCIÓN	31
Figura 13	CONVERTIDOR BOOST CON MOSFET EN CORTE	32
Figura 14	SIMULACIÓN DE CONVERTIDOR DC/DC	35
Figura 15	SISTEMA CON CONTROL FUZZY	36
Figura 16	DIAGRAMA CONTROLADOR FUZZY	36
Figura 17	DIAGRAMA DE ALGORITMO CONTROLADOR FUZZY	36
Figura 18	DERIVADA DP/DV PARA DISTINTAS IRRADIANCIA	37
Figura 19	FUNCIONES Y VARIABLES DEL CONTROLADOR	39
Figura 20	DIAGRAMA DE FLUJO DE MPPT	42
Figura 21	SUPERFICIE DE LAS REGLAS CON MATLAB	42
Figura 22	DIAGRAMA DEL SISTEMA IMPLEMENTADO	44
Figura 23	ESQUEMA DE CONEXIONES DE SENSORES Y PANTALLA	51
Figura 24	ESQUEMA CONVERTIDOR DC-DC BUCK	52
Figura 25	SISTEMA DE CONTROL A LAZO ABIERTO	54
Figura 26	SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO	56
Figura27	RESULTADOS A LAZO CERRADO PARA 'T' Y 'E' CONSTANTES	57
Figura28	RESULTADOS A LAZO CERRADO PARA IRRADIACIÓN VARIABLE	58
Figura29	RESULTADOS A LAZO CERRADO PARA TEMPERATURA VARIABLE	59
Tabla 1	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	14
Tabla 2	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LA FOTOCELDA SOLARTEC	22
Tabla 3	RESULTADOS OBTENIDOS PARA TEMPERATURA VARIABLE	40

## II RESUMEN

### 2.1 Resumen

Este proyecto de investigación ofrece una visión completa del punto de máxima potencia sistema de seguimiento (MPPT) en la aplicación de energía solar fotovoltaica (PV). Desde el PV solar el panel tiene una relación tensión / corriente no lineal, que se ve muy afectada por el sol irradiación y temperatura, por lo tanto, es necesario identificar un método eficaz extrayendo la máxima cantidad de energía de la célula / módulos PV.

El sistema MPPT está constituido del convertidor electrónico de potencia y un microcontrolador (Atmega AVR) que se utiliza para la implementación del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia.

En este trabajo se realiza el diseño y modelado de un sistema que permite hacer un control del punto de máxima potencia de un panel solar fotovoltaico utilizando lógica difusa.

Se realiza la selección y acondicionamiento de un modelo matemático para el panel solar y luego se simula utilizando Matlab.

Posteriormente se hace el diseño y modelado de un convertidor DC-DC en la topología tipo Buck para operar en el modo de operación continuo.

El controlador difuso es diseñado y validado utilizando el toolbox de lógica difusa de Matlab.

Como resultado se pudo comprobar la efectividad de la lógica difusa para trabajar con sistemas no lineales, lográndose el control del punto de máxima potencia para diferentes condiciones de operación con excelentes tiempos de convergencia.

**Palabras claves:** Lógica difusa, Panel solar, Convertidor DC-DC, Punto de máxima potencia.

## II.SUMMARY

This research project offers a complete view of the point of maximum power tracking system (MPPT) in the application of photovoltaic solar energy (PV). From the solar PV the panel has a non-linear voltage / current ratio, which is very affected by the sun irradiation and temperature, therefore, it is necessary to identify an effective method extracting the maximum amount of energy from the cell / PV modules.

The MPPT system consists of the electronic power converter and a microcontroller (Atmega AVR) that is used for the implementation of the maximum power point tracking algorithm.

In this work, the design and modeling of a system that allows control of the maximum power point of a photovoltaic solar panel using fuzzy logic is performed.

The selection and conditioning of a mathematical model for the solar panel is performed and then simulated using Matlab.

Subsequently, the design and modeling of a DC-DC converter in the Buck type topology is made to operate in the continuous operation mode.

The fuzzy controller is designed and validated using Matlab's fuzzy logic toolbox.

As a result, the effectiveness of the fuzzy logic to work with non-linear systems could be verified, achieving control of the maximum power point for different operating conditions with excellent convergence times.

**Keywords:** Diffuse logic, Solar panel, DC-DC converter, Maximum power point.

### III. INTRODUCCIÓN

La presente investigación está relacionado con el estudio del **CONTROLADOR DE SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MAXIMA POTENCIA EN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTONOMO CON LOGICA DIFUZA**, útil para aprovechar la energía es un método relativamente nuevo que se basa mediante el seguimiento axial y el seguimiento del punto de máxima potencia MPPT.

La ventaja del control de lógica difusa es que no necesita estrictamente ningún modelo matemático de la planta. Se basa en la experiencia del operador de la planta. Por lo tanto, muchos sistemas complejos se pueden controlar sin conocer el modelo matemático exacto de la planta. Además, la lógica difusa simplifica el tratamiento de las no linealidades en los sistemas.

El seguimiento máximo del punto de potencia (MPPT) es básicamente una técnica para rastrear el punto de máxima potencia en constante cambio de un panel solar. Consiste en dos partes principales, un procesador para rastrear el MPP y un convertidor de potencia para convertir el voltaje generado de la fuente a un deseado para la carga

Se ha implementado un algoritmo de control fuzzy para controlar el tiempo de encendido / apagado del MOSFET interruptor del convertidor Buck DC-DC.

Hasta ahora, se han implementado seguidores solares basados en el control de lógica difusa con diferentes configuraciones en los microcontroladores FPGA, PIC, pero la lógica de control en esta investigación se ha implementado en el microcontrolador Atmel AVR .

Este controlador consiste en un microcontrolador Atmega 328P que cumple con las características técnicas para implementar la lógica de control.

Este sistema es de bajo costo para adecuado para zonas rurales o remotas

## **IV. ANTECEDENTES**

### **4.1 Marco histórico y Filosófico**

#### **4.1.1 Historia**

El presente estudio relacionado con el CONTROLADOR DE SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MAXIMA POTENCIA EN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTONOMO CON LOGICA DIFUZA; tiene como componente las celdas fotovoltaicas que tuvieron su nacimiento gracias a un físico francés llamado Edmundo Becquerel, por el año 1839, fue éste quien notó que ciertos materiales producían pequeñas cantidades de corriente eléctrica cuando los mismos eran expuestos hacia la luz y es así como el principio del aprovechamiento de la energía solar surgiría.

Luego, Albert Einstein, en el año 1904 describió lo que era el efecto fotoeléctrico, en el cual se basa hoy la tecnología fotovoltaica, por dicho trabajo consiguió el premio Nobel de física. Con toda esta información, conocimientos y avances, los Laboratorios Bell crearon el primer módulo fotovoltaico en 1954 apareciendo allí las primeras celdas fotovoltaicas.

Como su fabricación era bastante costosa y en aquella época el precio resultaba algo injustificado, la producción de celdas fotovoltaicas "ELEANOR" decayó hasta 1960. Fue en este año en donde la industria espacial comenzó a hacer uso de esta tecnología para conseguir energía eléctrica y distribuir las luego a bordo de sus naves. Por ello podemos decir que fue a través de los programas espaciales que los científicos y técnicos pusieron énfasis en la energía solar y sus beneficios. Cuando su uso alcanzó un alto grado de confiabilidad, se pudo lograr una reducción en los costos. Esta confiabilidad o rendimiento va aumentando año a año mediante estudios que se van realizando, mejorando así sus prestaciones.

#### **4.1.2 Orígenes**

La búsqueda del punto óptimo de operación de un arreglo de paneles solares es una parte esencial de un sistema fotovoltaico. Esta búsqueda

depende de diversos factores entre ellos: las características de las baterías utilizadas, los paneles solares y la radiación solar instantánea.

Es por ello que es necesario el correcto control del sistema y la configuración necesaria de los parámetros que lo conforman para así aprovechar al máximo la energía disponible.

Por lo tanto, se llama MPPT (que por sus siglas en inglés significa "Maximum Power Point Tracker") al método utilizado para la búsqueda del punto de máxima potencia de un arreglo fotovoltaico.

Los aparatos que realizan esta búsqueda también son llamados MPPT y su función básica es maximizar la potencia entregada por los paneles solares. En un trabajo presentado por Trishan Efram y Patrick L. Chapman (2005) se indica el considerable crecimiento de la cantidad de "papers" escritos en las últimas décadas sobre métodos para la búsqueda del punto máximo de potencia.

## **4.2 Objetivos de la investigación**

### **4.2.1 Objetivo general**

Controlar la potencia de salida de un panel FV a través de un controlador difuso y de un convertidor DC-DC, para así poder entregar la máxima potencia posible a una carga bajo condiciones de irradiación y temperatura variable

### **4.2.2 Objetivos específicos**

- En este proyecto, se presenta un método de control que utiliza la lógica Fuzzy, aplicada a un convertidor DC-DC para realizar una MPPT en sistemas de CC.
- Verificar la eficiencia del método de control por lógica difusa a través de análisis de simulación.
- Implementar un algoritmo de seguimiento de punto de potencia máximo rápido y bastante preciso, varios de los cuales será discutido.

### 4.3 ALCANCES DE LA INVESTIGACION

Con el costo de las células solares disminuyendo, el cambio hacia el uso de energía solar es cada vez más viable.

Esto es particularmente cierto en zonas de nuestro país donde no hay energía eléctrica pero hay abundante energía solar disponible durante todo el año. Además, a medida que aumenta la popularidad de la energía solar, la necesidad de más eficiente es incumbente.

Las fuentes fotovoltaicas se utilizan ampliamente en muchas operaciones tales como baterías carga, bombeo de agua, alimentación de equipos en barcos marinos, vehículos eléctricos y recreativos, fuente de alimentación doméstica, sistema híbrido que incorpora energía solar y otras fuentes de energía renovables, sistemas de calefacción para piscinas, en satélites espaciales y de potencia, aplicaciones militares, energía solar plantas y algunas aplicaciones donde se necesita una fuente de energía no lineal.

Los sistemas fotovoltaicos se pueden dividir en dos categorías:

- Sistemas autónomos
- Sistemas de conexión a red.

En sistemas independientes o autónomos, el sistema fotovoltaico alimenta las cargas directamente sin conectarse al sistema es rentable debido a la modesta configuración del sistema y el esquema de control.

Este tipo de fuente de energía, debido a la proximidad entre la generación y el consumo, es una alternativa atractiva para las estaciones de **telecomunicaciones y los sistemas rurales** que están fuera de la red. Almacenar el exceso de energía generada y suministrar la carga en caso de mínima o ninguna producción de energía solar en la noche.

#### 4.3.1 Codificación de la investigación según UNESCO

Según la Nomenclatura internacional de UNESCO para los campos de Ciencia y Tecnología, el presente trabajo se sitúa en el 3322.05 según detalle: fuentes no convencionales de energía (también 2106.01 y 2506.08)

#### **4.3.2 La importancia y la justificación de la investigación**

##### **Aporte Científico y/o Tecnológico de la Investigación**

Basados en la problemática expuesta, el aporte científico y/o tecnológico el enfoque del presente trabajo se estableció sobre los siguientes puntos:

##### **Dimensionamiento del sistema.**

Como se indicó anteriormente, el objetivo del proyecto es diseñar y construir un controlador de carga MPPT para máxima potencia del panel solar

El proyecto consta de tres estructuras principales que son etapa de entrada, etapa del controlador y etapa de salida.

##### **El primer pasó: Selección del panel solar y baterías**

Consiste en el desarrollo del Rastreador de Punto de operación de Máximo energía es decidir el tipo de panel solar y los rangos de baterías a los que estaría conectado, basado en la corriente de carga máxima deseada.

##### **El segundo pasó: Estudio y selección de la topología del convertidor**

Selección de La topología del convertidor DC / DC para el MPPT será seleccionada y diseñada en base a la máxima la tensión del panel solar, el voltaje de la batería y la frecuencia de conmutación por el microcontrolador menos consumidores de energía pero eficientes.

##### **Tercer paso: Estudio de la etapa de control.**

El diseño del controlador se basa en el algoritmo de control por software por lógica difusa se realizará mediante un algoritmo de control de MPPT y carga para asegurar que el panel solar está funcionando en el punto de energía más alto mientras que carga la batería eficientemente.



La parte del control de carga del algoritmo implementará un proceso de carga de 3 etapas para la batería de plomo-ácido basado en el voltaje de la batería y el voltaje de salida del panel solar.

El algoritmo de control debe ser capaz de mostrar los parámetros vitales rápida y fácilmente a través de la pantalla LCD y los LED incorporados al sistema para que el usuario pueda interpretar el estado del sistema.

#### **Cuarto paso**

Por último, se realizó un estudio de hecho en los componentes y el diseño en su conjunto para evaluar la viabilidad de hacer el MPPT controlador de bajo costo para asegurar que podría ser fácilmente hecho para los mercados de bajo recursos económicos.

#### **4.3.3 Justificación.**

.De las diversas fuentes renovables, la energía solar ha demostrado buena opción para la generación de energía eléctrica, la energía solar es convertida directamente en energía eléctrica por módulos fotovoltaicos.

A pesar de que la energía solar es una buena fuente de energía, existe la necesidad de mejorar los métodos para aprovechar esta energía. Esto puede lograrse mediante un seguimiento axial y una Seguimiento del punto de potencia.

**La ventaja del control de la lógica difusa** es que no estrictamente necesita cualquier modelo matemático de la planta. Está basado en la experiencia del operador de la planta, y es muy fácil de implementar. Por lo tanto, muchos sistemas complejos pueden ser controlados sin conocer el modelo matemático exacto de la planta. Además, la lógica difusa simplifica el tratamiento de las no linealidades en los sistemas.

En la FIEE con la implementación de la curricula de pre grado se ha incorporado la asignatura de energía renovable y también en la unidad de

posgrado se tiene asignaturas de energía renovables este trabajo será parte de desarrollo de los temas de dichas asignaturas.

#### **4.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Actualmente, se ha venido viendo un notable interés de los gobiernos y la comunidad mundial en general por encontrar fuentes alternativas de energía que permitan reducir el impacto ambiental negativo normalmente generado por las fuentes convencionalmente utilizadas.

En este contexto los sistemas fotovoltaicos (FV) se perfilan como una solución bastante atractiva con la cual se vería disminuido en gran medida el actual deterioro ambiental.

Desafortunadamente la eficiencia de conversión de energía de los módulos FV tiende a ser baja y por lo tanto no se aprovecha al máximo la energía solar incidente. Lo anterior se debe a que los paneles FV tienen un punto de operación en el cual se le entrega la máxima potencia de salida a una carga y este punto de operación es variante en el tiempo y depende del grado de insolación y de la temperatura.

El control del punto de operación de los paneles FV es realizado por controladores de seguimiento del punto de máxima potencia también conocidos como controladores MPPT por sus siglas en inglés (Maximum Power Point Tracking).

Para el control del MPP se han trabajado diferentes algoritmos como los son el de control de voltaje de circuito abierto fraccional, el de la conductancia incremental y el de perturbación y observación (P&O).

Este último ha sido el método más utilizado de los algoritmos tradicionales aunque presenta problemas de oscilación y de eficiencia.

En ese sentido, actualmente se están utilizando métodos que han resultado ser efectivos, como lo son el control difuso, redes neuronales, maximización

de la corriente y voltaje de la carga, control de la corriente de cortocircuito fraccional, entre otros.

En resumen los métodos tradicionales de control del voltaje del arreglo fotovoltaico (FV) se basan en la aproximación de su modelo por Linealización, limitando su validez a vecindades alrededor del punto de máxima potencia; ésta característica, pone en riesgo el desempeño adecuado del sistema en todo su rango de operación, por lo que es necesario diseñar técnicas de control que garantice el mejor y más óptimo funcionamiento del panel FV.

En cuanto al enunciado del problema

¿El control del punto de operación de los paneles FV con seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) con controlador lógica difusa soluciona el problema de oscilaciones y eficiencia del sistema fotovoltaico?

#### **4.5. HIPÓTESIS**

**4.5.1** Empleando conocimientos de ingeniería, así como material y equipos disponibles en el mercado; es posible el diseño y la construcción de un sistema de control MPPT fotovoltaico utilizando lógica difusa , garantizando la máxima potencia nominal que se extrae del panel solar y se entrega a la batería mientras se carga en un modo normal para aumentar su vida útil y para fines de eficiencia bajo diferentes condiciones atmosféricas ; el cual cumpla con la premisa de ser económico, además de ser confiable y competitivo.

**4.5.2** La Variable independiente: energía solar renovable y sistema fotovoltaico

**4.5.3** La Variable dependiente: energía eléctrica

**Tabla N°4.1: Operacionalización de las variables**

<b>VARIABLES</b>	<b>INDICADORES</b>
X: ENERGIA RENOVABLE Y SISTEMA FOTOVOLTAICO	X1:FOTOCELDA X2:CONVERTIDOR DC/DC X3: CONTROLADOR MPPT
Y: ENERGIA ELECTRICA	Y1:NIVEL DE VOLTAJE Y2: NIVEL DE CORRIENTE Y3: POTENCIA ELECTRICA

Fuente: Autor

## V. MARCO TEORICO

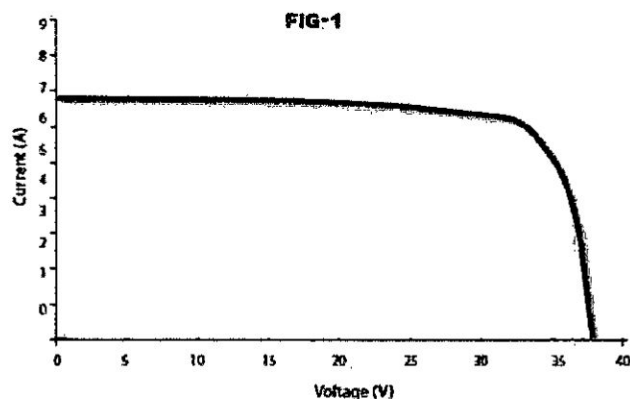
### 5.1 Conceptos básicos en el controlador de carga MPPT

Un panel solar genera diversos voltajes dependiendo de los diferentes parámetros como: la cantidad de sol luz; la temperatura del panel solar de carga conectada

Durante todo el día, como los cambios de tiempo, el voltaje producido por el panel solar va estar variando constantemente. Ahora, para cualquier voltaje dado, el panel solar producirá también una corriente (amperios).

La cantidad de amperios que son producidos para cualquier voltaje dado es determinada por una gráfica llamada curva IV, que puede encontrarse en la hoja de especificaciones de cualquier panel solar y por lo general se parece a la figura 5.1 se muestra .

Figura N°5.1  
Grafico corriente –voltaje del panel solar



Fuente: autor

En la figura 5.2, la línea azul muestra un voltaje de panel solar de 30V correspondiente a una corriente de aproximadamente 6.2A.

Esto sucede *porque los paneles solares se comportan como fuentes de corriente*, por lo que la corriente está determinada por la luz del sol disponible.

Ahora la potencia  $(P) = V \times I = 12 \times 5.55 = 66.6W$ . Así que el panel Solar se comporta ahora como un panel de 66 vatios.

Esto equivale a una pérdida de  $100W - 66.6W = 34W$  (33,4%).

Esta es la razón para utilizar un controlador de carga MPPT en vez de un controlador de carga estándar como PWM.

El controlador MPPT Controla la entrada y salida de un convertidor DC -DC, donde el ciclo de trabajo es variado para realizar un seguimiento del punto de máxima potencia.

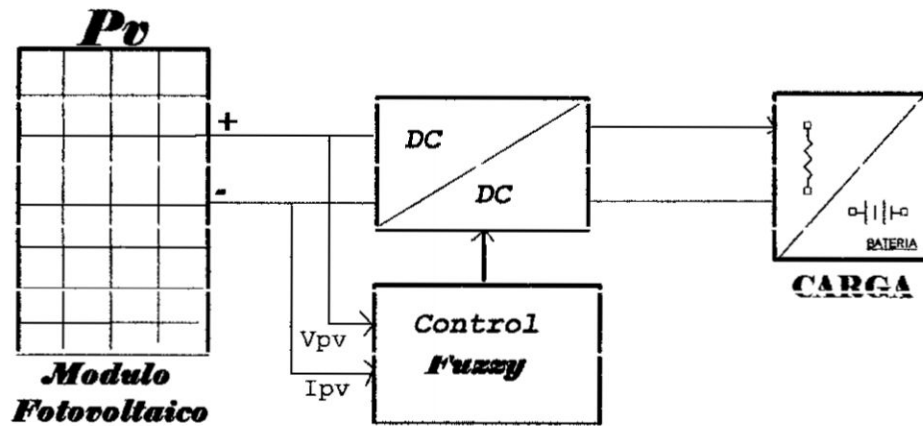
## **5.2 Descripción del sistema de control MPPT fotovoltaico**

El centro de nuestro estudio se basa en un SFV autónomo, este sistema contiene diferentes componentes, por lo general se lo puede dividir en tres partes esenciales, como se muestra en la Figura 5.4:

- a) **Módulo fotovoltaico (PV):** Es el encargado de transformar la radiación solar en energía eléctrica.
- b) **Técnica de control y acople:** Ésta técnica asegura que el SFV opere en condiciones óptimas, se utiliza la técnica de control con MPPT, para seguir la máxima potencia del PV. Esta técnica genera una señal de control mediante la ley de control fuzzy, que realiza la conmutación de un semiconductor en un convertidor DC/DC, permitiendo de esta manera acoplar el módulo fotovoltaico con la carga.
- c) **Carga o batería:** Es el elemento energizado por el SFV.

El análisis matemático, simulación y validación de cada uno de los bloques será detallado en las siguientes secciones.

Figura 5.4  
 Diagrama general de un Sistema fotovoltaico con MPPT

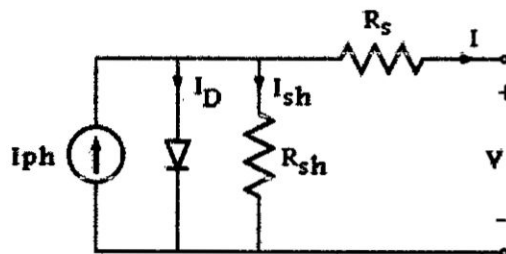


Fuente: Autor

### 5.3. MODELO MATEMÁTICO DEL PANEL FV

El bloque de construcción de las matrices fotovoltaicas es la célula solar, que es básicamente una unión de semiconductores p-n que convierte directamente la energía de la luz en electricidad y el módulo fotovoltaico puede ser modelado como se muestra por la esquemático de la Fig. 5.5

Figura 5-5:  
 Modelo de lá células fotovoltaicas



Fuente: Autor

**Una celda fotovoltaica** es básicamente un dispositivo electrónico que permite transformar la energía luminosa en energía eléctrica.

Las celdas fotovoltaicas presentan una característica no lineal en la curva corriente en función de la tensión ( $i$  (v)) y de potencia en función de la tensión ( $p$  (v)). Además pueden variar con la radiación solar y con la temperatura.

**Modelo:**

El circuito equivalente está compuesto por una fuente de corriente, un diodo en paralelo, una resistencia en paralelo (representando la corriente de pérdida) y una resistencia en serie (resistencia interna del dispositivo) Como se puede apreciar en la siguiente figura 5.2

La ecuación de la corriente en función de la tensión está dada por:

$$I = I_{PH} - I_S \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_S)}{KT_c A} \right) - 1 \right] - (V + IR_S) / R_{SH} \quad (5.1)$$

Donde:

- $I_{PH}$  es la corriente generada por la luz incidente en la celda fotovolta
- $I_S$  es la corriente de saturación.
- $q$  es la carga del electrón,  $q=1,6e-19$  Coulomb.
- $k$  es la constante de Boltzmann.  $k=1,38e-23 \frac{J}{K}$
- $T_C$  es la temperatura de trabajo de la celda.
- $A$  es un factor que depende de la tecnología de la celda fotovoltaica.  
Para una celda de Silicio monocristalino el valor es 1,2; para una celda de Silicio policristalino =1,3.
- $R_{SH}$  Es la resistencia Shunt.
- $R_S$  Es la resistencia en serie.

La corriente producida por la luz incidente en la celda es expresada como:

$$I_{PH} = [I_{SC} + K_I (T_C - T_{ref})] \lambda \quad (5.2)$$



Donde:

- $I_{SC}$  es la corriente de corto circuito a 25 grados centigrados y a una radiación de  $1000 \frac{W}{m^2}$
- $K_T$  es un coeficiente de temperatura de la celda fotovoltaica.
- $T_C$  es la temperatura de trabajo de la celda fotovoltaica.
- $T_{ref}$  es la referencia de temperatura de la celda.
- $\lambda$  es la radiación en  $\frac{KW}{m^2}$

La corriente de saturación está dada por:

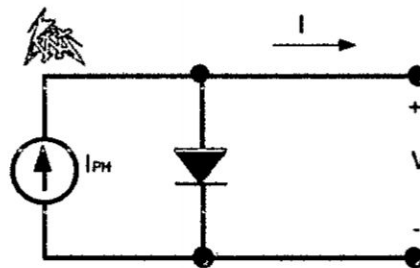
$$I_S = I_{RS} \left( \frac{T_C}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ -\frac{qE_G \left( \frac{T_C}{T_{ref}} - 1 \right)}{kT_C} \right] \quad (5.3)$$

Donde:

- $I_{RS}$  es la corriente de saturación inversa a una determinada radiación y a una dada temperatura.
- $E_G$  es la energía de la banda prohibida.

Despreciando  $R_{SH}$ , o sea:  $R_{SH} \rightarrow inf$ , el modelo queda como se ve en la

Figura 5.6  
Circuito simplificado de la fotoceida ideal



Fuente: propia

Y la ecuación de la corriente queda como:

$$I = I_{PH} - I_S \left[ \exp \left( \frac{qV}{kT_C A} \right) - 1 \right] \quad (5.4)$$

En el caso de tener un arreglo fotovoltaico entonces la ecuación queda como:

$$I = N_p I_{PH} - N_p I_S \left[ e^{\left( \frac{qV}{N_s K T C A} \right)} - 1 \right] \quad (5.5)$$

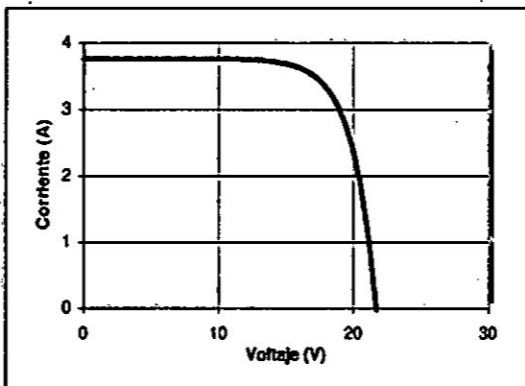
Donde:

- $N_p$  es la cantidad de celdas en paralelo.
- $N_s$  es la cantidad de celdas fotovoltaicas en serie.

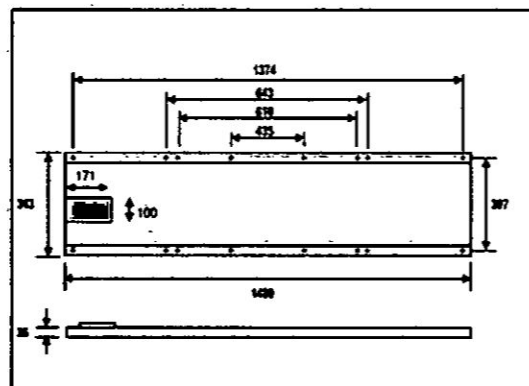
Se realizó pruebas de simulación considerando la fotocelda solar Solartec:

Tabla N°.5.1  
Características eléctricas de la fotocelda Solartec

■ Características Eléctricas		■ Características Mecánicas	
Potencia Nominal (PN)	60 Wp	Largo	1.480 mm
Tensión a PN	17,4 V	Ancho	343 mm
Corriente a PN	3,45 A	Espesor	36 mm
Tensión de circuito abierto	21,7 V	Peso	7,4 Kg
Corriente de corto circuito	3,76 A		



Los valores y la curva están dados para las condiciones de insolución de 1 KW/m<sup>2</sup>, masa atmosférica 1.5 y temperatura de celda de 25°C.  
Potencia Mínima Garantizada = Potencia Nominal - 10 %



Todas las distancias están expresadas en mm.

Fuente: Empres solar Solartec

#### 5.4 Simulación del panel fotovoltaico

Para la simulación en Simulink se utilizó un panel FV de 60W monocristalino, cuyas características eléctricas con una tolerancia de  $\pm 3\%$  para  $E_i=1000$  W/m<sup>2</sup> y  $T=25^\circ\text{C}$  se muestran en la tabla 5.1.

Los valores de los parámetros  $T_{Ci}$ ,  $T_{Cv}$  fueron medidos directamente, puesto que no estaban disponibles en la placa de datos incorporada en el panel FV elegido como muestra.

#### **Código N° 1 función implementada en Scilab:**

Para construir una función en Scilab simplemente se escribió un archivo \*.sci que contiene la función.

Los parámetros para la función son tensión, temperatura, radiación y la tensión a circuito abierto en el arreglo fotovoltaico.

El modelo implementado en la función es el más simplificado que desprecia las resistencias  $R_{SH}$  y  $R_S$

Para ejecutar la función solo es necesario cargar la función y ejecutar en Scilab

#### **Creation de la function denominado ipanel**

```
function ipanel=ipanel(V,T,G,Voc)

//Definición de datos del panel
isc=3.76; //A
Ns=26;
Np=1;
A=1.3;
Ki=3e-3;
Eg=1.15;
k=1.38e-23;
q=1.6e-19;
Tref=273+25;
Tc=273+T;
Irs=isc/(exp(q*Voc/(Ns*k*A*Tc))-1);
Is=Irs*(Tc/Tref)^3*exp(q*Eg*(1/Tref-1/Tc)/(k*A));
Iph1=(isc+Ki*(Tc-Tref))*G;
iVTG1=Np*Iph1-Np*Is*(exp(q*V/(Ns*k*Tc*A))-1);
dimv=size(iVTG1); //Dimensión del vector generado
//pone un cero si la función evaluada es menor a cero
if iVTG1<0 then
ipanel=0;
else
ipanel=iVTG1;
end
endfunction
```

## Codigo 02 Creación del codigo para obtener las graficas

```
V=[0:.1:30];
T1=25;
T2=40;
T3=60;
v1=size(V);
for j = 1:v1(1,2)
i1(j)=ipanel(V(j),T1,.75,21.7);
i2(j)=ipanel(V(j),T2,.75,21.7);
i3(j)=ipanel(V(j),T3,.75,21.7);

i4(j)=ipanel(V(j),T1,.5,21.7);
i5(j)=ipanel(V(j),T1,.75,21.7);
i6(j)=ipanel(V(j),T1,1,21.7);
end
subplot(121)
plot(V,i1,V,i2,V,i3);
xlabel('Tensión [V]');
ylabel('Corriente [A]');
title('Curva V(i)');

subplot(122)
plot(V,i1.*V,V,i2.*V,V,i3.*V);

xlabel('Tensión [V]');
ylabel('Potencia [W]');
title('Curva P(V)');

figure(1)
subplot(121)
plot(V,i4,V,i5,V,i6);
xlabel('tension [V]');
ylabel('Corriente [A]')
title('Curva I(V),variando la Radiacion G')
subplot(122)
plot(V,i4.*V,V,i5.*V,V,i6.*V);
xlabel('tension [V]');
ylabel('Potencia[W]')
title('Potencia del Panel , variando la Radiacion G')
```

Las características de salida típicas del módulo fotovoltaico se muestran en la Figura 5.7.

Los paneles solares tienen una característica común en cuanto a su relación Voltaje-Corriente.

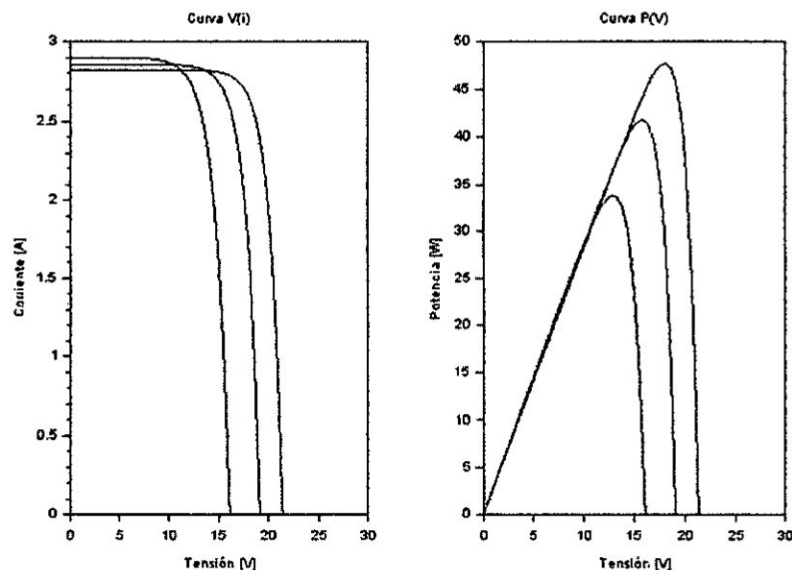
La figura 5.8 muestra la Curva de voltaje-corriente de las células solares. Como se puede ver, su funcionamiento no es lineal y hay una compensación entre voltaje y corriente.

Cuando no hay carga conectada, la tensión a través de los terminales se denomina tensión de circuito abierto (**Voc**).

De forma similar, cuando la carga tiene una impedancia cero (terminales cortocircuitados), la corriente que fluye a través de los terminales del panel se denomina corriente de cortocircuito ( $I_{SC}$ ).

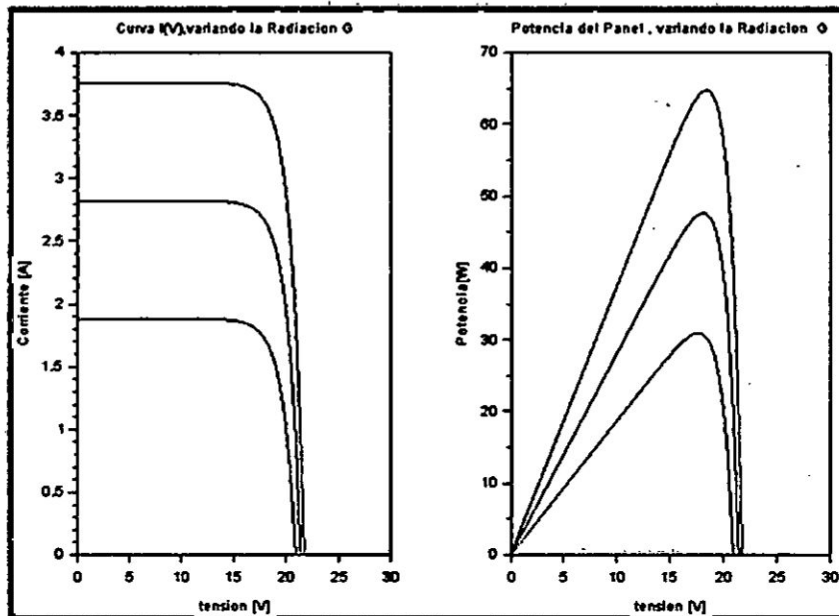
Los paneles solares van desde mini células solares que pueden producir menos de 1W de potencia a paneles solares industriales que pueden producir varios miles de vatios. Todo depende de las aplicaciones a las que se destina.

Figura 5.7  
Características I-V y P-V. En diferentes temperaturas.



Fuente: autor

Figura 5.8  
Curva de I-V y P-V. irradiancia variable



Fuente: autor

Por lo general, la mayoría de los paneles solares, las curvas I-V y P-V se prueban en condiciones de prueba estándar (STC) de temperatura de 25°C y de insolación solar (irradiancia) de 1000W / m<sup>2</sup>.

Sin embargo, las curvas I-V y P-V de la Figura 5.7 cambian debido a que estos dos parámetros varían, como se ve también en la Ecuación 5.2 donde el punto de potencia máxima varía con  $I_{ph}$  dependiendo de la irradiancia y  $V_t$  dependiente de la temperatura.

Para el caso de la temperatura, a medida que la temperatura de los semiconductores sube, aumenta la conductividad, la mayor conductividad reduce el campo eléctrico en la unión p-n del silicio, que a su vez reduce el voltaje a través de una célula solar. Un voltaje más pequeño de la célula conduce a una salida de energía más pequeña, disminuyendo intuitivamente eficacia.

Los paneles solares tendrán generalmente un coeficiente de temperatura ( $K_i$ ), que es generalmente la velocidad de la reducción de potencia para cada grado la temperatura de funcionamiento normal arriba de 25°C.

La Figura 4-6 muestra los efectos de la temperatura en las curvas I-V en un panel solar. Se observa que cuanto mayor es la temperatura menor es el área bajo la curva y por lo tanto menos potencia y eficiencia. El bombeo de un refrigerante a través de la parte trasera de los paneles es un método activo o la fijación de un disipador de calor o aletas de refrigeración es una manera pasiva de disipar el calor de los paneles.

La Figura 4.6 muestra la curva P-V resultante para un panel solar comercial típico de 60W. Por lo tanto, los paneles solares son más eficientes en días fríos y soleados en contraste.

**En cuanto a la insolación solar (irradiación);** la radiación solar es la radiación electromagnética (EM) emitida por el sol.

La insolación se expresa por la cantidad de energía recibida en una superficie dada en un tiempo dado. Se expresa en vatios por metro cuadrado ( $W / m^2$ ). La insolación solar se observa como la razón por la cual los paneles solares producen más salida durante el mediodía en comparación con las mañanas y las tardes.

La Figura 5.7 muestra el impacto de la irradiación en la curva I-V de un panel solar. Se observa que una mayor irradiación aumenta el área bajo la curva lo que significa más potencia y eficiencia, lo que puede demostrarse mediante la curva P-V de la Figura 5.7 para un panel solar típico de 60W.

La eficiencia se puede mejorar en los casos de baja irradiación solar utilizando métodos directos como el seguimiento solar y la concentración de luz o métodos indirectos como el que está en el ámbito de este proyecto que es la implementación de un controlador de carga MPPT

Como se ve por lo anterior, la salida de una energía solar es una curva no lineal y se caracteriza por el factor de relleno, que ayuda a determinar la potencia máxima que una célula solar puede proporcionar.

Este factor, abreviado "FF", es la relación de la potencia de salida máxima de la célula solar con el producto de la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito de la célula; eficiencia de la célula solar es la relación de potencia máxima a la potencia incidente.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (5.6)$$

$$eficiencia = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_{in}} \quad (5.7)$$

### 5.5 Controlador para el sistema

El control de la potencia en un PV se realiza mediante convertidores DC-DC, ya que varían su impedancia de entrada, con el fin de controlar la corriente y el voltaje del PV, para seguir el MPP mediante una técnica de control. Desde el punto de vista de su arquitectura interna, este tipo de convertidores se agrupan según su capacidad para realizar transformaciones de tensión, las configuraciones básicas conocidas son:

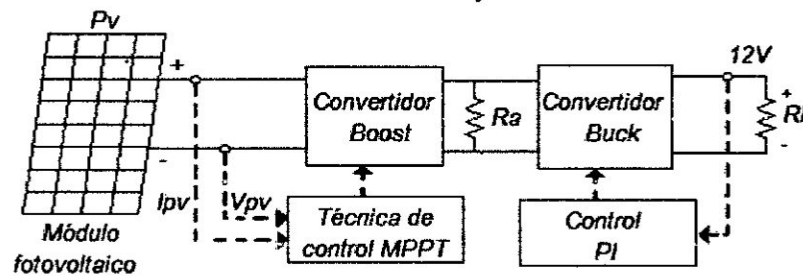
- a) Convertidor Buck o reductor,
- b) Convertidor Boost o elevador,
- c) Convertidor Buck-Boost o reductor elevador.

Existen investigaciones donde se analiza las pérdidas generadas en los convertidores Boost, Buck y Buck-Boost, se comprueba analíticamente que el convertidor elevador Boost presenta una mayor eficiencia. Si bien el convertidor reductor Buck muestra una mayor eficiencia con fuentes ideales, en aplicaciones fotovoltaicas tiene una debilidad, debido a que en esta topología hay una parte del periodo de conmutación en que no fluye corriente desde la fuente, provocando que no haya una continua extracción de potencia. Por el contrario, en el convertidor Boost siempre existe un flujo



de corriente en el inductor, cuando este trabaja en modo de conducción continuo (MCC) . Por esta razón se elige el convertidor Boost para realizar el MPPT.

Figura 5.9  
Sistema con convertidor y controlador.



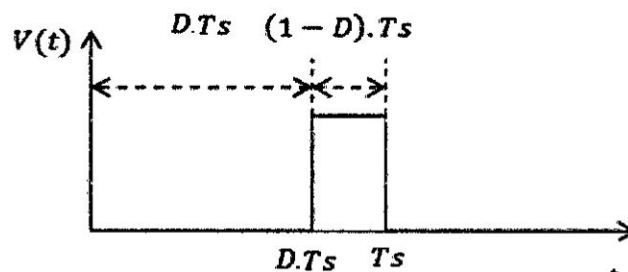
Fuente: autor

Existen diferentes estrategias de conmutación de los interruptores electrónicos de los convertidores. Una de las estrategias más sencillas es conmutar los transistores del convertidor a una frecuencia fija  $F_s$  y modificar la duración de la fase de encendido  $D \cdot T_s$  y apagado  $(1 - D) \cdot T_s$ , donde  $t_{on}$  es el tiempo de encendido,  $T_s$  es el periodo de conmutación igual a  $F_s^{-1}$ , y  $D$  es el ciclo de trabajo donde:  $D \in [0,1]$  y se define como:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (5.8)$$

Gráficamente el ciclo útil se puede ver representado mediante la señal  $(t)$  en la Figura 5.10.

Figura 5.10  
Señal de control de conmutación del convertidor DC-DC

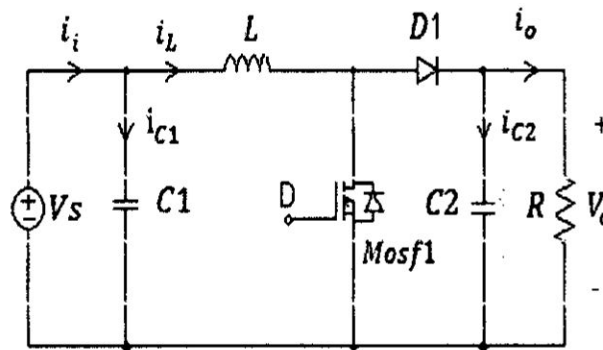


Fuente: autor

### 5.5.1 CONVERTIDOR BOOST

Para realizar el *MPP1*, se determinó el uso del convertidor electrónico Boost, debido a que posee un elemento almacenador de energía (inductor), que permite de manera directa el control de la corriente de entrada al convertidor. En la Figura 5.11, se muestra el modelo de circuito ideal de un convertidor elevador Boost.

**Figura 5.11**  
Convertidor Boost



Fuente: autor

Para realizar el diseño del convertidor Boost se define el voltaje de entrada como el voltaje de máxima potencia y un ciclo de trabajo a un valor de 0.6, de esta manera el voltaje de salida del convertidor Boost se define mediante la ecuación:

$$V_o = \frac{V_{mp}}{1-D} = \frac{19.26}{1-0.6} = 48.15 \quad (5.9)$$

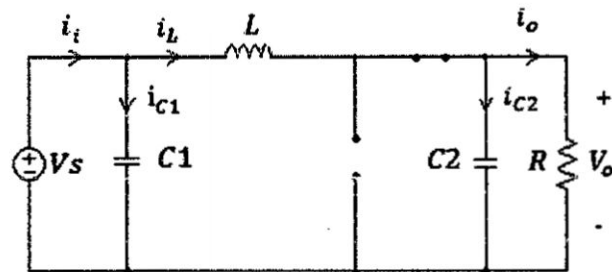
La inductancia mínima se deduce mediante (5), donde  $f$  representa la frecuencia de conmutación del mosfet que corresponde a 20Khz.

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R I}{2f} = 47.28 \mu H \quad (5.10)$$

Añadimos un margen de seguridad del 30% y tomamos el valor nominal más cercano  $L = 61.5 \mu H$ .

El segundo intervalo de tiempo corresponde al transistor en corte o no conducción, el circuito resultante se muestra en la Figura 5.13.

Figura 5.13.  
Convertidor Boost con Mosfet en corte.



Fuente: autor

Para este intervalo de tiempo las ecuaciones de malla y nodos son:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{C1} &= \frac{1}{C_1}(i_i - i_L) \\ \dot{V}_{C2} &= \frac{1}{C_2}i_L - \frac{1}{RC_2}V_{C2} \\ i_L &= \frac{1}{L}(V_{C1} - V_{C2}) \end{aligned} \quad (5.13)$$

### Modelo del convertidor Boost en el espacio de estado

Los elementos semiconductores son modelados como interruptores ideales. La descripción de un sistema dinámico mediante ecuaciones de estado está descrito por.

El sistema puede ser representado

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (5.14)$$

$A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  son matrices de coeficientes constantes, donde  $A$  se denomina la matriz de estado,  $B$  es la matriz de entrada,  $C$  matriz de salida y  $D$  es la matriz de transmisión directa. En MCC el circuito presenta dos estados

dados por el interruptor, uno cuando la variable  $u(t)$  toma el valor 1, intervalo  $DT_s$  (ON), y cuando toma el valor de 0, intervalo  $(1 - D)T_s$  (OFF).

Las ecuaciones en cada uno de los estados serán:

$$\dot{x}(t) = A_{ON}x(t) + B_{on} \quad (5.15)$$

$$\dot{x}(t) = A_{OFF}x(t) + B_{OFF} \quad (5.16)$$

La ecuación que describe un ciclo completo  $T_s$ , estará entonces dada por la concatenación de las ecuaciones (5.15) y (5.16) como se indica en (5.17) y (5.18).

$$\dot{x}(t) = (A_{ON}x(t) + B_{ON})u(t) + (A_{OFF}x(t) + B_{OFF})(1 - u(t)) \quad (5.17)$$

$$\dot{x}(t) = (A_{ON} - A_{OFF})x(t) * u(t) + A_{OFF}x(t) + (B_{ON} - B_{OFF})u(t) + B_{OFF} \quad (5.18)$$

El sistema actúa dependiendo de la variable  $(t)$ , conmutando de un estado ON ( $u(t)= 1$ ) a un estado OFF ( $u(t)= 0$ ). Aunque las ecuaciones (5.15) y (5.16) son lineales, el conjunto presenta un sistema no lineal debido a las conmutaciones. El comportamiento real de los convertidores DC-DC mostrado anteriormente por el modelo conmutado, dificulta el análisis del sistema debido a que las conmutaciones no pueden ser estudiadas en conjunto.

### **Modelo del convertidor elevador Boost.**

El modelo conmutado puede ser aproximado a un modelo promediado, cuando el periodo de conmutación es constante y menor a las constantes de tiempo en cada modo de operación. Esto permite encontrar un modelo continuo que se aproxima al valor de las variables en cada periodo  $T_s$ . En este caso la variable de control  $(t)$  deja de ser una señal binaria y toma directamente el valor del ciclo de trabajo  $D$ , que se mueve en todo el rango de 0 a 1. La ecuación (5.16) puede ser expresada de la siguiente forma: tema debido a que las conmutaciones no pueden ser estudiadas en conjunto.

$$\dot{x}(t) = (A_{ON}x(t) + B_{ON})D + (A_{OFF}x(t) + B_{OFF})(1 - D) \quad (5.19)$$

Redistribuyendo la ecuación anterior tenemos el modelo promediado:

$$\dot{x}(t) = (A_{ON}D + A_{OFF}(1 - D))x(t) + ((B_{ON}D) + B_{OFF}(1 - D)) \quad (5.20)$$

El modelo promediado se obtiene a partir de las ecuaciones (5.12) y (5.13) con la nueva variable de control  $D$ .

$$\begin{aligned} \dot{V}_{C1} &= \frac{i_i - i_L}{C_1} \\ \dot{V}_{C2} &= \frac{i_L - D}{C_2} - \frac{V_{C2}}{RC_2} \\ i_L &= \frac{V_{C1} - V_{C2}(1-D)}{L} \end{aligned} \quad (5.21)$$

A partir de las ecuaciones presentadas en (5.21), se definen las variables de estado y las entradas del sistema, tal como se presenta:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= V_{C1}(t) & u_1(t) &= D \text{ entrada} \\ x_2(t) &= V_{C2}(t) & u_2(t) &= i_1(t) \\ x_3(t) &= i_L(t) \end{aligned}$$

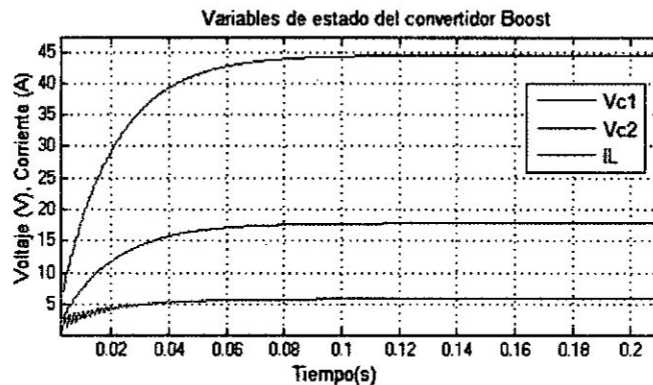
$$f(x) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_2 - x_3}{C_1} \\ \frac{x_3(1 - u_1) - \frac{x_2}{R}}{C_2} \\ \frac{x_1 - x_2(1 - u_1)}{L} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{C_1} \\ 0 & -\frac{1}{RC_2} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 \\ 0 & -\frac{x_3}{C_2} \\ 0 & \frac{x_2}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

En la Figura 5.13, se presenta la simulación de las variables de estado contra el tiempo, los valores de los elementos son:  $C_1 = 4700\mu H$ ,  $C_2 = 220\mu F$ ,  $L = 60\mu H$ ,

$R = 18.19$ ,  $f_s = 20Khz$ ,  $D = 0.6$ ,  $i_i = Imp = 5.68A$ .

Figura 5.14  
Simulación de convertidor DC/DC



Fuente: autor

## 5.6 Controlador Fuzzy para MPPT

El lazo de control para el conversor DC-DC puede establecerse como se observa en la Fig. 5.15 El bloque de sensado se encarga de obtener los valores adaptados de voltaje y corriente a cada instante, para que sean posteriormente procesado mediante un procesador digital.

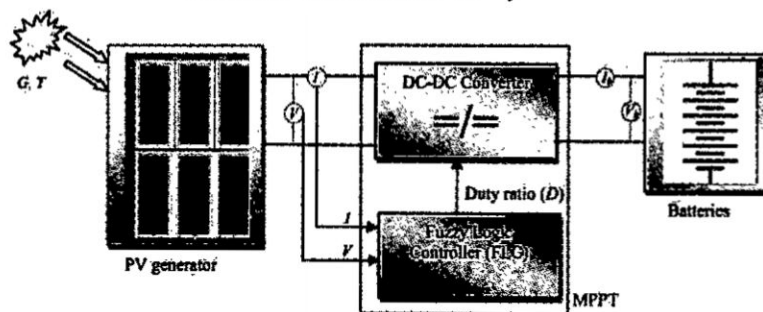
En este bloque de control, el controlador ejecuta los algoritmos MPPT encargados de modificar el valor de ciclo de trabajo del conversor, teniendo en cuenta tanto la potencia instantánea en terminales del panel como el valor de la carga aplicada a la salida del conversor.

El controlador de lógica difusa (FLC) mide el valor de la tensión y corriente en la salida del panel solar y luego calcula el poder de extraer las entradas para el controlador de carga. FLC calcula la potencia de salida  $P(k)$  en cada muestra  $(k)$  y determina la variación en la potencia con respecto al voltaje  $(dP / dV)$ . Como se muestra en la Fig. 5.15

Si  $dP / dV > 0$ , el controlador cambia el ciclo de trabajo de modo que para aumentar la tensión hasta que la potencia alcance su máximo valor o hasta que  $dP / dV = 0$

Si  $dP / dV < 0$ , el controlador cambia el ciclo de trabajo de modo que para disminuir el voltaje hasta que la potencia alcance su máximo valor

Figura 5.15  
Sistema con control fuzzy



Fuente: Autor

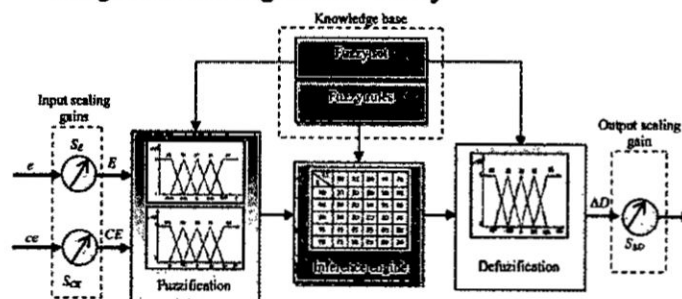
Figura 5.16  
Diagrama del Controlador fuzzy



Fuente: autor

- Entradas: E → error; CE:→cambio de error
- Salida: D: → variación del ciclo útil

Figura 5.17  
Diagrama del algoritmo fuzzy



Fuente: autor

Las dos entradas alimentadas a FLC son:

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)}$$

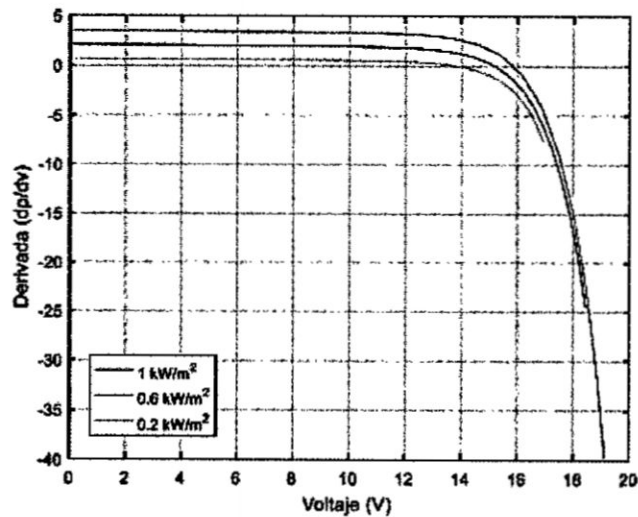
Cambio en error:  $CE(k) = E(k) - E(k-1)$

Donde:

- **Error E (k)** es la pendiente de la curva muestra que ya sea en el instante (k) el punto de operación está a la izquierda o derecha del MPP en el curva característica o exactamente en el punto MPP.
- **Cambio en el error CE (k)** determina la dirección en que se mueve el MPP.
- **P (k) y V (k)** determina los valores de potencia y voltaje generados por el Panel PV respecto en el instante (k).

En la Fig. 5.18 se aprecia la variación de la derivada respecto al voltaje para los niveles extremos de irradiancia seleccionados.

Figura 5.18  
Derivada DP/DV para distintas irradiancia



Fuente: autor



La inferencia lógica difusa utilizada para diseñar el controlador es basado en el enfoque de Mamdani.

La variable de salida del controlador es el **incremento del ciclo útil del convertidor Buck  $\Delta D$** , el cual puede tomar valores positivos o negativos dependiendo de la ubicación del punto de operación. Utilizando el valor de  **$\Delta D$**  que entrega el controlador, se realiza un acumulador para obtener el valor del ciclo útil.

$$D(k) = D(k - 1) + \Delta D(k)$$

El voltaje de salida del convertidor Buck corresponde a  **$V_{bat}=12V$**  y teniendo en cuenta que los voltajes máximo y mínimo del panel en el MPP son  **$V_{max}=19,267V$**  y  **$V_{min}=13,29V$** , se tiene que los cambios en el ciclo útil  **$D$**  deben estar entre:

$$D_{max} = \frac{12v}{13.29v} = 0.902$$

$$D_{min} = \frac{12v}{19.267v} = 0.622$$

$$D = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(d_j) * d_j}{\sum_{j=1}^n \mu(d_j)}$$

### 5.6.1 UNIVERSO DE DISCURSO

Para determinar el universo de discurso o rango de valores que pueden tomar las entradas E y CE se realiza una representación de estas señales versus el voltaje del panel FV para diferentes niveles de irradiación solar.

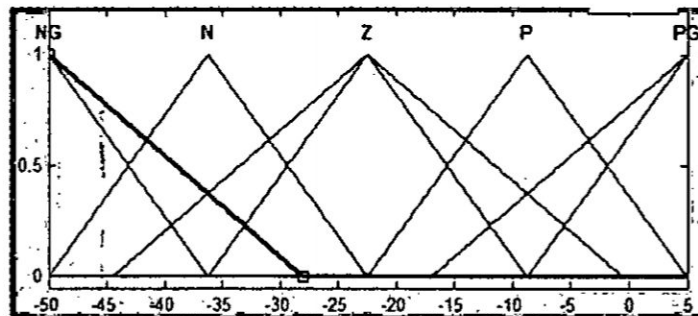
Con este procedimiento se definen los rangos para E de 5 a 50 y CE de -8 a 8. El rango para la salida del controlador  $\Delta D$  se define de -0.01 a 0.01 para tener un mayor grado de precisión en el seguimiento del MPP.

### 5.6.2. FUNCIONES DE MEMBRESÍA Y VARIABLES LINGÜÍSTICAS

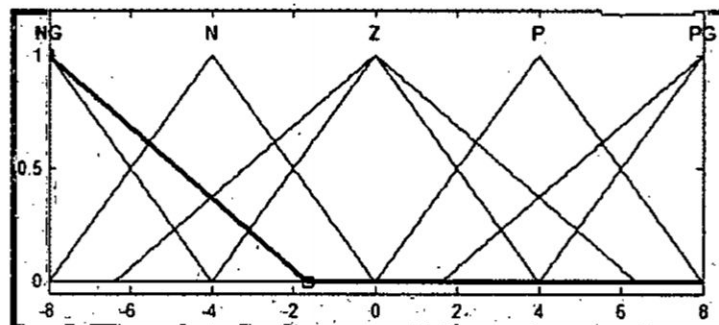
Para el proceso de fuzificación se eligen funciones de membresía triangulares por su simplicidad y por su fácil desarrollo en un dispositivo programable para una futura implementación (Chang, 2010).

Para las entradas E, CE y para la salida  $\Delta D$  del controlador, se definen 5 funciones de membresía expresadas en términos de las variables lingüísticas Negativo Grande (NG), Negativo (N), Cero (Z), Positivo (P) y Positivo Grande (PG). En la figura 5.19 a),b) y C) se muestran las funciones de membresía para las entradas y salida del controlador teniendo en cuenta el universo de discurso de cada una de ellas.

**Figura 4.19**  
**Funciones y variables del controlador**  
a) Funciones de membresía para la entrada Error

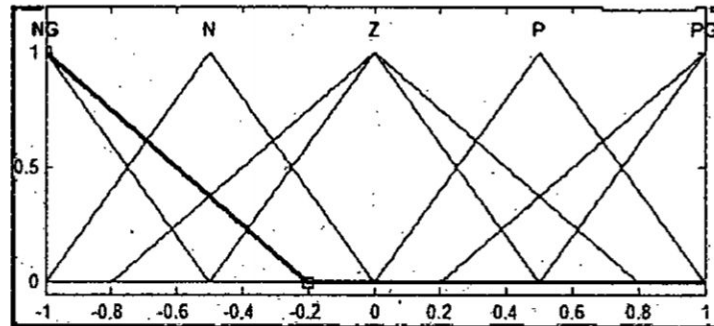


b) Funciones de membresía para la entrada CError



c)

d) Funciones de membresía para la salida D



Fuente: autor

5.6.3. REGLAS DIFUSAS

Definidas las funciones de membresía, se procedió con la definición de las reglas difusas. Se definieron 25 reglas de control utilizando una descripción lingüística del tipo Si-Entonces como se muestra en la tabla N°5.2

Tabla N°5.3  
Resultados obtenidos para temperatura variable

CE	NG	N	Z	P	PG
E					
NG	PG	P	P	P	P
N	PG	P	P	P	P
Z	P	P	Z	N	N
P	NG	NG	N	N	N
PG	NG	N	N	NG	NG

5.6.4. PROCESO DE FUZIFICACIÓN

Para el proceso de defuzificación se utiliza el método del centro de área utilizando la operación lógica "y" (Passino y Yurkovich, 1998).

Por ejemplo, para el caso en que las entradas Error=0 y CError=3, se tienen los siguientes valores para las funciones de membresía:

$$\mu_{ZERO}(Error) = 1$$

$$\mu_{POSITIVO}(CError) = 0.339$$

$$\mu_{positivogrande}(CError) = 0.284$$

Los valores para las demás funciones de membresía son cero para este caso. Existen dos reglas activas que tiene asociadas las premisas "error es zero", "cambio en error es positivo" y "cambio en error es positivo grande" las cuales son:

Si Error es **Z** y CError es **P** Entonces D es **N**.

Si Error es **Z** y CError es **PG** Entonces D es **N**.

Utilizando el criterio del mínimo se tiene que las premisas para las dos reglas son:

$$\mu_1 = \min\{0.33941\} = 0.3394$$

$$\mu_2 = \min\{0.28441\} = 0.2844$$

Aplicando el método del centro de áreas, se tiene que el valor defuzificado a la salida del controlador sería:

$$\mu = \frac{(-0.003)(0.0014) + (-0.0033)(0.0012)}{0.0014 + 0.0012} = 0.003$$

#### **Diagrama de flujo del Algoritmo de control difuso**

El siguiente diagrama de flujo en la figura 5.20 describe el control algoritmo basado en lógica difusa que se utiliza para implementar el sistema.

Figura. 5.20  
Diagrama de flujo de MPPT

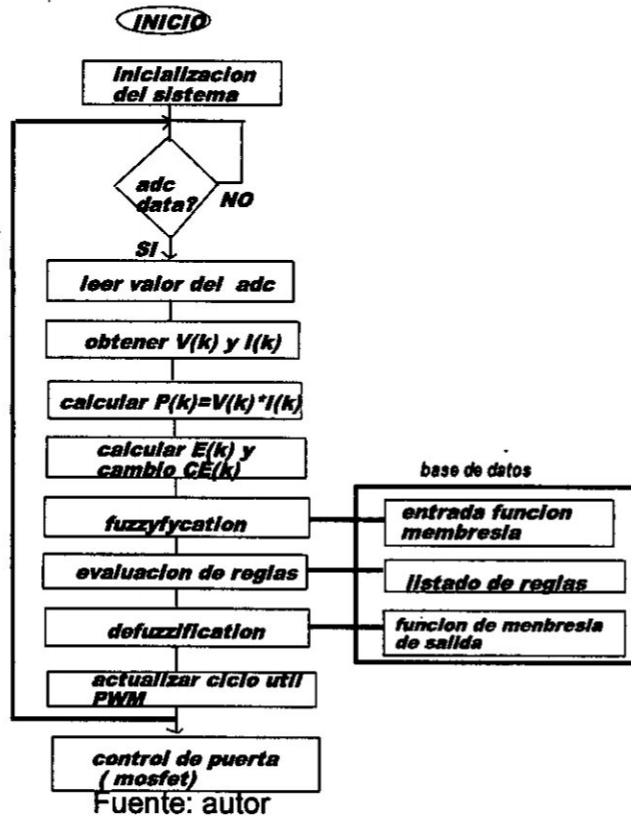
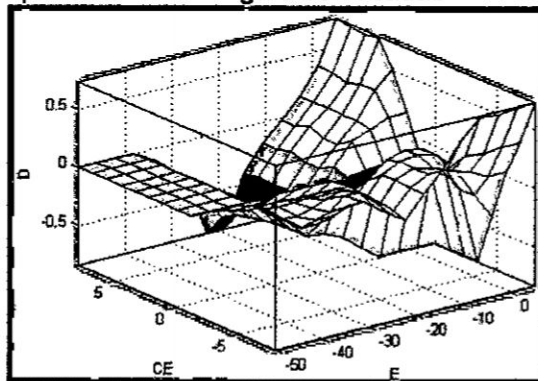


Figura 5.21  
Superficie de las reglas con matlab



Fuente: autor

## **VI. MATERIALES Y METODOS**

Se identificaron, relacionaron y delimitaron las variables y procesos del objeto de estudio, partiendo de la hipótesis se realizó el análisis de los datos colectados que sirvieron para corroborar o contrastar lo expresado en la hipótesis

**Hipótesis de partida.**

Para poder simular y realizar pruebas en nuestro laboratorio el sistema de control de MPPT por lógica difusa hemos planteado una serie de hipótesis iniciales selección de las variables de entrada al controlador y la salida.

La finalidad es poder aproximarnos a unas condiciones reales prefijadas para el posterior análisis de los resultados.

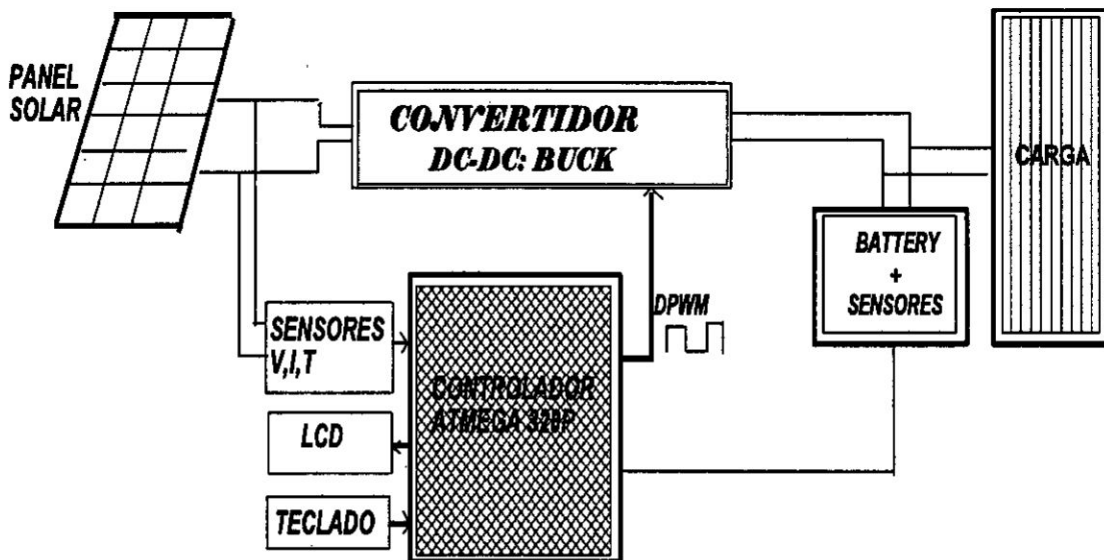
**Los datos de partida son los siguientes:**

- Este proyecto se basa en mejorar la eficiencia de los paneles solares mediante el método indirecto de Máximo Seguimiento de punto de potencia (MPPT) como se describe en las características de las células PV.
- La curva de potencia no lineal para un panel PV se vio que cambiaba principalmente por los factores de nivel de insolación solar y temperaturas de funcionamiento por ello se considera el lugar.
- El algoritmo del controlador de carga MPPT debe ser capaz de monitorear los voltajes de ambos la matriz fotovoltaica y la batería para determinar los diversos estados de carga de una batería mientras se mantiene la máxima eficiencia desde el panel solar.
- Estas técnicas constan de muchos aspectos, como la complejidad, la velocidad de convergencia, implementación de hardware, sensores necesarios, costo, rango de efectividad y necesidad de parametrización

### 6.1 Hardware general del sistema.

El diagrama de bloques del MPPT que se implementará se ilustra a continuación en la Figura 6-1

Figura 6-1  
Diagrama del sistema implementado



Fuente: autor

### 6.2. Microcontrolador

El microcontrolador Atmel ATmega328P fue elegido como el microcontrolador para las pruebas.

Los ATmega328P es un microcontrolador de bajo consumo CMOS de 8 bits basado en la arquitectura AVR RISC.

Contiene los requisitos de hardware y software pertinentes para cumplir con todos los objetivos de diseño, proporcionando suficientes pines digitales y analógicos para manejar todos los sensores, LCD, mientras que al mismo

tiempo realiza el algoritmo de control con el circuito MPPT usando salidas de modulación por ancho de pulso (PWM). Una lista de especificaciones para el ATmega328P se da a continuación:

- 8-bit microcontroller
- Up to 20 MHz clock
- 32 KB flash memory
- 1 KB EEPROM
- 2 KB SRAM(Static Random Access Memory)
- 6 PWM channels
- 6 analog inputs (10-bit built-in ADC)
- 14 digital input/output pins
- Programmable Serial USART
- Master/slave SPI Interface
- Two-Wire (TWI) or Inter-Integrated Circuit (I2C) communication
- 5V DC power
- etc.

Los seis pines analógicos se utilizarán en el controlador de carga MPPT.

Se considera dos sensores de corriente analógicos y dos sensores de voltaje análogos cada uno para la batería y el panel solar se considera cuatro pines analógicos (PC0... PC3).

Se considera el I2C que emplea un reloj y bus de datos, y el LCD es conectado al resto de pines (PC4 / SDA y PC5 / SCL).

### **6.3 Sensores**

#### **6.3.1 Sensores de Voltage**

Para la detección de voltaje, las redes del divisor de voltaje se usaron para detectar el panel solar y los voltajes de la batería.

De la hoja de datos de ATMEGA 328P, la tensión operativa especificada para los pines (E/S) es de 5 V, la corriente continua máxima por pin de E/S es de 40 mA; por lo tanto, se usa una relación de resistencias para reducir el tamaño del voltajes para que la tensión máxima alimentada desde el divisor de voltaje sea de 5V para evitar dañar el dispositivo analógico (E/S) mientras limita la corriente dibujada dentro de los límites.



Usando la ecuación del divisor de voltaje (5.1), se encontraron los valores de resistencia.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad 6.1$$

Las resistencias debían ser lo suficientemente grandes como para limitar la corriente que se extraía, por lo tanto, se eligieron resistencias en el rango KΩ. Se agregaron condensadores en paralelo con la segunda resistencia R2 para actuar como filtros que suavizan para ruido al microcontrolador.

El voltaje a través de R2 (Vout) es el que debe medirse con ATMEGA328P. Para la red de voltajes divididos en paneles solares, la Ecuación 5.1 se lleva a cabo tomando el escenario del peor caso de  $V_{in} = V_{oc}$  (voltaje de circuito abierto del panel solar) para dar un  $V_{out} = 5V$  como medida de seguridad; de manera similar para el voltaje de la batería red divisoria el peor escenario posible se tomó con  $V_{in} =$  absorción de la batería.

Dado que el Atmega328P tiene un ADC de 10 bits, asigna los valores de lectura analógica a  $2^{10}(1024)$  niveles (0-1023) y también dado que la tensión recomendada de los pines de E/S analógicos es 0-5 V, la entrada de 5 V se asigna a  $1024^{th}$  nivel, la sensibilidad del ADC al voltaje es por lo tanto  $5/1024$  V / nivel ADC.

Para obtener el voltaje sentido de la salida de ADC que se utilizará para el cálculo por ATMEGA328P en el MPPT algoritmo que necesitamos para calcular  $V_{in}$  mediante el uso de la fórmula

$$V_{sensado} = \frac{\frac{(\text{Valor ADC}) \cdot 5}{1024} (R_1 + R_2)}{R_2} \quad (6.2)$$

Para el panel solar se considera resistencias de  $R_1 = 81.1K$ ,  $R_2 = 9.75K$ , mientras que para el lado de la batería  $R_3 = 20.08K$ ,  $R_4 = 9.85K$

- Lo anterior habilitó el peor caso de voltaje de entrada solar  $V_{oc} = 45V$  y el peor voltaje de batería  $V_{batt} = 15V$  para ser reducido a menos de

5V que es **4.83V** y **4.93V** que eran seguros para el microcontrolador en las peores condiciones del caso.

El par de resistencias en serie de Kilohmios también Asegúrese de que la corriente de entrada en el microcontrolador se redujo a **0,5 mA**, lo que es muy seguro para los pines de **E/S** del microcontrolador.

- Los condensadores se colocaron a través de la entrada del sensor al microcontrolador para suavizar la entrada y el filtro de ruido

### **6.3.2 Sensor de corriente**

Los sensores de efecto Hall de Allegro Microsystems se consideraron adecuados para el proyecto.

Los sensores de corriente Allegro son de tres tipos 0-50A, 50-200A, 0->1000A; para reducir el alcance, se eligió el rango 0 →50A de los sensores actuales porque cubrió los requisitos del proyecto y tenía una mejor sensibilidad actual que los otros dos grupos.

Se eligió la serie ACS 712 porque tenía  $V_{cc} = 5V$ , es bidireccional y tiene versiones de 5, 20 y 30A.

La versión 20A se eligió en función del rango de corriente como objetivo del proyecto para diseñar un MPPT con una corriente de carga máxima de 20 A para la cual el 5A versión era inadecuada y aunque la versión 30A hubiera sido suficiente para atender márgenes, la versión 20A tenía una mejor sensibilidad, lo que significa que el controlador de carga MPPT sería más preciso.

Otras características ventajosas de la versión ACS712 -20A son:

- Entrada de señal analógica de bajo ruido
- El ancho de banda del dispositivo se configura a través del nuevo pin FILTER
- Tiempo de subida de salida de 5  $\mu s$  en respuesta a la corriente de entrada por pasos

- Ancho de banda de 80 kHz
- Error de salida total del 1,5% a TA = 25 ° C
- Paquete SOIC8 de perfil pequeño y poco espacio
- Resistencia del conductor interno de 1,2 mΩ

.A partir del voltaje de salida frente a la corriente detectada de la hoja de datos ACS712-20A es evidente que la sensibilidad es 0.1V / A y que emite una tensión de 2.5V cuando no fluye corriente (0A) suponiendo que no hay compensaciones eléctricas.

Pin7 (VIOUT) es el pin conectado al pin de entrada analógica del ATMEGA328P para que el algoritmo MPPT calcule la corriente.

Por lo tanto, idealmente, la corriente medida en Amperes viene dada por

$$I_{medido} = \frac{V_{medido} - 2.5v}{\frac{0.1v}{A}} \quad (6.3)$$

El ATMEGA328P tiene un ADC de 10 bits, por lo tanto, asigna voltaje medido entre  $2^{10}=1024$  niveles, y como la tensión recomendada para las d E/S es de 5V, una entrada analógica de 5V está representada por el  $1024^{th}$  del valor ADC.

Para el rango de current = 0A a current = 20A se mapea al valor  $512^{th}$  a  $1024^{th}$  del ADC.

Por lo tanto, para convertir el valor leído de ADC a un nivel actual que se utilizará para el cálculo aritmético mediante el algoritmo MPPT usamos la siguiente fórmula:

$$I_{sensada} = \frac{\frac{ADC_{valor} * 5}{1024} - 2.5}{0.1} \quad (6.4)$$

De lo que vemos que el valor de ADC detectado se convierte en el rango de voltaje 0 a 5V y se deduce el desplazamiento nulo ideal de 2.5V, el resultado se convierte a amperios en función de la sensibilidad de 0.1V / A

Después de que se montaron los sensores de corriente, los voltajes de compensación ( $V_{Iout}$  a tierra) se midieron para determinar los desplazamientos reales a 0 A y obtener lecturas de corriente más precisas.

Se determinó que eran 2.48 V y 2.476 V para los lados de entrada y de salida respectivamente, estos fueron programados en el algoritmo para lecturas más precisas.

### **6.3.3 Sensores de temperatura**

La temperatura de la batería es importante en su carga para la compensación de temperatura de modo que los puntos de referencia se reducen a medida que las temperaturas aumentan por encima de los 25°C y aumentan cuando las temperaturas bajan por debajo de 25°C, también es importante tener en cuenta la temperatura de la batería para evitar el sobrecalentamiento de la batería durante carga ya que esto destruye la vida de la batería e incluso podría explotar las baterías

Se eligió el sensor de temperatura DS18B20 es un dispositivo que se comunica de forma digital. Cuenta con tres terminales: Vcc, GND y el pin Data. Este sensor utiliza comunicación por One Wire. Este protocolo de comunicación permite enviar y recibir datos utilizando un solo cable. A diferencia de otros protocolos, que utilizan dos o más líneas de comunicación digital.

#### **CARACTERÍSTICAS**

Sensor Digital

Resolución de 9 y 12 bits

Rango de operación de -50° a 125° grados Centígrados

Precisión +- 0.5 grados

Protocolo OneWire

#### **6.4. Pantalla LCD-I2C-20x4**

Se consideró esta pantalla LCD 4x20. Este módulo posee una pantalla LCD de 20 caracteres por 4 líneas, retro iluminado color azul. Caracteres blancos. Incorpora un módulo conversor para que en vez de utilizar varios pines del Arduino, sólo se utilicen 2 Pines, SDA y SCL.

Esta pantalla integra el módulo para poderla usar a través del protocolo I2C sin ningún problema.

##### **Características**

- Alimentación: 5v.
- Caracteres: 4 filas x 20 caracteres alfanuméricos.
- Fondo de pantalla: azul.
- Color de los caracteres: blanco.
- Dimensiones del display: 75 x 26 mm útiles (97 x 40 mm en total).
- Dimensiones de la placa: 98 x 60 mm.
- Módulo I2C / IIC pre soldado en la parte trasera.

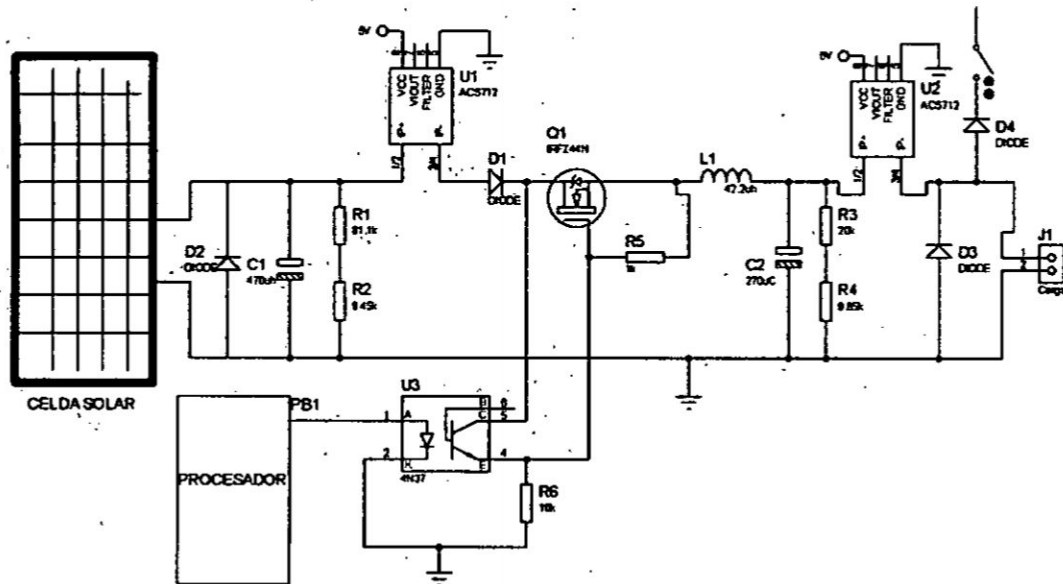
#### **6.5. HARDWARE DEL CONVERTIDOR DC-DC BUCK**

La topología utilizada para el convertidor fue la tipo Buck, en la cual el voltaje de salida es menor al voltaje de entrada y su función es que permite acondicionar la señal proveniente del panel FV utilizando un control difuso (Erickson, 1999). Se eligió esta topología puesto que el panel FV maneja un rango de voltajes entre 14,34 y 19,26V que necesitan ser regulados para conectarse a la carga que en este caso es una batería de 12V.

En la figura 6.3 se presenta la topología que fue diseñada para garantizar que el convertidor opere en el modo de operación continuo (MOC), y así evitar que la corriente en el inductor sea cero durante un intervalo de tiempo.



**Figura 6.3**  
**Esquema Convertidor DC-DC Buck**



Fuente: autor

### 6. 5.1. SELECCIÓN DEL INDUCTOR

El valor del inductor es diseñado para mantener el balance volts por segundo del convertidor y para reducir el rizado en la corriente de salida. En caso de que se utilice un valor de inductor inadecuado se ocasionará un rizado AC en la salida de DC y puede existir un cambio entre el modo de operación continuo y el discontinuo. Para mantener el MOC la corriente mínima de salida del convertidor debe ser (Rogers, 1999):

$$i_o(\text{crit}) \geq \frac{\Delta i_L}{2} \quad (6.5)$$

Con el fin de mantener un compromiso entre el tamaño del inductor y del capacitor, se considera un buen criterio de diseño trabajar con un rizado del 10-30% de la corriente de salida  $i_o$ , por lo tanto:

$$0.3i_o(\text{crit}) \geq \frac{\Delta i_L}{2} \quad (6.6)$$

Utilizando la ecuación descrita en Robles y Villa (2011) para el rizado en el inductor.

$$\Delta i_L(\text{on}) = \frac{(V_i - V_o) T_{\text{on}}}{L} \quad (6.7)$$

Combinando las Ecuaciones (6) y (7) y utilizando el procedimiento descrito en Robles y Villa (2011), el mínimo valor para el inductor es:

$$L_{\text{min}} \geq \frac{V_o \left(1 - \frac{V_o}{V_i}\right) T_s}{2i_o(\text{crit})(0.3)} \quad (6.8)$$

Para seleccionar el valor del Inductor que garantice el MOC para todas las condiciones de irradiación expuestas en el Cuadro 3, se tiene que  $V_o=12\text{V}$  y con los valores de  $V_i=17.41\text{V}$ ,  $i_o=0,694\text{A}$  en el punto de máxima potencia para una irradiación de  $200 \text{ W/m}^2$  y con una frecuencia de muestreo de  $f_s=100\text{KHz}$  se tiene que:  $L_{\text{min}} \geq 89.55\mu\text{H}$

Se elige un inductor de  $L=108\mu\text{H}$  asumiendo una tolerancia de  $\pm 20\%$ . Para este valor se tiene que  $i_o=0,5754\text{A}$  y por lo tanto el rizado en la corriente en el inductor  $\Delta i_L = 2(0.3)(i_o) = 345\text{mA}$

### 6.5.2. SELECCIÓN DEL CAPACITOR

Si se asume que el rizado de la corriente del inductor fluye a través del capacitor y que la componente de DC fluye a través de la carga, según lo descrito en Robles y Villa (2011), el valor del capacitor de salida es:

$$C \geq \frac{\Delta i_L T_s}{8\Delta V} \quad (6.9)$$

Conociendo que en un convertidor es deseable tener un rizado que no supere el 1% del voltaje de salida. se diseña para un rizado de 0.1%.

$$C \geq \frac{\Delta i_L T_s}{8(0.001)\Delta V} \quad (6.10)$$

El valor de C, utilizando los valores de los parámetros descritos en el diseño del inductor, es:

$$C \geq 79.71\mu\text{H}$$

Se elige un capacitor de  $C=96\mu\text{F}$  asumiendo una tolerancia de  $\pm 20\%$ .



## 6.6. SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR DC-DC

Para realizar el modelado del convertidor DC-DC en Simulink se plantean las ecuaciones de voltaje y corriente teniendo en cuenta la figura 6.3 y el ciclo útil  $D$ , por lo tanto se utilizaron las siguientes expresiones:

$$L \frac{di_L}{dt} = V_i D - V_o$$

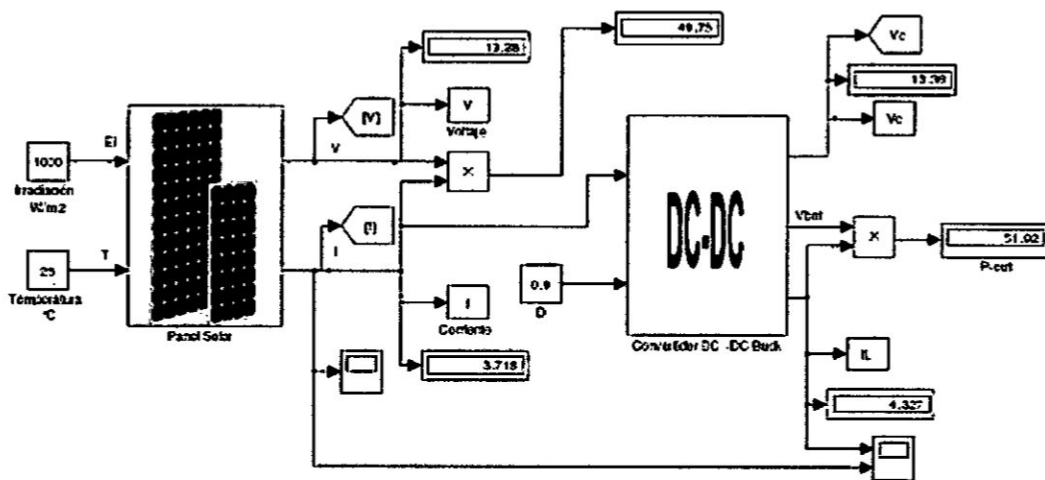
$$C \frac{dv_c}{dt} = I - i_L D$$

Se realizó un subsistema llamado DC-DC Buck teniendo como entradas las salidas del panel FV y el ciclo útil  $D$  y como salidas los valores de corriente y voltaje de la batería modificados por el valor del ciclo útil.

El subsistema realizado permite ajustar de forma sencilla a través de una máscara los valores de  $L$  y  $C$ .

El modelo resultante del convertidor se ilustra en la figura 6.4

**Figura 6.4**  
**Sistema de control a lazo abierto**



Fuente: autor

Utilizando el esquema que se muestra en la figura 6.4 se realizaron pruebas del sistema de lazo abierto variando de forma manual el valor del ciclo útil y tabulando los valores de la corriente de salida del panel

y la corriente de salida del convertidor. Los resultados obtenidos demuestran como el convertidor Buck permite aumentar o disminuir la corriente de salida  $I_L$  tomando como referencia la corriente del panel.

Para un ciclo útil de 0,65 se obtuvo una corriente  $I_L=2,7A$  mientras que para un ciclo útil de 0,75 se tuvo un valor de  $I_L=3,7A$ . Por lo tanto ajustando el valor de  $I_L$  se logra controlar el MPP del panel FV y en adelante se procederá con el diseño del controlador que permitirá modificar de forma automática el valor del ciclo útil para condiciones de irradiación y temperatura variables.

#### **6.7 SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO**

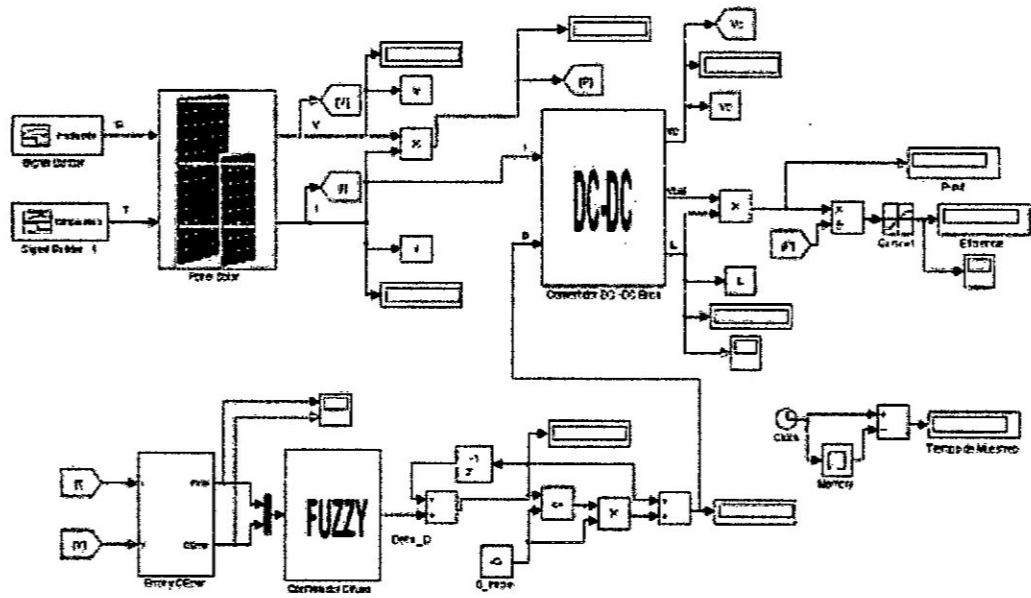
El modelado del controlador se realizó utilizando la herramienta de Matlab Fuzzy Logic Toolbox. Inicialmente se definen las entradas y salidas utilizando un controlador Mamdani y el método del centroide del área para la defuzificación. Este procedimiento se lleva a cabo utilizando el editor de sistema de inferencia difusa (FIS editor).

Las reglas difusas son incorporadas al sistema utilizando el editor de reglas del toolbox. Seguidamente con la ayuda del visualizador de reglas se logra evaluar el desempeño del sistema de inferencia difuso ante diferentes variaciones en las variables de entrada corroborando de esta forma el buen desempeño del controlador.

#### **6.8 SIMULACION DEL SISTEMA EN LAZO CERRADO**

Para realizar la simulación del sistema a lazo cerrado se utilizan los modelos planteados para el panel FV, el convertidor DC-DC y el controlador difuso. En la figura 6.5 se muestra el sistema de lazo cerrado simulado en Matlab/Simulink.

**Figura 6.5.**  
**Sistema de control de lazo cerrado**



Fuente: Autor

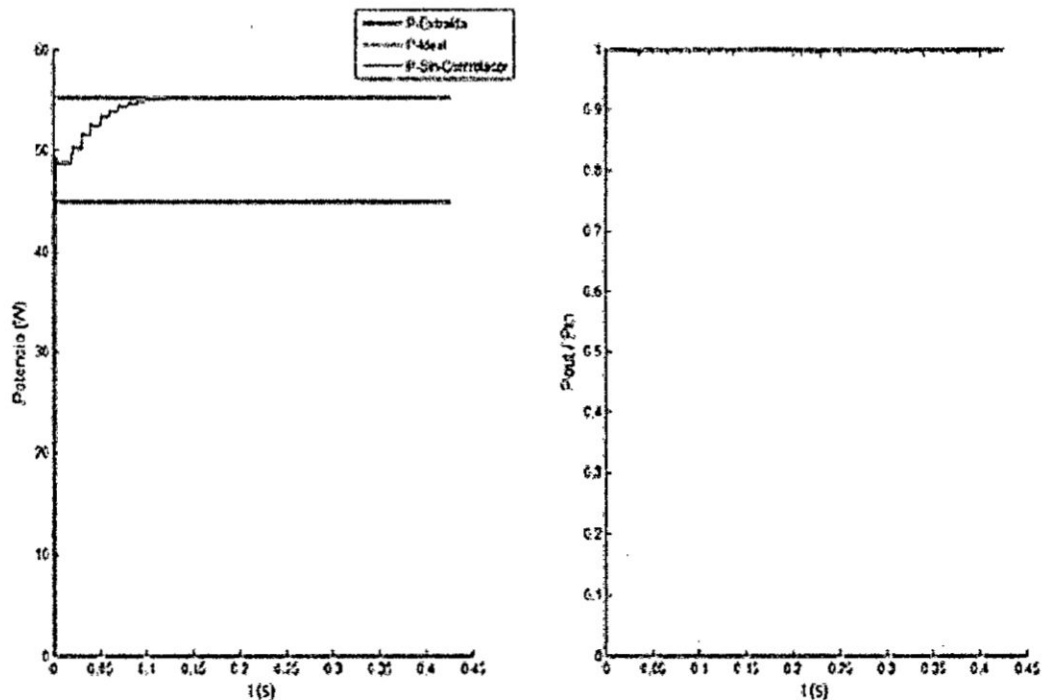
## VII. RESULTADOS

### 7.1. RESULTADOS PARA CONDICIONES DE PRUEBA ESTÁNDAR

Para evaluar el desempeño del controlador difuso en el sistema de lazo cerrado, se realizó una primera prueba para condiciones estándares de operación con  $T=25^{\circ}\text{C}$  y  $E=1000\text{ W/m}^2$ .

En la Figura 7.1 se muestra una comparación de la potencia ideal y la potencia extraída del panel FV y se puede observar como el controlador difuso logra extraer la máxima potencia de 55,15W a partir de un tiempo de estabilización de 0,104s. También se puede ver que la eficiencia ( $P_{out} / P_{in}$ ) del sistema está alrededor del 100%.

**Figura 7.1**  
**Resultados a lazo cerrado para T y E constantes**



Fuente: Autor

Para el caso en el que no se utiliza el controlador difuso, se realiza una conexión directa entre el panel FV y la batería de 12V por lo tanto la potencia extraída del panel es siempre constante y de 44,95W.

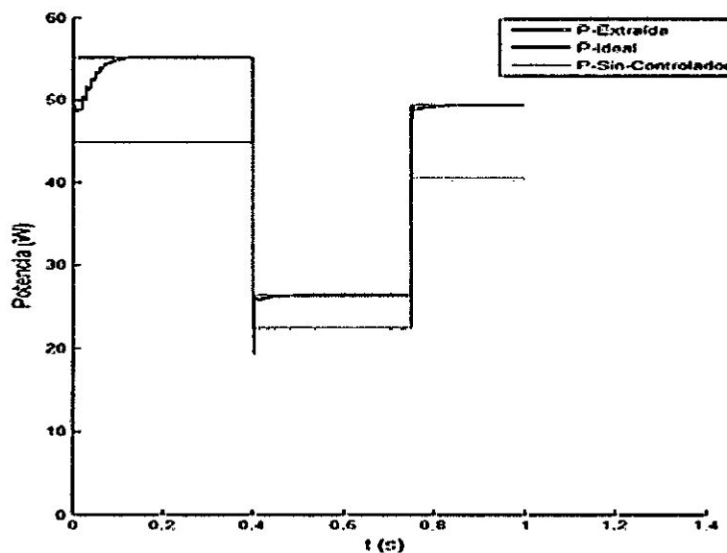
## 7.2. RESULTADOS PARA CAMBIOS EN LA IRRADIACIÓN

En este caso se realizan pruebas para cambios en la irradiación manteniendo una temperatura de 25°C y simulando un día soleado con algunas nubes que hacen que la irradiación oscile entre valores altos y bajos. Para lograr lo anterior se realizó un cambio en la irradiación de 1000 W/m<sup>2</sup> a 500 W/m<sup>2</sup> en t=0.4s y posteriormente de 500 W/m<sup>2</sup> a 900 W/m<sup>2</sup> en t=0.75s.

Los resultados obtenidos se ilustran en la figura 7.2 donde se puede ver la efectividad del controlador difuso puesto que se logra alcanzar el MPP para las diferentes condiciones de irradiación.

Figura N°7.2

Resultados a lazo cerrado para irradiación variable

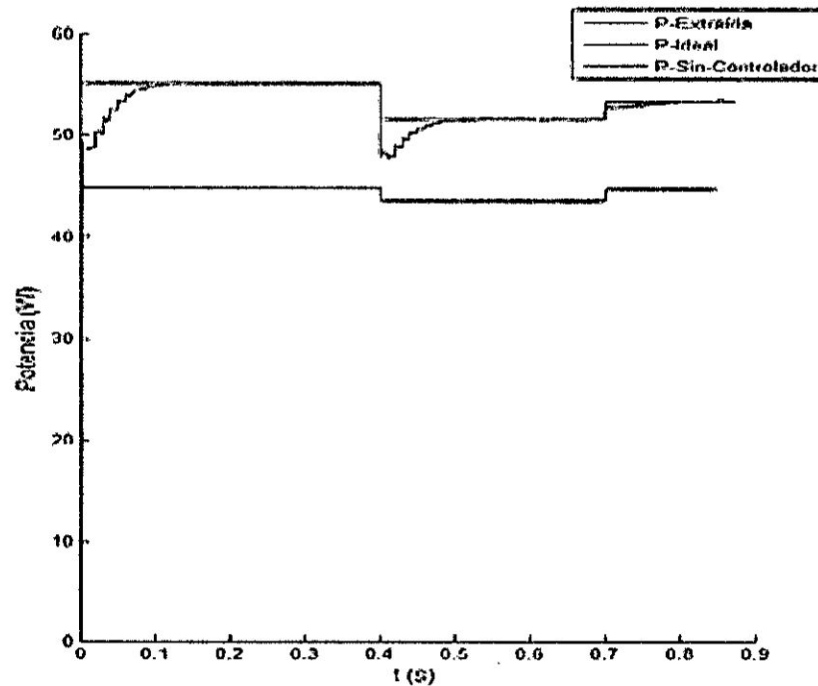


Fuente: Autor

### 7.3. RESULTADOS PARA CAMBIOS EN LA TEMPERATURA

En esta etapa de pruebas se realizaron cambios en la temperatura de 25°C a 45°C en  $t=0.4s$  y posteriormente de 45°C a 35°C en  $t=0.7s$  para una irradiación constante de 1000 W/m<sup>2</sup>. En la figura N°7.3 se muestran los resultados, donde se puede ver nuevamente la efectividad del controlador difuso puesto que se logra alcanzar el MPP para las diferentes condiciones de temperatura.

**Figura N° 7.3**  
**Resultados a lazo cerrado para temperatura variable**



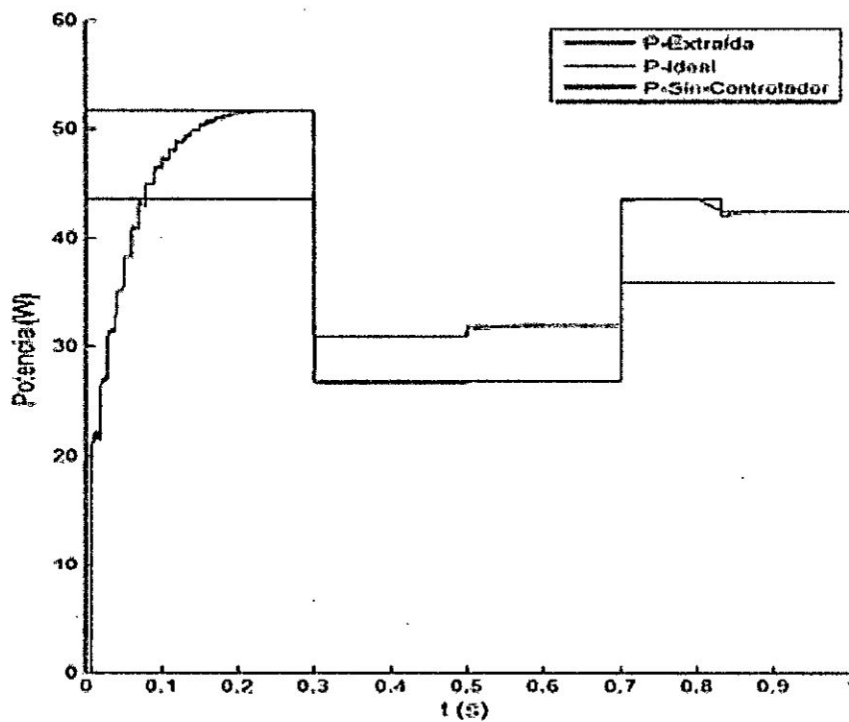
Fuente: Autor.

### 7.4. RESULTADOS PARA CAMBIOS EN LA TEMPERATURA Y LA IRRADIACIÓN

Para este caso se simuló un ambiente de trabajo más exigente donde hay variaciones de la temperatura y la irradiación. Para el caso de la irradiación se aplicaron cambios de 1000W/m<sup>2</sup> a 600W/m<sup>2</sup> en  $t=0.3s$  y luego en  $t=0.7s$  se cambió de 600W/m<sup>2</sup> a 800W/m<sup>2</sup>.

La temperatura se cambió de  $T=45^{\circ}\text{C}$  a  $T=25^{\circ}\text{C}$  en  $t=0.5\text{s}$  y luego de  $T=25^{\circ}\text{C}$  a  $T=35^{\circ}\text{C}$  en  $t=0.82\text{s}$ . Los resultados se pueden observar en la Figura N°7.4, donde ve la efectividad del controlador, la potencia extraída se estabiliza en los valores de potencia real.

**Figura N°7.4**  
**Resultados a lazo cerrado para T y E variable**



Fuente: Autor.

## VIII. DISCUSION

### CONCLUSIONES

Se realizó un controlador difuso que permite seguir y controlar el punto de máxima potencia de un panel fotovoltaico. Las pruebas realizadas permitieron evaluar el desempeño del controlador para cambios en los niveles de irradiación solar y temperatura de operación del panel FV. Los resultados obtenidos muestran la eficiencia del controlador con excelentes tiempos de convergencia y sin problemas de oscilación alrededor del punto de operación. Los efectos más severos sobre el desempeño del sistema se presentan cuando existen fuertes cambios en los niveles de irradiación y temperatura de operación afectándose de forma parcial la eficiencia del sistema de lazo cerrado.

La primera tarea realizada fue el modelado y simulación de un panel FV monocristalino de 55W utilizando Matlab/Simulink. Con esta herramienta se creó un subsistema que permite evaluar el comportamiento para paneles solares de diferentes tipos de fabricantes teniendo como entradas la irradiación solar y la temperatura, y como salidas la corriente y voltaje del panel.

Los resultados obtenidos con el modelo fueron contrastados con los parámetros reales de un panel FV lográndose errores en el rango de 0,18% a 1,7%, lo cual demuestra la correcta elección y simulación que se realizó del modelo matemático. La no linealidad del modelo del panel FV quedó demostrada con las curvas I-V y P-V obtenidas para las diferentes simulaciones realizadas ante cambios en la irradiación y la temperatura.

Las salidas del panel FV se conectaron a un convertidor DC-DC en la topología Buck, el cual fue diseñado y modelado para operar en el modo de operación continuo. Los resultados obtenidos con el convertidor demuestran que ajustando el ciclo útil se logra maximizar la corriente entregada a la batería y por lo tanto se



logra alcanzar el MPP para diferentes condiciones de operación del panel FV. Con las simulaciones obtenidas a lazo abierto utilizando el convertidor y el panel FV, quedó evidenciada la necesidad de incorporar un controlador para así evitar que la carga opere siempre a un voltaje constante sin tener en cuenta los cambios de irradiación y temperatura que afectan el desempeño del sistema.

El controlador difuso para el sistema de lazo cerrado fue diseñado utilizando un modelo de mamdani teniendo como entradas la pendiente de potencia y el cambio en la pendiente del panel FV, y como salida el incremento del ciclo útil de convertidor DC-DC. Se utilizó el toolbox de Matlab para modelar el controlador y así poder incorporarlo al sistema de lazo cerrado.

Con la presente investigación queda demostrada la efectividad que tienen los controladores difusos para sistemas no lineales debido a su gran flexibilidad y robustez. También queda claro que la lógica difusa es un mecanismo de razonamiento no matemático que depende del conocimiento y razonamiento de un experto.

Finalmente hay que mencionar que es un hecho que las fuentes de energía alternativas que utilizan paneles solares cada día tienen más auge, aunque desafortunadamente todavía estos dispositivos manejan bajas eficiencias, por lo tanto, son necesarios todos los esfuerzos que se realicen para mejorar la eficiencia de un sistema fotovoltaico.

## IX REFERENCIALES

1. Arias, F. (1999). El proyecto de investigación: Guía para su elaboración. Caracas. Editorial Episteme.
2. Chang, Y. (2010). A maximum power point tracking of PV system by scaling fuzzy control. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. March, Hong Kong.
3. Erickson, R. (1999). DC-DC Power Converters. Estados Unidos. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering.
4. Gasquet, H. (2004). Conversión de la luz solar en energía eléctrica. México D.F. Editorial Solartronic, S.A.
5. Gil, O. (2008). Modelado y simulación de dispositivos fotovoltaicos. Tesis de Maestría. Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica. Universidad de Puerto Rico. San Juan.
6. Giraldo, C. (2008). Maximum power point tracking using modified P&O method for the off grid radar. Tesis de Maestría. Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica. Universidad de Puerto Rico. San Juan.
7. Guasch, D. (2003). Modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos. Tesis Doctoral. Doctorado en Ingeniería Electrónica. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
8. Jiang, J.; Huang, T.; Hsiao, Y. y Chen, C. (2005). Maximum power tracking for photovoltaic power systems. Tamkang Journal of Science and Engineering. Volumen 8, No. 2.

9. Jiménez, J. (2009). Estudio y simulación de sistemas de conversión fotovoltaica-eléctrica mediante Matlab-Simulink. Proyecto Final de Carrera. Ingeniería de Telecomunicaciones. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
10. Kolakowski, T. (2009). Fuzzy logic control of a switched-inductor DC-DC buck converter in CCM. Tesis de Maestría. Master of Science in Engineering. Wright State University. Estados Unidos.
11. Midya, P.; Krein, P.; Turnbull, R.; Reppa, R. y Kimball, J. (1996). Dynamic maximum power point tracker for photovoltaic applications. Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC. June, Estados Unidos .
12. Molina, M.; Mercado, P. y Wiernes, P. (2007). Análisis y simulación de algoritmos de control para el seguimiento del punto de máxima potencia de sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red eléctrica. San Juan. Publicaciones de la Universidad Nacional de San Juan

## **X. APÉNDICE**

### **APENDICE 1:**

**Código de Algoritmo de Carga MPPT usado en el ATMEGA328P**

## APENDICE 1:

### Código de Algoritmo de Carga MPPT usado en el ATMEGA328P

El siguiente es el código completo para el controlador de carga MPPT.

```
/* Controlador de carga MPPT basado en microcontrolador */
/*Especificaciones:
Corriente máxima de carga = 20A
Tensión nominal de entrada = 45V
Evaluación eficiente del panel solar = 50-240W
Batería clasificada = batería de 12V por defecto, puede tolerar también 6V y 24V*/
// Arduino Pin Conectividad:
/* Pines de entrada analógica
A0-Sensor del divisor de voltaje del panel solar
A1-Panel solar Sensor de corriente ACS-712
A2-Sensor del divisor de voltaje de la batería
A3-Batería ACS-712 sensor de corriente SDA y SCL-LCD de I2C
Pines digitales de E / O
3-LED AZUL
5-LED ROJO
6-LED VERDE
8-PWM MOSFET DRIVER SD
9-PWM MOSFET DRIVER IN o PC817 ánodo pin1
1 sensor de temperatura
2,4,7,10-13-Teclado
*/
// Bibliotecas Esenciales
#include<TimerOne.h>//http://playground.arduino.cc/Code/Timer1
#include<LiquidCrystal_I2C.h>//http://playground.arduino.cc/Code/LCDi2c
#include<Wire.h>
#include <DallasTemperature.h>//for dsb1820
#include <Keypad.h>
#define Vsolar_sensor 0
// Definiciones de pin outs
#define Isolar_sensor 1
#define Vbatt_sensor 2
#define Ibatt_sensor 3
#define SD_pin 8//IR2110 SD
#define IN_pin 9//IR2110 HIN
#define MPPT_PandO// elegir el método de implementación usando perturb o //incremental
conductancia por el uncommenting la opción.
//#define MPPT_INCCOND
#define COMMON_ANODE//descomente si su cátodo común, las conectividades de //pines RGB son
especificado a continuación
#define Vsolar_factor 0.045085461/(5/1024)*(R2+R1)/R1;R1=9.85K,R2=81.1K
#define Vbatt_factor 0.014938902/(5/1024)*(R2+R1)/R1;R1=9.75K,R2=20.08K
#define Isolar_factor 0.048828125/(5/1024)/0.1 //sensitivity of ACS712-20A is 100mV/A
#define Ibatt_factor 0.048828125/5/1024/0.1 //sensitivity of ACS712-20A is 100mV/A
#define Ioffset1 24.9 //2.5/0.1 5/1024/0.1 //sensitivity of ACS712-20A is 100mV/A & volatge at
```

```

//0A is 2.5 V (but with the ones I used they had avoltage drop Of 24.8 at 0A)
#define loffset2 24.9 //2.5/0.1 5/1024)/0.1 ,,sensitivity of ACS712-20A is 100mV/A & voltage at 0A
is 2.5 V (but with the ones I used they had avoltage drop Of 24.4 at 0A)
// Constantes pertinentes
#define MOSFET_OFF digitalWrite(IN_pin,LOW)//because were using PC817 just turn off its input
#define MOSFET_ON digitalWrite(SD_pin,LOW)
#define LOAD_ON digitalWrite(load_pin,HIGH)
#define LOAD_OFF digitalWrite(load_pin,LOW)
#define pwm_max 100 //100%
#define pwm_top 1023 //DAC value of max pwm by timer1.h
#define pwm_min 28 //worst case pwm for maximum rating open circuit voltage Voc=45V
#define pwm_stepsize 1//step size to be use in Perturb&Observe
#define pwm_start 60//Optimal starting pwm
#define sample_no 10
// El cable de datos está conectado a Dpin1 en el Arduino
#define ONE_WIRE_BUS 1
#define load_pin 0//for keypad
const byte ROWS = 4; //four rows
const byte COLS = 3; //three columns
char keys[ROWS][COLS] = { {'1','2','3'}, {'4','5','6'}, {'7','8','9'}, {'.','0','#'}};

byte rowPins[ROWS] = {13, 12, 11, 10}; //connect to the row pinouts of the keypad
byte colPins[COLS] = {7, 4, 2}; //connect to the column pinouts of the keypad
//! CD BATTERY SoC ICONS
byte batt_icons [6][8]={ { 0b01010, 0b10001, 0b10001, 0b10001, 0b10001, 0b10001,
0b10001, 0b11111 }, { 0b01010, 0b10001, 0b10001, 0b10001, 0b10001, 0b10001,
0b11111, 0b11111 },{ 0b01010, 0b10001,0b10001, 0b10001, 0b10001, 0b11111, 0b11111,
0b11111 }, {0b01010, 0b10001, 0b10001, 0b10001, 0b11111, 0b11111, 0b11111,
0b11111},{0b01010,0b10001, 0b10001, 0b11111, 0b11111,0b11111, 0b11111, 0b11111 }, {
0b01010, 0b11111, 0b11111, 0b11111, 0b11111,0b11111, 0b11111,0b11111 }
};
#define PV_ICON 6
byte pv_icon[8]={ 0b11111, 0b10101, 0b11111, 0b10101, 0b11111, 0b10101, 0b11111,
0b11111 };
#define PWM_ICON 7
byte pwm_icon[8]= { 0b10111, 0b10111, 0b10101, 0b10101, 0b10101, 0b10101,
0b11101,0b11101 };
// Declaración de variables y tipos de datos
float Vsolar; float PrevVsolar=0; float Isolar; float Previsolar=0; float Vbatt;
float Ibatt; float Tbatt=25;
float celcius; float Psolar; float Pleast=2; float PrevPsolar=0; unsigned int interrupt_counter=0;
unsigned long boost_millis=0;//stors the boost time(absorption/topping) time for the day
float delta=pwm_stepsize;//changes pwm in MPPT bulk mode
float inc=pwm_stepsize;//changes pwm in boost and float modes to maintain voltage constant
float error1=0;//error during maintain absorption voltage
float error2=0;//error during maintaining float voltage
float error3=0;//error during avoiding exceeding max charging current
float pwm=0;

```

```

//Battery set points
float Vfloat;//temp compensated
float Vfloat1;//to be set by user
char strfloat[]={"13.60"};
float Vboost;//temp compensated
float Vboost1;//to be set by user
char strboost[]={"14.40"};
float LVD;//LOW VOLTAGE DISCONNECT
char strLVD[]={"11.20"};
unsigned long boost_settime;
float boost_settime1; char
strboostTime[]={"060"};
unsigned long boost_time;
char strBattType[]={"12"};
float temp_compensation;
float tempComp1;
char strtempComp[]={"3.0"};//3mV per cell
int Imax=20;//max charging current
int Tmax=40;//max rated battery temperature operating condition
//keypad auxiliaries
enum charger_mode{off,initialize,bulk,boost,float_mode}charger_mode;
//SetLCD I2C address for the 2004 display by syntax :hexaddress,en,rw,rs,D4,D5,D6,D7,bl,blpol
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F,2,1,0,4,5,6,7,3,POSITIVE);
//set keypad mapping matrix
Keypad keypad = Keypad( makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS );
// setup dsi8b20 Pass our oneWire reference to Dallas Temperature .
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
void setup() {
pinMode(SD_pin,OUTPUT);//Start in the off state by defining Shutdown Pin as an output and
turning it low
MOSFET_OFF;
charger_mode=off;
lcd.begin(20,4);//Initialize our LCD 2004 display (20 columns by 4 rows)
//Create LCD various SoC -state of charge icons and ensure backlight is on for all light conditions
visibility
lcd.backlight();
for (int baticon=1;baticon<7;baticon++){
  lcd.createChar(baticon,batt_icons[baticon]);
} lcd.createChar(PV_ICON,pv_icon);
lcd.createChar(PWM_ICON,pwm_icon);
pinMode(R,OUTPUT);
pinMode(G,OUTPUT);
pinMode(B,OUTPUT);
led_mode=black;
Timer1.initialize(20);//initialize timer1 at a 20microsecond period=50KHz
Timer1.pwm(IN_pin,0);//Set the PWM for the IN pin of MOSFET driver to0
//startpwm at an optimized start point

```

```

pwm=pwm_start;
keypad.addEventListener(keypadEvent); // Add an event listener for this keypad
//display constant icons of the key MPPT components
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("PV");
lcd.setCursor(3,0);
lcd.write(PV_ICON);
lcd.setCursor(7,0);
lcd.print("PWM");
lcd.setCursor(11,0);
lcd.write(PWM_ICON);
lcd.setCursor(14,0);
lcd.print("BATT");
}
void loop() {
  read_sensors();//read various sensors to get data needed to run MPPT charge controller
  keypadmode();
  run_MPPTcharger();//run MPPT P&O Algorithm and battery charging algorithm
  lcd_display();//display system parameters on LCD
  led_display();//display system status via LEDs
  load_engage();resetting(); }
int sample_sensor(int Inputpin){
  int sum = 0; int temp;
  for (int k=0; k<sample_no ; k++)
  {
temp=analogRead(Inputpin);
sum+=temp;
delayMicroseconds(50);
} return(sum/sample_no);
}
void read_sensors(void)
{
Vsolar=sample_sensor(Vsolar_sensor)*Vsolar_factor;
Vbatt=sample_sensor(Vbatt_sensor)*Vbatt_factor;
Isolar=(sample_sensor(Isolar_sensor)*Isolar_factor)-Ioffset1;
Ibatt=(sample_sensor(Ibatt_sensor)*Ibatt_factor)-Ioffset2;
sensors.begin();//to search for ds18b20
int b=(sensors.getDeviceCount());
if (b=10)
{ sensors.requestTemperatures();
celcius=sensors.getTempCByIndex(0);
Tbatt=celcius; }
else {Tbatt=25;
}
Psolar=Vsolar*Isolar;
Vfloat=(Vfloat1+(25-Tbatt)*temp_compensation);//Just incase the user doesnt edit anything
Vboost=(Vboost1+(25-Tbatt)*temp_compensation);
}

```



```

//Setting the pwm duty cycle for the IN_pin using timer1.pwm on pin9
void set_pwm_duty_cycle(float pwm){
  if (pwm<pwm_min){ pwm=pwm_min; }
  else
  if (pwm>pwm_max | pwm==pwm_max)
  { pwm=pwm_max;
  Timer1.pwm(IN_pin,(pwm_top-1),20); //operate at max 99.9% duty cycle to allow bootstrap
  capacitor to recharge at off time
  } if (pwm<pwm_max && pwm>pwm_min){
  Timer1.pwm(IN_pin,(pwm_top)*(long)pwm/100,20); //set pwm at 50KHz
  }
}
void run_MPPT_charger()
{
  switch(charger_mode)
  { case off: MOSFET_OFF;
  delay(1500);
  if(((Vbatt>12)&&(Vsolar>Vbatt+0.5)) || (Vbatt<=12)&&(Vsolar>=12.5)))
  {
    charger_mode=initialize;
  }
  break;
  case initialize:
  if
  (((Vbatt>12)&&(Vsolar<Vbatt+0.5)) || (Vbatt<=12)&&(Vsolar<12.5)) || (Isolar<0.1) || (Ibatt>Imax)
  || (Vbatt>Vboost+0.15) || Psolar<Pleast || Tbat>Tmax){ charger_mode=off;
  MOSFET_OFF;
  break;
  }
  else
  {
  if (boost_time>boost_settime){charger_mode=float_mode;}
  else {if (Vbatt>Vboost){
  charger_mode=boost;
  MOSFET_ON;
  boost_millis=millis();
  break:
  }
  else
  {
  charger_mode=bulk; //if voltage is less than boost voltage and cant go to float since
  the boost time hasnt been reached
  MOSFET_ON;
  break;
  } } }
  break;
  case bulk:
  case initialize:
  if

```

```

(((Vbatt>12)&&(Vsolar<Vbatt+0.5)||Vbatt<=12)&&(Vsolar<12.5)||Isolar<0.1)||Ibatt>Imax)||Vbatt>Vboost+0.15)||Psolar<Pleast||Tbatt>Tmax))
{
    charger_mode=off;
    MOSFET_OFF;
    break;
}
else
{
    if (Vbatt>Vboost+0.01)
    {
        if (boost_time>boost_settime)
        {
            charger_mode=float_mode;
            MOSFET_ON;
            break;
        }
        else { charger_mode=boost; MOSFET_ON; boost_time=millis(); break; }
    }
    else { #ifdef MPPT_PandO mppt_PandO(); #endif
        #ifdef MPPT_INCCOND mppt_INCCOND(); #endif
        if(Ibatt>Imax-1){
            error3=Ibatt-(Imax-1); inc=300*delta*error3; pwm=inc;
            set_pwm_duty_cycle(pwm);
        } break; }}
    case boost:
        boost_time=boost_time+millis()-boost_millis; boost_millis=millis();
        if
        (((Vbatt>12)&&(Vsolar<Vbatt+0.5)||Vbatt<=12)&&(Vsolar<12.5)||Ibatt>Imax)||Isolar<0.1)
        ||(Vbatt>Vboost+0.15)||Psolar<Pleast||Tbatt>Tmax){ charger_mode=off;
        MOSFET_OFF; break;
        }
        else {if (Vbatt< Vboost-0.25){ charger_mode=bulk; MOSFET_ON; break; }
        else{ if(boost_time>boost_settime){ charger_mode=float_mode; MOSFET_ON;
        break;
        }
        else {if(Vbatt>Vboost+0.02){ error1=Vbatt-(Vboost+0.02);
        inc=delta*500*error1;//if battery voltage >14.42 decrease pwm by the %error;we want thr
        pwm
        to be zero by the time we get to 14.6
        pwm=inc; set_pwm_duty_cycle(pwm); boost_time=boost_time+millis()-boost_millis;
        }
        if(Ibatt>Imax-1){
            error3=Ibatt-(Imax-1); inc=300*delta*error3;//if battery current >19 decrease pwm by the
            %error
            pwm=inc; set_pwm_duty_cycle(pwm); } break; } } }
        case float_mode:
            if

```

```

(((Vbatt>12)&&(Vsolar<Vbatt+0.5)| |(Vbatt<=12)&&(Vsolar<12.5)| |(Isolar<0.1)| |(Ibatt>Imax)
| |(Vbatt>Vboost+0.15)| |Psolar<Pleast| |Tbatt>Tmax)){
  charger_mode=off; MOSFET_OFF; break; }
else {if(Vbatt<(Vfloat-0.1)){
  charger_mode=bulk; MOSFET_ON; break; }
else {if (Vbatt>(Vfloat+0.02)){ error2=Vbatt-(Vfloat+0.02); inc=delta*500*error2; pwm-=inc;
set_pwmduycycle(pwm);
if(Ibatt>Imax-1){
  error3=Ibatt-(Imax-1); inc=300*delta*error3;//if battery current >19 decrease pwm by the
%error
  pwm-=inc; set_pwmduycycle(pwm); } break; }}
default: charger_mode=off; MOSFET_OFF; break; }}

void mppt_PandO(){
  if (Psolar<PrevPsolar){
    pwm-=delta;//if solar power has reduced,change track direction and add this negated value to
pwm
    PrevPsolar=Psolar; set_pwmduycycle(pwm); }
  else{ pwm+=delta;//else just add the normal pwm that is positive to pwm
    PrevPsolar=Psolar; set_pwmduycycle(pwm); }
}
void mppt_INCCOND(){
  float delta_P=Psolar-PrevPsolar; float delta_V=Vsolar-PrevVsolar; float delta_I=Isolar-Previsolar;
float gradient=delta_P/delta_V; if(delta_V!=0){ if(gradient>0){ pwm+=delta;
PrevPsolar=Psolar;
  PrevVsolar=Vsolar; Previsolar=Isolar; set_pwmduycycle(pwm); }
  else if(gradient<0){ pwm-=delta; PrevPsolar=Psolar; PrevVsolar=Vsolar;
Previsolar=Isolar; set_pwmduycycle(pwm); } }
else {if(delta_I>0){ pwm+=delta; PrevPsolar=Psolar; PrevVsolar=Vsolar; Previsolar=Isolar;
set_pwmduycycle(pwm);}
else if(delta_I<0){ pwm-=delta; PrevPsolar=Psolar; PrevVsolar=Vsolar; Previsolar=Isolar;
set_pwmduycycle(pwm);}} }
/*led system status indication
red light= battery undervoltage <30% ,<11.75V// warning light
purple light=battery overvoltage >14.5V
orange light =30% to 90% 11.75-12.5V
green light=battery full charge >90% 12.5-13.6V
blue light= no solar panel/battery//warning light
small green led= MPPT charger on(will be done from lm7805 secondary side)*/
void led_display(void)
{ if(Vbatt>Vboost+0.2) led_mode=purple; else if (Vbatt>12.5&&Vbatt<Vfloat)
led_mode=green;
  else if(Vbatt<11.75) led_mode=red; if (Vbatt<12.5| |Vsolar<0.25) led_mode=blue;

  switch (led_mode){
    case red: setColor(255, 0, 0); break;case green:setColor(0, 255, 0);break;case blue:setColor(0, 0,
255);
    break;case yellow:setColor(255, 255, 0); break ;case purple:setColor(80, 0, 80);break;case orange :

```

```

setColor(255,128,0);break;case black :setColor(0,0,0);break;}}
void setColor(int r, int g, int b)
{
#ifdef COMMON_ANODE r = 255 - r; g= 255 - g; b = 255 - b; #endif
analogWrite(R,r); analogWrite(G,g); analogWrite(B,b);}
//LCD display of system parameters
void lcd_display()
{ lcd.setCursor(0,0);lcd.print("PV");lcd.setCursor(3,0);lcd.write(PV_ICON);lcd.setCursor(7,0);
lcd.print("PWM");lcd.setCursor(11,0);lcd.write(PWM_ICON);lcd.setCursor(14,0);lcd.print("BATT");
//solar parameters
lcd.setCursor(0,1); lcd.print(Vsolar); lcd.print("V"); lcd.setCursor(0,2); lcd.print(Isolar);
lcd.print("A");
lcd.setCursor(0,3); lcd.print(Psolar); lcd.print("W");
//Duty cycle of pwm
lcd.setCursor(7,1);if (charger_mode==off){lcd.print("0"); lcd.print("."); lcd.print("00");}
else {lcd.print(pwm);lcd.print("%");}
//charging mode
lcd.setCursor(7,2);if (charger_mode==off){ lcd.print("OFF"); lcd.print(" "); lcd.print(" ");}
else if (charger_mode==bulk){ lcd.print("BULK"); lcd.print(" ");}else if (charger_mode==boost)
lcd.print("BOOST");else if (charger_mode==float_mode) lcd.print("FLOAT");
//boost time
lcd.setCursor(7,3);lcd.print(boost_time/60000);lcd.print ("min");
//battery parameters
lcd.setCursor(14,1); lcd.print(Vbatt); lcd.print("V"); lcd.setCursor(14,2); lcd.print(Ibatt);
lcd.print("A");
//Battery SoC
int pct=100*(Vbatt-10.5)/(12.7-10.5);//battery at 10% is 12.7V and at 0% is 10.5V
if (pct<0) pct=0; else if (pct>100) pct=100; lcd.setCursor(18,0); if (pct==0){ lcd.write(1);
} else {
lcd.print((char)(pct*5/100));//print battery icon based on battery SoC
} lcd.setCursor(14,3); pct=pct-(pct%10); lcd.print(pct); lcd.print("%"); lcd.print(" "); lcd.print("
");}

// Taking care of some special events.
void keypadEvent(KeypadEvent key){
switch (keypad.getState()){

char keypadmode(){
char key = keypad.getKey(); keypad.getState();
void settings(){ while(e<7){ editmode=e; if (editmode==0){ e++; setBattType();}else {if
editmode==1){ e++; setVboost();}else{if (editmode==2){ e++; setVfloat();}else {if
(editmode==3){
e++; setVboostTime();}else {if (editmode==4){e++; settempComp();}else
{if(editmode==5){e++;
void setBattType(){
lcd.clear(); lcd.setCursor(0,0); lcd.print("Set Battery Type"); lcd.setCursor(2,1);
lcd.print("V"); lcd.setCursor(3,1); lcd.print(":NEW VALUE"); lcd.setCursor(0,2); lcd.print(a);
lcd.print("V"); lcd.print(":CURRENT VALUE");

```

```

float cellboost=Vboost1/(a/2);//save per cell setpoint so that if we change battery type we can
respectively scale up depending on the no. of cells a/6
float cellfloat=Vfloat1/(a/2);//no need for adjusting temp compensation since its calculated per
cell
float cellLVD=LVD/(a/2); while(j<2){char key = keypad.getKey();

if (key){ strBattType[j]=key; lcd.setCursor(j,1); lcd.print(key); j++; }}
// j=0;//reset n incase we enter this loop again
lcd.clear(); Vboost1=cellboost*(a/2); Vfloat1=cellfloat*(a/2); LVD=cellLVD*(a/2);}

void setVboost(){ lcd.clear(); lcd.setCursor(0,0); lcd.print("Enter Boost Value"); lcd.setCursor(5,1);
lcd.print("V"); lcd.setCursor(6,1); lcd.print(":NEW VALUE"); lcd.setCursor(0,2);
lcd.print(Vboost1);
lcd.print("V"); lcd.print(":CURRENT VALUE"); while(k<5){char key = keypad.getKey();
if (key){ strboost[k]=key; lcd.setCursor(k,1); lcd.print(key); k++; }}
//k=0;//reset k incase we enter this loop again
lcd.clear(); Vboost=(Vboost1+(25-Tbatt)*temp_compensation);
}

void setVfloat(){ lcd.clear(); lcd.setCursor(0,0); lcd.print("Enter Float Value"); lcd.setCursor(5,1);
lcd.print("V"); lcd.setCursor(6,1); lcd.print(":NEW VALUE"); lcd.setCursor(0,2);
lcd.print(Vfloat1);
lcd.print("V"); lcd.print(":CURRENT VALUE");
while(l<5){char key = keypad.getKey();
if (key){ strfloat[l]=key; lcd.setCursor(l,1); lcd.print(key); l++; }
l=0; lcd.clear(); Vfloat=(Vfloat1+(25-Tbatt)*temp_compensation);}

void setLVD(){
lcd.clear(); lcd.setCursor(0,0); lcd.print("Enter LVD Value"); lcd.setCursor(5,1); lcd.print("V");
lcd.setCursor(6,1); lcd.print(":NEW VALUE"); lcd.setCursor(0,2); lcd.print(LVD);
lcd.print("V");
lcd.print(":CURRENT VALUE"); while(p<5){char key = keypad.getKey();
if (key){ strLVD[p]=key; lcd.setCursor(p,1); lcd.print(key); p++; } }
p=0; lcd.clear();

void setVboostTime()
{ lcd.clear(); lcd.setCursor(0,0); lcd.print("Enter Boost minutes"); lcd.setCursor(3,1);
lcd.print("min"); lcd.setCursor(6,1); lcd.print(":NEW VALUE"); lcd.setCursor(0,2);
lcd.print(strboostTime); lcd.print("min"); lcd.print(":CURRENT VALUE"); while(m<3){
char key = keypad.getKey();
if (key){ strboostTime[m]=key; lcd.setCursor(m,1); lcd.print(key); m++; }}
lcd.clear(); ; boost_settime={(unsigned long)(boost_settime1*60000);}

void settempComp()
{ lcd.clear(); lcd.setCursor(0,0); lcd.print("Cell TempCompensation"); lcd.setCursor(3,1);
lcd.print("mV/*C"); lcd.setCursor(8,1); lcd.print(":NEW VALUE"); lcd.setCursor(0,2);
lcd.print(strtempComp); lcd.print("mV/*C"); lcd.print(":CURRENT VAL"); while(n<3){
char key = keypad.getKey();
if (key){ strtempComp[n]=key; lcd.setCursor(n,1); lcd.print(key); n++; }}

```

```

    lcd.clear(); temp_compensation=(tempComp1*(a/2)/1000);}

void lcd_scroll(){ while(s<1){ lcd.clear(); lcd.home(); lcd.print("Batt Temp:"); lcd.print(Tbatt);
lcd.print("°C"); lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Vboost"); lcd.print(Vboost); lcd.print("V");
lcd.setCursor(0,2); lcd.print("Vfloat"); lcd.print(Vfloat); lcd.print("V"); lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("LOAD:"); if (load){ lcd.print("ON"); }else { lcd.print("OFF"); } delay(3000); s++;
lcd.clear(); } resetting();}

void load_engage(){ if(!load){//only if user has activated load mode
if(Psolar<Pleast&&Vbatt>LVD){ LOAD_ON; }else
{if(Psolar>Pleast&&Vbatt>Vfloat){
LOAD_ON; } else LOAD_OFF; }}elseLOAD_OFF;}

```

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

Señor: *Msc. Ing. Jacob Astocondor Villar*

Presente.-

Con fecha dos de junio de dos mil dieciséis ha expedido la siguiente Resolución de Consejo de Facultad de la FIEE:

**RESOLUCIÓN DE CONSEJO DE FACULTAD DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO N° 290-2016-CFFIEE. Bellavista, 02 de junio de 2016.**

Visto, el Proveído N° 1546-2016-DFIEE del Señor Decano de la FIEE, recibido en Secretaría Académica de la FIEE el 02 de junio de 2016, en el que adjunta el OFICIO N° 061-2016-UIFIEE del Director de la Unidad de Investigación de la FIEE, en la que se adjunta la Resolución de Comité Directivo de la Unidad de Investigación N° 022-2016-CDUIFIEE, de fecha 26 de mayo de 2016, en la que se Aprueba el Nuevo Proyecto de Investigación titulado: "CONTROLADOR DE SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO CON LÓGICA FUZZY", presentado por el Profesor Investigador MSc. Ing. JACOB ASTOCONDOR VILLAR, adscrito a la FIEE, en la categoría de Asociado a Tiempo Completo.

**CONSIDERANDO:**

Que, siendo la investigación una labor prioritaria y de fundamental importancia que todo docente debe desempeñar, en concordancia con el Art. 256° y el Art. 259.6° del Normativo Estatutario de la Universidad Nacional del Callao.

Que, con Resolución del Comité Directivo de la Unidad de Investigación N° 022-2016-CDUIFIEE, de fecha 26 de mayo de 2016 se resuelve: "APROBAR el Nuevo Proyecto de Investigación titulado: "CONTROLADOR DE SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO CON LÓGICA FUZZY" presentado por el profesor investigador MSc. Ing. JACOB ASTOCONDOR VILLAR".

Que, visto el Proveído N° 1546-2016-DFIEE del Señor Decano de la FIEE, recibido en Secretaría Académica de la FIEE el 02 de junio de 2016, en el que adjunta el OFICIO N° 061-2016-UIFIEE del Director de la Unidad de Investigación de la FIEE, en la que se adjunta la Resolución de Comité Directivo de la Unidad de Investigación N° 022-2016-CDUIFIEE, de fecha 26 de mayo de 2016, en la que se Aprueba el Nuevo Proyecto de Investigación titulado: "CONTROLADOR DE SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO CON LÓGICA FUZZY", presentado por el Profesor Investigador MSc. Ing. JACOB ASTOCONDOR VILLAR, adscrito a la FIEE, en la categoría de Asociado a Tiempo Completo.

Que, en Sesión Extraordinaria del Consejo de Facultad de la FIEE de fecha 02 de junio de 2016; teniendo como Segundo Punto de Agenda "Trabajos de Investigación", se acordó: REFRENDAR, la aprobación del Proyecto de Investigación del profesor MSc. Ing. JACOB ASTOCONDOR VILLAR, titulado: CONTROLADOR DE SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO CON LÓGICA FUZZY";

En uso de las atribuciones que le confieren los Artículos 180.5° y 180.23° del Estatuto de la Universidad Nacional del Callao.

**RESUELVE:**

1. **REFRENDAR**, la Resolución N° 022-2016-CDUIFIEE del Comité Directivo de la Unidad de Investigación de la FIEE, sobre el nuevo Proyecto de Investigación presentado por el profesor investigador en la Categoría Asociado a Tiempo Completo, MSc. Ing. JACOB ASTOCONDOR VILLAR, titulado: "CONTROLADOR DE SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO CON LÓGICA FUZZY" el mismo que tendrá una duración de quince (15) meses, con el apoyo administrativo de la Sra. Mercedes Anselma Porro Ayala y con un presupuesto de S/2,102.00 (Dos mil ciento dos y 00/100 soles), demandándose el Presupuesto del Gasto por cuenta de la UNAC.
2. **ELEVAR**, al Vicerrectorado de Investigación el mencionado Proyecto de Investigación para el trámite respectivo.
3. **TRANSCRIBIR**, la presente Resolución al Vicerrectorado de Investigación (VRI), Unidad de Investigación (UIFIEE) e interesado para conocimiento y fines consiguientes.

Fdo. Dr. Ing. JUAN HERBER GRADOS-GAMARRA.-Decano y Presidente del Consejo de Facultad de la FIEE.-Sello de Decano.- Fdo. Dr. Ing. SANTIAGO LINDER RUBIÑOS JIMENEZ.-Secretario Académico.-Sello de Secretario Académico.

SLRJ/lpt  
TRCF2902016

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

*Santiago Linder Rubiños Jimenez*

Dr. Ing. Santiago Rubiños Jimenez

SECRETARIO ACADÉMICO