

Universidad Nacional del Altiplano

Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica,
Electrónica y Sistemas

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica



“Diseño y simulación de un sistema energético fotovoltaico con control de seguimiento del punto de máxima potencia para proveer energía eléctrica eficiente en la región de Puno.”

TESIS

Presentado por:

Lenin Wilfredo Cuenta Luque

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Electrónico

Puno – Perú

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA**

“Diseño y simulación de un sistema energético fotovoltaico con control de seguimiento del punto de máxima potencia para proveer energía eléctrica eficiente en la región de Puno”

TESIS

Presentado por:

LENIN WILFREDO CUENTA LUQUE

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Electrónico

Fecha de sustentación: 27/12/2017



Aprobado por los jurados:

Presidente:

.....
Dr. Midwar Elias Valencia Vilca

Primer miembro:

.....
M.Sc. Luis Enrique Baca Wiesse

Segundo miembro:

.....
Ing. Jesús Vidal López Flores

Director de tesis:

.....
Dr. José Emmanuel Cruz de la cruz

Área : Automatización e Instrumentación

Tema : Aplicación de sistemas fotovoltaicos

DEDICATORIAS

Con infinita gratitud a mis queridos padres:

*A los Sr. Juan Cancio y Biviana ejemplos de
dignidad y sacrificio, que supieron guiarme por
la senda del bien con su apoyo incondicional en
el logro de mi profesión.*

A mis queridos hermanos: Gerardo,

Rafael, Zenaida, Haydee, María,

Reynaldo e Iván.

*A mis amigos con quienes compartimos los
mejores momentos en la vida estudiantil a
quienes nunca olvidaremos y siempre tendremos
presente.*

Lenin Wilfredo

AGRADECIMIENTOS

*A mis queridos padres, hermanos
por compartir grandes momentos y
su apoyo incondicional.*

*A los miembros de mí jurado por
sus valiosas sugerencias que me
ayudaron a culminar el presente
proyecto de investigación y mis
agradecimientos más sinceros a
todos ellos por valorar mi trabajo.*

*A mi director de tesis, por su
acertada dirección y valiosa
colaboración para el desarrollo.*

A mis amigos... y a la vida misma.

Lenin Wilfredo

CONTENIDO

Resumen.....	12
Abstract	13
 CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	14
1.1. El problema de la Investigación	15
1.2. Antecedentes de la Investigación.	17
1.3. Formulación del Problema	19
1.4. Importancia y utilidad del estudio	19
1.5. Objetivos de la investigación	20
1.5.1. Objetivo General	20
1.5.2. Objetivos Específicos.....	20
1.6. Caracterización del área de Investigación:	21
1.6.1. Limitaciones y ubicación.	23
 CAPÍTULO II	
REVISIÓN DE LITERATURA.....	24
2.1. Marco Teórico	24
2.1.1. Energía renovable	25
2.1.2. Sistemas fotovoltaicos	31
2.1.3. Celda y módulo FV	35
2.1.4. Estado de los algoritmos MPPT	40
2.1.5. Geometría solar	45
2.1.6. Conversión de potencia eléctrica	54
2.1.7. Control de Inversores	65
2.2. Marco Conceptual	76
2.3. Hipótesis de la Investigación.....	79
 CAPÍTULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS	80
3.1. Tipo y Diseño de Investigación.....	80
3.2. Población y muestra de la investigación	80
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	81
3.4. Procedimiento de recolección de datos	81
3.4.1. Estructura y del proyecto	81
3.4.2. Bloque de radiación solar.....	82
3.4.3. Descripción del panel solar	84
3.4.4. Algoritmo perturbar y observar (P&O).....	90

3.4.5. Diseño del convertidor boost	94
3.4.6. Diseño del inversor monofásico.....	99
3.4.7. Modelado de carga doméstica y red eléctrica	103
3.5. Procesamiento y análisis de datos	103

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	104
-------------------------------------	------------

4.1. Resultados	104
4.1.1. Simulaciones estáticas	104
4.1.2. Simulaciones en épocas de solsticio y equinoccio.....	109
4.1.3. Simulaciones con seguimiento.....	117
4.2. Discusión	122

CONCLUSIONES.....	123
--------------------------	------------

RECOMENDACIONES.....	124
-----------------------------	------------

BIBLIOGRAFÍA	125
---------------------------	------------

ANEXOS

Anexo A: Código para la radiación solar.....	127
Anexo B: Código para el panel solar	129
Anexo C: Código para P&O	130
Anexo D: Datasheet del panel solar.....	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema de instalación para la producción de energía solar en vivienda....	21
Figura 1.2: Mapa de referencia de la región Puno	23
Figura 2.1: Componentes de la radiación solar.....	26
Figura 2.2: Curva de radiación solar y horas solares pico	26
Figura 2.3: Tipos de energía solar	27
Figura 2.4: Planta solar en base de heliostatos para la generación de energía eléctrica. 28	
Figura 2.5: Concentrador cilíndrico y parabólico para la obtención de energía.....	29
Figura 2.6: Mapa de la energía solar incidente diaria promedio anual.....	30
Figura 2.7: Tipos de instalación sistemas fotovoltaicos	32
Figura 2.8: Sistemas fotovoltaicos aislados	32
Figura 2.9: Sistemas fotovoltaicos conectados a red	33
Figura 2.10: Sistemas fotovoltaicos híbridos.....	34
Figura 2.11: Estructura básica de una célula fotovoltaica y su mecanismo de trabajo... 35	
Figura 2.12: Terminología fotovoltaica; célula, modulo y array	36
Figura 2.13: Topologías de conexión de los PV. a) Serie, b) paralelo y c) Mixto.....	37
Figura 2.14: Circuito equivalente de un panel solar	38
Figura 2.15: Curvas Características PV de I-V y P-V.	39
Figura 2.16: Curvas de potencia vs voltaje en un panel fotovoltaico	40
Figura 2.17: Algoritmo PSO	43
Figura 2.18: Algoritmo perturbar observar	44
Figura 2.19: Inclinación del sol en el transcurso del año.....	46
Figura 2.20: Latitud y longitud terrestre	46
Figura 2.21 Movimiento de la tierra alrededor del sol	48
Figura 2.22: Trayectoria imaginaria del sol.....	49
Figura 2.23: Ángulos de posición del sol	50
Figura 2.24: Conversión de energía eléctrica	54
Figura 2.25: Topología convertidor Boost.....	55
Figura 2.26: Topología convertidor Boost con Condensador de entrada	55
Figura 2.27: Ckto equivalente elevador boost, encendido y apagado.....	56
Figura 2.28: Señales de compuerta, corrientes I_L y I_c del boost	57
Figura 2.29: Topología inversor monofásico de puente completo	61
Figura 2.30: Circuito del inversor monofásico	62
Figura 2.31: Tensión de Salida del inversor	63
Figura 2.32: Modulacón por ancho de pulso sinusoidal	66
Figura 2.33: Control de tensión de lazo simple	70
Figura 2.34: Control de tensión de doble lazo.	71

Figura 2.35: Filtro L conectado a la red eléctrica convencional.....	71
Figura 2.36: Inversor monofásico conectado a la red.....	72
Figura 2.37: Circuito equivalente del inversor	73
Figura 2.38: Diagrama fasorial del circuito despreciando la caída resistiva	73
Figura 2.39: Diagrama fasorial del circuito incluyendo el efecto de R.	74
Figura 3.1: Esquema general del sistema completo.....	82
Figura 3.2: Bloque función radiación solar	83
Figura 3.3: Modelado panel fotovoltaico en Simulink	85
Figura 3.4: Curvas características del módulo PV - 135W.....	86
Figura 3.5: Curva característica I-V radiación variable $T=25^{\circ}\text{C}$	87
Figura 3.6: Curvas Características P-V, radiación variable y $T=25^{\circ}\text{C}$	87
Figura 3.7: Curvas Características I-V Temperatura variable	88
Figura 3.8: Curvas Características P-V, Temperatura variable	89
Figura 3.9: Polarizaciones del MPPT en las curvas características del panel I-V y P-V	90
Figura 3.10: Diagrama de bloques para el algoritmo P&O	92
Figura 3.11: Diagrama de flujo para el algoritmo P&O	92
Figura 3.12: Bloque algoritmo P&O.....	93
Figura 3.13: Parámetros para el algoritmo P&O	94
Figura 3.14: Ciclo de trabajo D obtenido del algoritmo P&O.....	94
Figura 3.15: Circuito del convertidor elevador.....	97
Figura 3.16: Voltaje salida del convertidor	97
Figura 3.17: Rizo de voltaje salida del convertidor	98
Figura 3.18: Corriente en el inductor boost	98
Figura 3.19: Rizo de corriente en el inductor	98
Figura 3.20: Circuito del inversor monofásico de puente completo.....	99
Figura 3.21: Rama del inversor monofásico	100
Figura 3.22: Esquema obtención constante de referencia para el control.....	101
Figura 3.23: Esquema control para la obtención del ciclo de trabajo.....	102
Figura 3.24: Control de disparos Inversor Monofásico	102
Figura 3.25: Aproximación de la curva característica de consumo	103
Figura 4.1: Curvas características I-V P-V para 1000 W/m^2	105
Figura 4.2: Tensión módulo solar para radiación constante 1000 W/m^2	105
Figura 4.3: Radiación solar variable a los largo del día - 24 horas.....	106
Figura 4.4: Potencia, intensidad y tensión de salida del array solar	107
Figura 4.5: Potencia, intensidad y tensión de salida del convertidor boost	108
Figura 4.6: Tensiones de salida del módulo solar y convertidor boost.....	108
Figura 4.7: Intensidades inversor, hogar y red eléctrica – solsticio verano.....	110
Figura 4.8: Simulaciones completas - solsticio de verano.....	111
Figura 4.9: producción y consumo energético paneles, hogar y red– solsticio verano	112

Figura 4.10: Energía generada por los paneles estáticos	112
Figura 4.11: Intensidades Inversor, hogar y red eléctrica - Solsticio invierno	113
Figura 4.12: Simulaciones completas - Solsticio invierno	114
Figura 4.13: Producción consumo de energía PV, hogar y red - invierno.....	114
Figura 4.14: Intensidades inversor, hogar y red eléctrica – equinoccio otoño	116
Figura 4.15: Simulaciones completas - equinoccio otoño	116
Figura 4.16: Producción y consumo de energía PV, hogar y red – otoño	117
Figura 4.17: Un eje - Intensidades inversor, hogar y red eléctrica	118
Figura 4.18: Un eje – Simulaciones completas solsticio de verano.....	118
Figura 4.19: Un eje – Energía generada por los paneles solares	119
Figura 4.20: Dos ejes – Intensidades inversor, hogar y red eléctrica	120
Figura 4.21: Dos ejes – Simulaciones completas solsticio de verano	120
Figura 4.22: Dos ejes – Energía generada por los paneles	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Promedio anual de la irradiación solar diaria en el Perú.	31
Tabla 2.2: Comparativo entre distintos algoritmos de MPPT	41
Tabla 2.3: Número del día en base al día y mes	51
Tabla 2.4: Conmutación de los interruptores del inversor monofásico	62
Tabla 3.1: Parámetros y características más significativos del panel comercial	84
Tabla 3.2: Error relativo de los parámetros del módulo PV-135W	86
Tabla 3.3: Valores simulados I-V y P-V, irradiación Variable y T=25°C.....	88
Tabla 3.4: Valores simulados I-V y P-V, Temperatura Variable	89
Tabla 3.5: Codificación del algoritmo P&O	91
Tabla 3.6: Valores necesarios para el cálculo del convertidor boost.....	95
Tabla 4.1: Error relativo de los parámetros del array PV 10x5	106
Tabla 4.2: Resumen de energía producida del SFV	122

ACRÓNIMOS

MPPT	: Seguimiento del máximo punto de potencia
MPP	: Punto de Máxima Potencia
IGBT	: transistor bipolar de puerta aislada
DC/CC	: Corriente Continua
AC	: Corriente Alterna
V_{pmax}	: Voltaje en el punto de máxima potencia
I_{pmax}	: Corriente en el punto de máxima potencia
V_{oc}	: Tensión de circuito abierto
I_{sc}	: Corriente de cortocircuito
TC_v	: Coeficiente de temperatura de voltaje
TC_i	: Coeficiente de temperatura de corriente
P	: Potencia
V	: Voltaje
I	: Corriente
PWM	: modulación por ancho de pulso
CCM	: Conmutación Modo Continuo
DCM	: Conmutación Modo Discontinuo
P&O	: perturbación y observación
XOR	: compuerta XOR u OR exclusiva
Boost	: (o elevador) es un convertidor DC a DC
CC/CA	: inversor Monofásico
PV	: panel fotovoltaico
W/m^2	: vatios por metro cuadrado
α	: Ángulo de azimut
h	: Altura solar
ω	: Angulo horario
L	: Latitud
δ	: Declinación solar
β	: Ángulo de inclinación
I_{cs}	: Constante Solar
m	: Movimiento elíptico de la Terra alrededor del Sol
θ	: Ángulo de incidencia del rayos solares
n	: Numero de día del año
I_d	: Radiación solar sobre una superficie plana horizontal
SFV	: Sistemas fotovoltaicos
GPI	: Proporcional Integral Generalizado)
PSO	: Optimización por Enjambre de Partículas)

RESUMEN

En el presente proyecto de investigación denominada Diseño y simulación de un sistema energético fotovoltaico con control de seguimiento del punto de máxima potencia para proveer energía eléctrica eficiente en la región de Puno, muestra detalladamente el diseño, la implementación y simulación en el software Matlab/Simulink, con el objetivo de suministrar energía eléctrica a la vivienda durante las horas solares (día) e inyectando a la red eléctrica cuando se excede la demanda del consumo en la residencia.

Teniendo en cuenta el factor de la demanda del consumo de energía en la vivienda, se realiza un arreglo de paneles fotovoltaicos 10 en serie y 5 en paralelo (array PV 10x5), de donde se obtiene una potencia eléctrica máxima de 6.75KW, con parámetros estandarizados y normalizados (radiación solar 1000W/m² y Temperatura 25°C).

Para tal efecto, se realiza la transferencia de potencia generada a través de circuitos electrónicos de potencia como el convertidor elevador DC-DC y el inversor monofásico DC-AC, cada etapa requiere de un propio controlador.

Para dar solución la variación de los parámetros de radiación y temperatura y la no linealidad del modelo de los PV, se recurre implementar el algoritmo P&O para la conmutación de la compuerta del convertidor. También se implementa el controlador del inversor monofásico por el método sliding control, constituyendo en lazo de corriente y voltaje.

Palabras clave:

Radiación solar, Panel fotovoltaico, Algoritmos MPPT, Convertidor Boost, Inversor monofásico y Control en modo deslizante

ABSTRACT

In the present research project called Design and simulation of a photovoltaic energy system with monitoring control of the maximum power point to provide efficient electric power in the Puno region, it shows in detail the design, implementation and simulation in the Matlab / Simulink software, with the objective of supplying electricity to the house during the solar hours (day) and injecting into the electricity network when the consumption demand in the residence is exceeded.

Taking into account the demand factor of energy consumption in the home, an array of photovoltaic panels 10 in series and 5 in parallel (array PV 10x5) is made, from which a maximum electrical power of 6.75KW is obtained, with parameters standardized and standardized (solar radiation 1000W / m² and Temperature 25°C).

For this purpose, the transfer of power generated through electronic power circuits such as the DC-DC boost converter and the single-phase DC-AC inverter is carried out, each stage requires its own controller.

To solve the variation of the radiation and temperature parameters and the non-linearity of the PV model, it is necessary to implement the P & O algorithm for the switchover of the converter gate. The controller of the single-phase inverter is also implemented by the sliding control method, constituting a current and voltage loop.

Keywords:

Solar Radiation, Photovoltaic Panel, MPPT Algorithms, Boost Converter, Single Phase Inverter and Sliding Mode Control

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La generación de energía fotovoltaica mediante la utilización de paneles solares promete ser una fuente limpia y de amplia aplicación para fuentes de energía renovable. Entre las numerosas fuentes de energía renovable, la energía solar juega un papel importante debido a la naturaleza libre de contaminación, debido a las propiedades de la energía captada a partir de la radiación solar se han desarrollado diversas interfaces electrónicas de potencia para poder interconectar este tipo de sistemas a la vivienda o red eléctrica.

En este trabajo se realiza un análisis individual de todos los componentes que conforman un sistema conectado a vivienda y red; panel solar, convertidor DC-DC e Inversor DC-AC, con sus respectivos controladores; realizando el modelamiento de cada uno de los sistemas. Finalmente se presenta los resultados obtenidos mediante simulación en MATLAB SIMULINK.

El proyecto se ha esquematizado de la siguiente manera, en el Capítulo I, se describen el planteamiento del problema, antecedentes, justificación, objetivos, hipótesis y limitaciones de la investigación.

En el Capítulo II, detallamos el marco teórico donde explicamos la importancia de la energía solar como fuente alternativa, la situación energética en el Perú, el estudio de la geometría solar y los conceptos relacionados, convertidores de potencia e inversores, comparación de algoritmos MPPT, agrupación de paneles y controladores.

En el Capítulo III, procedemos el cálculo e implementación de los modelos matemáticos en MATLAB/SIMULINK. En el Capítulo IV, el análisis e interpretación de los resultados de las simulaciones de sistema con todas las etapas conectadas, y por último se incluyen los anexos.

1.1. El problema de la Investigación

Actualmente, uno de los mayores retos a nivel mundial es satisfacer la creciente demanda de energía, haciéndolo de manera sustentable. Hoy en día, el 80% de la energía total generada proviene de los hidrocarburos. Los problemas con este tipo de energías no solo tienen que ver con la creciente escasez de materia prima y con su relación directa con el calentamiento global, sino también con temas como la contaminación del aire, lluvia ácida, disminución de la capa de ozono y destrucción de áreas forestales, debido a esto el desarrollo de energías alternas ha tomado cada vez mayor importancia.

Es predecible que las fuentes energéticas no renovables como el petróleo, gas natural y carbón se agoten en un futuro próximo, por otra parte es claro que el desarrollo industrial y socioeconómico de un país depende fuertemente de la solución de su problemática energética, razón por la cual surgen varias alternativas basadas en energías renovables pretendiendo responder a la demanda de energética.

Una de las energías sustentables que mayor crecimiento ha tenido en los últimos años es la energía fotovoltaica, debido a sus varias ventajas, una de las vías hacia el uso de la energía renovable es el aprovechamiento de la energía solar, el uso de dicha energía no es una idea novedosa, ya que la humanidad ha hecho uso de esta desde hace siglos.

Si bien esta energía es abundante, universal y con un impacto ambiental bajo, la ingeniería ha encontrado grandes limitantes en su utilización, como es el hecho de su carácter oscilante e intermitente, su dispersión, su baja intensidad, las bajas eficiencias de conversión asociadas a los actuales dispositivos y su complicado almacenamiento.

Sin embargo, es a partir de la década de 1970 que se ha incrementado la investigación y desarrollo de esta alternativa buscando aumentar la eficiencia y una idealizada convivencia con la naturaleza en una perspectiva de desarrollo sustentable.

Según el estudio publicado en el 2007 por World Energy Council, para el año 2100 el 70% de la energía consumida será de origen solar, según informes de Greenpeace, la fotovoltaica podrá suministrar electricidad a dos tercios de la población mundial en el 2030.

Actualmente los sistemas fotovoltaicos, ya sean paneles fotovoltaicos colectores solares o concentradores solares son la mayoría de carácter estático, por lo cual no aprovechan al máximo la obtención de energía solar ya que durante el día solo estará un corto periodo de tiempo con incidencias solar perpendicular al área de captación.

Para solucionar este problema surgen los algoritmos MPPT y seguimiento solar conformado por una estructura mecánica de uno o dos grados de libertad (ejes) accionado por motores, los cuales mediante un censado electrónico de los rayos solares direccionan la carga (panel fotovoltaico, colectores solares, concentrador solar, etc.) perpendicular a la incidencia solar. (H. J. Neri, 2016)

1.2. Antecedentes de la Investigación.

Internacionales

En el ámbito internacional se puede nombrar algunas investigaciones y desarrollos de proyectos referidos a este tema como por ejemplo:

a) Sistema fotovoltaico con seguimiento de máxima potencia y regulación de tensión bajo condiciones de sombreado parcial, Tesis Maestría en Ciencias, desarrollado por Ernesto Josué Neri Rodríguez, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico – México, febrero del 2016.

Desarrollando un control del tipo GPI para regular el voltaje en la carga en un sistema fotovoltaico, garantizando la operación en el punto de máxima potencia mediante el algoritmo PSO. Para que un SFV sea considerado como una alternativa redituable a las fuentes de energía convencionales es necesario utilizar un algoritmo de MPPT, para aprovechar al máximo la energía del arreglo de los paneles.

Concluyendo, Para implementar un sistema fotovoltaico se requiere de una inversión inicial elevada. En cuanto al algoritmo MPPT a utilizar, no puede concluirse llanamente que uno sea mejor que otro en cualquier situación, ya que esto depende de las condiciones en que vaya a utilizarse el SFV. Si se considera utilizarlo en una zona en que todos los paneles recibirán exactamente la misma irradiancia en todo momento, un algoritmo de MPPT sencillo como P&O puede ser suficiente

Nacionales

a) “Diseño e implementación de un seguidor solar para el control electrónico de un reflector Scheffler”, tesis para optar el título de ingeniero electrónico, que presentado el bachiller: Frank Roger Loayza Ochoa, pontificia universidad católica del Perú, marzo 2012.

Esta tesis tiene como objetivo principal diseñar e implementar un seguidor solar para el control electrónico, basado en microprocesador, de un reflector parabólico tipo Scheffler. Este reflector solar, que ya fue construido por el GRUPO PUCP, tiene como finalidad poder cocinar con la energía del Sol en zonas rurales de la manera más cómoda, barata y eficiente posible.

Conclusiones; Luego de una exhaustiva indagación, se pudo estudiar y asimilar los fundamentos, conceptos teóricos y prácticos implícitos en la investigación del presente trabajo, lo que permitió dar cumplimiento a los objetivos, seleccionando el método para el seguimiento solar.

b) “sistema solar fotovoltaico de conexión a red en el centro materno infantil de la universidad de Piura”, Héctor Armando Cornejo Lalupú, Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico – Eléctrico, Universidad de Piura, Octubre del 2013. El objetivo general es elaborar un manual técnico con el fin de ser una guía para el dimensionamiento, diseño e instalación de un sistema fotovoltaico conectado a red, conformado por módulos fotovoltaicos, inversor y un medidor o contador de energía.

En conclusión, esta tecnología de conversión de energía tiene la ventaja principal es que puede ser extraída de un modo “renovable”. Se espera que esta alternativa de energía renovable sea conveniente en un futuro de energía sostenible por las siguientes razones: está más extensamente disponible comparada con los combustibles fósiles, Puede mejorar el desarrollo de economías locales y crear empleos, Los resultados económicos muestran que el sistema es rentable recuperando la inversión inicial al octavo año de funcionamiento, etc

Locales.

a) Existen algunas tesis similares al propuesto como se puede mencionar “Diseño e implementación de un módulo de seguimiento solar sensorless mediante coordenadas solares y GPS para la captación de la radiación solar en sistemas térmico Fotovoltaicos”, Ingeniería Electrónica, UNA-PUNO, 2012.

Donde se abarca como el diseño e implementación de un módulo de seguimiento solar sensorless mediante coordenadas solares y GPS para aumentar la eficiencia de captación y aprovechamiento del recurso energético en sistemas térmico fotovoltaicos. Conclusión: Se logró implementar el modulo e sensorless satisfactoriamente, utilizando los modelos de Spencer y Ashrae con una precisión de 0.4894 grados para la azimut solar y con 0.1184 grados para la altura solar respecto a los datos de Censol 5.

1.3. Formulación del Problema

La interrogante principal de la presente investigación es: ¿Cómo diseñar un sistema fotovoltaico para abastecimiento eficiente de energía eléctrica?

1.4. Importancia y utilidad del estudio

El desarrollo de la actividad humana y la disponibilidad de la energía son dos factores que están íntimamente ligados y se deduce de ella, por ejemplo, en las zonas alejadas y de escasos recursos económicos del país son justamente aquellas en las que el coeficiente de electrificación es el más bajo.

El presente proyecto se centra en las energías renovables. Una de las energías sustentables que mayor crecimiento ha tenido en los últimos años es la energía fotovoltaica, debido a las ventajas señaladas anteriores. Sin embargo, los paneles solares presentan una baja eficiencia, por lo que es de vital importancia en cualquier SFV, implementar un algoritmo de control como MPPT.

En el estado de arte existen varias las estrategias para aprovechar la luz solar, una de las formas que realmente llamo la atención fue la empleada por el Helianthusannuus o comúnmente conocido como girasol. La estrategia del girasol para obtener el máximo rendimiento de la energía solar consiste en el constante encaramiento de la superficie al Sol, siguiendo en todo momento el desplazamiento solar a lo largo del día y obteniendo así una incidencia de los rayos solares totalmente perpendicular (90°).

Es entonces cuando en los paneles fotovoltaicos se introducen ejes que permitan la movilidad para el seguimiento de la perpendicularidad de los rayos solares, lo que unido a un control para la búsqueda del Punto de Máxima Potencia, emule con bastante fidelidad el movimiento de un girasol, lo que permite extraer el máximo rendimiento de los PV.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo General

- El objetivo del presente proyecto es el estudio y la simulación de un sistema fotovoltaico completo, compuesto por arreglo de PV, un convertidor elevador CC/CC, un inversor DC/CA, consumo de energía en la vivienda y la red eléctrica.

1.5.2. Objetivos Específicos

- a. Estudio de los sistemas fotovoltaicos relacionado con la geometría y energía solar.
- b. Estudio y comparación de los algoritmos MPPT y métodos de control de inversores
- c. Estudio y diseño de los convertidores de potencia DC-DC y DC/AC
- d. Desarrollar, simular y analizar el sistema mediante herramientas MATLAB/SIMULINK

1.6. Caracterización del área de Investigación:

El diseño y simulación del sistema energético fotovoltaico con control de seguimiento del punto de máxima potencia, podrá transformar la potencia DC en AC de manera eficiente y a un bajo costo de implementación.

Propuesta

Se modela un sistema fotovoltaico que constara de: Arreglo de paneles fotovoltaicos (10 panes en serie y 5 en paralelo), Convertidor elevador CC/CC tipo Boost, inversor monofásico CC/CA, vivienda y red eléctrica.

Se simulará y analizará el comportamiento del sistema descrito, utilizando el software Matlab/Simulink. Y con la ayuda del software PSIM para la simulación de la etapa de potencia y se hace una descripción general del proyecto propuesto.

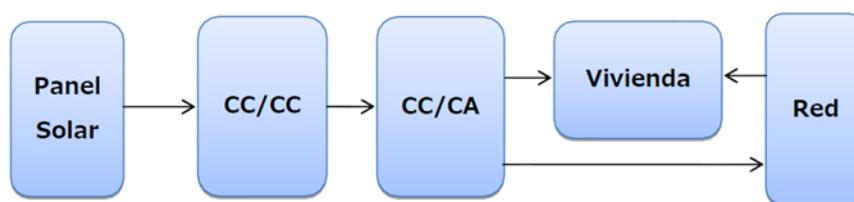


Figura 1.1: Esquema de instalación para la producción de energía solar en vivienda

Fuente: Elaborado por el investigador

En la Figura 1.1 podemos ver la disposición de cada uno de los elementos que conforman el circuito, de una forma muy general. En primer lugar tenemos el modulo con paneles fotovoltaicos que será el encargado de generar energía eléctrica a través de la luz solar, esta debe proporcionar la potencia necesaria para autoabastecer el consumo doméstico o ya sea industrial. Los paneles fotovoltaicos por si solos no son capaces de producir la tensión suficiente para poder conectar el sistema a los 311V de pico y 60Hz de la red alterna convencional.

Es por esta razón a la salida del módulo PV, se dispone de un convertidor elevador boost, capaz de elevar la tensión que aportan los paneles. Además permite acoplar algoritmo MPPT, para aplicar pulsos en el dispositivo de conmutación del convertidor elevador.

Una vez obtenido la tensión de corriente continua elevada a la salida del convertidor, superior a 311V, deberemos procesarla a través de un inversor para convertirla de continua a alterna y de esta forma poder inyectarla a red a 220 Voltios eficaces. Al igual que en el convertidor, el inversor también dispone de su propio control.

Una vez obtenida nuestra señal de alterna a la salida del inversor, tan solo debemos conectarla a nuestra vivienda y seguidamente a la red eléctrica. De esta forma durante el día nuestros paneles solares se encargarán de proporcionar la energía para ser consumida por nuestras cargas domésticas, y como otra opción venderla la energía sobrante a la empresa suministradora de energía eléctrica para que está suministre por la noche.

Para implementar este sistema se ha escogido el entorno Simulink del programa Matlab, una de las razones para esta elección ha sido su relativamente sencilla interfaz que permite resolver problemas más o menos complejos de distintas áreas de la ingeniería gracias a su extenso abanico de librerías. Además la posibilidad de programar en lenguaje Matlab con bloques de función ha permitido simplificar en gran medida la implementación de funciones matemáticas para el modelaje de los distintos elementos.

1.6.1. Limitaciones y ubicación.

No se realizará ninguna validación experimental del sistema propuesto y tampoco se realizará un análisis económico o estudio de factibilidad del mismo.

El proyecto se desarrolla en la región de Puno-Perú Figura 1.2, las coordenadas geográficas estarían marcadas como Latitud Sur: $15^{\circ}50'31''$ ($13^{\circ} 66' 00''$ y $17^{\circ}17' 30''$), Longitud Oeste $70^{\circ}01'11''$ ($71^{\circ}06' 57''$ y $68^{\circ}48' 46''$) y Altitud sobre el nivel del mar: 3830m.

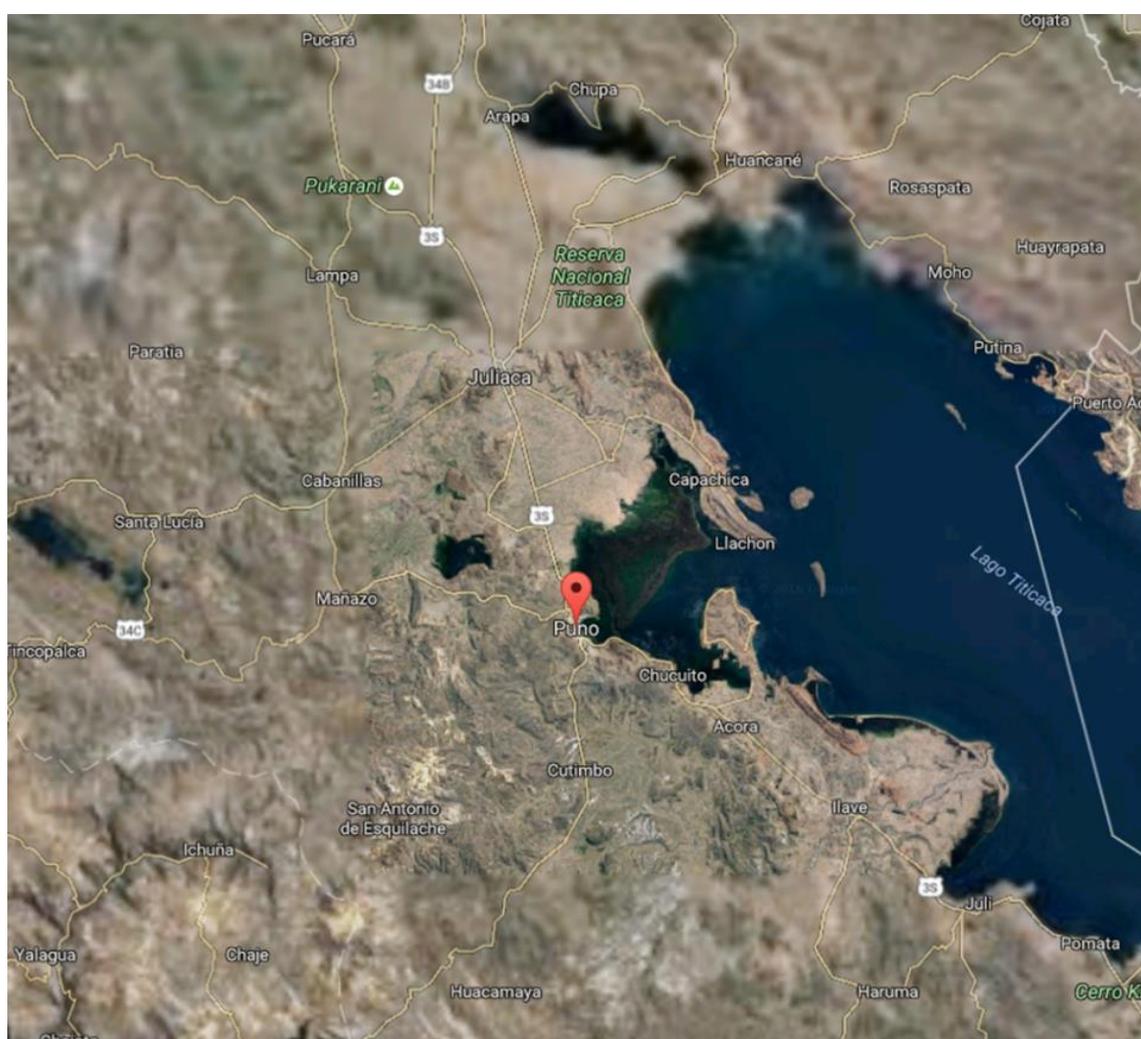


Figura 1.2: Mapa de referencia de la región Puno

Fuente: <https://www.google.com.pe/maps>

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco Teórico

Una de las energías sustentables que mayor crecimiento ha tenido en los últimos años es la energía fotovoltaica, debido a sus varias ventajas, una de las vías hacia el uso de la energía renovable es el aprovechamiento de la energía solar, el uso de dicha energía no es una idea novedosa, ya que la humanidad ha hecho uso de esta desde hace siglos.

La ingeniería ha encontrado grandes limitantes en su utilización, como es el hecho de su carácter oscilante e intermitente, su dispersión, su baja intensidad, las bajas eficiencias de conversión asociadas a los actuales dispositivos y su complicado almacenamiento.

Sin embargo, es a partir de la década de 1970 que se ha incrementado la investigación y desarrollo de esta alternativa buscando aumentar la eficiencia y una idealizada convivencia con la naturaleza en una perspectiva de desarrollo sustentable.

Se presenta a continuación el fundamento teórico de los sistemas fotovoltaicos.

2.1.1. Energía renovable

El consumo de energía eléctrica a nivel mundial está avanzando de manera rápida debido al desarrollo de las industrias, el transporte, los medios de comunicación y otras aplicaciones que se dan a la misma. De esta manera existen diferentes recursos que se explotan para la obtención de energía eléctrica como el carbón, petróleo, gas natural y uranio. (Abella, 2005)

El uso de estas fuentes o recursos no renovables conlleva problemas como el impacto ambiental producido por las emisiones del gas de efecto invernadero. Es por eso que al ser recursos limitados se está optando por el uso de energías alternativas a partir de fuentes o recursos renovables.

La Energía Renovable es toda fuente de energía natural e inagotable presente en la naturaleza como la energía del sol la cual es aprovechada de manera directa o indirecta.

2.1.1.1. Energía y radiación solar

La energía solar está constituida por la fracción de luz que emite el sol, y que es interceptada por la Tierra en su superficie, y por tanto se encuentra condicionada por factores de tipo astronómico y geográfico (posición relativa sol-tierra y lugar donde esté ubicado el sistema) así como de tipo climatológico. Debido a estas condiciones, el total de la radiación que incide el sol en la superficie terrestre está compuesto. Figura 2.1

- **Radiación Directa:** Es la radiación que proviene directamente del sol en forma de rayos paralelos sin sufrir algún tipo de distorsión
- **Radiación Difusa:** Es la radiación en forma de rayos dispersos que llega a la superficie de la tierra luego de haber sido interceptada por los diferentes elementos de la atmósfera
- **Radiación Reflejada:** Es la radiación que proviene de la reflexión producida por los rayos al ser interceptados por elementos de la superficie de la tierra
- **Radiación Global:** Esta radiación es el resultado de la sumatoria de la radiación directa con la radiación difusa sobre la superficie de la tierra.

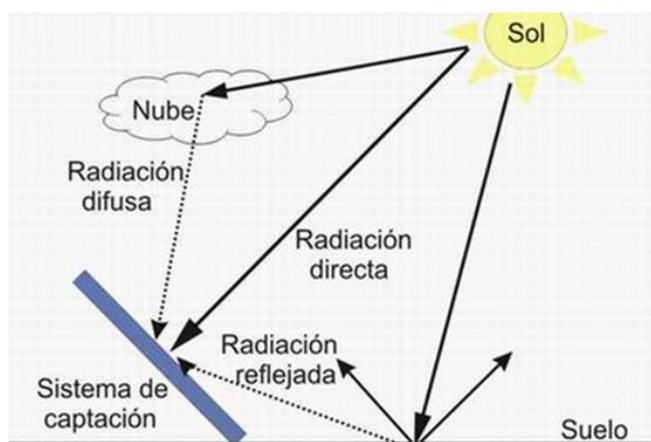


Figura 2.1: Componentes de la radiación solar

Fuente: <http://www.monografias.com>

La radiación solar está definida como el flujo de energía que llega hacia la tierra en forma de ondas electromagnéticas. Esta se mide en términos de $[W/m^2]$ y el valor máximo de radiación en la superficie terrestre es de $1000W/m^2$. Figura 2.2

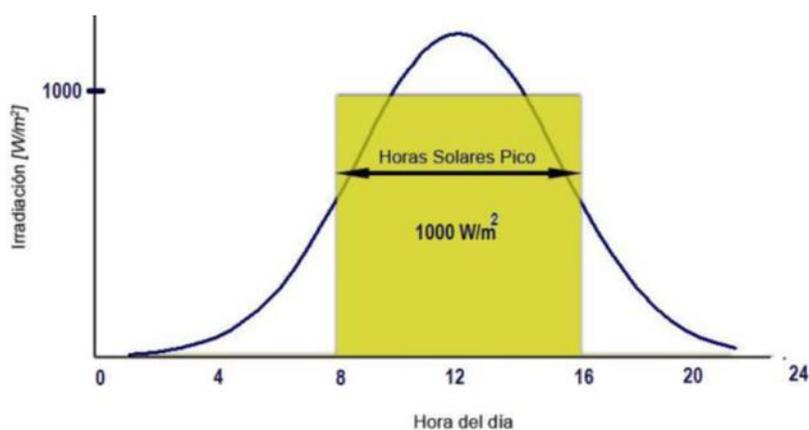


Figura 2.2: Curva de radiación solar y horas solares pico

Fuente: Abella 2005

La radiación es un parámetro muy importante en el diseño de sistemas solares, los factores climáticos, el ángulo de posicionamiento del panel con respecto al sol y otros que afectan la captación de manera eficiente.

2.1.1.2. Tipos de energía solar

El flujo de radiación solar que llega a la tierra es la fuente primaria de todas las formas de energía conocidas, siendo muy variadas su aprovechamiento de diferentes maneras para la creación de energía eléctrica a partir de: (Figura 2.3)

- a. Cambios de presión
 - Vientos (energía eólica)
- b. Condensación
 - Ciclo agua (energía hidroeléctrica)
- c. Radiación solar
 - Fotosíntesis (energía biomasa)
 - Efecto fotovoltaico (energía fotovoltaica)

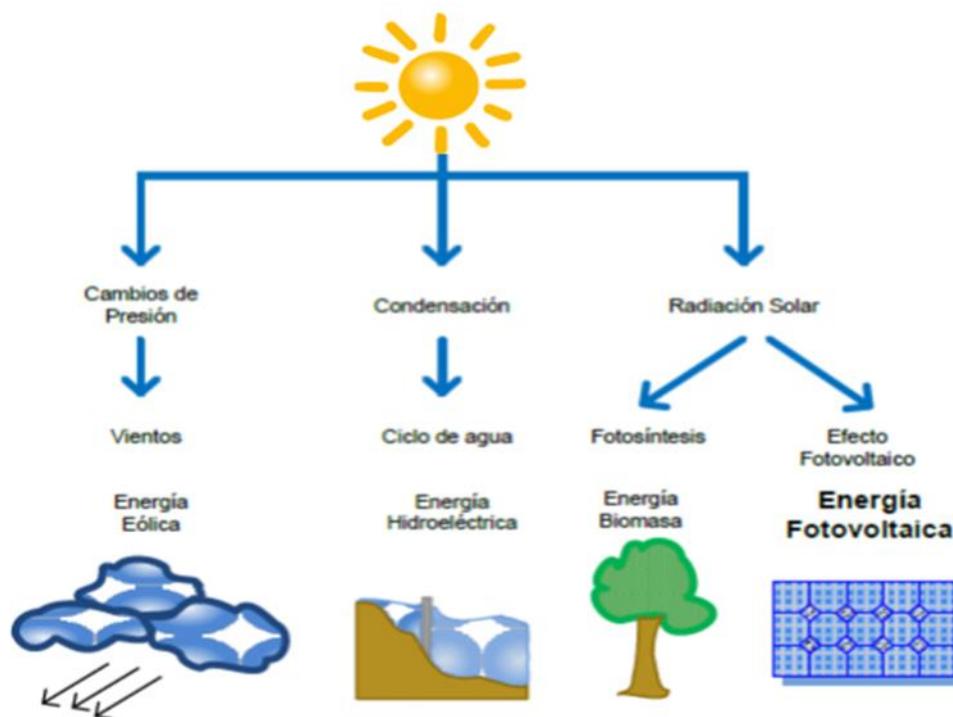


Figura 2.3: Tipos de energía solar

Fuente: <http://www.rinconeducativo.org/aplicaciones-de-la-energia-solar-fotovoltaica>

2.1.1.3. Aplicaciones de la energía solar

Las principales aplicaciones de la energía solar es la obtención de la energía eléctrica y energía calorífica/térmica:

La primera se obtiene mediante la aplicación de paneles fotovoltaicos el cual utiliza el efecto fotoeléctrico para capturar fotones y el cual pondrá en movimiento los electrones usando algunos materiales como el silicio.

Esta alternativa sigue en constante investigación respecto a la eficiencia de conversión que lleva de 10% para células monocristalinas y 15% para células policristalinas. Actualmente en laboratorios experimentales se han obtenido eficiencia de conversión de hasta 30% pero aún no se comercializan, se estima dentro de los próximos años ya estarán disponibles.

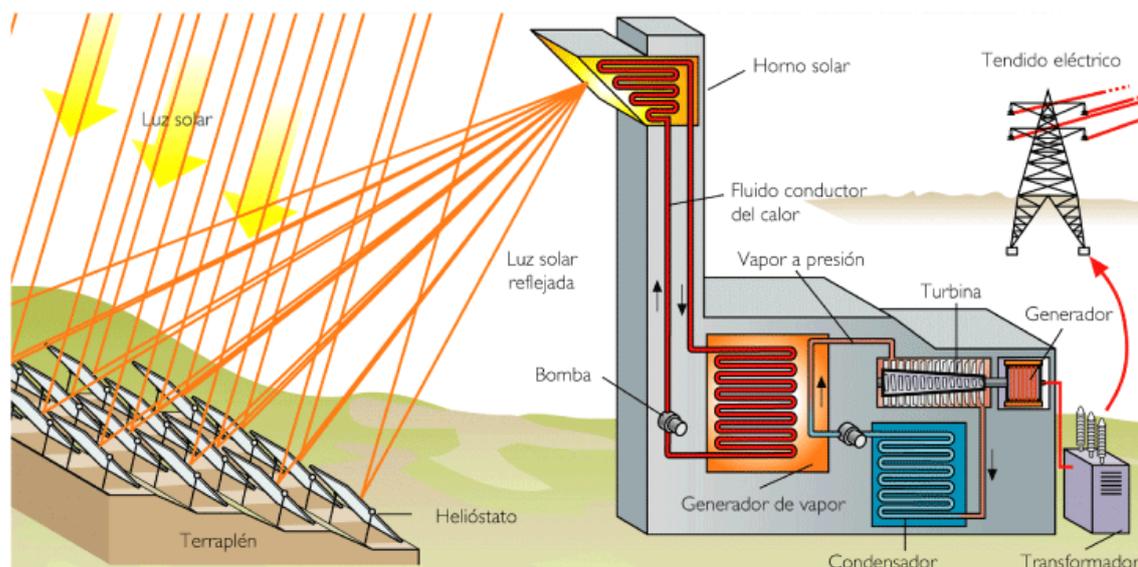


Figura 2.4: Planta solar en base de heliostatos para la generación de energía eléctrica

Fuente: (Kalogirou, 2009)

También se puede obtener energía eléctrica mediante plantas solares termo-eléctricas en base a heliostatos que concentran la radiación en una torre la cual genera vapor el cual acciona turbinas y así genera electricidad, estas plantas tienen una eficiencia de conversión en el orden del 50% con el cual nos permite obtener energía eléctrica en Mega Watts. Se muestra en la Figura 2.4.

Otra aplicación importante es la obtención de la energía térmica, si este fuera el caso obtendríamos energía con una eficiencia de conversión en el orden del 70% que viene a representar la más alta comparada con todas las anteriores mencionadas, las aplicaciones de la energía térmica es variada tanto para el uso doméstico o el uso industrial se presenta en la Figura 2.5.

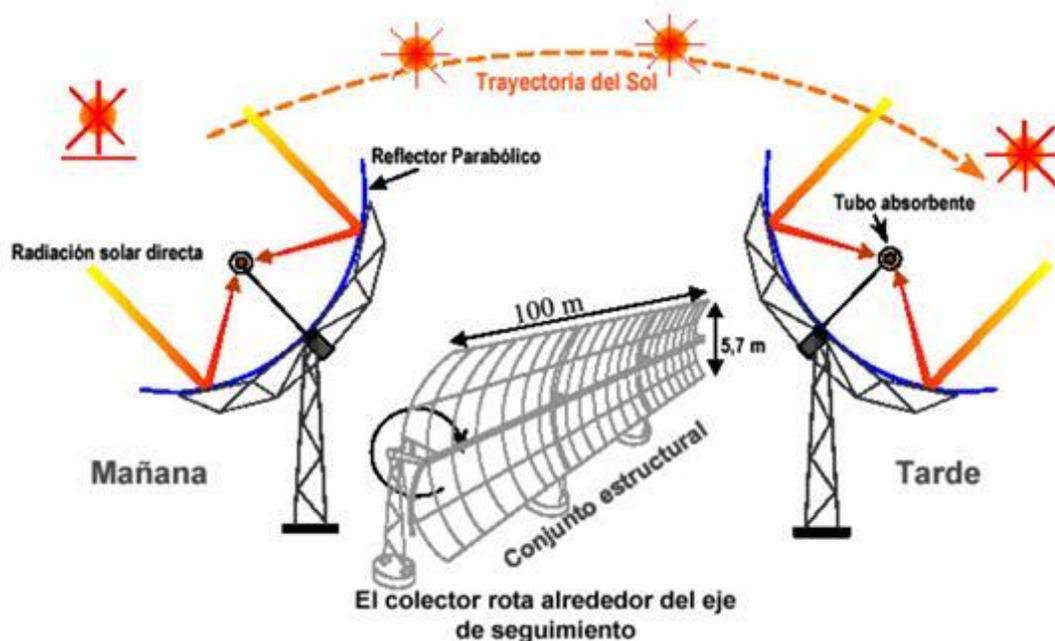


Figura 2.5: Concentrador cilíndrico y parabólico para la obtención de energía

Fuente: (Kalogirou, 2009)

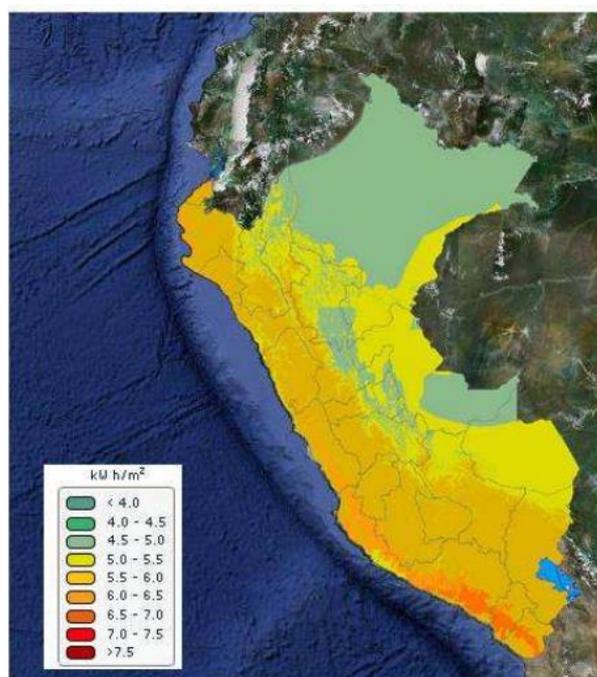
A continuación mencionamos todas las posibles aplicaciones de la energía solar tanto para el uso doméstico como para el uso industrial:

- Calentamiento de agua
- Generación de energía eléctrica
- Refrigeración
- Calefacción domestica
- Destilación (desalinización)
- Fotosíntesis
- Hornos solares
- Cocinas solares
- Evaporación y generación de vapor
- Acondicionamiento de aire
- Secadores solares
- Eliminación de bacterias mediante la concentración de radiación U.V.

Como vemos para la mayoría de aplicaciones donde se requiere una eficiencia de conversión es necesario el uso de seguidores solares o los algoritmos MPPT como en el proyecto actual que se desarrolla.

2.1.1.4. Situación de la energía solar en el Perú

El Perú cuenta con un gran potencial de energía solar, gracias a sus características geográficas y climatológicas. La dirección ejecutiva de proyectos del Ministerio de energía y Minas ha encargado al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) la elaboración de un mapa solar. Esto permitirá cuantificar el potencial disponible y sirve como una herramienta importante para la elaboración de proyectos que se presentan en la Figura 2.6 y Tabla 2.1.



Recurso energético con mayor disponibilidad en casi todo el territorio nacional.

	Promedio Anual (kwh/m2)
Costa Sur	: 6,0 – 6,5
Costa Centro	: 5,5 – 6,0
Sierra	: 5,5 – 6,0
Selva Sur	: 5,0 – 5,5
Selva Norte	: 4,5 – 5,0

Figura 2.6: Mapa de la energía solar incidente diaria promedio anual

Fuente. Atlas de energía solar del Perú.

El ministerio de energía y minas, como ente promotor de las energías renovables, está desarrollando un importante proyecto para desimación de equipos de energía solar fotovoltaica en zonas rurales, aplicando criterios de calidad de energía y sostenibilidad en el tiempo. (Ministerio de Energía y Minas, Junio 2003)

Tabla 2.1: Promedio anual de la irradiación solar diaria en el Perú.

ORDEN	LOCALIDAD	DISTRITO	PROVINCIA	DEPARTAMENTO	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD (metros)	IRRADIACION SOLAR Promedio Anual (kWh/m ²)
1	IQUITOS	IQUITOS	MAYNAS	LORETO	73° 15 27	03° 44 47	125	3.73
2	EL CENEPA	EL CENEPA	CONDORCANQUI	AMAZONAS	78° 09 36	04° 27 45	240	2.89
3	REQUENA	REQUENA	REQUENA	LORETO	73° 50 51	05° 03 14	180	3.66
4	HDA EL VALOR	EL MILAGRO	UTCUBAMBA	AMAZONAS	78° 38 36	05° 39 33	421	4.49
5	YURIMAGUAS	YURIMAGUAS	ALTO AMAZONAS	LORETO	76° 06 17	05° 53 26	185	4.14
6	JUAN GUERRA	JUAN GUERRA	SAN MARTIN	SAN MARTIN	76° 19 44	06° 34 46	330	3.95
7	CAJAMARCA	CAJAMARCA	CAJAMARCA	CAJAMARCA	78° 30 58	07° 09 06	2640	4.47
8	PADRE ABAD	PADRE ABAD	PADRE ABAD	UCAYALI	75° 30 27	09° 01 58	270	4.02
9	TINGO MARIA	RUPA-RUPA	LEONCIO PRADO	HUANUCO	75° 59 41	09° 17 30	640	4.02
10	HUANUCO	HUANUCO	HUANUCO	HUANUCO	76° 14 25	09° 55 27	1895	4.52
11	HUMAYA	LEONCIO PRADO	HUALAURA	LIMA	77° 00 00	11° 06 00	750	4.66
12	SAN RAMON	SAN RAMON	CHANCHAMAYO	JUNIN	75° 21 04	11° 07 05	800	3.98
13	IBERIA	IBERIA	TAHUAMANU	MADRE DE DIOS	69° 32 24	11° 23 17	350	3.68
14	HUACHAC	HUACHAC	CHUPACA	JUNIN	75° 20 29	12° 00 50	3350	4.97
15	SANTA ANA	SANTA ANA	LA CONVENCION	CUSCO	77° 41 30	12° 51 37	920	4.01
16	AYACUCHO	AYACUCHO	HUAMANGA	AYACUCHO	74° 13 25	13° 09 26	2760	4.89
17	SAN JERONIMO	SAN JERONIMO	CUSCO	CUSCO	71° 52 59	13° 32 24	3220	4.69
18	ABANCAY	ABANCAY	ABANCAY	APURIMAC	72° 52 30	13° 38 02	2376	4.75
19	MANRIQUE	INDEPENDENCIA	PISCO	ICA	76° 01 52	13° 41 18	200	4.52
20	PARCONA	PARCONA	ICA	ICA	75° 42 04	14° 02 29	389	5.04
21	ICA	ICA	ICA	ICA	75° 43 24	14° 03 60	390	4.89
22	HDA MAJORO	NAZCA	NAZCA	ICA	74° 59 19	14° 50 20	410	5.02
23	MARCONA	MARCONA	NAZCA	ICA	75° 06 34	15° 12 34	620	4.94
24	HUARAYA	MOHO	MOHO	PUNO	69° 28 14	15° 23 25	3890	5.16
25	SIBAYO	SIBAYO	CAYLLOMA	AREQUIPA	71° 27 16	15° 28 54	3647	4.94
26	PUNO	PUNO	PUNO	PUNO	70° 01 38	15° 50 08	3675	5.19
27	JULI	JULI	CHUCUITO	PUNO	69° 27 26	16° 12 39	3652	5.05
28	PAMPA DE MAJES	SANTA ISABEL DE SIGUAS	AREQUIPA	AREQUIPA	72° 11 42	16° 19 32	1440	5.61
29	AREQUIPA	AREQUIPA	AREQUIPA	AREQUIPA	71° 31 60	16° 23 49	2350	5.31
30	CHARACATO	CHARACATO	AREQUIPA	AREQUIPA	71° 28 55	16° 28 01	2451	5.32
31	MOQUEGUA	MOQUEGUA	MARISCAL NIETO	MOQUEGUA	70° 55 58	17° 11 27	1412	5.36
32	PAUCARANI	PACHIA	TACNA	TACNA	69° 46 09	17° 30 42	4541	5.41
33	CALANA	CALANA	TACNA	TACNA	70° 11 08	17° 56 17	675	4.99

Fuente: (Ministerio de Energía y Minas, Junio 2003)

2.1.2. Sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos o SFV se refieren a una amplia variedad de sistemas de energía solar que usan paneles hechos de celdas de silicio policristalino o monocristalino, las cuales son empleadas para convertir energía solar en electricidad. A pesar de que la eficiencia de estos sistemas está entre un 20% y un 40%, su estudio e implementación ha sido investigado ampliamente a nivel mundial debido a su impacto ambiental baja.

El uso de dispositivos de electrónica de potencia como inversores DC-AC y convertidores DC-DC es requerido para integrar el SFV. También se define como el conjunto de componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos que sirva para transformar la energía solar en energía eléctrica, donde cada aplicación tiene un sistema diferente.

Clasificación de instalaciones fotovoltaicas: Las instalaciones fotovoltaicas se dividen en dos grandes grupos en función del objetivo de las mismas como instalaciones aisladas de la red e instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red, se presenta en la Figura 2.7.

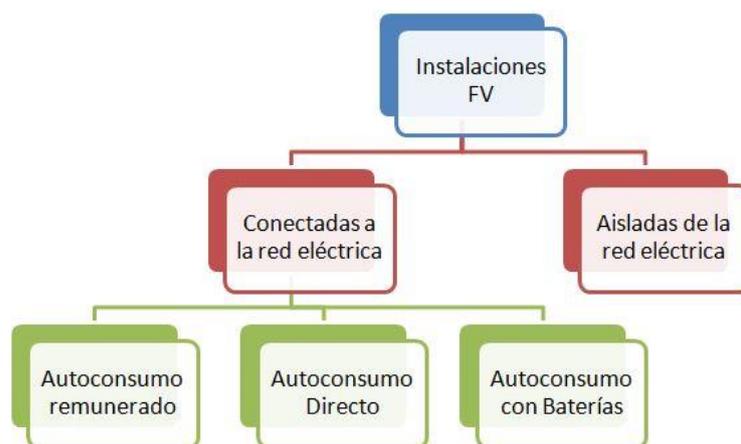


Figura 2.7: Tipos de instalación sistemas fotovoltaicos

Fuente: <https://www.solarenergy.org/diseño-e-instalacion>

2.1.2.1. Instalación de sistemas aislados

Se emplean en localidades donde el acceso es restringido a la red pública y se subdividen en:

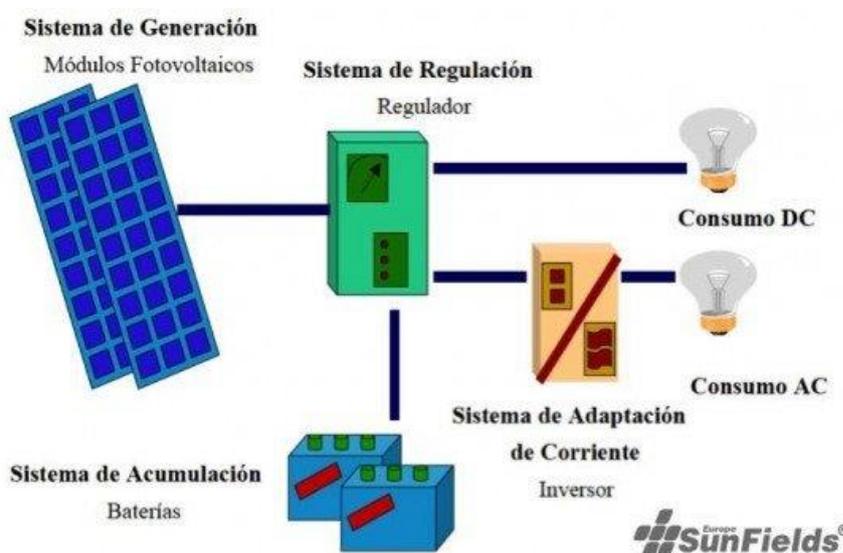


Figura 2.8: Sistemas fotovoltaicos aislados

Fuente: <https://www.solarenergy.org/diseño-e-instalacion>

Sistemas centralizados consisten en un único gran sistema que cubre las necesidades de un conjunto de usuarios, la ventaja es disminuir los costos del sistema manteniendo la calidad del suministro.

Sistemas descentralizados consisten en la instalación de un sistema individual completo en cada vivienda y los costos aumentan relativamente. El esquema general se muestra en la Figura 2.8.

2.1.2.2. Instalación de sistemas con conexión a red

Un sistema fotovoltaico conectado a la red consiste básicamente en un generador fotovoltaico acoplado a un inversor que opera en paralelo con la red eléctrica convencional. El concepto de inyección a la red tiene un amplio margen de aplicaciones, desde pequeños sistemas de pocos kilowatt pico (kWp) de potencia instalada hasta centrales de varios megawatt pico (MWp).

El generador fotovoltaico capta la radiación solar y la transforma en energía eléctrica, que en lugar de ser almacenada en baterías como en los sistemas aislados e híbridos, se puede utilizar directamente en el consumo o entregarla a la red eléctrica de distribución. Estas dos funciones las realiza el inversor de DC a AC.

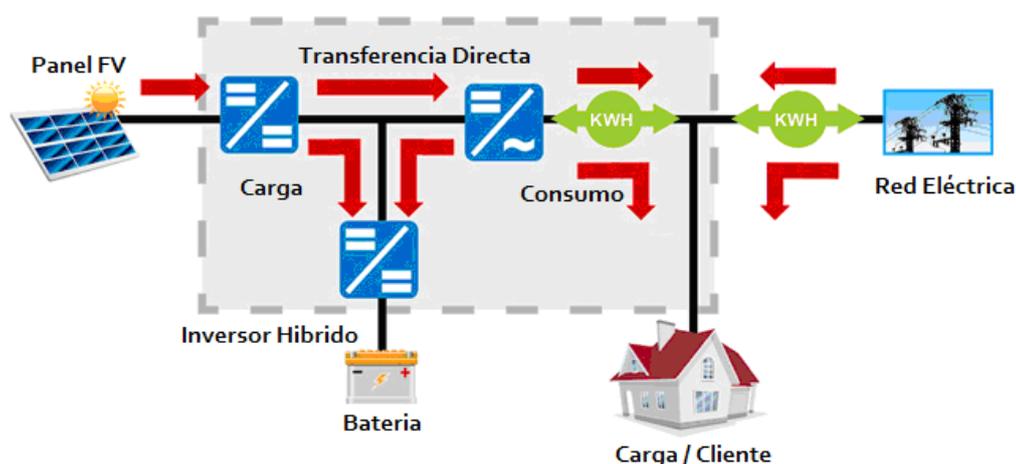


Figura 2.9: Sistemas fotovoltaicos conectados a red

Fuente: <https://www.solarenergy.org/disenio-e-instalacion>

Una de las configuraciones que se desarrolla en este campo, es la conexión directa de arreglos de paneles a los inversores de tal forma se clasifica como inversores fotovoltaicos conectados a red es de la siguiente manera:

- Inversores centralizado
- Inversores cadena (string)
- Inversores multi-cadena (multi string)
- Inversores módulo

Cabe destacar los sistemas fotovoltaicos conectados a la red de baja tensión tienen un rol muy importante como: Bajo coste, pequeño tamaño y peso, alta fiabilidad, alta eficiencia y seguridad para la interacción con los seres humanos

2.1.2.3. Instalación híbrida

Se esquematiza en la Figura 2.10, Son aquellas que combinan módulos fotovoltaicos con una o más fuentes energéticas auxiliares como los aerogeneradores, los motores Diesel, etc. Este sistema es más fiable que las anteriores, ya que al disminuir la captación y generación de electricidad del sistema fotovoltaico, el suministro no se ve comprometido al ser complementado por otro tipo de generación ya sea renovable o no renovable.

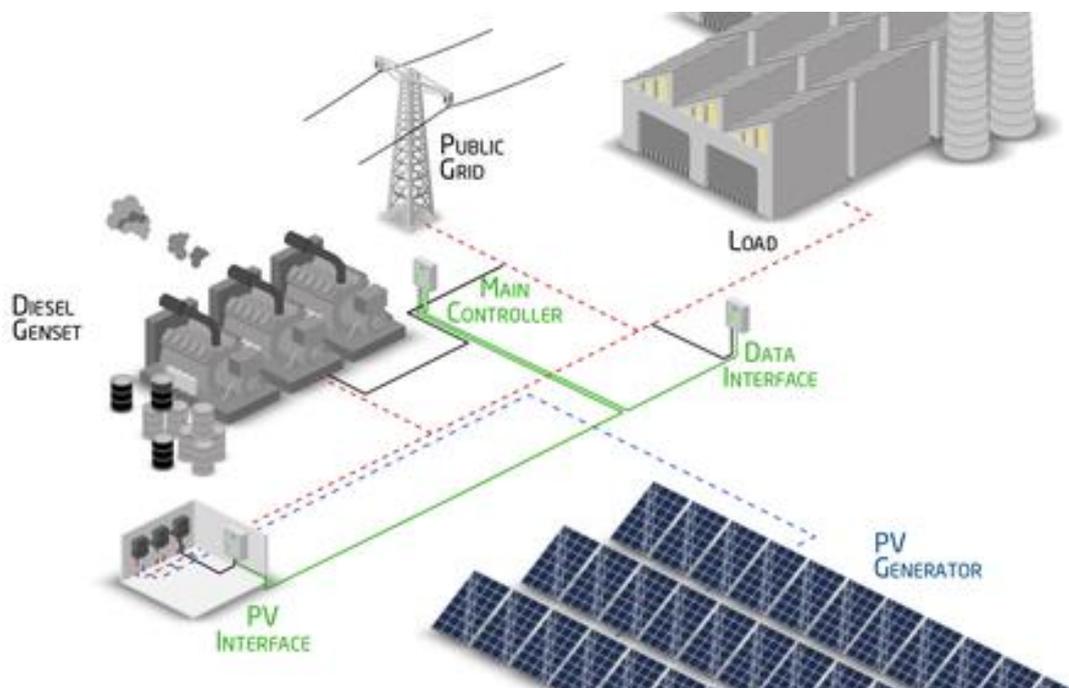


Figura 2.10: Sistemas fotovoltaicos híbridos

Fuente: <https://www.solarenergy.org/disenio-e-instalacion>

2.1.3. Celda y módulo FV

2.1.3.1. Célula fotovoltaica

La célula fotovoltaica es un diodo semiconductor cuyo objetivo es absorber la energía disponible de la radiación solar para convertirla en energía eléctrica. En la Figura 2.11, se puede apreciar la estructura de una célula fotovoltaica compuesta por materiales semiconductores con unión PN donde en la parte superior de esta posee una capa antirreflexiva y una capa iluminada cubierta por una rejilla metálica y en la parte inferior de dicha unión PN consta de un contacto metálico y están formados por varios tipos de semiconductores como:

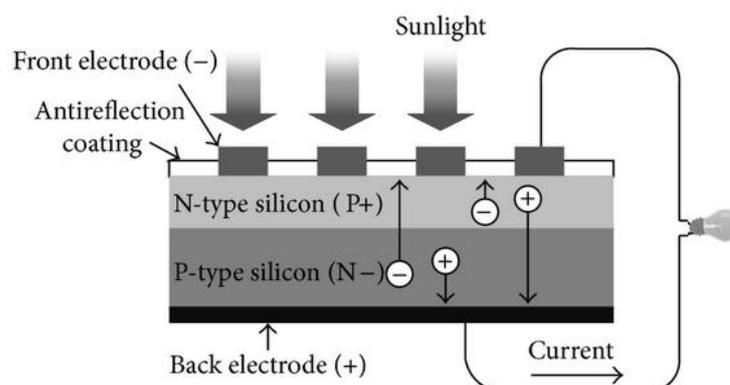


Figura 2.11: Estructura básica de una célula fotovoltaica y su mecanismo de trabajo

Fuente: (Astudillo & Lema, 2017)

Silicio Mono-cristalino: Este tipo de células fotovoltaicas están formadas por un único cristal de silicio y son de color azul oscuro uniforme. El rendimiento energético está comprendido entre el 15% y el 17%

Silicio Poli-cristalino: A diferencia de las mono-cristalino, estas células fotovoltaicas están formadas por un conjunto de cristales de silicio teniendo así un rendimiento energético más bajo entre el 12% y el 14%.

Silicio Amorfo: Estas células son usadas para aplicaciones solares de relojes y calculadoras debido a su bajo costo y su rendimiento energético que está por debajo del 10%

2.1.3.2. Panel fotovoltaico

Un panel fotovoltaico es un conjunto de celdas fotovoltaicas interconectadas entre sí y es usado como componente de un sistema FV para ofrecer electricidad limpia y renovable tanto a la industria comercial como a la residencial. La mayoría de los paneles FV son rígidos, pero ya existen paneles flexibles basados en las celdas solares delgadas, las conexiones eléctricas son hechas en serie para alcanzar la salida de voltaje deseada, y en paralelo para lograr la cantidad de corriente necesaria.

De esta manera en la estructura interna y externa del panel fotovoltaico se muestra en la Figura 2.12, donde las células están ensambladas entre una lámina superior de cristal con un encapsulado y una lámina inferior de plástico, a las cuales se añaden un marco de aluminio para tener una resistencia mecánica adecuada.

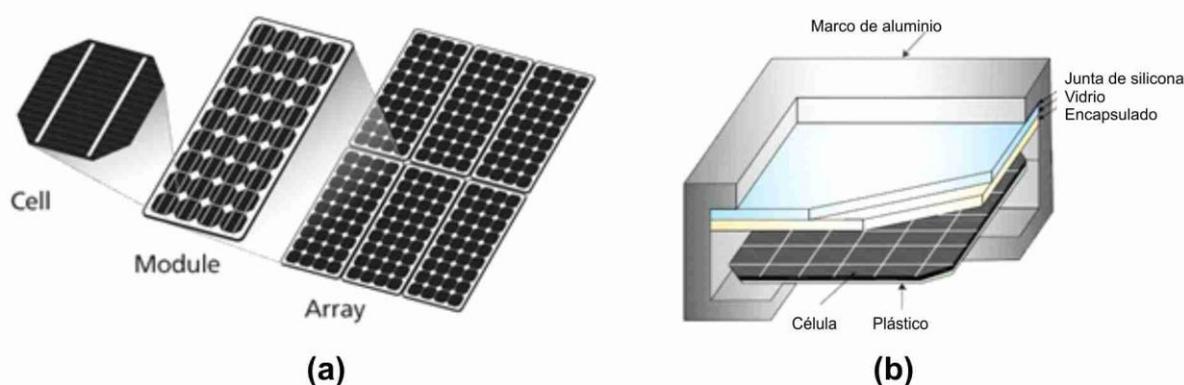


Figura 2.12: Terminología fotovoltaica; célula, módulo y array

Fuente: (Hassaine, 2010)

Agrupación de paneles solares

La conexión de un sistema fotovoltaico a la red eléctrica está sujeta a la cantidad de potencia que se desea inyectar lo cual se refleja en la cantidad de módulos con los que se cuenta. Varios módulos conectados en serie son conocidos como una cadena o string y varios string conectados en paralelo constituyen un arreglo como se muestra en Figura 2.13.

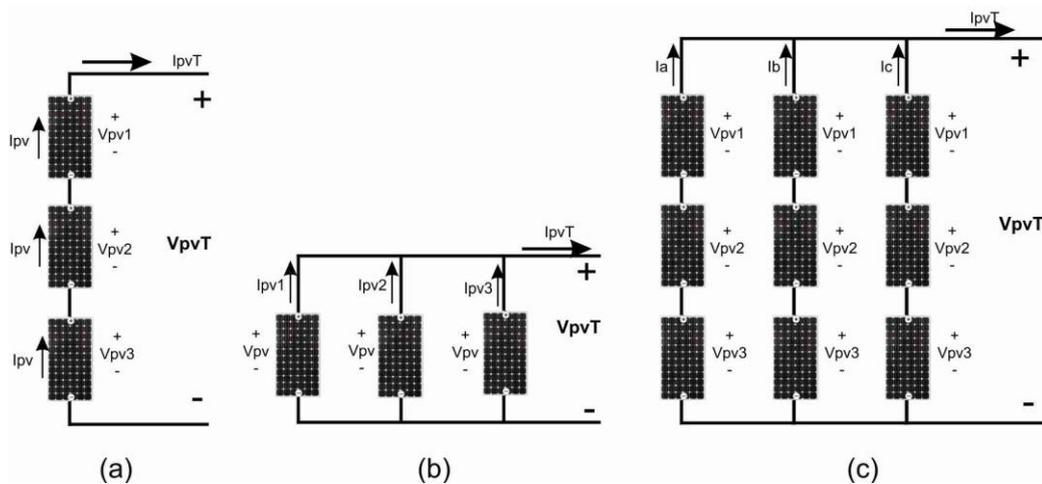


Figura 2.13: Topologías de conexión de los PV. a) Serie, b) paralelo y c) Mixto

Fuente: Elaborado por el investigador

Estas topologías son importantes para satisfacer las demandas requeridas, de esta forma pueden estar conectadas en serie, paralelo y mixto dependiendo del nivel de voltaje o corriente que se requiera. Se deduce las ecuaciones (Ec.2.1) y (Ec.2.2), que se representa la agrupación en serie y en paralelo respectivamente.

$$V_{pvT} = \sum_{i=1}^{Ns} V_{pvi} = V_{pv1} + V_{pv2} + V_{pv3} \tag{Ec.2.1}$$

$$I_{pvT} = I_{pv1} = I_{pv2} = I_{pv3}$$

$$I_{pvT} = \sum_{i=1}^{Np} I_{pvi} = I_{pv1} + I_{pv2} + I_{pv3} \tag{Ec.2.2}$$

$$V_{pvT} = V_{pv1} = V_{pv2} = V_{pv3}$$

Combinando las (Ec.2.1) y (Ec.2.2) se obtiene la agrupación mixta y la potencia requerida.

$$Potencia : (P_{pvT}) = N_p * N_s (V_{pvT} * I_{pvT}) \quad (Ec.2.3)$$

Donde : Número de paneles. N_p (paralelo) y N_s (serie)

2.1.3.3. Modelado del panel FV

Una celda fotovoltaica puede ser representada mediante un modelo de fuente de corriente como se observa en la Figura 2.14, la cual es un dispositivo no lineal cuya energía eléctrica generada fluctúa según el valor de la radiación solar y temperatura, como se muestra en la Figura 2.15.

En la literatura existe diversos modelos matemáticos y para el proyecto se eligió el modelo propuesto por Ortiz en su tesis de doctorado en la Universidad de Michigan “Modeling and Analysis of Solar Distributed Generation”, cuya principal ventaja es que solo necesita hallar el parámetro de ajuste de curva que puede ser obtenido directamente de la ecuación I-V (Ortiz, 2006), (Gil, 2008).

Los demás parámetros son obtenidos de la hoja de datos del dispositivo que se desee modelar. Con este modelo se puede representar el panel FV, para valores dinámicos de irradiación y temperatura. La ecuación propuesta por los autores, para representar la relación I-V del panel FV es la siguiente:

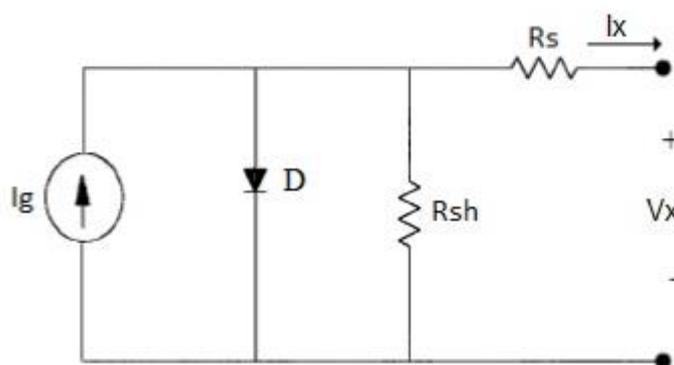


Figura 2.14: Circuito equivalente de un panel solar

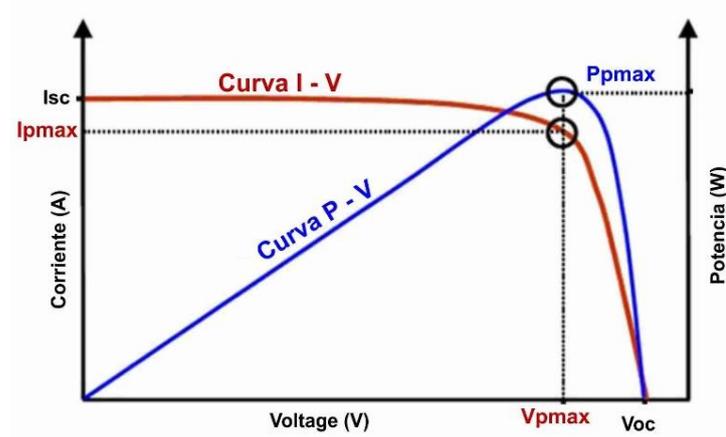


Figura 2.15: Curvas Características PV de I-V y P-V.

Fuente: Elaborado por el investigador

$$I_v = \left(\frac{I_x}{1 - \exp\left(-\frac{1}{b}\right)} \right) * \left(1 - \exp\left(\left(\frac{V_{oc}}{b * V_x} \right) - \left(\frac{1}{b} \right) \right) \right) \quad (\text{Ec.2.4})$$

Dónde: V_x e I_x son los voltajes de circuito abierto y corriente de cortocircuito para valores de irradiación y temperaturas dinámicos y están definidos por:

$$V_x = s \frac{E_i}{E_{in}} TC_v * T - T_n + sV_{max} - s(V_{max} - V_{min}) * \dots * \exp\left(\frac{E_i}{E_{in}} \log\left(V_{max} - \frac{V_{oc}}{V_{max}} - V_{min} \right) \right) \quad (\text{Ec.2.5})$$

$$I_x = p \frac{E_i}{E_{in}} * \left(I_{sc} + TC_i * (T - T_n) \right) \quad (\text{Ec.2.6})$$

V_{max} , V_{min} : son los valores de voltaje de circuito abierto para niveles de irradiación menores a 200 W/m² y mayores a 1200 W/m² con una temperatura de operación de 25°C. Estos valores rondan el 85% de V_{oc} para V_{min} y el 103% de V_{oc} para el caso de V_{max} .

Las ecuaciones (Ec.2.4), (Ec.2.5) y (Ec.2.6) se introducen en Simulink para modelar el panel fotovoltaico y poder llevar a cabo la simulación y visualización de sus curvas características en el siguiente Capítulo.

Donde:

- s: Número de paneles en serie.
- p: Número de paneles en paralelo.
- b: Constante característica del panel.
- E_i : Irradiación efectiva a la que opera el panel.
- E_{in} : Constante de irradiación de 1000 W/m^2 .
- T: Temperatura a la que opera el panel.
- T_n : Constante de temperatura de 25°C .
- V_{oc} : Voltaje de circuito abierto.
- I_{sc} : Corriente de cortocircuito.
- TC_i : Coeficiente de temperatura de corriente.
- TC_v : Coeficiente de temperatura de voltaje.

2.1.4. Estado de los algoritmos MPPT

Los algoritmos MPPT (Maximun Power Tracking) buscan ajustar de manera dinámica y en tiempo real la máxima transferencia de energía disponible. Uno de los problemas con los paneles fotovoltaicos, es que la energía que entregan varía continuamente en el tiempo, dependiendo de las condiciones climáticas y situación física

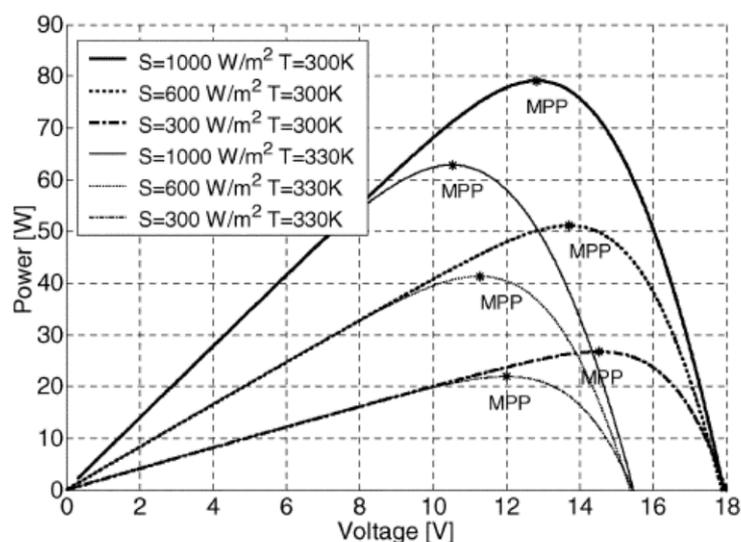


Figura 2.16: Curvas de potencia vs voltaje en un panel fotovoltaico

Fuente: (H. J. Neri, 2016)

Si se quiere aprovechar la mayor cantidad de energía solar, es imperativo operar en todo momento en lo más cercano posible del MPP. Por ello, utilizar un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia, es una necesidad básica en cualquier SFV.

En la Figura 2.16, Se muestran las curvas características de potencia contra voltaje a distintos valores de irradiancia y temperatura. Se observa claramente la dependencia no lineal del MPP ante estas variables. El punto de máxima potencia se consigue realizando un ajuste fino que permita regular el voltaje y corriente de manera que la célula fotovoltaica entregue en sus terminales de salida la máxima potencia en todo momento. Para encontrar el punto de máxima potencia se utilizan técnicas de control por medio de algoritmos denominados MPPT.

En general se dividen en dos grupos: algoritmos convencionales y algoritmos de control inteligente, Los primeros son relativamente sencillos de implementar, con un costo moderado, pero presentan problemas de convergencia (oscilan alrededor del MPP) y no garantizan que se opere en el máximo global. Los algoritmos de control inteligente, resuelven los problemas mencionados, pero requieren de cálculos complicados, lo que eleva su costo y su complejidad. La Tabla 2.2 resume varios algoritmos y sus características.

Tabla 2.2: Comparativo entre distintos algoritmos de MPPT

	Algoritmo	Complejidad	Costo	PMP Global
Convencionales	Perturbar y observar	Baja	Medio	No
	Vco Fraccional	Baja	Bajo	No
	Conductancia incremental	Media	Medio	No
Control Inteligente	Lógica difusa	Alta	Alto	Sí
	Redes Neuronales	Alta	Alto	Sí
	PSO	Alta	Alto	Sí

Fuente: (H. J. Neri, 2016)

2.1.4.1. Voltaje de circuito abierto fraccional VOC

Se observa que existe una relación casi lineal entre el voltaje en el máximo punto de potencia, V_{PMP} y el voltaje de circuito abierto entregado por el panel V_{oc} , k_1 es una constante de proporcionalidad, obtenida previamente de manera empírica, analizando la repuesta del panel fotovoltaico bajo condiciones variadas de irradiancia y temperatura.

$$v = k_1 * v_{oc} \quad (\text{Ec.2.7})$$

El problema con este método es que para medir VOC, hay que desconectar la carga temporalmente, lo que produce pérdidas de potencia. Otro problema es que, en realidad, nunca se está operando realmente en el MPP, sólo en una región aproximada.

2.1.4.2. Conductancia incremental

Este método, se basa en la premisa de que la derivada de la curva Potencia/Voltaje es cero en el MPP, positiva en la región izquierda y negativa en la región derecha. De acuerdo a la ecuación (Ec.2.8), el MPP puede determinarse comparando la conductancia instantánea I/V contra la conductancia incremental $\Delta I/\Delta V$.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{\Delta V} &= \frac{d(I * V)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} &= \frac{-I}{V} \quad \text{en PMP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} &> \frac{-I}{V} \quad \text{InquierdoPMP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} &< \frac{-I}{V} \quad \text{DerechaPMP} \end{aligned} \quad (\text{Ec.2.8})$$

Este algoritmo funciona, al igual que P&O, aumentando el voltaje de operación en pequeños escalones, por lo que presenta problemas similares dependientes del tamaño de dicho escalón. Aunque la oscilación y los problemas por condiciones atmosféricas rápidamente cambiantes son menores que en el P&O.

2.1.4.3. Optimización por enjambre de partículas

PSO es un método estocástico modelado a partir del comportamiento de bandadas de pájaros. Utiliza un enjambre de individuos llamados partículas, donde cada una representa una posible solución. La posición de cada partícula es influenciada por la mejor partícula en su vecindad y por la mejor solución encontrada por la partícula misma.

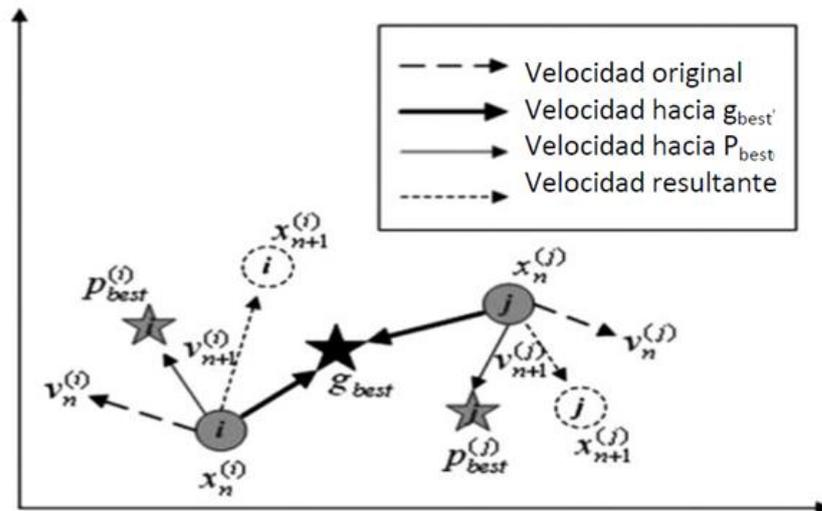


Figura 2.17: Algoritmo PSO

Fuente: (H. J. Neri, 2016)

La velocidad y posición de cada partícula se calculan y ajustan utilizando estos factores y después de cierto número de iteraciones se encuentra el máximo global del sistema. En la Figura 2.17, se observan los distintos vectores que influyen en el cálculo de la posición de cada partícula.

2.1.4.4. Redes neuronales

El problema con los algoritmos de este tipo (inteligentes) es que su grado de complejidad es elevado, debido a los cálculos que es necesario realizar en cada iteración. Por lo que se requiere de un hardware potente que pueda llevarlos a cabo y de una adecuada implementación en software.

2.1.4.5. Perturbar y Observar (P&O)/Hill Climbing

Este método consiste en medir el voltaje y la corriente para calcular la potencia que está siendo entregada por el panel, y luego se perturba (un incremento o decremento ligero en el voltaje) y se calcula de nuevo la potencia, se muestra en la Figura 2.18.

La velocidad de convergencia depende del tamaño del escalón, demasiado pequeño es lento y cuando es grande el sistema oscila demasiado. El problema de este método es que siempre está oscilando alrededor del MPP y puede fallar si las condiciones climáticas varían rápidamente. Además, presenta también el problema de máximo local el caso de sombreado parcial.

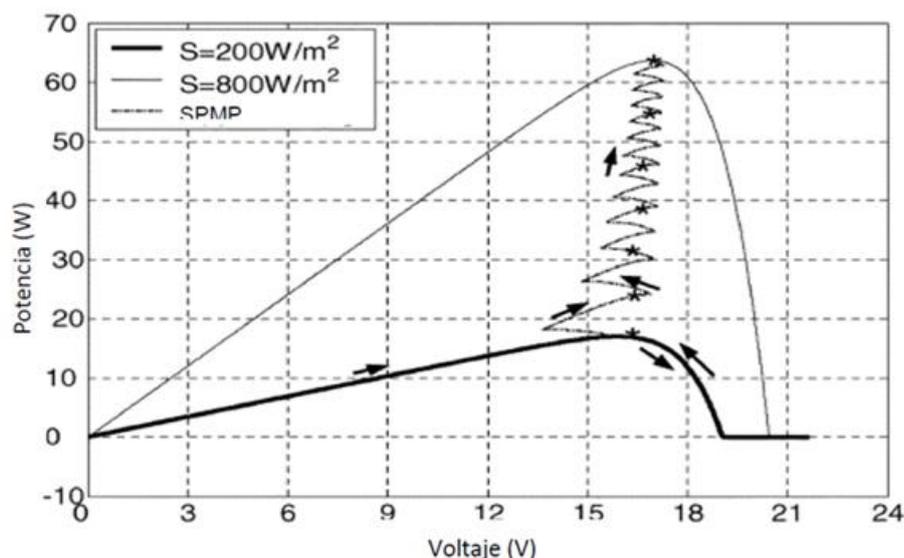


Figura 2.18: Algoritmo perturbar observar

Fuente: (T. Eram, Junio 2007)

2.1.5. Geometría solar

El Sol no siempre describe el mismo movimiento, según la estación, el lugar o el día del año, éste variara su movimiento respecto al horizonte, por tanto explicaremos algunos conceptos de astronomía que serán esenciales para entender la formulación matemática, sobre la que se basó para desarrollar el algoritmo y el MPPT de control como funciones.

2.1.5.1. Orientación del captor

La orientación e inclinación son aspectos determinantes en los arreglos fotovoltaicos para su producción eléctrica.

La radiación solar que incide sobre una placa variará con el ángulo que forme la misma con la radiación. La captación de energía solar será máxima cuando la posición de la placa solar sea perpendicular a la radiación. La inclinación de los rayos del sol respecto a la superficie horizontal es variable a lo largo del año (máxima en verano y mínima en invierno) y por tanto, en aquellas instalaciones cuyos paneles estén fijos, existirá un ángulo de inclinación que optimizará la colección de energía sobre una base anual como se muestra en la figura 2.7.

En consecuencia para realizar cálculo de los parámetros que requieren el presente proyecto, vamos citar los modelos de ASHARE 2007 y los modelos de SPENCER 1971, ambos estudios son válidos que se diferencian del uno al otro. Cabe mencionar también que existen otros modelos como los de Perrin de Brichanbaut (1975), Cooper (1969), García (1994).

Los modelos de Spencer es el modelo más ampliamente utilizado a nivel mundial, por ejemplo se utilizó para elaborar el “atlas de radiación solar de Colombia”, el atlas climático de radiación solar de España, etc.

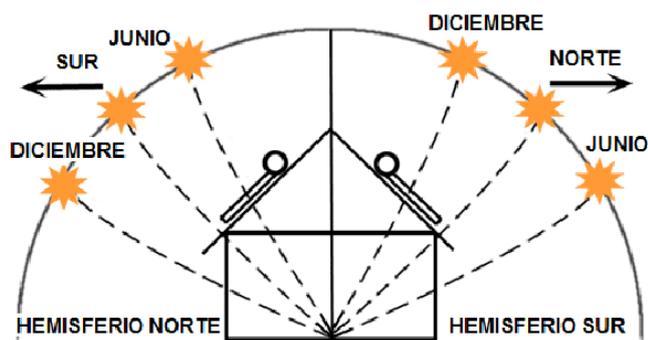


Figura 2.19: Inclínación del sol en el transcurso del año.

Fuente: (Kalogirou, 2009)

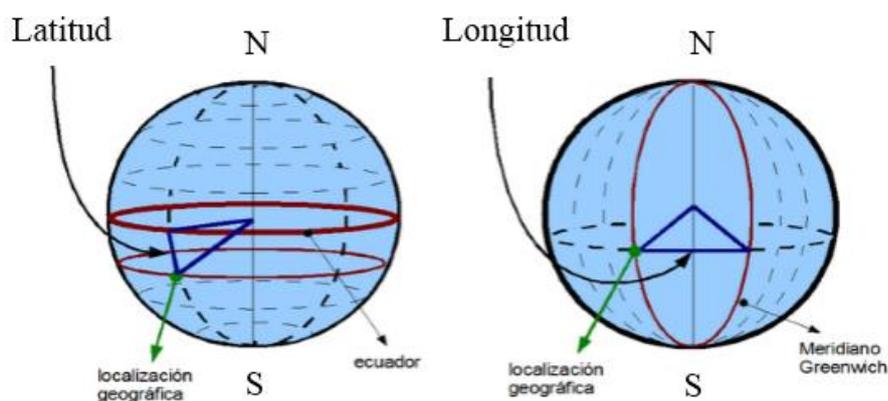


Figura 2.20: Latitud y longitud terrestre

Fuente: <https://www.coordenadas-gps.com>

2.1.5.2. Latitud y longitud

Las coordenadas geográficas son un conjunto de líneas imaginarias que permiten ubicar con exactitud un lugar en la superficie de la Tierra. Este conjunto de líneas corresponden a los meridianos y paralelos como se muestra en la Figura 2.20.

Longitud: es la distancia angular que existe entre el meridiano de Greenwich y un punto cualquiera de la Tierra, medida sobre el paralelo que pasa por dicho punto. Se expresa en grados sexagesimales. Toma un rango de valores de 0° a 180°, correspondiendo el valor 0° al meridiano de Greenwich que es su línea base.

Latitud: es la distancia angular entre la línea ecuatorial (el ecuador), y un punto determinado de la Tierra, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentra dicho punto (dependerá del hemisferio en el que se sitúe el receptor). Se expresa en grados sexagesimales, tomando un rango de valores de 0° a 90° , correspondiendo el valor 0° al ecuador que es su línea base. El polo norte tendrá un valor de 90°N y el polo sur de 90°S .

Altitud: es la distancia vertical a un origen determinado, considerado como nivel cero, para el que se suele tomar el nivel medio del mar.

2.1.5.3. Excentricidad Solar

La rotación de la tierra alrededor de su eje causa los cambio en la distribución de la radiación a lo largo del día y la posición de este eje respecto al sol causa los cambios estacionales. En la trayectoria de la tierra alrededor del sol hay que destacar los siguientes días:

- Solsticio de verano: máxima duración del día
- Solsticio de invierno: mínima duración del día
- Equinoccios de primavera y otoño: igual duración de día y de noche

El primero de estos movimientos es el de traslación, que consiste en el movimiento del propio planeta alrededor del Sol. El segundo movimientos es el de rotación, que consiste en el desplazamiento del planeta sobre su propio eje haciéndolo girar sobre sí mismo. En el caso de la Tierra este eje es conocido como eje polar y atraviesa la Tierra de Norte a Sud. Los movimientos nombrados anteriormente se pueden observar en la Figura 2.21.

Como bien indica en la anterior figura, el movimiento de traslación de la Tierra es elíptico y tarda en realizarse 365 días, 5 horas y 48 minutos. La velocidad aproximada a la que se realiza el giro completo es de unos 107000km/h. En el caso del movimiento de rotación la Tierra tarda tan solo 24 horas en realizar el giro sobre sí misma.

La Tierra tiene un inclinación de 23.45° respecto del plano del ecuador, lo que provoca que el Sol no incida de igual forma para unas coordenadas concretas durante las distintas estaciones y días del año. Es por esta razón que no obtenemos la misma radiación solar en invierno que en verano.

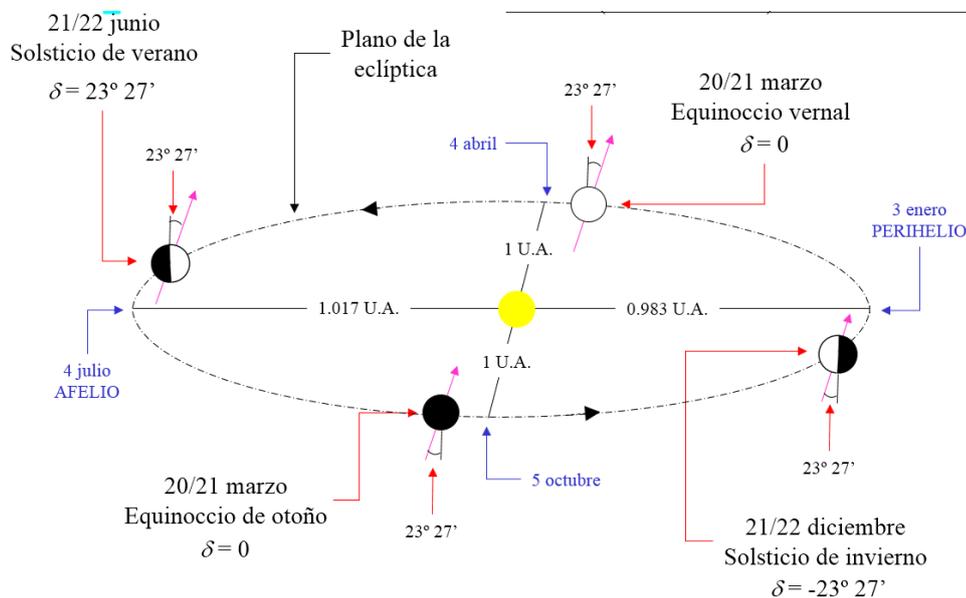


Figura 2.21 Movimiento de la tierra alrededor del sol

Fuente: (Kalogirou, 2009)

Si despreciamos la excentricidad de la elipse que forma el movimiento de traslación de la Tierra, obtenemos la siguiente ecuación que nos permite determinar la distancia de la misma al Sol:

$$d = 1.5 * 10^{11} \left[1 + 0.017 * \sin \left(\frac{360(n-93)}{365} \right) \right] \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde:

d : distancia de la tierra al sol

n : Número de día en un año, incremento en 1

2.1.5.4. Movimiento imaginario del sol

Es necesario precisar la posición del sol en cada instante para optimizar su rendimiento, la herramienta más apropiado para definir estas posiciones son las coordenadas polares, los parámetros más importantes son:

Ángulo de azimut solar (γ): Es el ángulo formado entre la proyección del rayo del solar en el plano horizontal y la dirección verdadero sur (para localizaciones en el hemisferio norte) o verdadero norte (para localizaciones en el hemisferio sur).

$$\sin(\gamma) = \frac{\cos(\delta) * \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (\text{Ec.2.10})$$

Donde:

δ :declinacion solar

ω :ángulo horario

h :altura solar

$$\omega = 15 * (12 - hora) \quad (\text{Ec.2.11})$$

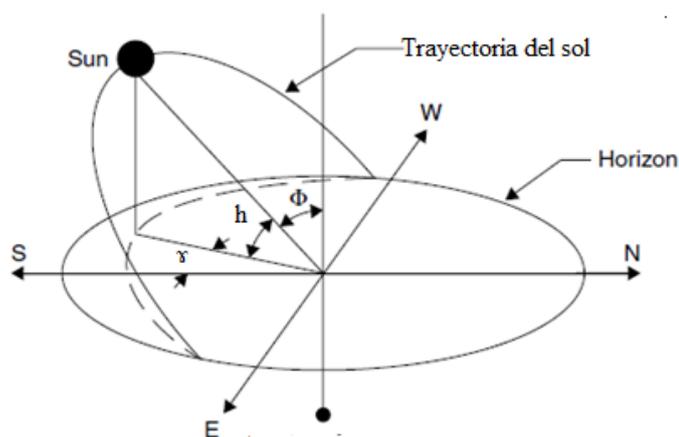


Figura 2.22: Trayectoria imaginaria del sol

Fuente: (Kalogirou, 2009)

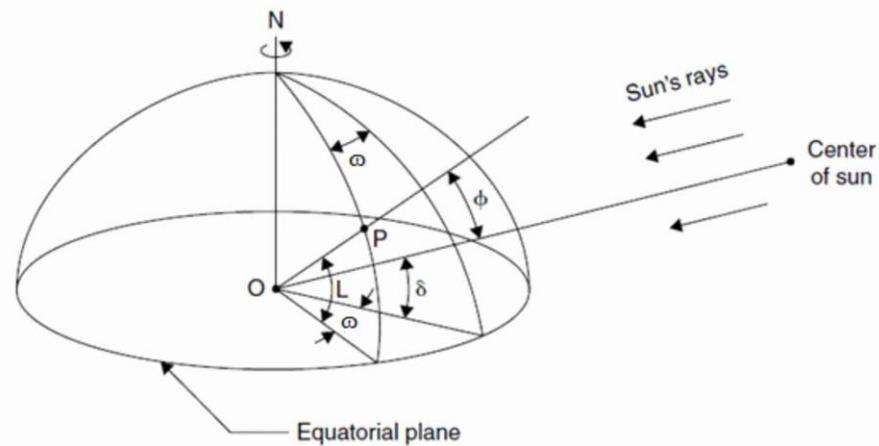


Figura 2.23: Ángulos de posición del sol

Fuente: (Kalogirou, 2009)

Angulo altura solar (h): Es el ángulo formado entre los rayos del sol y el plano de la superficie horizontal en la figura anterior como (α) .

Angulo horario (ω): Es el ángulo resultante de dividir 360° entre las 24 horas que tarda la Tierra en girar sobre sí misma, lo que nos da 15° cada hora. Tomando como origen el mediodía solar siendo las mañanas positivas y las tardes negativas:

Angulo latitud (L): Es el ángulo que forma la vertical del punto estudiado con el plano del ecuador. Su valor oscila entre 0° y 90° , siendo el hemisferio Norte positivo y el hemisferio Sud negativo.

Declinación solar (δ): Es la posición angular del sol respecto el plano del ecuador medida al mediodía solar. La declinación puede obtenerse mediante la fórmula de Cooper, y a continuación se puede observar una ecuación aproximada.

$$\delta = 23.45 * \sin\left(360 * \frac{284 - n}{365}\right) \quad (\text{Ec.2.12})$$

Debido a que el número del día del año varia (n) y la hora del día son requeridos frecuentemente en cálculos de la geometría solar, representa la siguiente tabla para efectos de cálculo.

Tabla 2.3: Número del día en base al día y mes

Month	Day number	Average day of the month		
		Date	N	δ (deg.)
January	i	17	17	-20.92
February	$31 + i$	16	47	-12.95
March	$59 + i$	16	75	-2.42
April	$90 + i$	15	105	9.41
May	$120 + i$	15	135	18.79
June	$151 + i$	11	162	23.09
July	$181 + i$	17	198	21.18
August	$212 + i$	16	228	13.45
September	$243 + i$	15	258	2.22
October	$273 + i$	15	288	-9.60
November	$304 + i$	14	318	-18.91
December	$334 + i$	10	344	-23.05

Fuente: (Kalogirou, 2009)

2.1.5.5. Parámetros de radiación

- a. Ángulo de incidencia (θ):** formada entre la dirección de la radiación directa y la normal del captador.

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta) \sin(L) \cos(\beta) - \sin(\delta) \cos(L) \sin(\beta) \cos(\gamma) + \\ & \cos(\delta) \sin(L) \sin(\beta) \cos(\omega) \cos(\gamma) + \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega) + \\ & \cos(\delta) \cos(L) \cos(\beta) \cos(\omega) \end{aligned} \tag{Ec.2.13}$$

- b. Radiación directa**

$$Radiación_{directa} = I_{cs} * m * \cos \theta \tag{Ec.2.14}$$

$$m = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{360 * n}{365}\right) \tag{Ec.2.15}$$

- I_{cs} : Constante Solar [1.6364 KW/m²]
- m : Movimiento elíptico de la Terra alrededor del Sol
- θ : Ángulo de incidencia del rayos solares sobre la superficie
- n : Día del año, a partir de 1 e incrementando unitariamente

c. Radiación difusa

$$Radiación_{difusa} = \frac{1}{2} * \rho * I_d * (1 - \cos \beta) \quad (\text{Ec.2.16})$$

d. Radiación reflejada

$$Radiación_{reflejada} = \frac{1}{2} * \rho * I_g * (1 - \cos \beta) \quad (\text{Ec.2.17})$$

$$I_g = I_b * \cos \theta + I_d \quad (\text{Ec.2.18})$$

β : Inclinación de la superficie

ρ : Coeficiente de reflexión de la superficie (albedo)

I_g : Radiación solar sobre una superficie plana horizontal debido a la directa y difusa

I_b : Radiación directa

θ : Ángulo de incidencia del rayos solares sobre la superficie

I_d : Radiación difusa

e. Radiación total en una superficie

$$Radiación_{total} = Radiación_{directa} + Radiación_{difusa} + Radiación_{reflejada} \quad (\text{Ec.2.19})$$

f. Efectos atmosféricos sobre la radiación

La radiación que percibe los PV se ve afectada por las condiciones atmosféricas como la presión atmosférica, la altura, la nubosidad del cielo, etc. Se muestra algunos parámetros.

$$m = \frac{1}{\sin \gamma + \frac{0.505}{\gamma + 6.079 * e^{1.636 * \gamma}}} \quad (\text{Ec.2.20})$$

$$\rho = \rho_0 * e^{\left(\frac{-0.3367 * alt}{288 - 0.0032 * alt}\right)} \quad (\text{Ec.2.21})$$

- Factor de transmisión (t) = 0,75
- Presión del aire a nivel de la mar (ρ_0)
- Altura sobre el nivel del mar en metros (alt)
- Masa óptica relativa del aire (m)
- Presión media del aire a una altura (p)
- Altura a la que se encuentra el Sol (γ)

El estado del cielo también es de gran importancia ya que la radiación que llega es función de la nubosidad existente, no hay una fórmula en concreto, sino que es una relación de porcentajes en función de la cantidad de nubosidad.

- Cielo claro : 100 % de la radiación
- Cirrus : 83,80 % de la radiación
- Altocúmulos : 50,87 % de la radiación
- Estratos : 21,71 % de la radiación

2.1.6. Conversión de potencia eléctrica

En el campo de la electrónica de potencia una de las operaciones más realizadas es la conversión de energía, es decir realizar estas operaciones modificando la tensión o corriente por medio de conmutación.

En la Figura 2.24 se puede observar las formas de conversión de energía ya sea de corriente directa a corriente alterna o viceversa. (Rashid, 1995) y (A. Bueno, 2016)

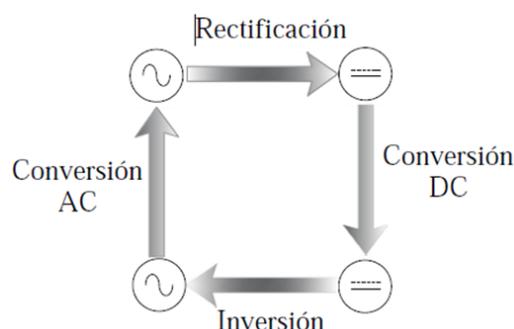


Figura 2.24: Conversión de energía eléctrica

Fuente: (Rashid, 1995)

Las formas de conversión de energía eléctrica se denominan como:

- **Conversión AC.**- En este caso el proceso consiste en transformar corriente alterna AC en o AC pero con distinto nivel y frecuencia.
- **Rectificación.**- Es el proceso que consiste en transformar de corriente alterna AC a corriente directa DC.
- **Conversión DC.**- Al igual que la conversión AC este proceso consiste en transformar de DC a DC de distinto nivel.
- **Inversión.**- Este es el proceso inverso a la rectificación ya que consiste en transformar la corriente directa DC en corriente alterna AC.

Circuitos convertidores de Potencia DC-DC

Los convertidores de corriente directa son los encargados de convertir una fuente de tensión continua variable a una de tensión continua fija.

De esta manera existen varias topologías de convertidores DC, los cuales se clasifican dependiendo de su función. Entre los más comunes se tiene:

- Convertidor Elevador (Boost)
- Convertidor Reductor (Buck)
- Convertidor Reductor - Elevador (Buck-Boost)

Todas estas formas de conversión de energía se las realiza por medio de puentes convertidores electrónicos, los cuales van a tener diferentes configuraciones dependiendo de la aplicación. En el proyecto se detallará el proceso de Conversión elevador tipo Boost DC-DC y el proceso de Inversión de corriente eléctrica DC-AC, que se tocara más adelante.

2.1.6.1. Convertidor DC-DC Boost

Para realizar el seguimiento de MPP se utilizó particularmente el convertidor CD/CD elevador de tensión tipo Boost. A la entrada del convertidor se tendrá el arreglo de paneles fotovoltaicos, y será controlado por el algoritmo P&O. El voltaje de salida deberá ser suficiente para alimentar la siguiente etapa (inversor monofásico).

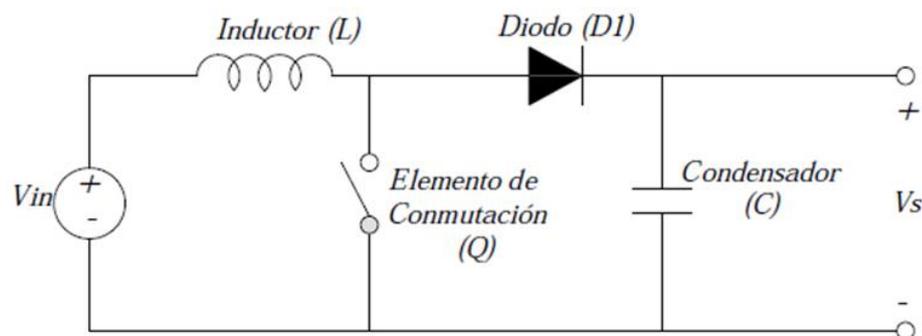


Figura 2.25: Topología convertidor Boost

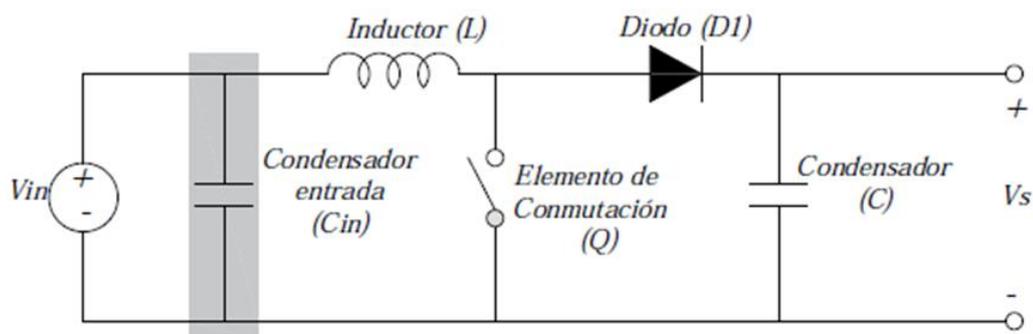


Figura 2.26: Topología convertidor Boost con Condensador de entrada

Fuente: (Hart, 2001)

El convertidor propuesto se utiliza para elevar el nivel de tensión a la salida con respecto a la tensión de entrada. La topología del convertidor elevador Figura 2.25 incluye un inductor (L) y un condensador (C) a la salida, los cuales son necesarios para reducir el rizado y de esta manera mantener la tensión en la salida del convertidor.

En algunas configuraciones consta de un condensador de entrada C_{in} el cual es utilizado para estabilizar la tensión de entrada debido a los picos de corriente que se producen por el elemento de conmutación (Q), tal como se muestra en la Figura 2.26.

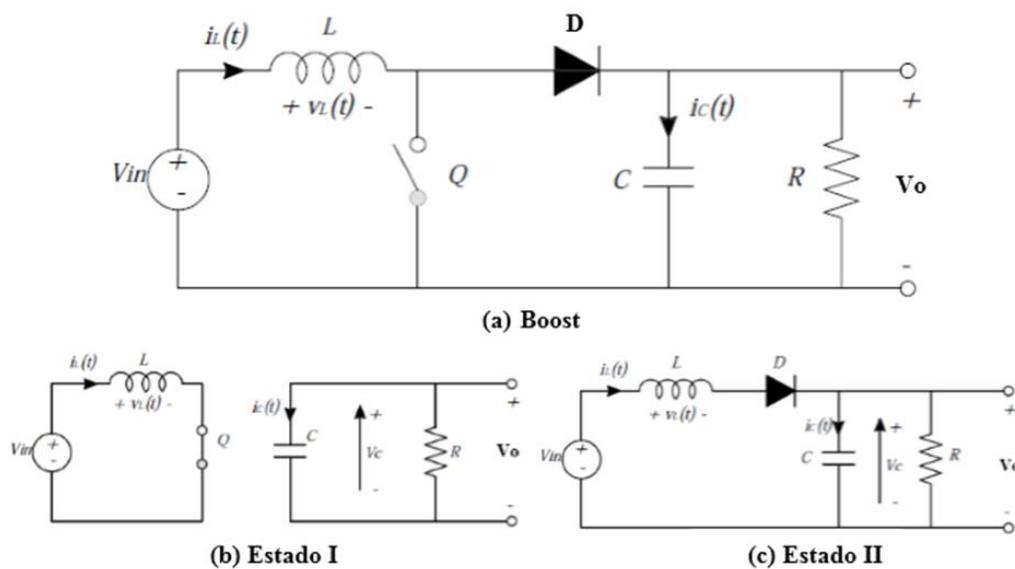


Figura 2.27: Ckto equivalente elevador boost, encendido y apagado

Fuente: (Hart, 2001)

Al tener conectado una carga resistiva (R), Figura 2.27 (a) se presentan dos estados de funcionamiento, conducción continua (MCC) y discontinua (MCD). Con la finalidad de encontrar la tensión de salida ΔV_s y la corriente del inductor en estado estacionario Δi_L .

- Estado I: Conmutador Q en conducción. D en corte. Carga del inductor con tensión V_{in} .
- Estado II: Conmutador Q en corte. D en conducción. Descarga del inductor con tensión $V_{in} - V_o$, a continuación describimos en detalle el modo continuo, puesto que nos interesa para el diseño.

Modo de conducción Discontinuo (DCM)

En algunas situaciones, la cantidad de energía requerida por la carga es suficientemente pequeña como para ser transferida en un tiempo menor que el tiempo total del ciclo de conmutación. En este caso, la corriente a través del inductor cae hasta cero durante parte del periodo.

La única diferencia con el modo continuo, es que el inductor se descarga completamente al final del ciclo de conmutación. Sin embargo, esta pequeña variación en el funcionamiento tiene un fuerte efecto en la ecuación del voltaje de salida.

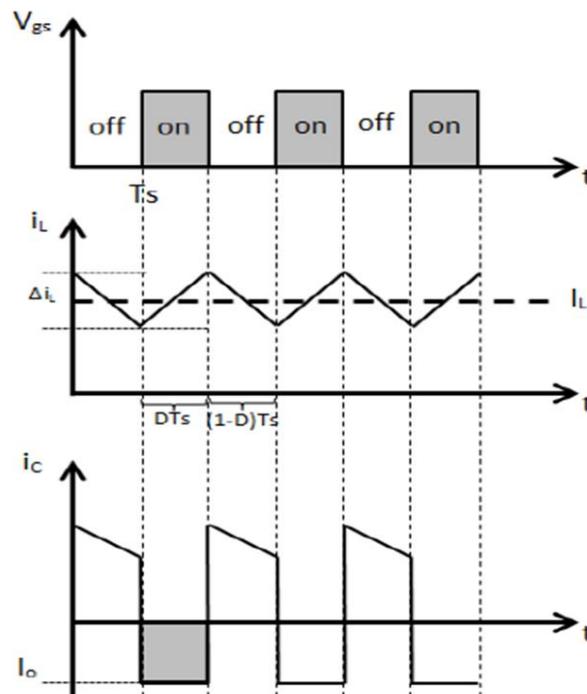


Figura 2.28: Señales de compuerta, corrientes i_L y i_c del boost

Fuente: (Hart, 2001)

Modo de Conducción Continua (CCM)

El análisis del convertidor se realiza para los dos circuitos mostrados. En la Figura 2.28 se muestran las formas de onda que se dan en el convertidor durante el estado estable. Se observa el comportamiento de la corriente en el inductor y en el capacitor, dependiendo de la señal de compuerta del interruptor Q.

De acuerdo a los circuitos y a las formas de onda y teniendo en cuenta a D como el ciclo de trabajo y Ts como el periodo, durante el tiempo de encendido se observa que:

$$V_L = V_{in} = L \frac{di_L}{dt} = \frac{L\Delta i_{Lon}}{t_{on}} \quad (\text{Ec.2.22})$$

$$\Delta i_{Lon} = \frac{V_{in}t_{on}}{L} \quad (\text{Ec.2.23})$$

Así mismo, durante el tiempo de apagado

$$V_L = V_{in} - V_o = L \frac{di_L}{dt} = \frac{L\Delta i_{Loof}}{t_{off}} \quad (\text{Ec.2.24})$$

$$\Delta i_{Loof} = \frac{(V_{in} - V_o)t_{off}}{L} \quad (\text{Ec.2.25})$$

Igualando los incrementos de corriente durante el tiempo de encendido y apagado, se obtiene la ganancia M

$$\Delta i_{Lon} = -\Delta i_{Loof} \quad (\text{Ec.2.26})$$

$$\frac{V_{in}t_{on}}{L} = -\frac{(V_{in} - V_o)}{L}t_{off} \quad (\text{Ec.2.27})$$

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} = \frac{T_s}{t_{off}} \quad (\text{Ec.2.28})$$

Teniendo en cuenta que Toff es igual a (1-D) Ts, se tiene que

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (\text{Ec.2.29})$$

El valor del inductor se calcula en base al rizo de corriente deseado

$$L = \frac{V_{in}t_{on}}{\Delta i_{Lon}} = \frac{V_{in}DT_s}{\Delta i_{Lon}} = \frac{V_{in}D}{\Delta i_{Lon}f_s} \quad (\text{Ec.2.30})$$

Partiendo de la ecuación de corriente en el capacitor y de la forma de onda de la misma, se obtiene.

$$i_c = c \frac{dV_c}{dt} \quad (\text{Ec.2.31})$$

$$dV_c = \frac{1}{c} i_c dt \quad (\text{Ec.2.32})$$

$$\Delta V_c = \Delta V_o = \frac{1}{c} \int_0^{DT_s} i_c dt \quad (\text{Ec.2.33})$$

Tomando en cuenta que durante el tiempo de encendido, la integral de la corriente en el capacitor es igual a $DT_s \cdot I_o$.

$$\Delta V_c = \Delta V_o = \frac{1}{c} (DT_s I_o) = \frac{DI_o}{Cf_s} \quad (\text{Ec.2.34})$$

$$C = \frac{DI_o}{\Delta V_o f_s} = \frac{DP_o}{\Delta V_o V_o f_s} \quad (\text{Ec.2.35})$$

Se utilizan las ecuaciones (Ec.2.29), (Ec.2.30) y (Ec.2.35) para calcular la ganancia y ciclo de trabajo, el valor de la inductancia y el valor de la capacitancia, respectivamente para el diseño respectivo en el siguiente Capítulo III (Ver tabla).

2.1.6.1.1. Control de Convertidores

El control de los convertidores se realiza por medio de diferentes técnicas tomando en cuenta aspectos como la no linealidad de los mismos, variaciones de la carga y tensión de entrada. De esta manera existen técnicas como:

- Control por PWM
- Control por Deslizamiento

Esta clasificación se dará con más detalles más adelante.

2.1.6.2. Inversores DC-AC

Los inversores son circuitos que transforman la corriente o tensión continua en alterna con magnitud y frecuencia variable. De esta manera se podrá tener a la salida una tensión que puede ser fija o variable a una frecuencia fija o variable. (Rashid, 1995)

Para obtener una tensión alterna de salida variable se puede realizar controlando los parámetros de tensión de entrada continua DC y la ganancia del inversor la cual es la relación entre la tensión de salida AC y la tensión de entrada DC.

Por otro lado al no tener una tensión continua de entrada fija se puede variar la ganancia del inversor por medio del control por modulación por ancho de pulso PWM dentro del inversor. El control de los inversores según se realiza por medio de dispositivos de conmutación que usan una señal PWM controlando el encendido y apagado de los mismos, entre los dispositivos más utilizados están:

- Transistores de Bipolares de Unión (BJT)
- Transistores de Efecto de Campo de Metal Óxido Semiconductor (MOSFET)
- Transistores Bipolares de Compuerta Aislada (IGBT)
- Tiristores Controlados por Compuerta (GTO)

Topología de Inversor según la fuente de energía

Las topologías se describieron en la sección anterior, Los inversores según la fuente de energía se pueden clasificar como:

- Inversor alimentado por Tensión (VFI, de voltaje-fed inverter) donde la tensión de entrada permanece constante
- Inversor alimentado por Corriente (CFI, de current-fed inverter) donde la corriente de entrada permanece constante.
- Convertidor Enlazado con CC Variable si la tensión de entrada es controlable.

Por otra parte los inversores según el número de fases se clasifican como:

- Inversores Monofásicos

- Inversores Trifásicos

2.1.6.3. Inversores Monofásicos

Los inversores monofásicos presentan a la salida una sola fase de AC la cual puede ser utilizada para alimentar cargas puramente monofásicas. De esta manera existen diferentes topologías como son: Medio Puesto y Puesto Completo. De esta clasificación se detallará la topología de Puesto Completo debido a que tiene mayor tensión de salida.

(C. Jara P. Galarza, 2015)

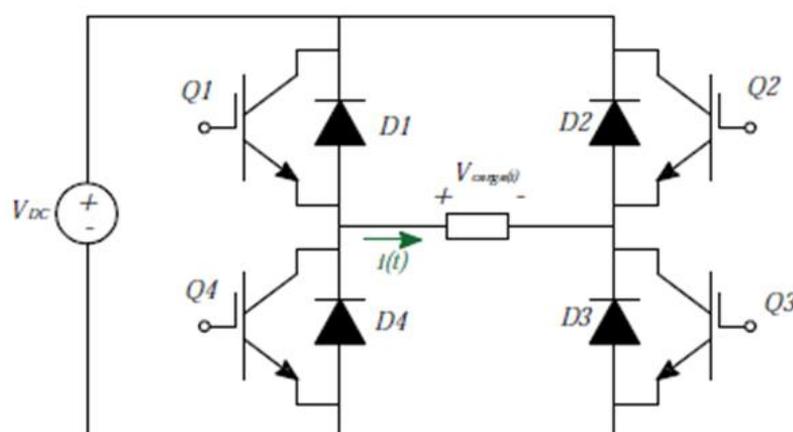


Figura 2.29: Topología inversor monofásico de puesto completo

Fuente: (A. Bueno, 2016)

Un inversor monofásico de puesto completo está formado por cuatro interruptores que pueden ser dispositivos de conmutación como IGBT en anti paralelo con un diodo en forma de puesto H, con la finalidad de convertir corriente continua en alterna. Como se muestra en la Figura 2.29 esta configuración permite que la corriente positiva sea controlada por el dispositivo de conmutación y la corriente negativa sea controlada por el diodo de descarga en anti paralelo (A. Bueno, 2016).

Principio de Funcionamiento: Este tipo de inversor representado por el circuito de la Figura 2.30, consta de cuatro interruptores bidireccionales de corriente y una fuente de corriente continua.

Por medio de la conmutación de los interruptores S1, S2, S3 y S4 y la inyección de una tensión de entrada VDC se puede obtener una salida en corriente altera VAC con el fin de aplicar sobre la carga tensiones positivas (+VDC), tensiones negativas (-VDC) o cero (0). (Hart, 2001).

En la Figura 2.30, para obtener $V_o = +V_{dc}$, los interruptores S1 y S3 permanecen cerrados y los interruptores S2 y S4 permanecen abiertos. Para obtener una tensión negativa de salida $V_o = -V_{dc}$ en este caso los interruptores S2 y S4 permanecen cerrados y los interruptores S1 y S3 permanecen abiertos.

Por último para obtener una tensión de salida $V_o = 0$ se tiene dos posibilidades la primera es cerrar los interruptores S1 y S2 mientras que los interruptores S3 y S4 permanezcan abiertos mientras la segunda posibilidad es cerrar los interruptores S3 y S4 y los interruptores S1 y S2 permanezcan abiertos, se resume en la Tabla 2.4.

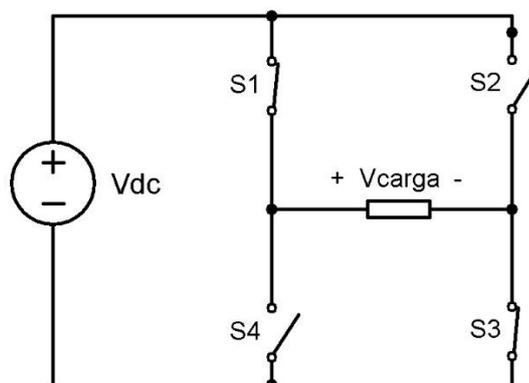


Figura 2.30: Circuito del inversor monofásico

Fuente: (A. Bueno, 2016)

Tabla 2.4: Conmutación de los interruptores del inversor monofásico

Interruptores Cerrados	Tensión de salida V_o
S1 y S3	+VDC
S2 y S4	-VDC
S1 y S2	0
S3 y S4	0

Tensión de salida del inversor

En la salida del inversor por medio de la conmutación periódica de los interruptores se tendrá una tensión alterna con forma de onda cuadrada como se puede ver en la Figura 2.31, donde esta señal contendrá armónicas superiores a la fundamental que deberán ser eliminadas por medio del uso de filtros. En este caso la operación del inversor es simétrica en dos estados (+VDC,-VDC).

El control de la frecuencia y magnitud efectiva de la tensión o corriente inyectada hacia la carga pueden ser controladas por el tiempo de conmutación de los interruptores. Por tanto el valor de la tensión efectiva o tensión RMS inyectada hacia la carga en un tiempo de conmutación T/2 para estos dos estados se calcula con la ecuación (Ec.2.36)

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_{DC}^2 dt} = V_{DC} \tag{Ec.2.36}$$

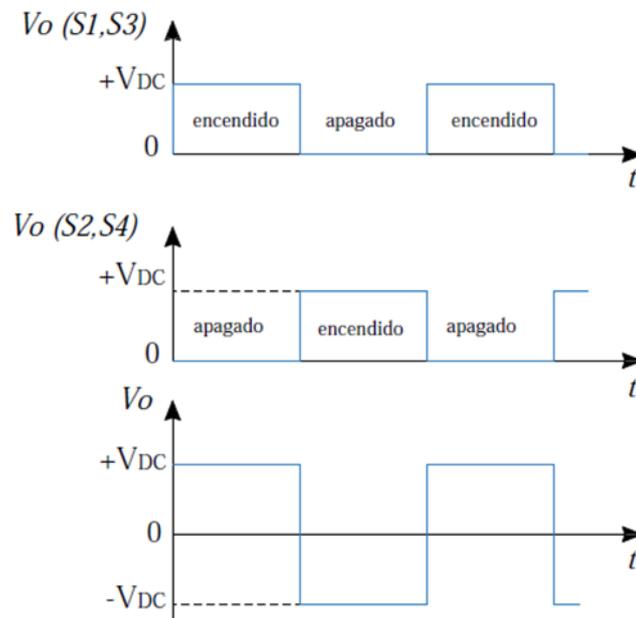


Figura 2.31: Tensión de Salida del inversor

Fuente: (Hart, 2001)

Ahora bien para modificar el valor efectivo de la tensión de salida del inversor se lo realiza por medio del control por tres estados (+VDC, -VDC, 0) que consiste en modificar el valor de la fuente de entrada VDC en cada semiciclo de la forma de onda alterna de salida del inversor por medio la operación de los convertidores DC-DC, donde durante el tiempo de conducción del mismo se realizan cortocircuitos en la salida que afectan a la carga con la finalidad de modificar o disminuir este valor efectivo de la tensión.

La tensión alterna de salida teniendo en cuenta los tres estados de operación, donde el valor efectivo de la tensión de salida del inversor está dado por la ecuación (Ec.2.38)

$$V_{rms} = V_{DC} \sqrt{\frac{2\alpha}{T}} \quad (\text{Ec.2.37})$$

Donde :

$$0 \leq \alpha \leq \frac{T}{2}$$

Reemplazando el valor de : $\alpha = \frac{T}{-2x}$

En la ecuación (Ec.2.37) se obtiene:

$$V_{rms} = V_{DC} \sqrt{1 - \frac{4x}{T}} \quad (\text{Ec.2.38})$$

2.1.7. Control de Inversores

2.1.7.1. Modulación de inversores PWM

El control de los inversores consiste en modificar la tensión de salida de los mismos mediante la variación de ganancia, incorporando técnicas como el control por modulación por ancho de pulso PWM. (Ortiz Valencia & Ramos Paja, Noviembre 2015)

La Modulación por Ancho de Pulso PWM por sus siglas en inglés (Pulse-Width Modulation) es una técnica la cual modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica ya sea con el objetivo de transmitir información por un medio de comunicación o con el propósito de controlar la cantidad de energía que es inyectada hacia la carga.

De esta manera los parámetros que se presentan en el PWM son: Periodo (T) y el Ciclo de Trabajo (D) el cual indica el tiempo en que la señal se encuentra en estado alto respecto al tiempo total o periodo (T).

El PWM utilizado para el control de los inversores, modifica algunas características de una señal denominada portadora con respecto a otra señal denominada moduladora o de referencia, donde las señales más comunes para su implementación son una señal senoidal de referencia y una señal triangular usada como portadora.

Modos de operación del PWM

Ahora bien para controlar la tensión de salida de inversor se utiliza diferentes formas de onda moduladoras. Esto se logra por medio de diferentes técnicas de Modulación como son:

- Modulación por ancho de un solo pulso.
- Modulación por ancho de pulsos múltiples.
- Modulación por ancho de pulso senoidal.
- Modulación por ancho de pulso senoidal modificado.
- Control por desplazamiento de fase.

En este apartado se hace énfasis a la modulación por ancho de pulso sinusoidal, debido a que será implementado en el Capítulo 3 para cumplir con el objetivo de este proyecto.

2.1.7.1.1. Modulación por ancho de pulso sinusoidal SPWM

En este tipo de control de modulación por ancho de pulso sinusoidal se muestra en la Figura 2.32, donde se compara una señal sinusoidal de referencia de frecuencia f_r con una señal portadora triangular de frecuencia f_c .

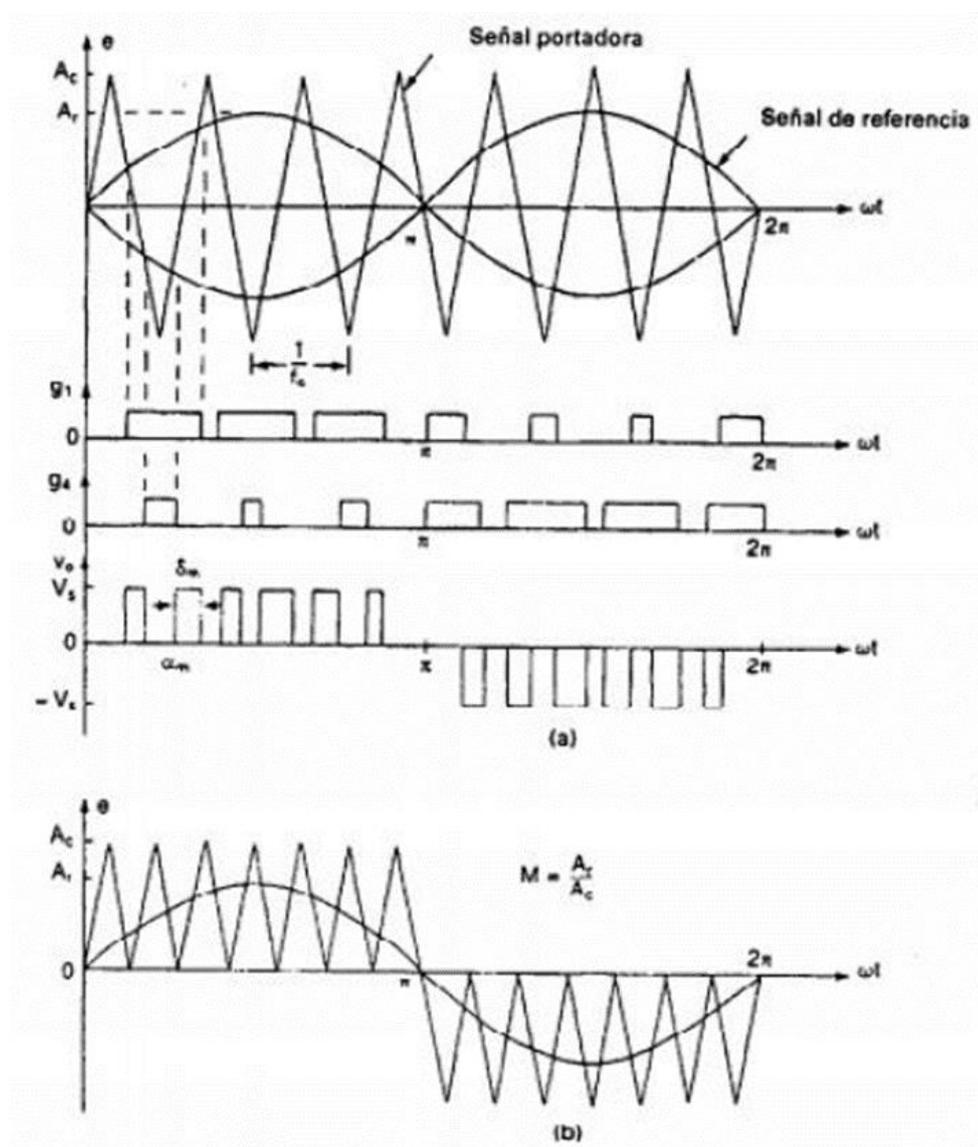


Figura 2.32: Modulación por ancho de pulso sinusoidal

Fuente: (Hart, 2001)

La frecuencia de referencia va a determinar el valor de la frecuencia f_o de salida del inversor y su amplitud A_r determinará el índice de modulación controlando de esta manera dicho voltaje de salida. Existen dos variantes de esta técnica de modulación: SPWM Bipolar y SPWM Unipolar detalladas a continuación:

SPWM Bipolar

En esta técnica de modulación se utiliza una única señal de referencia senoidal y una señal portadora triangular la cual fija la frecuencia de conmutación con el fin de obtener en el inversor dos estados $+V_{DC}$ y $-V_{DC}$.

En el caso de utilizar un inversor de puente completo se tendrá dos combinaciones posibles de los interruptores para generar a la salida del mismo una tensión $+V_{DC}$ y $-V_{DC}$.

SPWM Unipolar

En este caso se utilizan dos señales de referencia senoidal y una señal portadora triangular la cual fija la frecuencia de conmutación con el fin de obtener en el inversor tres estados $+V_{DC}$, $-V_{DC}$ y 0. En el caso de tener un inversor de puente completo la modulación se controla por separada para cada rama del puente. Ambas ramas comparten la señal portadora, pero a cada una se aplica la señal de referencia con un cierto desfase respecto a la otra.

2.1.7.2. Índices de Modulación

Los parámetros más importantes que relacionan la señal moduladora y portadora entre sí son la amplitud y la frecuencia. Teniendo de esta manera lo que es el índice de modulación en amplitud y el índice de modulación en frecuencia: (Martín Delgado, Junio 2012)

Índice de Modulación en Amplitud

El índice de modulación en amplitud I_M , es la relación entre la amplitud de la señal moduladora y la amplitud de la señal portadora como se muestra en la ecuación (Ec.2.39).

$$I_M = \frac{V_{pico_{moduladora}}}{V_{pico_{portadora}}} \quad (\text{Ec.2.39})$$

Si $I_M \leq 1$, el sistema se denomina modulado y si $I_M > 1$, el sistema se denomina sobre modulado.

Al estar el sistema modulado la amplitud de la componente fundamental de la salida del PWM es proporcionalmente lineal y se expresa en la ecuación (Ec.2.40).

$$I_{rms1} = \sqrt{2} * I_M V_{DC} \quad (\text{Ec.2.40})$$

Índice de Modulación en Frecuencia

El índice de modulación en frecuencia m_f , es la relación entre la frecuencia de la señal portadora y la frecuencia de la señal moduladora, es decir queda expresado como se muestra en la ecuación (Ec.2.41).

$$m_f = \frac{f_{portadora}}{f_{moduladora}} \quad (\text{Ec.2.41})$$

De esta manera la salida del PWM tiene la misma frecuencia fundamental que la señal de referencia.

2.1.7.3. Factor de Distorsión Armónica (THD)

La red eléctrica convencional en ocasiones se ve afectada por ciertas distorsiones producidas por la conexión de componentes o aparatos eléctricos o electrónicos conectados a ella. Por tanto en aplicaciones como la interconexión de la red eléctrica con sistemas fotovoltaicos estos pueden distorsionar la señal pura o fundamental de dicha red eléctrica, debido a la presencia de componentes no lineales.

De esta manera estas distorsiones o armónicos afectan a la calidad de la energía debido a que son señales con valores de frecuencia múltiplos de la frecuencia fundamental.

Definición matemática del THD (C. Jara, P. Galarza, 2015)

El Factor de Distorsión Armónica (THD) de una señal es medida del contenido total de armónicas de la señal respecto a la fundamental y se calcula tanto para la señal de tensión como de corriente por medio de las ecuaciones (Ec.2.42) y (Ec.2.44).

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_{RMS}^2 - V_1^2}}{V_1} \quad (\text{Ec.2.42})$$

Donde el voltaje eficaz es:

$$V_{RMS} = \sqrt{V_{CD}^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2} \quad (\text{Ec.2.43})$$

Para el caso de la distorsión armónica de corriente se expresa como:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (\text{Ec.2.44})$$

Donde la corriente eficaz es:

$$I_{RMS} = \sqrt{I_{CD}^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (\text{Ec.2.45})$$

De acuerdo a normativas internacionales como la IEEE 519-2014 y la IEEE 1547 se establecen valores máximos de THD para tensión y corriente de:

- Distorsión Armónica de Tensión THDV = 3%
- Distorsión Armónica de Corriente THDI = 8%

2.1.7.4. Estructura de control de un inversor

Entre las estructuras comúnmente utilizadas se tiene:

2.1.7.4.1. Control de tensión de lazo simple

En Figura 2.33 se muestra un control por tensión de un inversor, donde se obtiene la señal de tensión de salida por medio de un sensor y se compara con una señal de referencia, obteniendo así una señal de error la cual será aplicada a un regulador de tensión que actúa como un controlador y posterior a ello a un modulador (PWM) donde se obtiene el ciclo de trabajo a ser aplicado a los interruptores (Martín Delgado, Junio 2012)

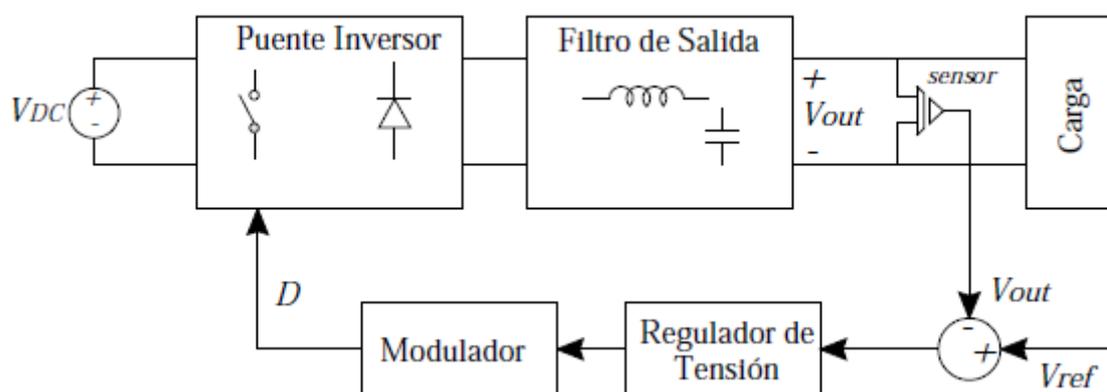


Figura 2.33: Control de tensión de lazo simple

Fuente: (Martín Delgado, Junio 2012)

2.1.7.4.2. Control de tensión de doble lazo

En este tipo de control mostrado en la Figura 2.34 está compuesto por un lazo interno de corriente y un lazo externo de tensión, donde la señal de salida para el lazo de corriente se obtiene de la bobina del filtro y para el lazo de tensión se obtiene de un sensor a la salida del mismo.

Al igual que el control anterior las señales son captadas y comparadas con una señal de referencia para ser aplicadas a un regulador de tensión y corriente el cual envía una señal hacia el modulador.

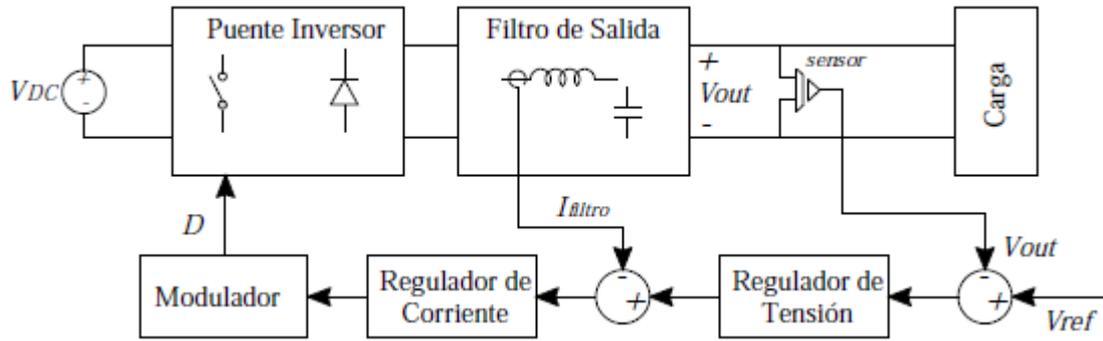


Figura 2.34: Control de tensión de doble lazo.

Fuente: (Martín Delgado, Junio 2012)

2.1.7.5. Filtro de red

Los filtros de la red son los encargados de eliminar las armónicas de orden superior que se producen producto de las conmutaciones del PWM del inversor con el objetivo de entregar a la red corrientes y tensiones senoidales pura.

Además el filtro de red tiene como objetivo introducir una impedancia entre el inversor y la red eléctrica, ya que por medio de la impedancia generada se tiene circulación del flujo de potencia.

Filtro L

El filtro L mostrado en la Figura 2.35, es un filtro de primer orden debido a que está formado por un solo elemento activo, donde la frecuencia de conmutación que se produce en el convertidor deberá ser lo suficiente elevada con el fin de obtener una atenuación elevada de los armónicos causados por el PWM. (Astudillo & Lema, 2017)

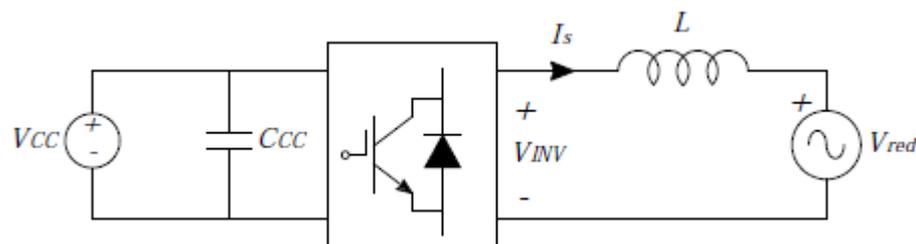


Figura 2.35: Filtro L conectado a la red eléctrica convencional

Fuente: (Astudillo & Lema, 2017)

Para la mayoría de casos se debe considerar el efecto de la resistencia interna de la bobina, la cual se conecta en serie a la inductancia L del circuito de la Figura 2.35. Cabe recalcar que para el diseño de los filtros se debe basar en las normativas vigentes que hacen referencia a los criterios de atenuación de los armónicos de la corriente de red como la IEEE Std 519, donde se establece que los valores máximos de THD (distorsión armónica total) en la corriente total es del 8% (IEEE).

Inversor Monofásico conectado a la red mediante filtro

Un inversor monofásico del tipo mostrado en la Figura 2.29 al conectarse a la red eléctrica debe tener en su salida conectado un filtro el cual tiene como objetivo atenuar las altas frecuencias y armónicos producidos por las conmutaciones que se originan del PWM que control los disparos de dicho inversor.

De esta manera en la Figura 2.36, se puede apreciar un inversor monofásico conectado a red por medio de un filtro L y su uso se debe al bajo costo de implementación que presenta con respecto a usar un filtro LCL.

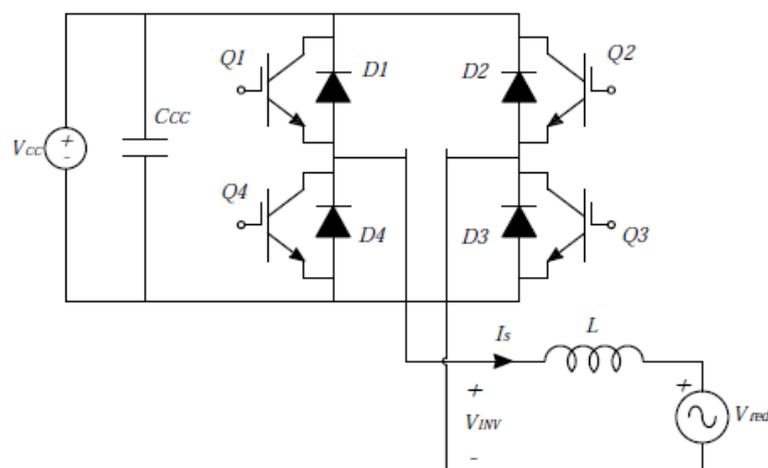


Figura 2.36: Inversor monofásico conectado a la red

Fuente: (Astudillo & Lema, 2017)

En la Figura 2.37 se presenta el circuito equivalente del inversor monofásico conectado a la red eléctrica, donde se tiene acoplado un filtro L con una resistencia en serie (R) que representa la resistencia interna de la bobina que por lo general no debe ser despreciada con el fin de obtener resultados reales.

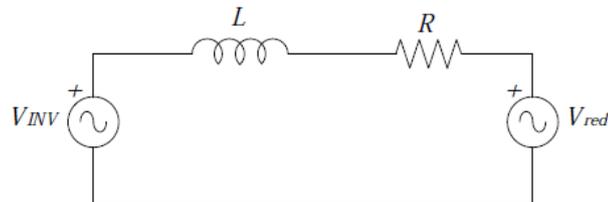


Figura 2.37: Circuito equivalente del inversor

Ahora bien para analizar el circuito en la Figura 2.37, se representa el diagrama fasorial mostrado en la Figura 2.38 despreciando el efecto de la resistencia. Donde:

V_{red} : es el valor eficaz de la tensión de la red.

$V_{I_{con}}$: es el valor eficaz de la tensión de salida del inversor.

I_1 : es la corriente eficaz de salida del inversor.

φ : es el ángulo de desfase entre la corriente del inversor y la tensión de la red.

δ : es el ángulo de desfase entre la tensión de la red y la tensión del inversor.

X_L : es la reactancia de la bobina.

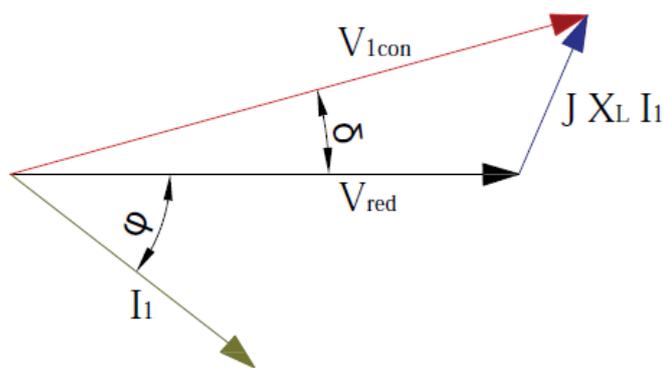


Figura 2.38: Diagrama fasorial del circuito despreciando la caída resistiva

Fuente: (Astudillo & Lema, 2017)

La potencia activa y reactiva de la red del circuito de la Figura 2.37 sin considerar el efecto de la resistencia se presenta en la ecuación (Ec.2.46):

$$S = P + jQ = \frac{V_{red} * V_{1con}}{X_L} \text{sen}(\delta) + \frac{V_{red}}{X_L} (V_{1con} \cos(\delta) - V_{red}) \quad (\text{Ec.2.46})$$

En el caso de incluir el efecto de la resistencia, el diagrama fasorial se presentan en la Figura 2.39.

De igual manera se puede obtener la potencia activa y reactiva de la red presentada por circuito de la Figura 2.37 considerando la caída de tensión en la resistencia R mediante las ecuaciones (Ec.2.47) y (Ec.2.48).

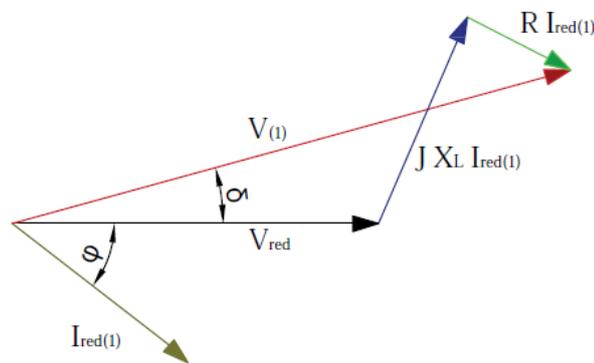


Figura 2.39: Diagrama fasorial del circuito incluyendo el efecto de R.

Fuente: (Astudillo & Lema, 2017)

$$P = V_{red} V_{1con} \left(\frac{X_L}{Z^2} \text{sen}(\delta) + \frac{R}{Z^2} \cos(\delta) \right) - V_{red}^2 \frac{R}{Z^2} \quad (\text{Ec.2.47})$$

$$Q = V_{red} V_{1con} \left(\frac{X_L}{Z^2} \cos(\delta) + \frac{R}{Z^2} \text{sin}(\delta) \right) - V_{red}^2 \frac{X_L}{Z^2} \quad (\text{Ec.2.48})$$

Dónde $Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ y reemplazando en (Ec.2.47) y (Ec.2.48) se tiene las ecuaciones siguientes:

$$P = \frac{V_{red} V_{1con} X_L}{R^2 + \omega^2 L^2} \text{sin}(\delta) + \frac{V_{red} V_{1con} R}{R^2 + \omega^2 L^2} \cos(\delta) - \frac{V_{red}^2 R}{Z^2} \quad (\text{Ec.2.49})$$

$$Q = \frac{V_{red} V_{1con} X_L}{R^2 + \omega^2 L^2} \cos(\delta) + \frac{V_{red} V_{1con} R}{R^2 + \omega^2 L^2} \text{sin}(\delta) - \frac{V_{red}^2 X_L}{Z^2} \quad (\text{Ec.2.50})$$

2.1.7.6. Requerimientos y Normativa para la Conexión de Sistemas PV

Para que un sistema fotovoltaico se conecte a la red distribución convencional debe cumplir con una serie de requisitos y normativas con la finalidad de garantizar la seguridad y la calidad de servicio eléctrico. Las regulaciones locales impuestas por los operadores de la red se aplican en la mayoría de países, pero a nivel internacional existen organismos los cuales imponen normativas y estándares para los requerimientos de la red como la IEEE (siglas en inglés, Institute of Electrical and Electronic Engineers).

IEEE 1547 Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System

La IEEE 1547 es una normativa que establece los criterios y requerimientos para la interconexión de fuentes distribuidas con sistemas eléctricos de potencia. Esta normativa proporciona además requisitos necesarios para el desempeño, operación, pruebas y consideraciones de seguridad y mantenimiento en la interconexión [56 IEEE].

En lo que respecta a los requerimientos técnicos de la interconexión, se debe tomar en cuenta la regulación del voltaje en el PCC y los rangos permitidos de las fluctuaciones son $\pm 5\%$ del nivel de voltaje asignado por el operador del sistema. Además se especifica que la frecuencia debe mantenerse en los 60Hz con rangos permitidos que van desde 59,3 Hz hasta los 60,5 Hz en un tiempo de no más de 0,16 seg.

En la interconexión las fuentes de generación alternativas no deberán inyectar armónicos más allá del 8% en el caso de la corriente y no más del 3% en el caso del voltaje.

Finalmente la normativa establece realizar una evaluación de la instalación en la interconexión de manera que cada uno de los componentes cumpla con la prueba de calidad y diseño para poner en marcha la instalación.

2.2. Marco Conceptual

En el desarrollo de la investigación se requiere conceptos de:

Fuentes de Energía Renovable

Es un recurso energético que es regenerativo o virtualmente inagotable, algunos ejemplos son; solar, viento, geotermal y agua.

Un sistema fotovoltaico autónomo (SFA)

Produce energía eléctrica para satisfacer el consumo de cargas eléctricas no conectadas a la red, empleando un sistema de acumulación energético para hacer frente a los períodos en los que la generación es inferior al consumo

Radiación Solar

El sol produce una cantidad de energía constante que, en el momento de incidir sobre la superficie terrestre pierde parte de su potencia debido a distintos fenómenos ambientales.

Irradiación

Densidad de energía solar recibida en un determinado periodo de tiempo, medido en Wh/m², o si es por día, Wh/m²/día.

Irradiancia

Densidad de potencia instantánea recibida, se mide en W/m².

Celda Solar

El más pequeño elemento semiconductor de un módulo fotovoltaico (PV) para realizar la conversión inmediata de luz solar en electricidad.

Fotovoltaico (FV)

Se refiere a la conversión directa de luz solar en electricidad, se le conoce como solar eléctrico y solar fotovoltaico.

Arreglo de módulo de paneles

Un sistema interconectado de módulos fotovoltaicos que funcionan como una unidad independiente de producción de electricidad.

Kilovatio

Es una medida de potencia eléctrica equivalente a 1000 Vatios o el consumo de energía de mil joules por segundo.

Kilovatios hora

Es una medida de energía que equivale a 1,000 vatios consumidos en un periodo de una hora. Normalmente las utilidades nos cobran en base a kilovatios hora consumidos en un mes.

Módulo

Es una estructura construida con celdas solares en serie para lograr un voltaje operacional.

Panel Solar

También se le conoce como módulo fotovoltaico, mejor definido como un sistema de módulos conectados físicamente en una misma estructura desde la fábrica.

Seguidores Solar

Se refiere a un arreglo solar en una estructura diseñada para seguir la posición del sol y maximizar la radiación solar incidente en la superficie de las placas solares.

Sistema Conectado a la Red

Es un sistema solar eléctrico o fotovoltaico (PV) en el cual el arreglo solar se comporta como una planta generadora central, supliendo potencia a la red.

THD:

La distorsión armónica (ó ARMÓNICOS) se refiere a que la forma de onda de voltaje ó corriente no es totalmente sinusoidal.

Modulación

Engloba el conjunto de técnicas que se usan para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda sinusoidal.

PWM

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM, siglas en inglés de pulse-width modulation) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica.

Ciclo de trabajo Duty cycle

En electrónica, el ciclo de trabajo, ciclo útil o régimen de trabajo es la relación que existe entre el tiempo en que la señal se encuentra en estado activo y el periodo de la misma. Su valor se encuentra comprendido entre 0 y 1.

Algoritmo

Conjunto ordenado de operaciones sistemáticas que permite hacer un cálculo y hallar la solución de un tipo de problemas.

2.3. Hipótesis de la Investigación

Hipótesis General

- Es posible diseñar e simular un módulo de energético solar controlado con algoritmo MPPT - P&O que permita la captación de la radiación solar de manera eficiente para su aprovechamiento significativo en sistemas fotovoltaicos.

Hipótesis General

- a. Es posible relacionar el estudio de los SFV con la geometría del movimiento del sol.
- b. Se puede elegir un algoritmo MPPT adecuado para la aplicación, tomando en cuenta la complejidad de implementación y costo.
- c. Se puede elegir topologías y diseñar convertidores e inversores de electrónica de potencia.
- d. Con modelos matemáticos estudiados se implementa en el software Matlab/Simulink.

Variables

De acuerdo al desarrollo del presente trabajo se identificó las variables que se emplean en el desarrollo de la de un sistema fotovoltaico de energía para el suministro de energía eléctrica.

Variable dependiente

- Energía Solar

Variable Independiente

- Algoritmo MPPT P&O
- Modelado de implementación del sistema completo

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Tipo y Diseño de Investigación

El presente trabajo es una investigación del tipo descriptiva y no experimental en el ámbito de la generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos.

El diseño para el desarrollo del presente trabajo se cuenta con los instrumentos necesarios tanto en información bibliográfica como en datos técnicos y software, donde la estructura que planteamos esta resumida en tres procesos, Análisis de la información, proceso de la información y presentación de resultados. Cada uno de estos procesos involucra los niveles a cada una de las etapas del SFV.

3.2. Población y muestra de la investigación

El SFV diseñada en este trabajo se puede aplicar y sirve como solución a la necesidad de suministro de energía eléctrica a viviendas localizadas en sitios alejados de las ciudades o familias que no cuentan con redes de energía eléctrica. La población está constituida por las viviendas y la muestra es constituida por unidades de familia en el ámbito de la región de Puno.

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica de recolección de datos empleada en esta investigación fue una recopilación documental y bibliográfica enfocada primeramente a la teoría relacionada a los sistemas fotovoltaicos. Dentro de esta teoría se enmarca no sólo temas relacionados con el módulo fotovoltaico como es: la célula fotovoltaica, sus tipos y eficiencia de las mismas; panel fotovoltaico, curvas características de estos y métodos de interconexión; los diferentes tipos algoritmos MPPT, convertidores, reguladores e inversores; sino también temas referentes a la radiación solar, ángulo de incidencia de la radiación directa y de la inclinación del captador, cálculo de parámetros, entre otros.

Se implementan los circuitos de cada uno de los componentes del sistema individualmente, mediante representaciones diagramas de bloques en el software MATLAB/SIMULINK.

3.4. Procedimiento de recolección de datos

Se realizamos la descripción y el cálculo de los parámetros de cada bloque en las siguientes secciones.

3.4.1. Estructura y del proyecto

En la Figura 3.1, se presenta el esquema completo del sistema compuesta por los subsistemas que lo conforman y se realiza la descripción de la misma; se observa en primer lugar el bloque de radiación solar que genera las variables más importantes como son la radiación solar y la temperatura, paso seguido implementamos el modelo matemático propuesto en el Capítulo II, para el modulo del panel de 135W de potencia y luego se agrupando 10x5 PV.

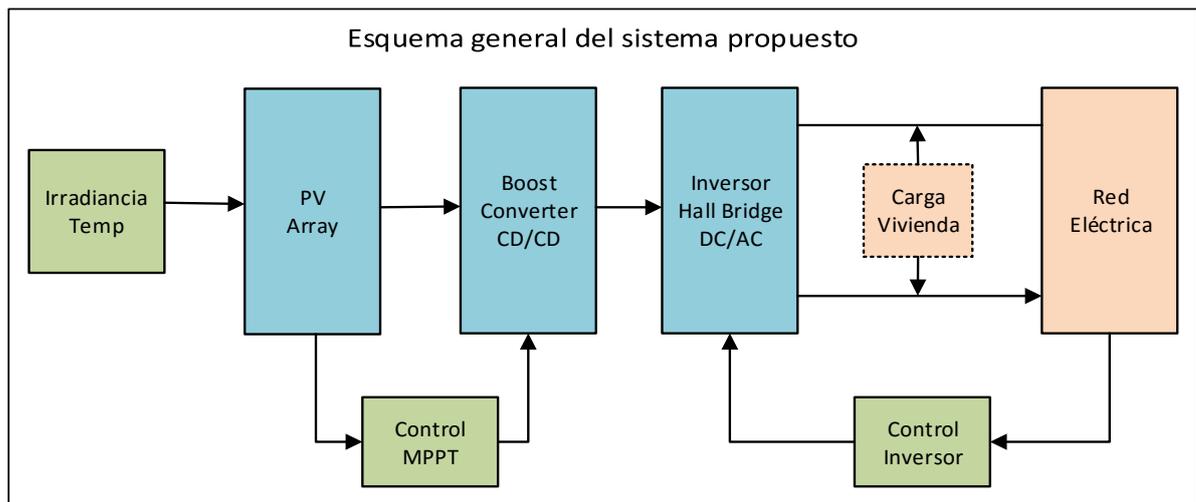


Figura 3.1: Esquema general del sistema completo

Fuente: Elaborado por el investigador

Se aborda la etapa de potencia, convertidor elevador tipo Boost, se implementa el algoritmo P&O para seguir el MPPT, que actúa como control sobre dispositivo de conmutación del convertidor, suministrando el ciclo de trabajo (Duty Cycle), para obtener la máxima transferencia de potencia a la salida del convertidor elevador ante las perturbaciones de las variables.

Una vez obtenida una tensión sobre los 311V, se invierte señal a través de un inversor monofásico de puente completo, de esta forma se inyecta corriente alterna a 220Vrms - 60 Hz. El control del inversor se desarrolla por el método sliding o control por desplazamiento, se diseña el filtro LC para la inyección de la corriente a la red eléctrica.

3.4.2. Bloque de radiación solar

Como se vio en el capítulo II, el PV array es función dos variables externas que influyen en sus curvas características. Una de las variables es la temperatura ambiental y durante el proyecto se cogerá esta variable a 25°C que es el valor estándar que se suele asignarsele.

La segunda variable es la radiación solar, esta varía a lo largo del día dependiendo de la estación del año y del posicionamiento del Sol respecto a la placa. Es por ello que no podemos asignarle un valor fijo puesto que durante el día esta variable cambia drásticamente e influye en cierto grado la curva características del arreglo.

Por tanto asignamos a esta variable a una función que sea capaz de describir el comportamiento de la radiación a lo largo de un día, para una estación del año concreta, para una altitud determinada, para un clima variable, etc.

En el software Simulink, implementamos este parámetro como una función, Este bloque permite Ingresar los parámetros, condiciones externas para la variable de irradiación y Temperatura que recibirá el arreglo de PV.

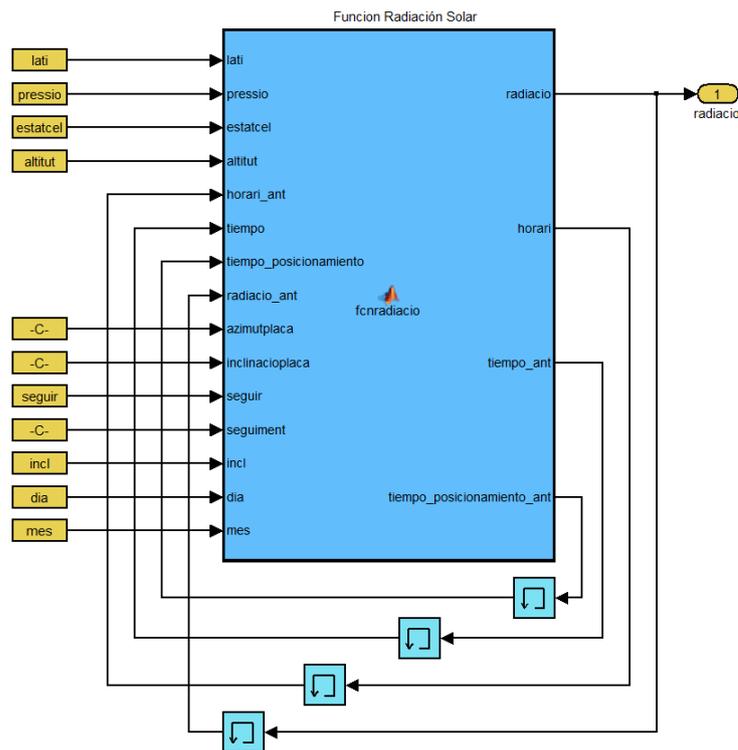


Figura 3.2: Bloque función radiación solar

Fuente: Elaborado por el investigador

En la Figura 3.2, se observa las variables de entrada y salida, alguna de ellas están conectada a la entrada formando un lazo cerrado para compararlas con el valor anterior, conectándose un bloque de memoria para generar un retardo de la señal.

Donde se forzó a que cada segundo el sol se desplace 15° en su trayectoria, cada grado representa a una hora del movimiento solar y por tanto esto nos permitirá simular 1h/s. El bloque se implementó en código Matlab y se muestra en el ANEXO A.

3.4.3. Descripción del panel solar

3.4.3.1. Módulo del panel solar

Se eligió el módulo PV 135W monocristalino, modelo Exiom EXM140 (156) series de fabricación española. Es importante disponer de las características internas y de funcionamiento del panel, Además contar con los datos proporcionados por el fabricante, que es de gran utilidad para la simulación de ese mismo y la obtención de sus curvas características. Se muestra la hoja característica del fabricante en el ANEXO C.

A continuación se extrae los parámetros característicos más significativos en la Tabla 3.1, proporcionados por el fabricante en condiciones estándares, para la radiación de 1000 W/m^2 y temperatura de 25°C .

Tabla 3.1: Parámetros y características más significativos del panel comercial

Voltage en el punto de máxima potencia (V_{pmax})	18.00 V
Corriente en el punto de máxima potencia (I_{pmax})	7.50 A
Tensión de circuito abierto (V_{oc})	21.40 V
Corriente de cortocircuito (I_{sc})	8.40 A
Coefficiente de temperatura de voltaje (TC_v)	-0.1261 $\% / ^\circ\text{C}$
Coefficiente de temperatura de corriente (TC_i)	0.00418 $\% / ^\circ\text{C}$

Fuente: Fabricante del módulo 135W - Exiom

Modelo de array implementado en simulink

El modelo a implementar son las ecuaciones (Ec.2.4), (Ec.2.5) y (Ec.2.6) descritas y analizadas en el del Capítulo II y se implementan en Simulink, como una función, Configurando el PV como una fuente de tensión controlada por corriente para la salida de los parámetros de intensidad y tensión.

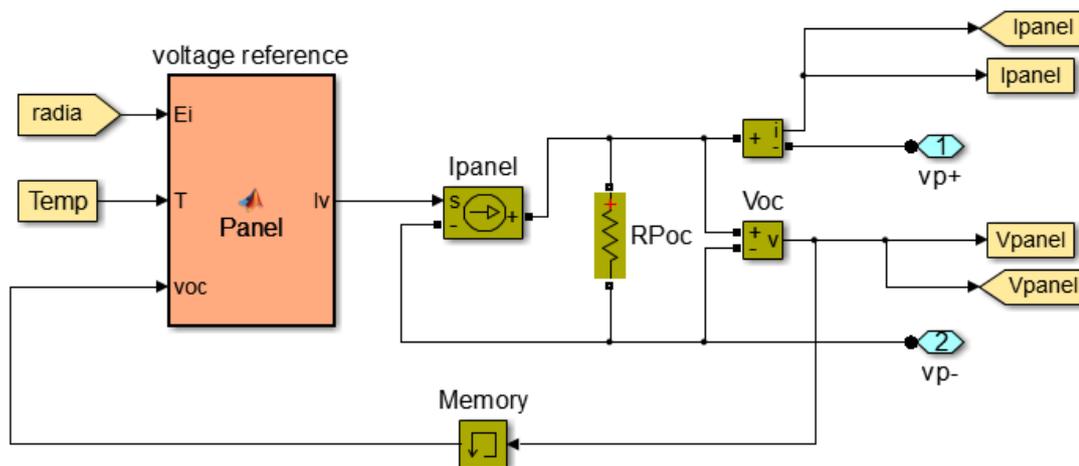


Figura 3.3: Modelado panel fotovoltaico en Simulink

Fuente: Elaborado por el investigador

El bloque panel que se muestra en la Figura 3.3, se implementa en código Matlab como una función, donde se define las variables y se asigna el número de módulos de PV a las variables s (número de paneles en serie) y p (número de paneles en paralelo), se presenta el código para el PV en el (Anexo B).

3.4.3.2. Respuesta del módulo unidad

En este apartado se comprueba el funcionamiento de un solo módulo PV, en consecuencia se le asigna a las variables $s=1$ y $p=1$ constituyendo de esta forma un array 1×1 .

Para conseguir las curvas características de I-V y P-V para variaciones de temperatura y radiación solar. Se hace notar que en esta sección se abarca las simulaciones con un solo módulo PV, Las simulaciones y análisis para el array PV 10×5 se realiza en el siguiente Capítulo.

Simulación radiación y temperatura ideales

Para la simulación del modelado PV comercial, se ha considerado los parámetros de radiación a 1000 W/m^2 , que es la misma que utiliza el fabricante para el cálculo de sus parámetros. Además se ha considerado una temperatura ambiental $T=25^\circ\text{C}$ y se tiene en cuenta una tolerancia en las características eléctricas del $\pm 3\%$. Figura 3.4.

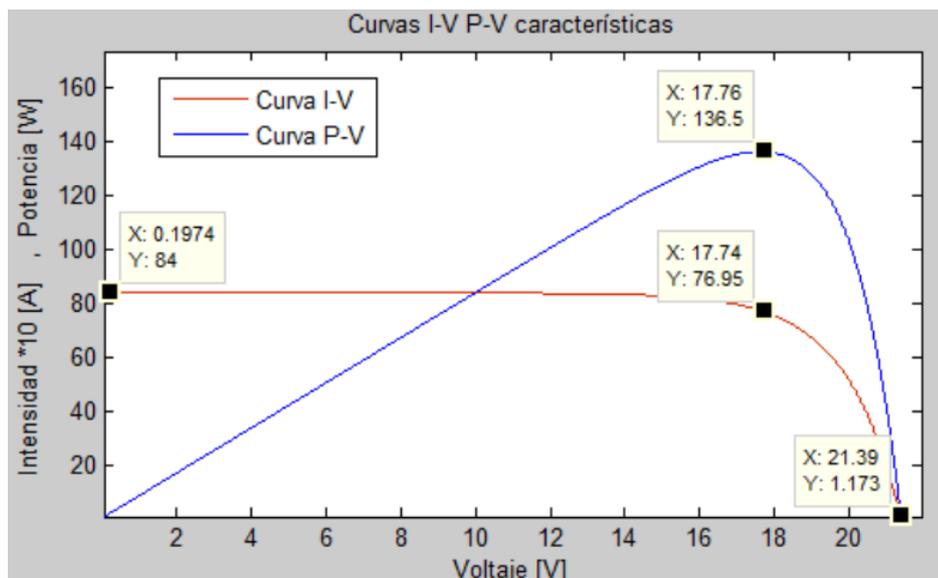


Figura 3.4: Curvas características del módulo PV - 135W

Fuente: Elaborado por el investigador

Tabla 3.2: Error relativo de los parámetros del módulo PV-135W

Parametro	Valor teórico	Valor simulado	Error relativo
Corriente de cortocircuito (Isc)	8.40 A	8.40 A	0 %
Tensión de circuito abierto (Voc)	21.40 V	21.40 V	0 %
Voltaje en el punto de máxima potencia (Vpmax)	18.00 V	17.76 V	1 %
Corriente en el punto de máxima potencia (Ipmax)	7.50 A	7.69 A	-2.5 %
Punto de máxima potencia (MPPT)	135 W	136.5 W	-1.1 %

Fuente: Elaborado por el investigador

Como podemos ver en la Tabla 3.2; el modelo matemático ha sido capaz de emular las características del panel comercial con buena precisión, dentro del margen del $\pm 3\%$ de error estipulado por el fabricante.

Por tanto, se valida con estos resultados nuestro modelo matemático podemos afirmar que nuestro modelo cumple con el comportamiento real de un panel fotovoltaico. Donde después se implementamos un array de 15 paneles fotovoltaico. Variando los parámetros s y p.

Simulación radiación variable

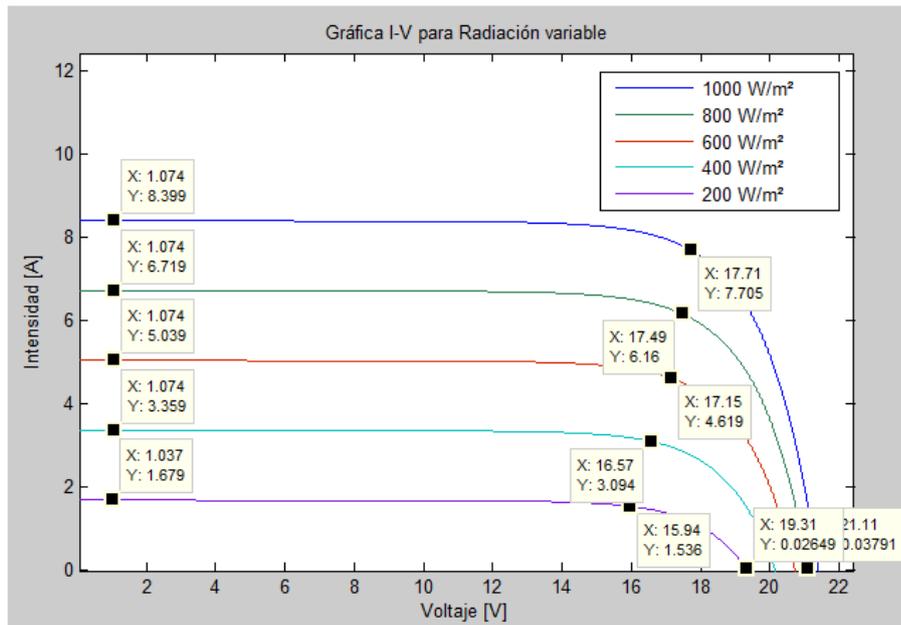


Figura 3.5: Curva característica I-V radiación variable T=25°C

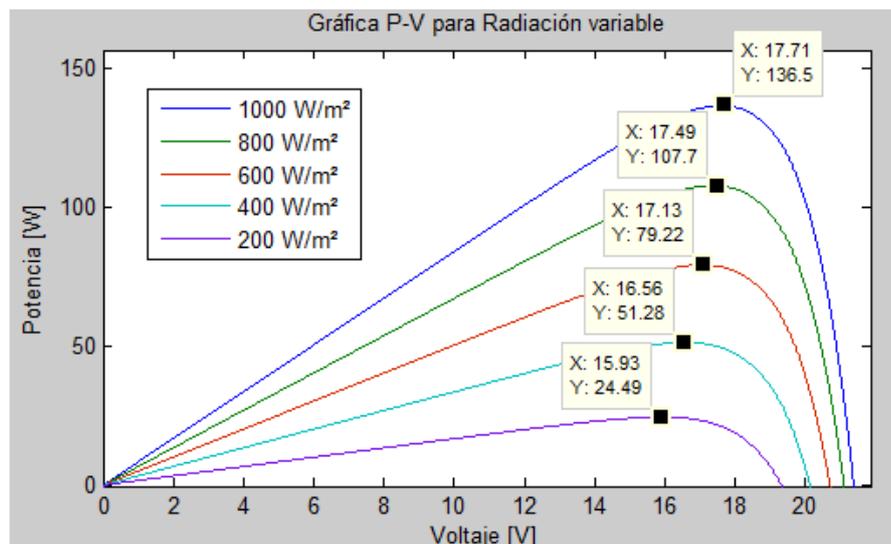


Figura 3.6: Curvas Características P-V, radiación variable y T=25°C

Fuente: Elaborado por el investigador

Para las siguientes simulaciones se utilizó una temperatura ambiental constante $T = 25^{\circ}\text{C}$ y unos niveles variables de radiación en el rango de 200 a 1000 W/m^2 .

Con esta simulación se pretende ver la respuesta del panel a la variación de la incidencia de los rayos del Sol, forzando el valor de irradiación en un rango operativo real y se muestran en las Figura 3.5 y Figura 3.6.

Tabla 3.3: Valores simulados I-V y P-V, irradiación Variable y T=25°C

Parametro	1000 W/m ²	800 W/m ²	600 W/m ²	400 W/m ²	200 W/m ²
Corriente de cortocircuito (Isc) A	8.40	6.72	5.04	3.36	1.68
Tensión de circuito abierto (Voc) V	21.40	21.11	20.73	20.13	19.30
Voltaje en el punto de máxima potencia (Vpmax) V	18.00	17.49	17.13	16.56	15.93
Corriente en el punto de máxima potencia (Ipmax) A	7.50	6.16	4.62	3.09	1.54
Punto de máxima potencia (MPPT) W	135	108	79.2	51.3	24.5

Fuente: Elaborado por el investigador

Los resultados se muestran en la Tabla 3.3, se refleja la validez de nuestro modelo. Ya que responde adecuadamente a los cambios de irradiación que se pueden dar a lo largo del día. Se aprecia a la disminución de la irradiación; también disminuyen el MPP y los valores de Vpmax e Ipmax.

Simulación temperatura variable

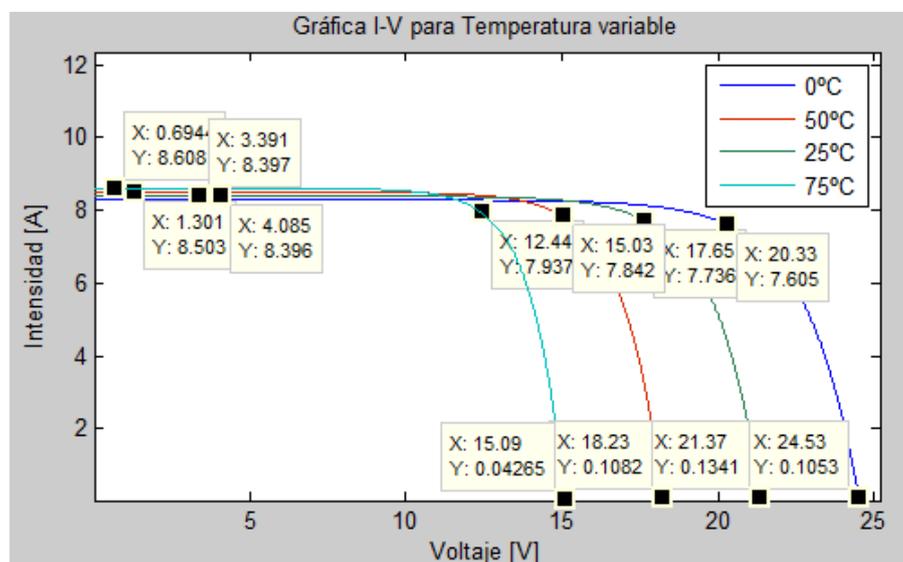


Figura 3.7: Curvas Características I-V Temperatura variable

Fuente: Elaborado por el investigador

Se simula variando la temperatura de operación del panel, para temperaturas de 0, 25, 50 y 75°C y una irradiación constante de 1000 W/m². Se presenta en las Figura 3.7 y Figura 3.8.

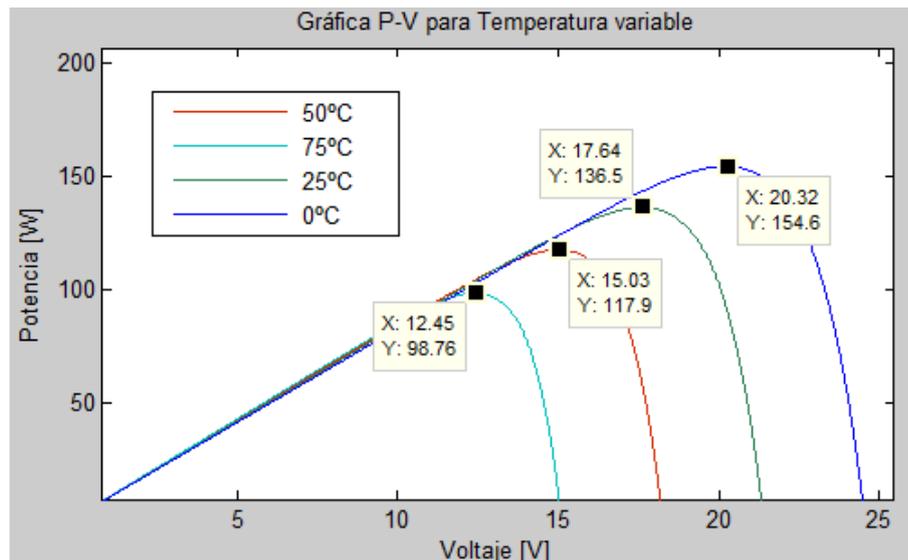


Figura 3.8: Curvas Características P-V, Temperatura variable

Fuente: Elaborado por el investigador

La última prueba se simula variando la temperatura de operación del panel, Los resultados mostrados, para temperaturas de 0, 25, 50 y 75°C y una irradiación constante de 1000 W/m², verificando la Tabla 3.4, se aprecia un incremento de la Temperatura también incrementa la I_{pmax} y el parámetros MPP, V_{pmax} disminuyen, donde el ultimo varia más rápido que la corriente.

Tabla 3.4: Valores simulados I-V y P-V, Temperatura Variable

Parametro	0 °C	25 °C	50 °C	75 °C
Corriente de cortocircuito (I _{sc}) A	8.40	8.4	8.5	8.61
Tensión de circuito abierto (V _{oc}) V	54.53	21.37	18.23	15.09
Voltaje en el punto de máxima potencia (V _{pmax}) V	20.32	17.64	15.03	12.45
Corriente en el punto de máxima potencia (I _{pmax}) A	7.60	7.74	7.84	7.94
Punto de máxima potencia (MPPT) W	154.6	136.5	117.9	98.76

Fuente: Elaborado por el investigador

Análisis y simulación para el PV array (10x5), se desarrolla en el capítulo 4.

3.4.4. Algoritmo perturbar y observar (P&O)

En el presente trabajo se eligió el método P&O, la función es testear los valores de la corriente y potencia en cada instante de tiempo, para ajustar el ciclo de trabajo D (duty cycle), para obtener la potencia máxima de los paneles. Que se aplicara como entrada (secuencia de pulsos) a la compuerta IGBT del convertidor elevador tipo Boost.

3.4.4.1. Diseño del P&O

Para el diseño consideremos las curvas características I-V y P-V lo que hace muy visual la obtención del MPPT. Se esquematiza en la Figura 3.9.

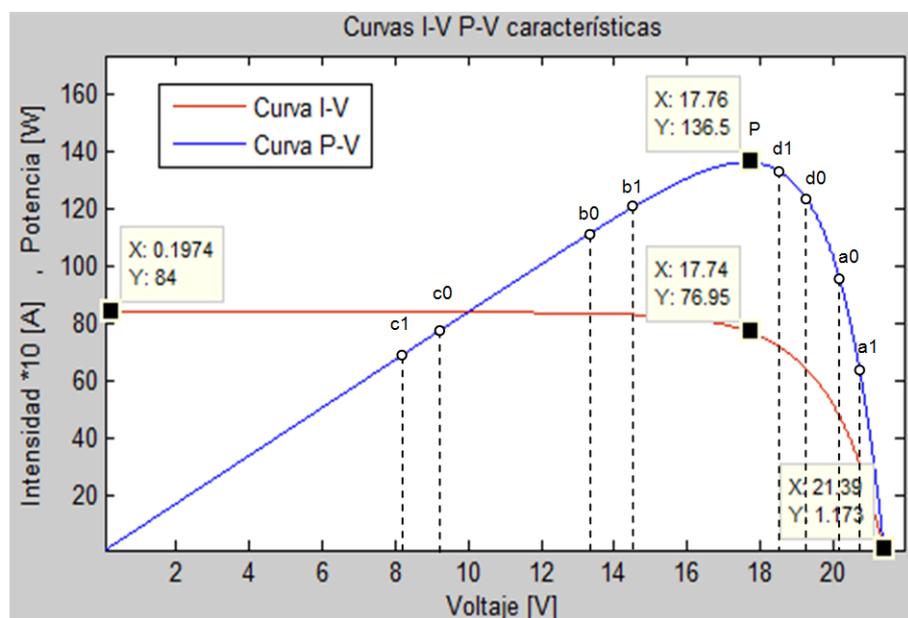


Figura 3.9: Polarizaciones del MPPT en las curvas características del panel I-V y P-V

Se observa en la figura que las variaciones de voltaje influyen sobre la intensidad y la potencia del panel, haciendo que el punto de trabajo oscile de derecha a izquierda o viceversa. La manera de proceder para el diseño de este tipo de control es, en primer lugar, la asignación de códigos 0 y 1 a las bajadas y subidas (respectivamente) tanto de corriente como de potencia. Por tanto siguiendo este procedimiento nos surgen 4 posibles condiciones:

- $I_{panel} = 0$ y $P_{panel} = 0$, indica que la corriente y la potencia bajan respecto su valor anterior. Esta condición corresponde a los instantes A0 y A1, como se aprecia ambas curvas descienden reduciendo su valor y la vez que aumenta la tensión del panel.
- $I_{panel} = 0$ y $P_{panel} = 1$, indica que la corriente ha bajado y la potencia ha subido respecto su valor anterior. Esta condición se corresponde a los instantes B0 y B1, que nos indican que se acerca al MPPT desde la izquierda y por tanto la intensidad disminuye su valor.
- $I_{panel} = 1$ y $P_{panel} = 0$, indica que la corriente ha subido y el valor de potencia ha reducido. Esta condición se corresponde a los instantes C0 y C1 lo que nos sitúa de nuevo a la izquierda del MPP y alejándonos de él ya que la intensidad ha subido.
- $I_{panel} = 1$ y $P_{panel} = 1$, indica que tanto la corriente como la potencia suben respecto su valor anterior. Esta condición corresponde a los instantes D0 y D1 y nos indican que nos acercamos hacia el MPP desde el lado derecho.

Tabla 3.5: Codificación del algoritmo P&O

I_{pv}	V_{pv}	XOR	Sentido	Nivel	Ton	Control
0	0	0	Izquierda	baja	sube	sube
0	1	1	Derecha	sube	baja	baja
1	0	1	Derecha	sube	baja	baja
1	1	0	Izquierda	baja	sube	sube

Fuente: Elaborado por el investigador

De estas cuatro condiciones que se pueden dar en cualquier panel fotovoltaico se puedes extraer las condiciones para que el control actúe según cada una de ellas. Siempre que se den las condiciones B o C nos encontraremos en el lado izquierdo del MPPT y debemos ir hacia la derecha para alcanzarlo. Por tanto deberemos bajar la intensidad y por consiguiente subir el voltaje. Por el contrario si nos encontramos en las condiciones A o D deberemos buscar el MPPT hacia la izquierda. Por tanto si codificamos desplazarnos hacia la izquierda como 0 y desplazarnos hacia la derecha como 1. Haciendo una comparación los datos corresponde a la tabla lógica XOR, la evolución del control se muestra en la Tabla 3.5.

Diagramas de bloque y flujo del P&O

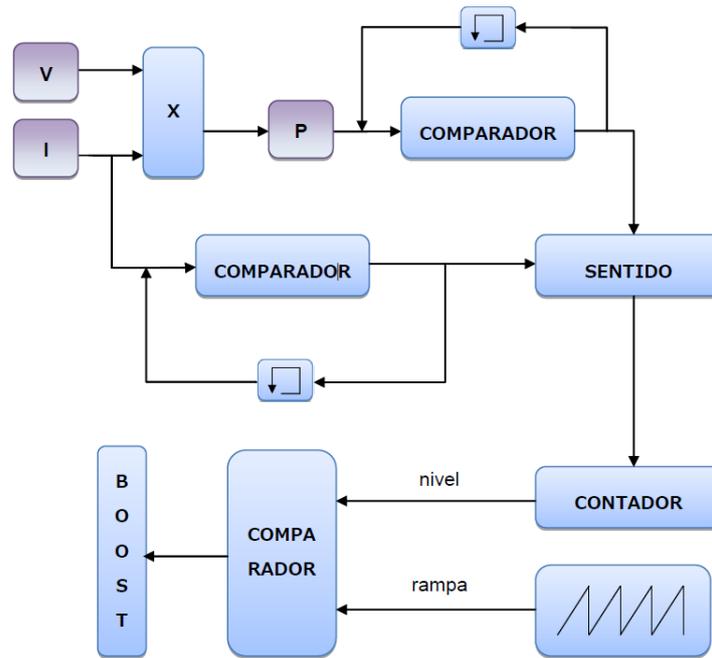


Figura 3.10: Diagrama de bloques para el algoritmo P&O

Fuente: Elaborado por el investigador

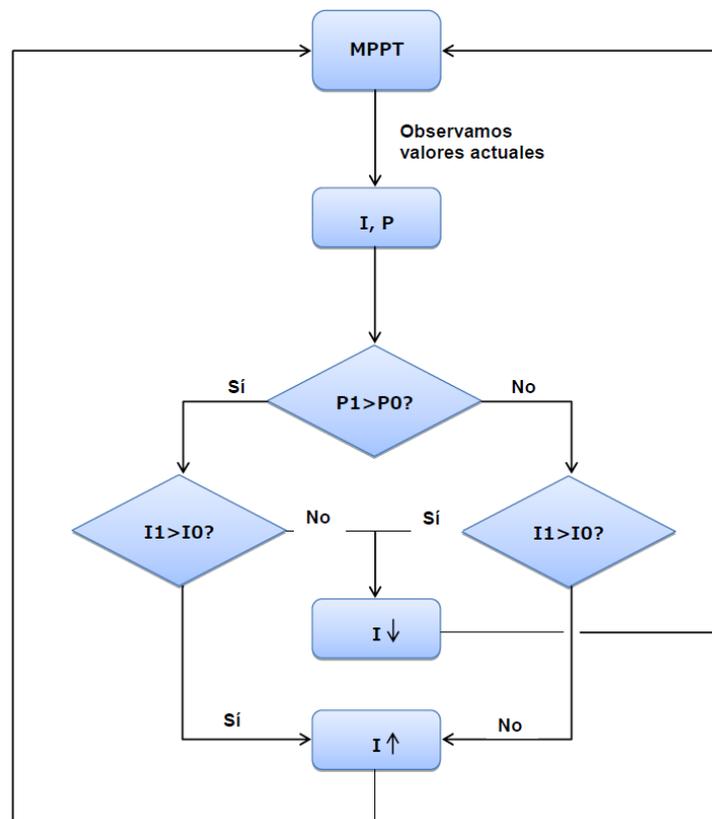


Figura 3.11: Diagrama de flujo para el algoritmo P&O

Fuente: Elaborado por el investigador

Se desarrolla el diagrama de bloques Figura 3.10, donde primeramente se obtiene los valores instantáneos de corriente y voltaje, seguidamente el voltaje se multiplica por la intensidad para hallar la potencia instantánea y se procede a comparar estos dos valores con los obtenidos anteriormente, de la comparación de estos se obtiene el sentido hacia donde debemos guiar el punto de trabajo para obtener el MPPT.

Por otra parte se presenta el diagrama de flujo del algoritmo P&O presentado en la Figura 3.11.

Implementación del P&O en Simulink

Este algoritmo está implementado en Simulink con el uso del bloque Matlab Function mediante código, el cual adquiere los valores de voltaje y corriente del panel fotovoltaico calculando la potencia. Este método se basa en medir valores de potencia de salida antes y después de una perturbación y compararlos, según este proceso se puede determinar qué dirección se debe seguir para alcanzar la potencia máxima, es decir al restar estos valores se obtiene un signo de variación. Con este signo el algoritmo incrementa o decrementa una constante predeterminada ΔD , obteniendo a la salida un ciclo de trabajo D con rango de valores de 0 a 1.

La implementación del bloque y parámetros en Matlab/Simulink se muestran en la Figura 3.12 y Figura 3.13 respectivamente, y el código desarrollado se muestra en ANEXO B.

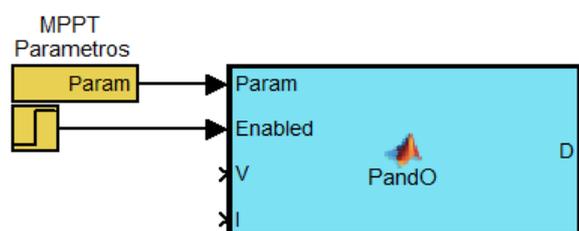


Figura 3.12: Bloque algoritmo P&O

Fuente: Elaborado por el investigador

Parámetros para el algoritmo P&O

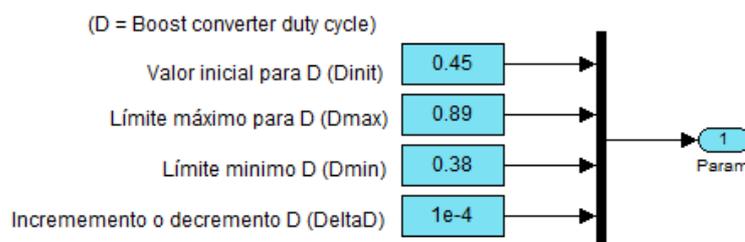


Figura 3.13: Parámetros para el algoritmo P&O

3.4.4.2. Respuesta del P&O

En la Figura 3.14, se presenta la respuesta del ciclo de trabajo estimado 1.2s.

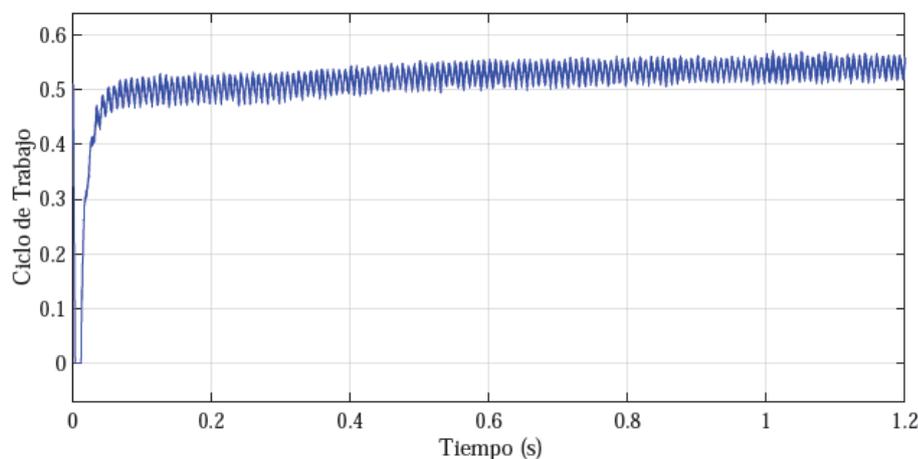


Figura 3.14: Ciclo de trabajo D obtenido del algoritmo P&O.

Fuente: Elaborado por el investigador

3.4.5. Diseño del convertidor boost

El convertidor elevador tipo boost permite obtener una tensión de salida mayor a la de entrada, la tensión de entrada depende del número de paneles en serie que se consideran en el sistema, en este caso a la salida se tiene una tensión de 400V, con respecto a los 311Vpico de la red asegurando de esta manera una modulación adecuada por parte del inversor, estableciendo una tensión mayor para el correcto funcionamiento de los lazos de control de potencia. Debido a esto se considera la tensión del MPPT de 176.41V aproximadamente. Además la corriente MPPT a través del inductor del convertidor es de 38.78.

3.4.5.1. Cálculo y parámetros del convertidor

Tabla 3.6: Valores necesarios para el cálculo del convertidor boost

Parámetros	Valor
Frecuencia de conmutación (fcon)	30 KHz
Tensión de ingreso Vin	176.41 V
Tensión de salida Vout	400 V
Corriente a través del inductor iL	38.78 A
Corriente de rizado del inductor ΔiL	0.38 A
Tensión de rizado del capacitor ΔVout	1 V
Potencia de salida	6841 W

Fuente: Elaborado por el investigador

En la Tabla 3.6, se establecen los datos necesarios para calcular los componentes del convertidor elevador.

3.4.5.1.1. Cálculo del ciclo de trabajo (Duty Cycle)

De acuerdo a la (Ec.2.29) el ciclo de trabajo se calcula de la siguiente manera:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} = 0.559 \quad (\text{Ec.3.1})$$

El ciclo de trabajo se aplica a un modulador por ancho de pulso (PWM), el cual con la respectiva frecuencia de conmutación permite el funcionamiento del transistor IGBT.

En el diseño se considera ciclos de trabajo útiles de 0.435-0.559, debido a que se obtiene valores de tensión dentro de un rango permisible en la entrada del inversor DC-AC, para los controles de potencia.

3.4.5.1.2. Cálculo del inductor Lboost

Según la (Ec.2.30) el Lboost se calcula de la siguiente manera:

$$L_{\min} = \frac{v_0 * D(1-D)}{\Delta i_L * f_s} = \frac{(400)(0.559)(1-0.559)}{(0.387)(20000)} = 12.71 \mu F$$

$$L_{boost} = 15.26 \mu F \quad (\text{Ec.3.2})$$

Para garantizar la operación en MC agregamos 20% :

El inductor está diseñado para una corriente de 38.77 A, por lo que se establece un rizado de corriente del 1% lo suficientemente bajo para mayor estabilidad del sistema. La frecuencia de conmutación del transistor IGBT, se recomienda establecer en valores mayores a 20kHz para reducir variaciones en la corriente de la bobina, cabe mencionar que esta frecuencia no debe ser demasiado alta ya que se presentarán mayores pérdidas por conmutación. En este caso se impone una frecuencia de 20kHz.

3.4.5.1.3. Cálculo del capacitor Cboost

Según la (Ec.2.35) Cboost se calcula de la siguiente manera:

$$C_{out} = \frac{I_o * D}{\Delta v_o * f_s} = \frac{(17.10)(0.559)}{(0.003)(20000)} = 398.33 \mu F \quad (\text{Ec.3.3})$$

Dónde: V_{out} : Tensión de salida del convertidor
 P : Potencia activa inyectada a la red

El condensador ubicado a la salida del convertidor, se diseña considerando un rizado de tensión menor a 1V, con la finalidad de obtener una tensión a la salida con menos oscilaciones.

3.4.5.2. Respuesta del convertidor elevador

Para la simulación del convertidor elevador se establece un modulador por ancho de pulso o PWM, necesario para generar los pulsos de onda cuadrada para el funcionamiento del transistor IGBT. El ciclo de trabajo determina el porcentaje del periodo de pulso aplicado al IGBT.

En la Figura 3.15, se presenta el circuito del convertidor elevador en conjunto con el algoritmo Perturbar y Observar conectado a la red en Simulink.

Cabe recalcar que el capacitor en la entrada del convertidor se coloca con la finalidad de disminuir los transitorios de corriente y tensión del panel, en este caso el valor corresponde a ($C_{in} = 343.49 \mu F$), Los terminales de salida del convertidor se conectan al inversor DC-AC.

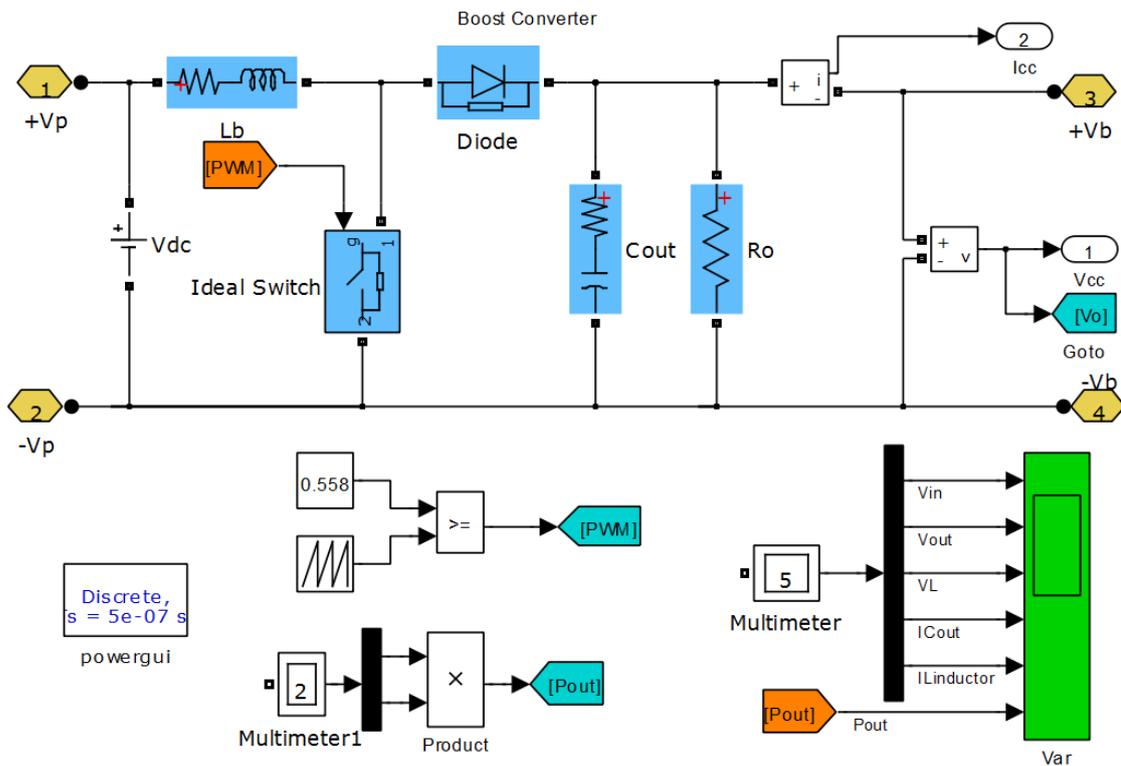


Figura 3.15: Circuito del convertidor elevador

Fuente: Elaborado por el investigador

3.4.5.2.1. Voltaje y rizo del convertidor

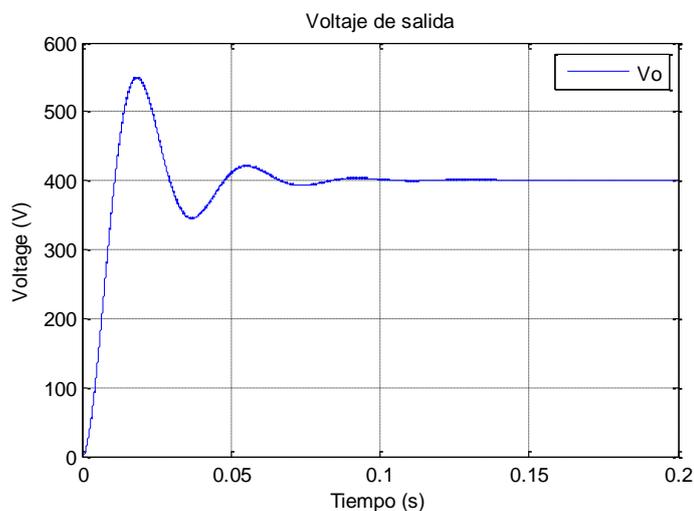


Figura 3.16: Voltaje salida del convertidor

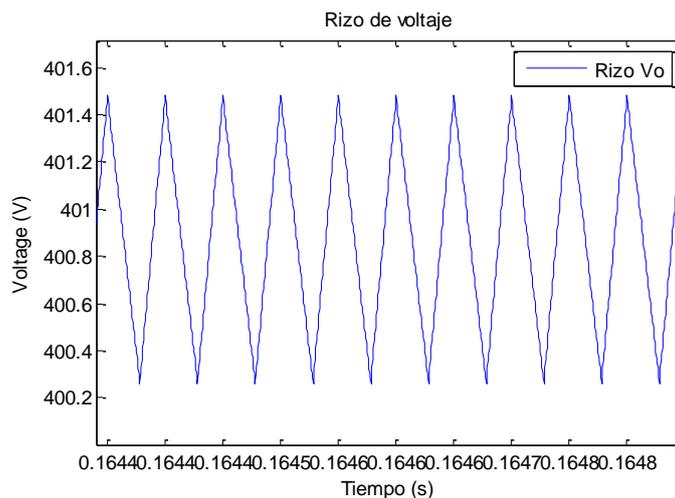


Figura 3.17: Rizo de voltaje salida del convertidor

Se muestra la respuesta alimentadas con fuentes ideales en las Figura 3.16 y Figura 3.17.

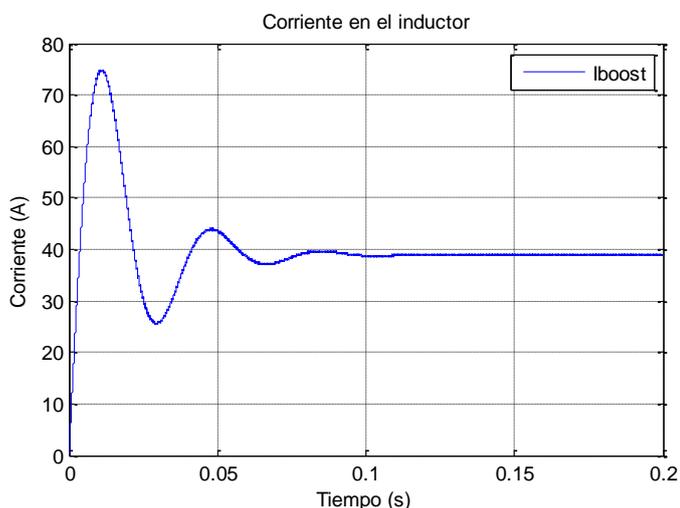


Figura 3.18: Corriente en el inductor boost

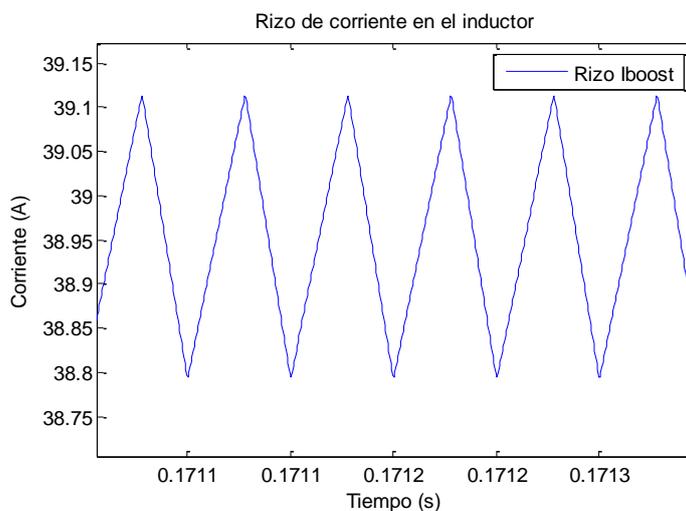


Figura 3.19: Rizo de corriente en el inductor

3.4.5.2.2. Corriente y rizo del inductor boost

Se presenta en las Figura 3.18 y Figura 3.19.

3.4.6. Diseño del inversor monofásico

El objetivo de este punto es obtener un proceso de inversión, transformando la corriente DC en AC, cumpliendo la condición de que la tensión de salida del convertidor sea mayor a 311V requerida por el inversor para que entre en funcionamiento. Se implementa un inversor monofásico puente completo denominado también ‘full bridge’, estructurado mediante IGBTs, controlando los disparos de los transistores y un filtro adecuado.

Modelo del inversor monofásico

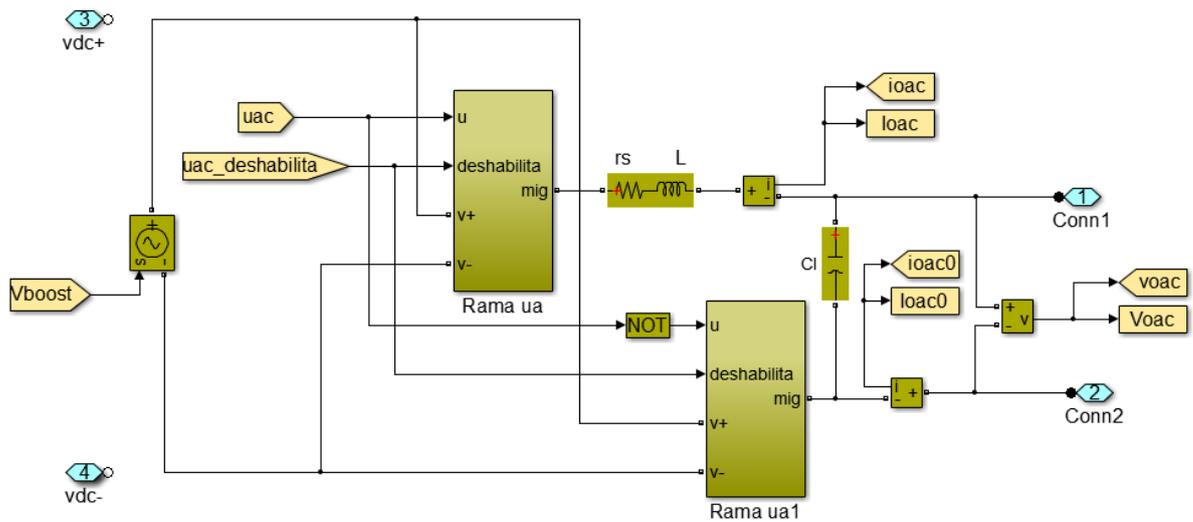


Figura 3.20: Circuito del inversor monofásico de puente completo

Fuente: Elaborado por el investigador

Rama del inversor monofásico

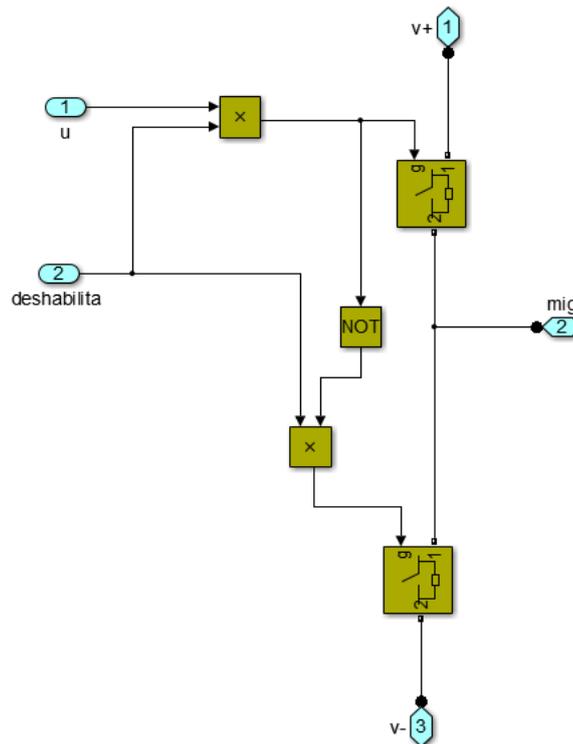


Figura 3.21: Rama del inversor monofásico

Fuente: Elaborado por el investigador

En la Figura 3.21, se implementa la rama del inversor, donde se tiene el puerto “deshabilita”, cumpliendo la función de activar y desactivar el inversor.

3.4.6.1. Diseño del control del inversor

Para el diseño del control del inversor separamos en dos partes claramente diferenciadas, la primera es para la obtención de la constante de referencia que nos permitirá dar la amplitud adecuada a nuestra señal de referencia, y el segundo obtener del ciclo de trabajo para conmutar los transistores.

Primeramente, se toma en cuenta en el principio de conservación de potencia en los circuitos electrónicos, para este caso la potencia del convertidor DC es igual a la potencia del inversor AC, independiente de la variación de tensión del PV por tanto:

$$\begin{aligned}
 P_{cc} &= P_{ca} \\
 V_{cc} * I_{cc} &= V_{ca} * I_{ca}
 \end{aligned}
 \tag{Ec.3.4}$$

Dónde: CC Corriente Continua
CA Corriente Alterna

$$K_{ref} = \frac{V_{cc} * I_{cc}}{V_{rms}} \sqrt{2} \tag{Ec.3.5}$$

$$\text{Sin}(wt) = \frac{V_{ac}}{V_{rms} * \sqrt{2}} \tag{Ec.3.6}$$

3.4.6.1.1. Obtención de la constante de referencia:

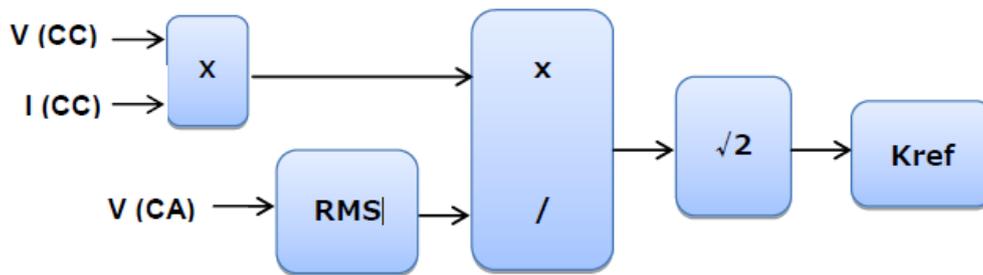


Figura 3.22: Esquema obtención constante de referencia para el control

Fuente: Elaborado por el investigador

Se obtiene la potencia del convertidor, esta se compara con la tensión AC del inversor y previamente filtrada por el bloque 'RMS' para la obtención de su valor en continua y luego el resultado de esta comparación lo multiplicamos por $\sqrt{2}$ para poder trabajar con la constante en alterna. Este bloque es una función encargado de realizar la media estadística.

3.4.6.1.2. Obtención del ciclo de trabajo

En la Figura 3.23, comparamos la tensión del inversor y esta misma tensión pero con su valor de continua, lo que nos da como resultado una senoide de valor unitario pero que trabaja a la frecuencia del inversor 60 Hz. Seguidamente le damos como amplitud el valor de la constante de referencia 'kref' y tiene la señal de corriente de referencia que será comparada con la señal de corriente del inversor para realizar los disparos y así determinar el ciclo de trabajo de las ramas.

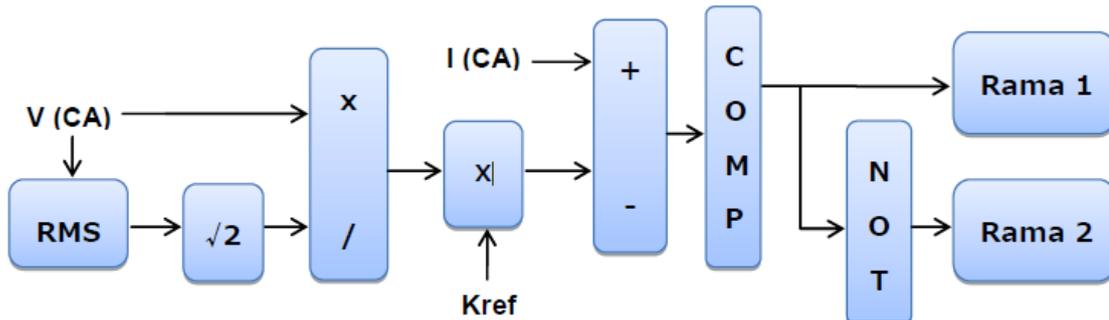


Figura 3.23: Esquema control para la obtención del ciclo de trabajo

Fuente: Elaborado por el investigador

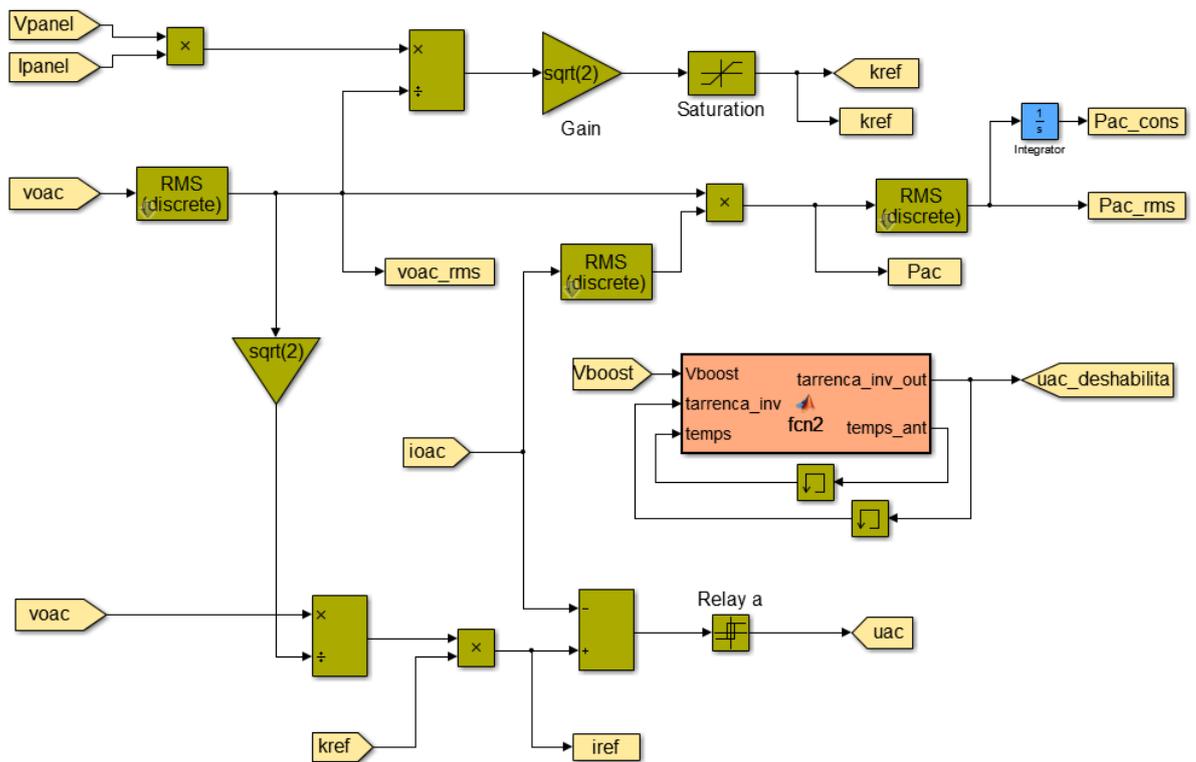


Figura 3.24: Control de disparos Inversor Monofásico

Fuente: Elaborado por el investigador

El sistema de control es conocido como sliding o de deslizamiento. Se ha elegido la implementación de este sistema por su simplicidad, ya que tan solo tiene que compararse la corriente de nuestro inversor con nuestra corriente de referencia y ejecutar los disparos según sea mayor o menor que esta. De esta forma no hace falta sintonizar ningún tipo de parámetro que pudiera hacer nuestro control más complejo de lo necesario. Se implementa el control del inversor en Simulink en la Figura 3.24.

Los bloques sqrt(2) y RMS(discrete) son indispensables cuando trabajamos con corrientes continuas y alternas al mismo tiempo. De esta forma es posible operar con ambos sistemas y permite hacer una comparación en los resultados.

3.4.7. Modelado de carga doméstica y red eléctrica

La vivienda será la encargada del consumo energético que se efectúa durante un día completo, por tanto el consumo de energía doméstica se comporta como una simple carga resistiva con la capacidad de variar su valor y de esta manera generar diversas demandas energéticas a lo largo del día.

Para el modelado usaremos una curva característica aproximada para la simulación respectiva. Figura 3.25, por otro lado el modelo de la red eléctrica, quedara simulada por una simple fuente de corriente alterna, con una amplitud de 311 V pico y a una frecuencia de 60Hz.

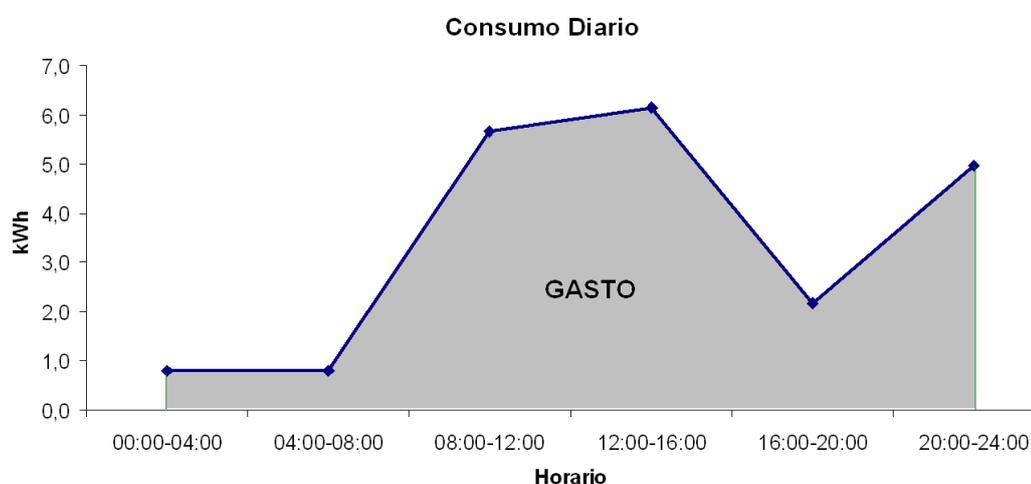


Figura 3.25: Aproximación de la curva característica de consumo

Fuente: <http://www.autoconsumoresidencial.com/>

3.5. Procesamiento y análisis de datos

Los datos se muestran en las tablas de cada sección anterior.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

En el presente capítulo se desarrolla las simulaciones y el análisis sistema fotovoltaico con todas las etapas interconectadas, las simulaciones podemos dividirla en dos grupos como estáticas y con seguimiento.

En primer lugar se realiza la simulación del correcto funcionamiento del bloque, radiación solar, el arreglo de PV, el seguimiento del MPPT del algoritmo P&O y el convertidor elevador boost. En segundo lugar, las simulaciones estáticas comprendidas como es las épocas de solsticios y equinoccios.

Por ultimo las simulaciones con seguimiento de los módulos PV, atribuidas a ejes (a 1 y 2 grados de libertad) para el seguimiento de la trayectoria del sol, luego se realiza las comparaciones y análisis del sistema.

4.1.1. Simulaciones estáticas

4.1.1.1. Simulación de array 10x5

En la Figura 4.1, se presenta la simulación que comprueba el correcto funcionamiento del arreglo de paneles 10x5, extrayendo las curvas características I-V y P-V, son las que nos aportan información relevante.

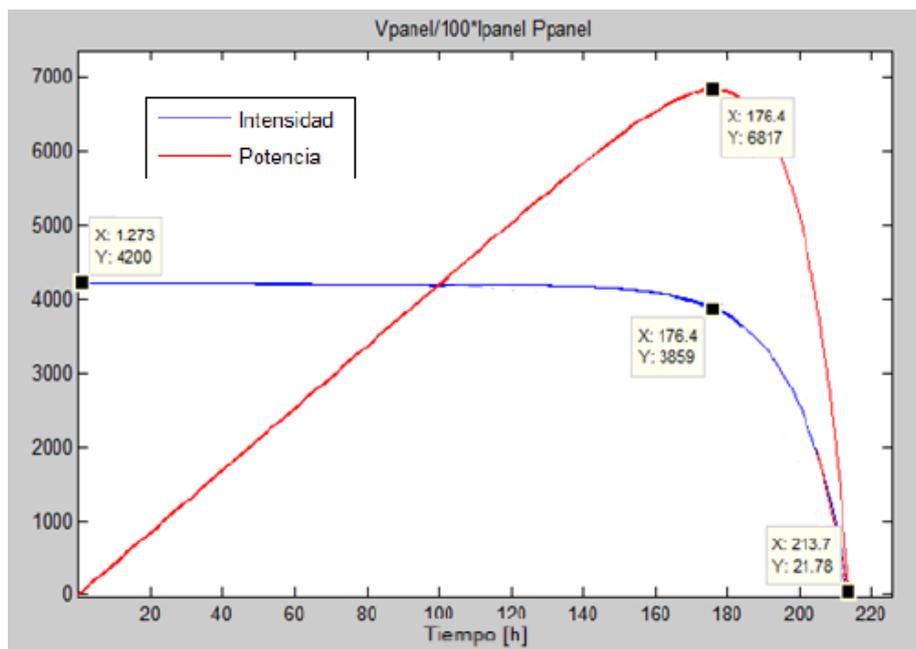


Figura 4.1: Curvas características I-V P-V para 1000 W/m²

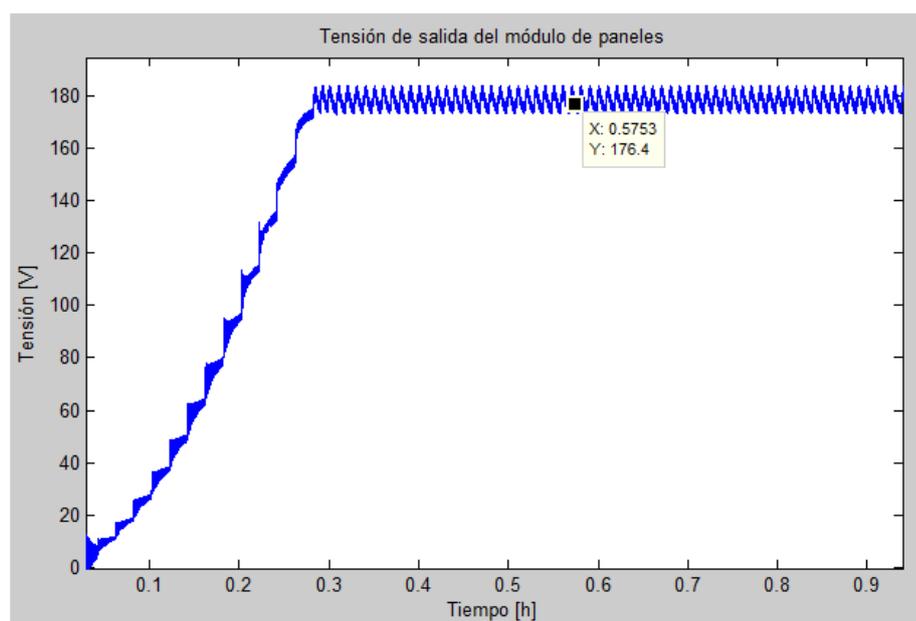


Figura 4.2: Tensión módulo solar para radiación constante 1000 W/m²

Fuente: Elaborado por el investigador

También se comprueba el funcionamiento del algoritmo P&O capaz de seguir el MPPT manteniendo la tensión constante para la producción de potencia máxima. Se observa en la Figura 4.2, el sistema sigue el punto de máxima potencia con bastante precisión, donde obtenemos una tensión de 176.4V.

Se presenta la Tabla 4.1, como consecuencia de las simulaciones mostradas en las Figura 4.1 y Figura 4.2, donde se obtiene resultados satisfactorios comparadas con las características impuestas por el fabricante, perteneciendo dentro del rango permitido del ($\pm 3\%$).

Tabla 4.1: Error relativo de los parámetros del array PV 10x5

Parámetro	Valor teórico	Valor simulado	Error relativo
Corriente de cortocircuito (I_{sc}) x5	42.00 A	42.00 A	0%
Tensión de circuito abierto (V_{oc}) x10	214 V	214 V	0%
Voltaje en el punto de máxima potencia (V_{pmax}) x10	180 V	176.4 V	2%
Corriente en el punto de máxima potencia (I_{pmax}) x5	37.5 V	38.59 A	-2.9%
Punto de máxima potencia (MPPT) x50	6750 W	6817 W	-0.9%

4.1.1.2. Respuesta del bloque radiación solar

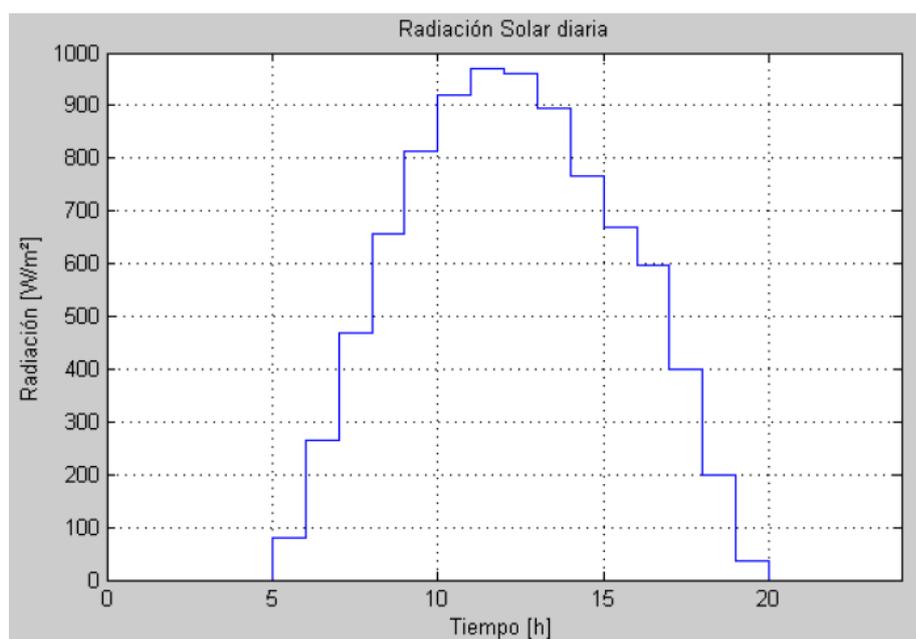


Figura 4.3: Radiación solar variable a lo largo del día - 24 horas

Fuente: Elaborado por el investigador

La respuesta del panel fotovoltaico depende de la variable radiación solar, el panel no puede trabajar con una única curva característica I-V o P-V, debido al movimiento de rotación y traslación de la tierra.

En la Figura 4.3, podemos ver la variación de la radiación en el transcurso del día, donde el parámetro del tiempo representa de 0 a 24 Seg. Cada segundo representa una hora, haciendo un total de 24 horas.

Como vemos la función toma valores de radiación cada hora siguiendo el movimiento descrito por el sol, de tal forma que determina la radiación de entrada al bloque de los módulos.

4.1.1.3. Respuesta del módulo de paneles solares

La simulación de la corriente, la tensión y la potencia del array solar, se presenta en la Figura 4.4, alimentada con la función del bloque radiación solar, se aprecia la tensión de salida en los módulos situado en torno a los 182V y es la intensidad la que hace variar la potencia cerca de 6.7KW aproximadamente.

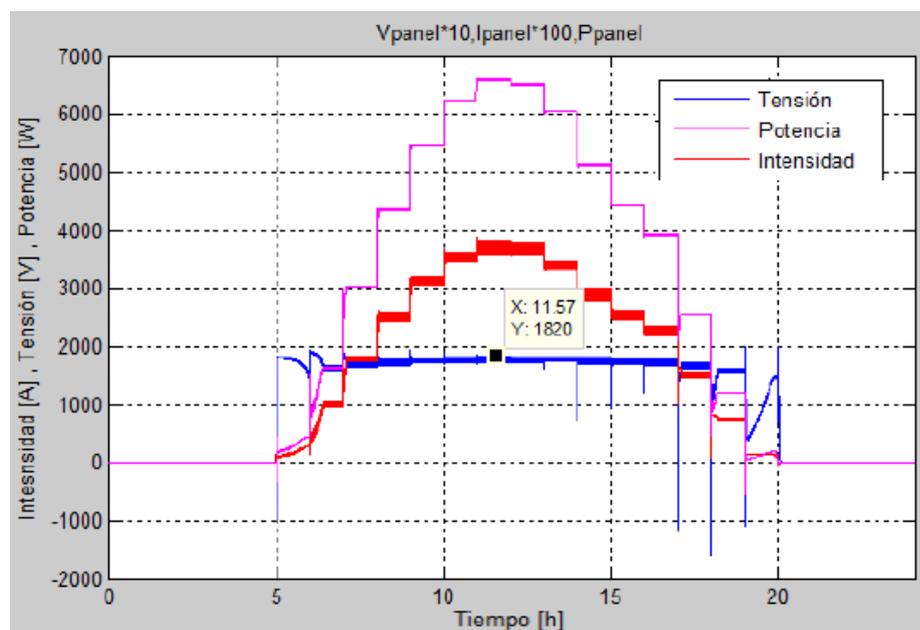


Figura 4.4: Potencia, intensidad y tensión de salida del array solar

4.1.1.4. Respuesta del convertidor elevador boost

Simulación alimentada con el PV array, En la Figura 4.5, en la salida del convertidor podemos observar la tensión de salida de 1151V en su punto más elevado.

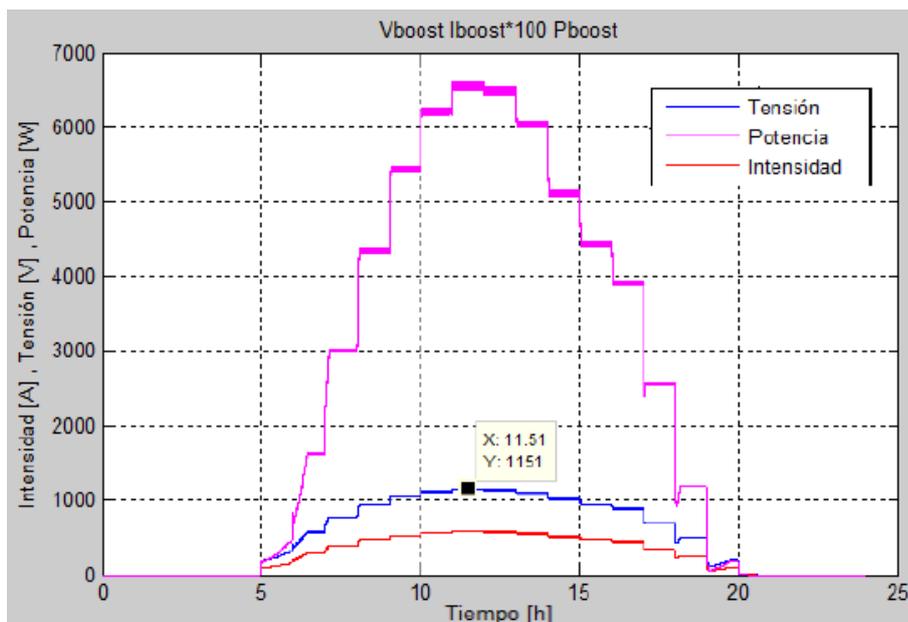


Figura 4.5: Potencia, intensidad y tensión de salida del convertidor boost

Fuente: Elaborado por el investigador

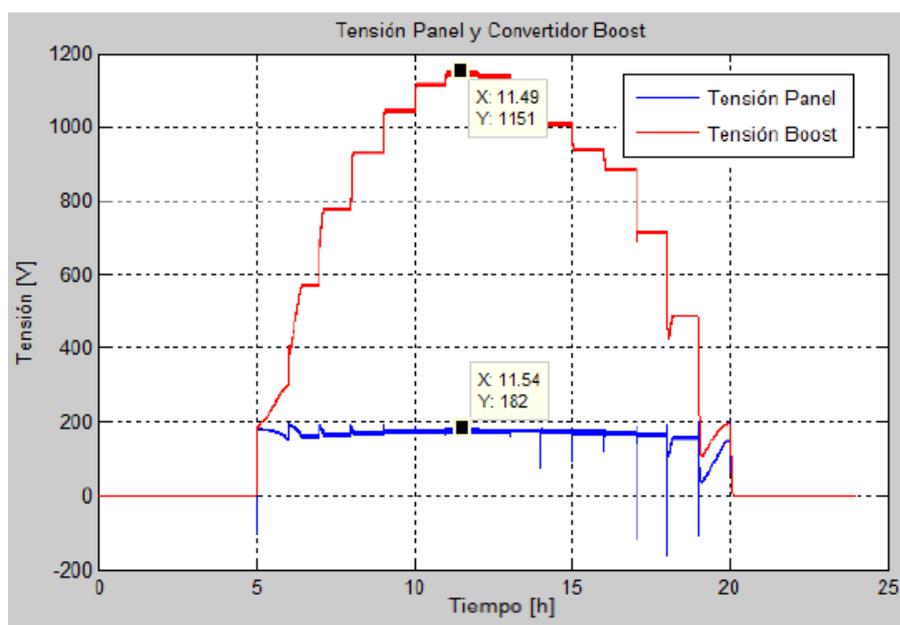


Figura 4.6: Tensiones de salida del módulo solar y convertidor boost

Fuente: Elaborado por el investigador

La entrada de tensión que tenía el convertidor y que provenía de nuestro modulo solar era de unos 180 V aproximadamente, por tanto hemos sido capaces aumentar x6 veces el valor de salida, obteniendo un tensión por encima de los 311V requeridos por el inversor.

Para una mejor visualización mostramos en la Figura 4.6, la comparación de las tensiones de los PVs y el boost, como podemos ver incluso para las más pequeñas radiaciones tenemos más de 311V a la salida del convertidor lo que hace al sistema más efectivo y eficiente.

4.1.2. Simulaciones en épocas de solsticio y equinoccio

Los solsticios: son los momentos del año en los que el Sol alcanza su mayor o menor altura aparente en el cielo, y la duración del día o de la noche son las máximas del año, respectivamente. Astronómicamente, los solsticios son los momentos en los que el Sol alcanza la máxima declinación norte ($+23^{\circ} 27'$) o sur ($-23^{\circ} 27'$) con respecto al ecuador terrestre.

Existen dos, el solsticio de verano corresponde al día 21 de junio y es conocido por el día más largo del año en el hemisferio norte, y el solsticio de invierno, ocurre alrededor del 21 de diciembre y es conocido por la noche más larga del año en el hemisferio norte.

Se denomina equinoccio: al momento del año, en que el sol está situado en el plano del ecuador terrestre, y la palabra equinoccio proviene del latín *aequinoctium* y significa «igual». Ese día para un observador que se ubica en el ecuador terrestre, el sol alcanza el zenit, y el paralelo de declinación del sol con el ecuador coinciden. Ocurre 2 veces al año, la primera sobre 20/21 de marzo denominada equinoccio primavera y la segunda sobre 22/23 de septiembre denominada equinoccio otoño,

4.1.2.1. Solsticio verano (21 junio)

En esta primera simulación veremos un poco más en profundidad cómo funciona el sistema completo, para poder entender las diferentes graficas que se mostrarán en cada una de ellas, y las condiciones de simulación se muestra a continuación.

Condiciones de simulación – Solsticio Verano		
Fecha	Mes	Junio (6)
	Día (n)	21
Condiciones atmosféricas	Presión atmosférica (Pa)	1
	Latitud (L)	15
	Altitud (h)	0
	Estado de cielo	despejado
	Radiación (W/m ²)	Variable
	Temperatura (°C)	25
Condiciones de los paneles	Azimut de la placa (γ)	23.5
	Inclinación del panel (β)	Modo verano
	Panel con seguimiento	Sin ejes

Fuente: Elaborado por el investigador

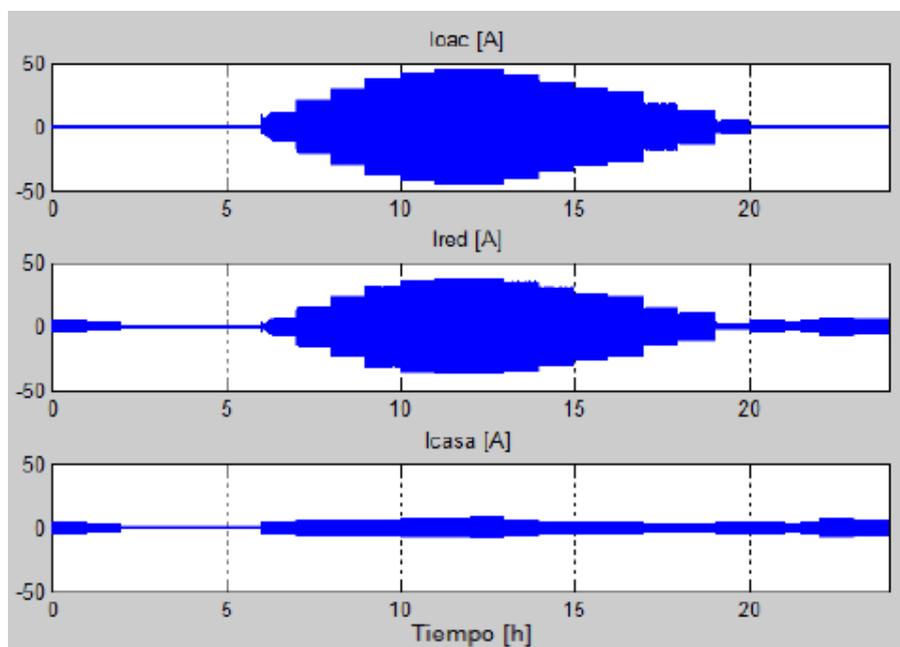


Figura 4.7: Intensidades inversor, hogar y red eléctrica – solsticio verano

En la Figura 4.7, se muestra la simulación las corriente que circulan, donde el inversor entra en funcionamiento para suministrar corriente eléctrica alterna, cuando la tensión de la salida del convertidor es mayor a 311 V, en caso contrario no se posee energía de la fuente solar.

Por otro lado en la Figura 4.8, se muestra primeramente la radiación solar, como se mencionó, anteriormente es el día de mayor insolación de todo el año. Observando entre las 5-6 am se aprecia la radiación solar, pero el sistema no es capaz de producir potencia hasta las 6-7 am. Y por el contrario a partir de esta hora hasta 5-6 pm se genera potencia en los paneles.

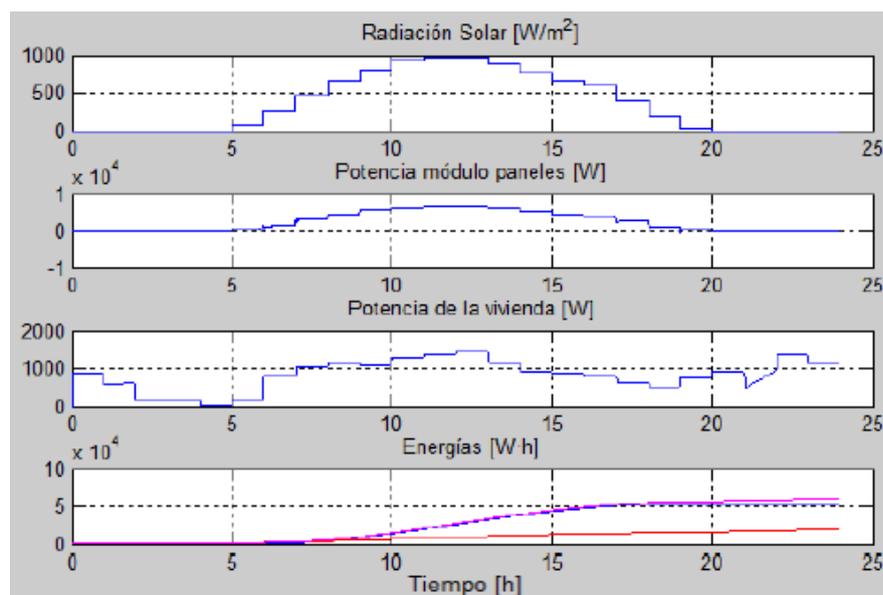


Figura 4.8: Simulaciones completas - solsticio de verano

Fuente: Elaborado por el investigador

En la Figura 4.9 y Figura 4.10, se aprecia el consumo de energía (señal roja) que no es más de 20KWh a lo largo del día, como se mencionó anteriormente nuestro sistema empieza a trabajar entre las 6-7 de la mañana, donde en este día en particular (21 de junio) se tiene mayor radiación solar consiguiendo mayor potencia eléctrica de todo el año.

En contraparte a partir de las 6-7 am entra en funcionamiento los paneles solares y estos producen energía según la disponibilidad de la radiación solar a lo largo del día, y por tanto si esta es alta ellos producirán una tasa energética elevada.

Se observa también el sistema fotovoltaico produce 55KWh durante el horario solar, durante este periodo la demanda del consumo de la vivienda es de 10KWh, realizando un diferencia entre la energía producida y consumida se obtiene 45KWh aproximadamente, dicha energía se suministra a la red eléctrica, se muestra en la Figura 4.10.

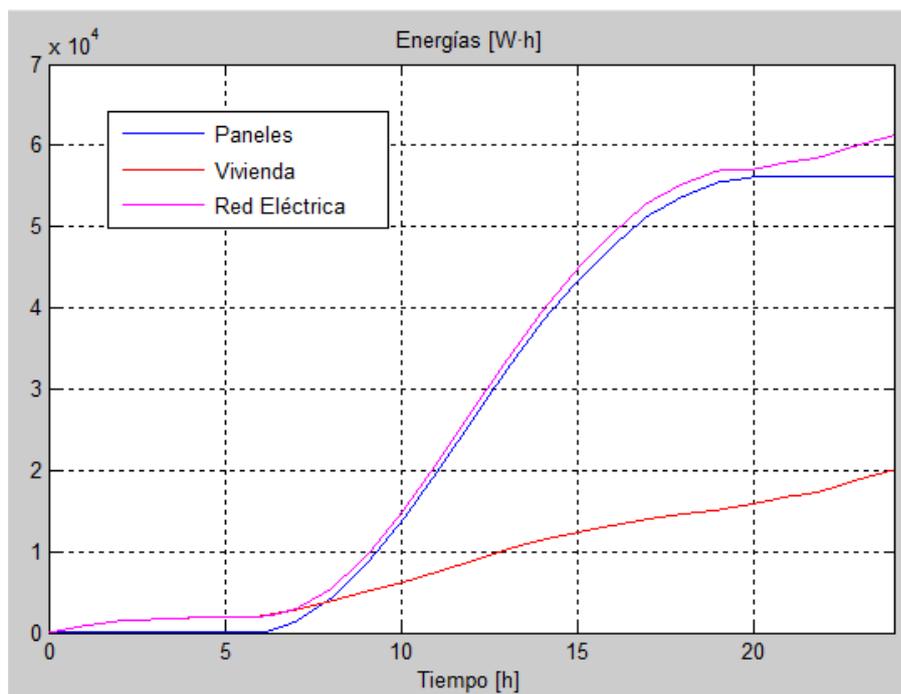


Figura 4.9: producción y consumo energético paneles, hogar y red– solsticio verano

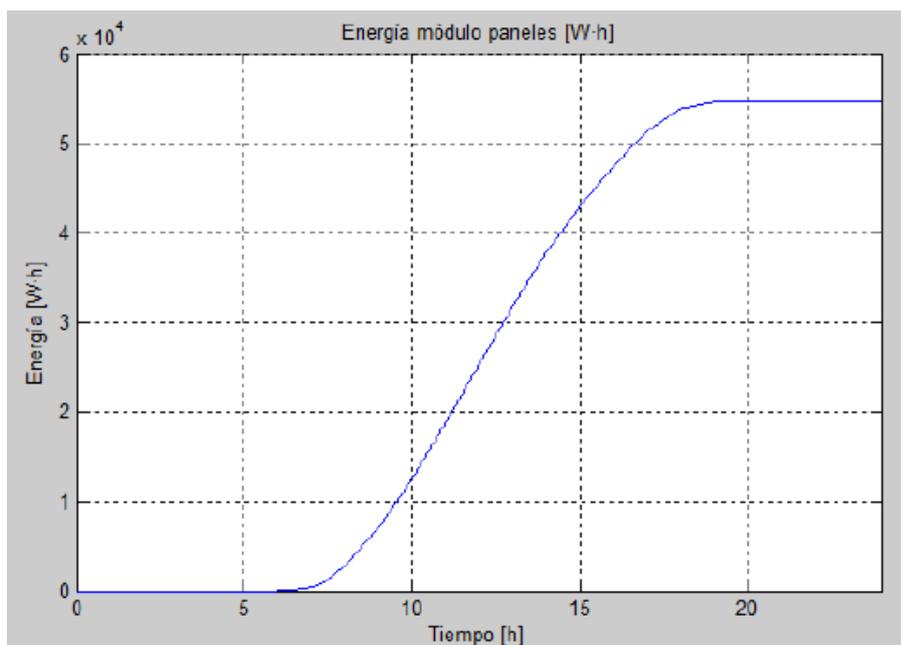


Figura 4.10: Energía generada por los paneles estáticos

4.1.2.2. Solsticio invierno (21 diciembre)

El solsticio de invierno, ocurre alrededor del 21 de diciembre y es conocido por la noche más larga del año en el hemisferio norte. Las simulaciones se muestran en las Figura 4.11, Figura 4.12 y Figura 4.13, realizadas de manera similar al del solsticio.

Condiciones de simulación – Solsticio Invierno		
Fecha	Mes	Diciembre (12)
	Día (n)	21
Condiciones atmosféricas	Presión atmosférica (Pa)	1
	Latitud (L)	17
	Altitud (h)	0
	Estado de cielo	despejado
	Radiación (W/m ²)	Variable
	Temperatura (°C)	25
Condiciones de los paneles	Azimut de la placa (γ)	23.5
	Inclinación del panel (β)	Modo invierno
	Panel con seguimiento	Sin ejes

Fuente: Elaborado por el investigador

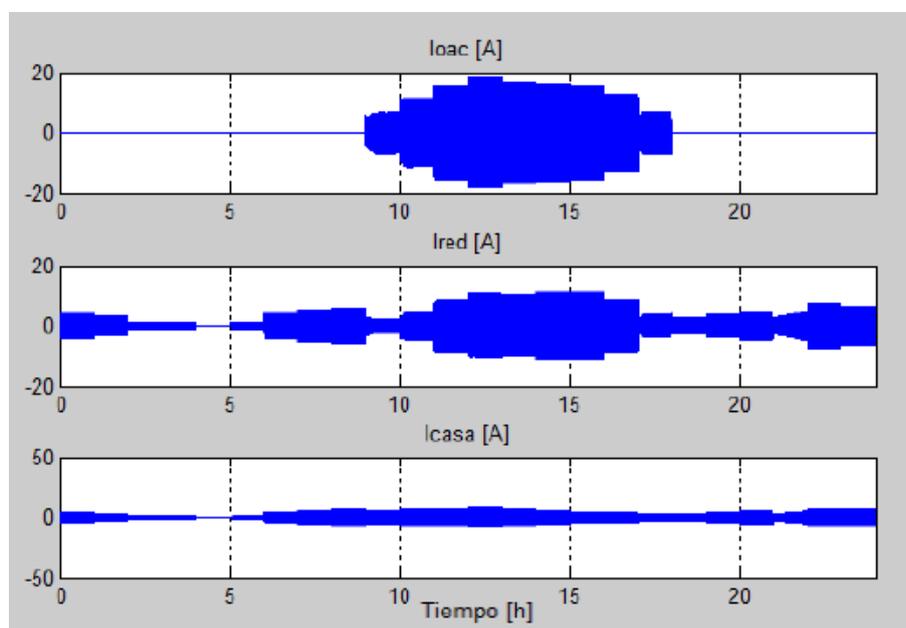


Figura 4.11: Intensidades Inversor, hogar y red eléctrica - Solsticio invierno

Fuente: Elaborado por el investigador

En esta época del año el día es más corto, logrando amanecer entre 6-7am, y los módulos no pueden producir potencia eléctrica hasta las 9-10am aproximadamente. Energía producida durante esta época es la más baja de todo el año a causa de las pocas horas solares.

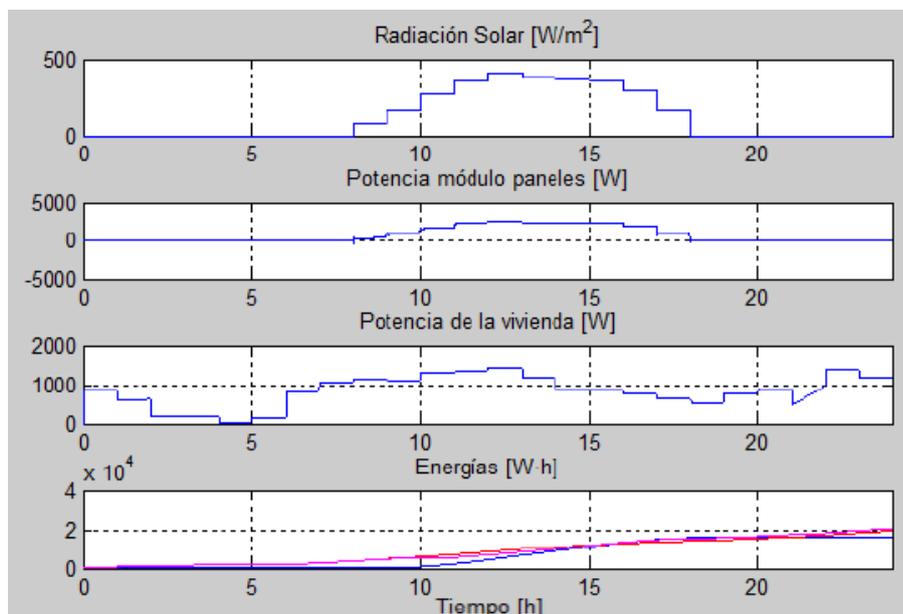


Figura 4.12: Simulaciones completas - Solsticio invierno

Fuente: Elaborado por el investigador

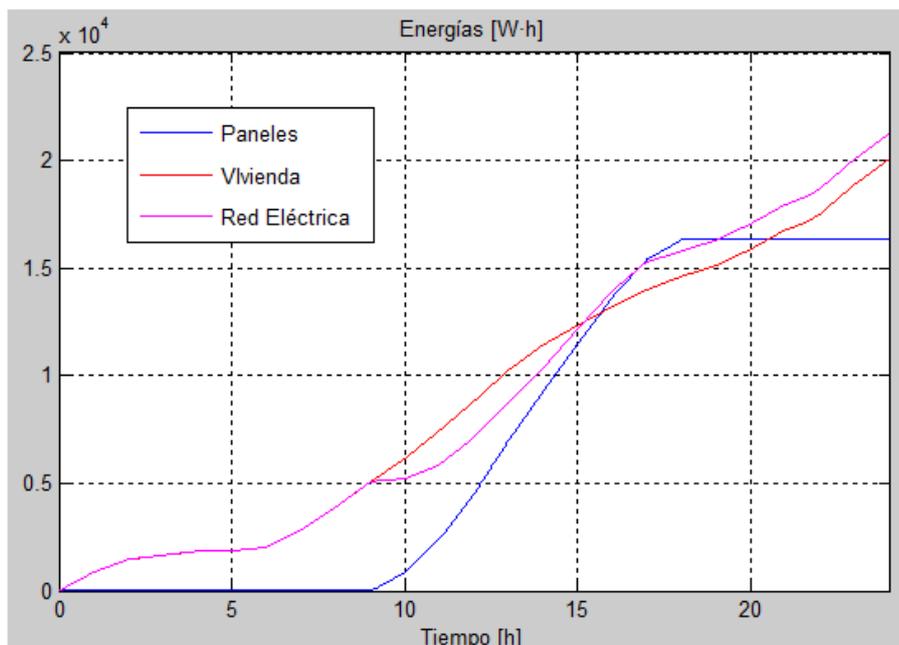


Figura 4.13: Producción consumo de energía PV, hogar y red - invierno

Fuente: Elaborado por el investigador

En resumen, aun teniendo un panorama contrario, los paneles solares cubren la demanda energética durante el rango de 9:30 -18:00 horas, la energía que se genera es de 15KWh, si la demanda de la vivienda es de 10KWh obtenemos 5KWh que se suministra a la red eléctrica.

4.1.2.3. Equinoccios primavera y otoño.

En el proyecto solo simularemos el equinoccio de otoño, ya que el equinoccio primavera es similar.

Condiciones de simulación – Equinoccio Otoño		
Fecha	Mes	Septiembre (9)
	Día (n)	21
Condiciones atmosféricas	Presión atmosférica (Pa)	1
	Latitud (L)	17.5
	Altitud (h)	0
	Estado de cielo	despejado
	Radiación (W/m ²)	Variable
	Temperatura (°C)	25
Condiciones de los paneles	Azimut de la placa (α)	23.5
	Inclinación del panel (β)	Modo Otoño
	Panel con seguimiento	Sin ejes

Fuente: Elaborado por el investigador

Las simulaciones se muestran en las Figura 4.14, Figura 4.15 y Figura 4.16: En este caso vemos, como es normal para las fechas simuladas, que el sol sale más tarde y se pone más temprano, generando así una exposición solar mayor ante los paneles fotovoltaicos. Esto afecta directamente a la potencia que son capaces de generar los paneles y a la duración de la misma durante el día.

Se concluye, en este caso debido a la tardía incidencia de los rayos solares la red eléctrica suministra más horas a la vivienda, se precia en la Figura 4.16, el sistema genera 35KWh (20KWh menos del solsticio verano), considerando como en los anteriores casos de 10KWh en la vivienda, se logra suministrar 25KWh a la red eléctrica.

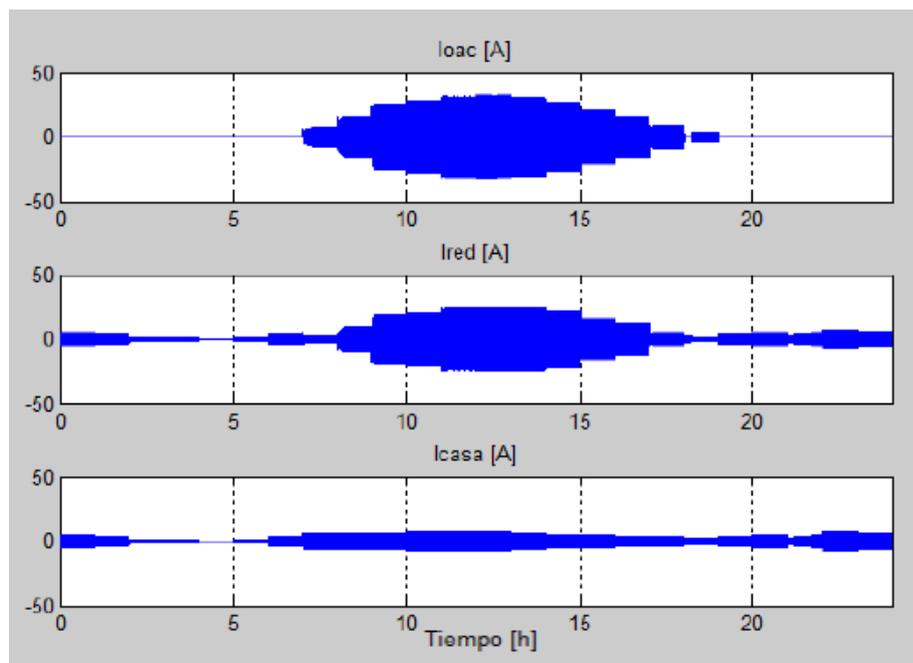


Figura 4.14: Intensidades inversor, hogar y red eléctrica – equinoccio otoño

Fuente: Elaborado por el investigador

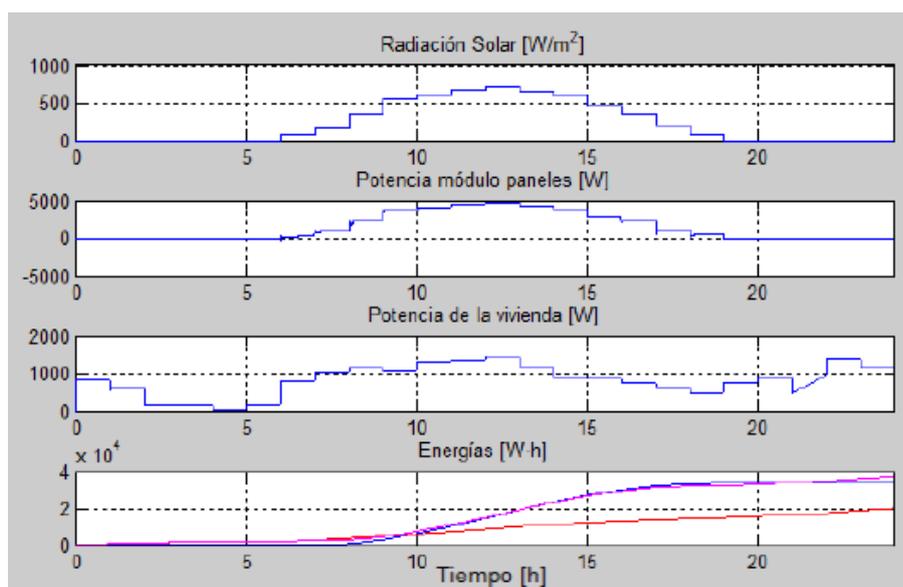


Figura 4.15: Simulaciones completas - equinoccio otoño

Fuente: Elaborado por el investigador

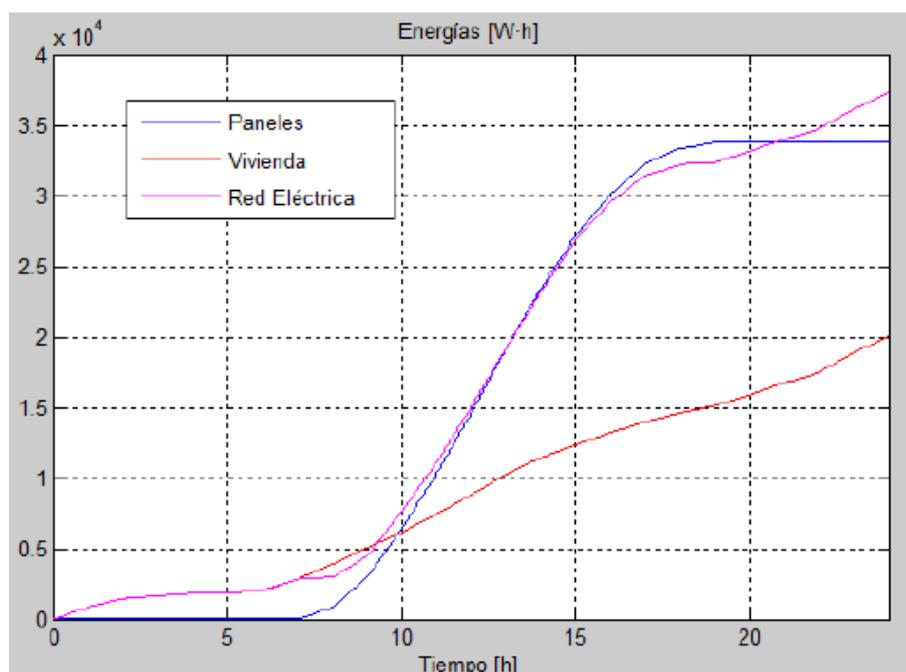


Figura 4.16: Producción y consumo de energía PV, hogar y red – otoño

Fuente: Elaborado por el investigador

4.1.3. Simulaciones con seguimiento

La simulación se realiza para un día específico en el proyecto se escogió 6 de junio solsticio verano.

4.1.3.1. Paneles con seguimiento a un eje

Incluimos seguimiento a un eje o también llamado seguimiento horizontal en los paneles fotovoltaicos, se muestran los parámetros de intensidades, potencia y energía de los PV, consumo en la vivienda y la red eléctrica en las Figura 4.17, Figura 4.18 y Figura 4.19.

Consiguiendo el seguimiento horizontal, nuestros paneles pueden aprovechar mejor la radiación al amanecer y la del atardecer ya que el sistema sigue parcialmente al sol, Obteniendo un resultado positivo donde se adquiere más producción de energía eléctrica.

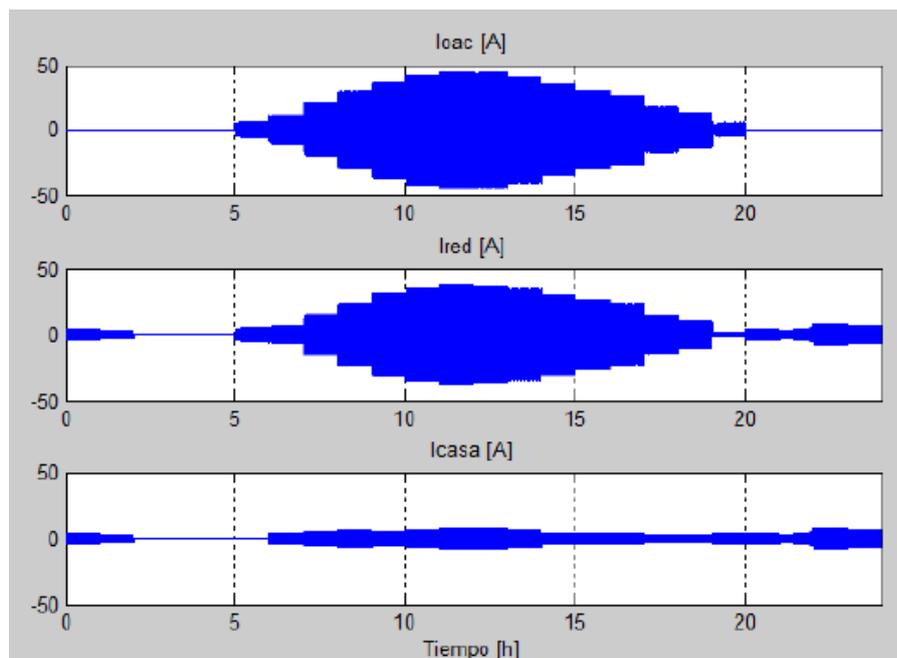


Figura 4.17: Un eje - Intensidades inversor, hogar y red eléctrica

Fuente: Elaborado por el investigador

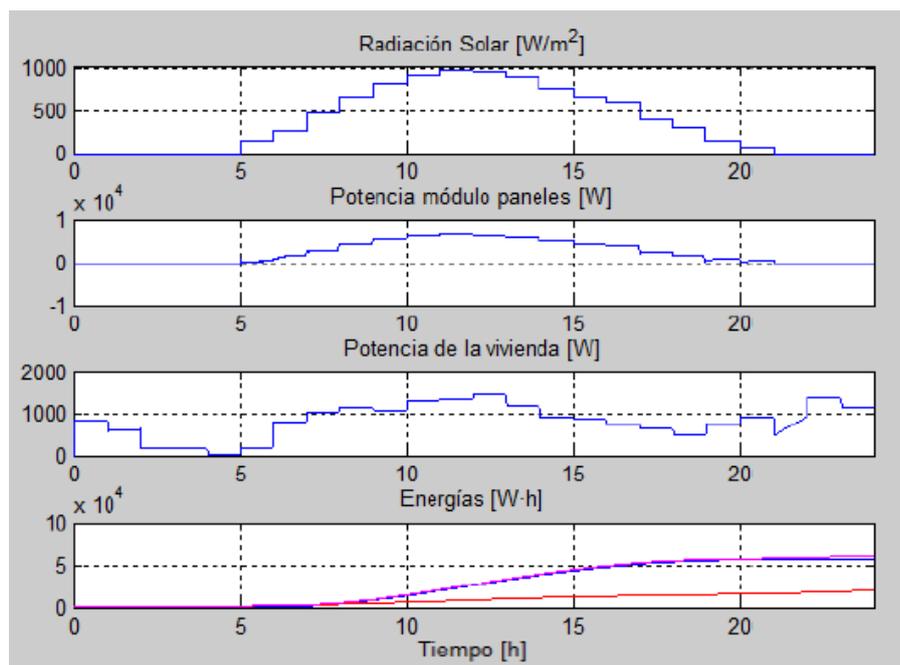


Figura 4.18: Un eje – Simulaciones completas solsticio de verano

Fuente: Elaborado por el investigador

En la Figura 4.19, se puede ver la producción energética de los paneles. Se aprecia el resultado donde se consigue 59kWh de energía, como en el caso anterior suministramos mayor cantidad a la red eléctrica en este caso 39KWh, ya que nuestro hogar consume 20kWh, durante las horas de luz que se tiene el 21 de junio se consume tan solo consume 10kWh lo que nos generará el suministro de 49kWh sobrante durante este periodo. Este incremento de 5kWh corresponde a una subida energética del 9.26%, un valor nada despreciable teniendo en cuenta que estamos trabajando con tan solo a un eje.

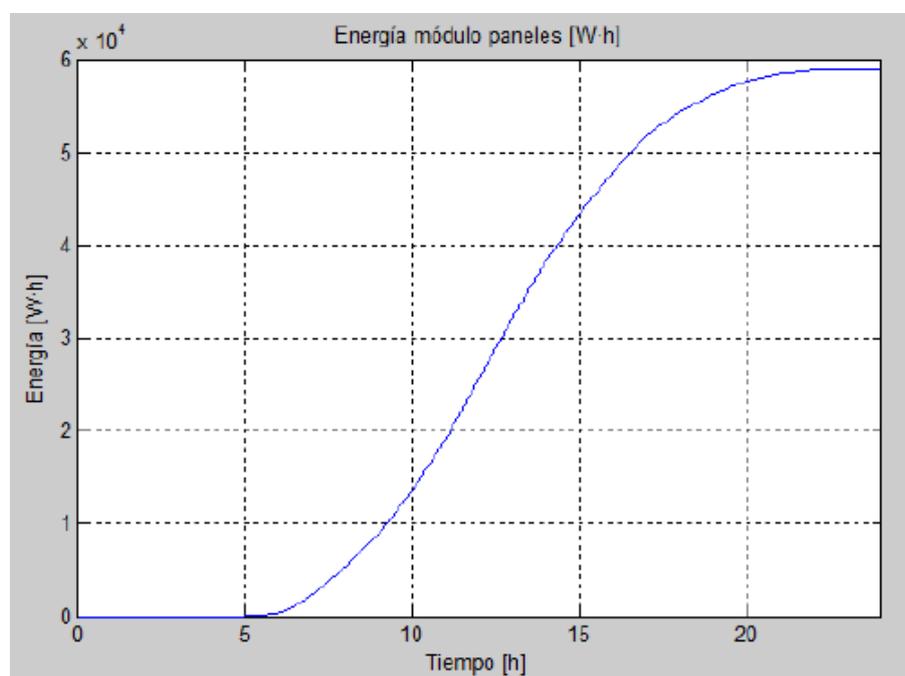


Figura 4.19: Un eje – Energía generada por los paneles solares

Fuente: Elaborado por el investigador

4.1.3.2. Paneles con seguimiento a dos ejes

La simulación se realiza con seguimiento a dos ejes como son la de seguimiento horizontal y vertical. En las Figura 4.20, Figura 4.21 y Figura 4.22, se muestran las simulaciones de las corrientes inversor, hogar, red eléctrica y las potencias respectivas.

Lo interesante de introducir dos ejes, es conseguir que los paneles puedan encarar completamente a los rayos del sol y por consiguiente adquirir la máxima potencia que entrega el array de paneles.

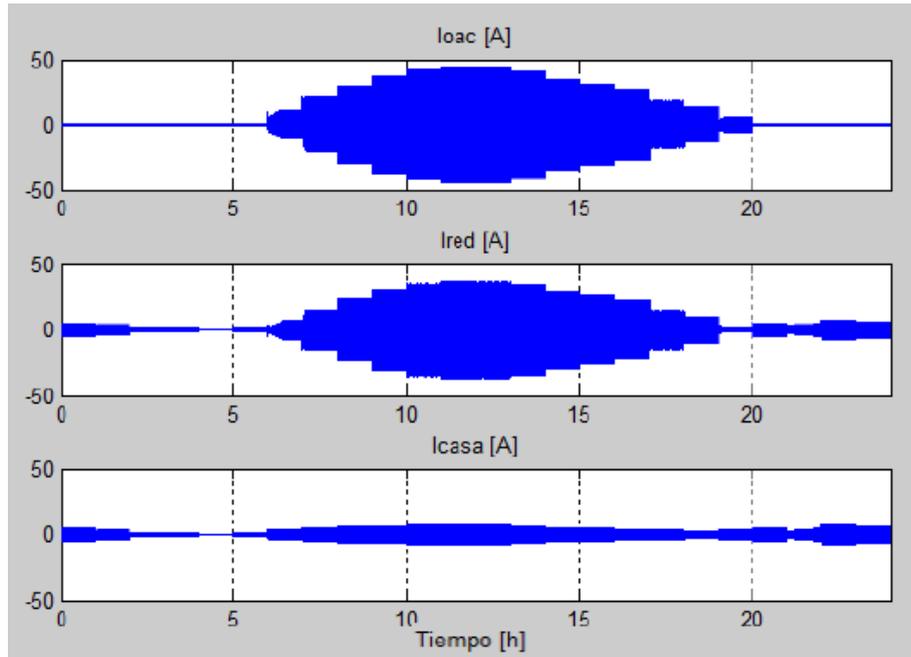


Figura 4.20: Dos ejes – Intensidades inversor, hogar y red eléctrica

Fuente: Elaborado por el investigador

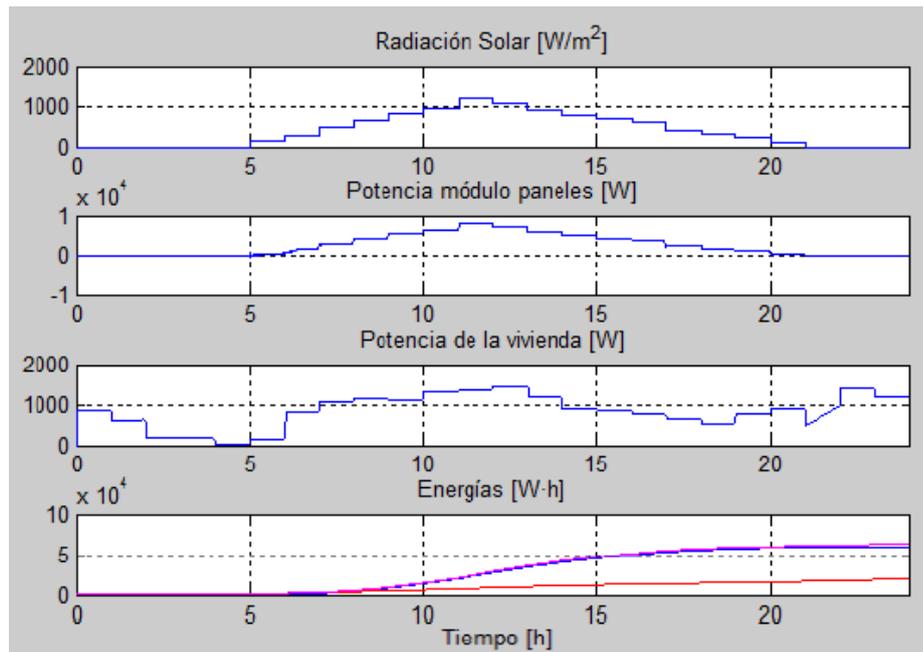


Figura 4.21: Dos ejes – Simulaciones completas solsticio de verano

Fuente: Elaborado por el investigador

En la Figura 4.22 se muestra la energía generada, donde apreciamos el incremento de energía de 70KWh para el día 21 de junio, el consumo de hogar es de 10KWh permitiéndonos suministrar 60KWh a la red eléctrica convencional.

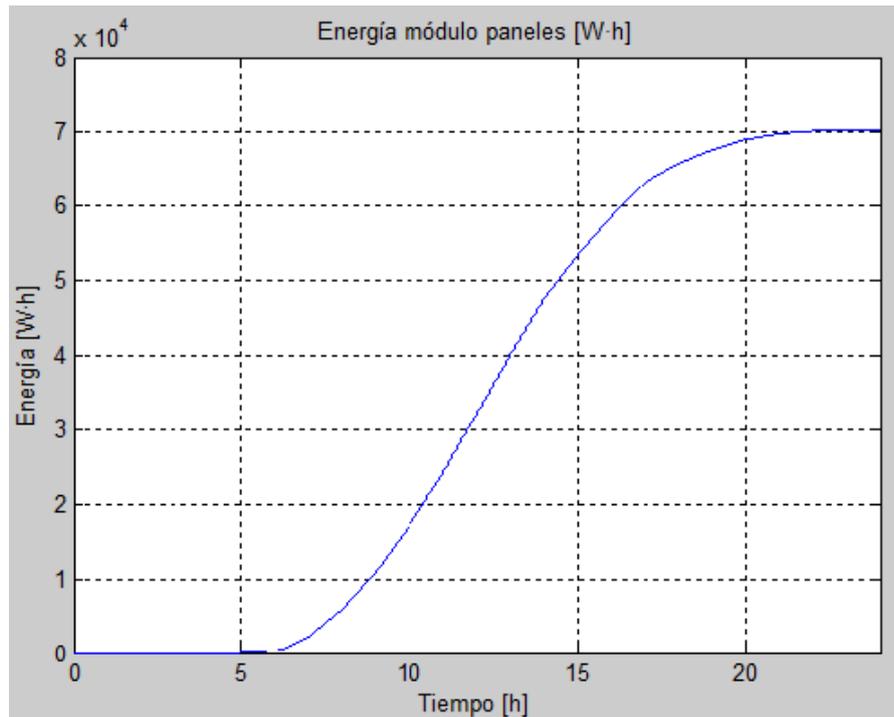


Figura 4.22: Dos ejes – Energía generada por los paneles

Fuente: Elaborado por el investigador

4.2. Discusión

Evidentemente en los paneles solares que se encuentran estáticas sobre la superficie no podrán aprovechar toda la radiación solar a lo largo del día, en consecuencia solo captaran una parte de la radiación solar en momentos en que la radiación solar es perpendicular a los paneles. Sin embargo los paneles solares que disponen de seguimiento del recorrido solar, permiten captar toda la radiación solar de esta forma se mejora la eficiencia.

Dentro de los paneles con seguimiento debemos diferenciar entre los de un eje y los de dos, siendo los primeros los encargados del seguimiento horizontal y los segundos horizontal y vertical. Los paneles con seguimiento a un eje, se encarga de seguir el movimiento solar, pero no consiguen adaptarse a la altura que se encuentra el sol.

Para los paneles con seguimiento a dos ejes, se consigue el seguimiento con un Angulo perpendicular de 90° aproximadamente en todo momento (mañanas y atardeceres), esto se debe a que se consigue seguir horizontalmente y verticalmente, aprovechando toda la radiación y en consecuencia se obtiene máxima eficiencia en producción de energía.

En la Tabla 4.2, se aprecia numéricamente los resultados de las simulaciones realizadas, evidentemente los PV que disponen de seguimiento solar son más eficientes que los estáticos, en consecuencia resaltamos el seguimiento a dos ejes son más eficientes que el resto de los casos por lo que es importante su implementación.

Tabla 4.2: Resumen de energía producida del SFV

Condiciones de seguimiento	Energía [kW·h]	Incremento [kW·h]	Incremento [%]
Estático	54.00	-	-
Seguimiento a un eje	59.00	5.00	9.26 %
Seguimiento a dos ejes	70.00	16.00	29.62 %

Fuente: Elaborado por el investigador

CONCLUSIONES

- a.** Se comprueba el funcionamiento correcto del módulo y el arreglo de paneles FV 10x5, donde se obtiene dentro del error estipulado en la hoja del proveedor del $\pm 3\%$.
- b.** Al considera los paneles solares reciban exactamente la misma radiación solar, con algoritmo P&O se logra seguir el punto máximo de potencia.
- c.** Los paneles solares que se encuentran estáticas sobre la superficie no podrán aprovechar toda la radiación solar a lo largo del día, a comparación de los que dispone se seguimiento solar (movimiento a uno y dos grados de libertad), en consecuencia resaltamos el seguimiento a dos ejes son más eficientes que el resto de los casos por lo que es importante su implementación.
- d.** Se demostró el proceso de conversión de potencia DC a AC, logrando suministrar energía eléctrica a la vivienda y el exceso inyectar a red.

RECOMENDACIONES

- a.** Para obtener mejor respuesta en el sistema se debe considerar la potencia activa y reactiva, se consideraría implementar el control y el filtro del sistema con mejores características para aumentar la capacidad de inyección de potencia a la red y a su vez reducir la presencia de armónicos.
- b.** Es necesario continuar este trabajo incluyendo la modelación dinámica del sistema de potencia, los límites de estabilidad y un análisis de las condiciones que debería exigir una empresa eléctrica en sus normativas para poder incluir la conexión de sistemas solares a sus redes de distribución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kalogirou, S. A. (2009). *"Solar Energy Engineering - Processes and Systems"*. California, USA: Academic Press. (1st. ed).
- [2] A. Bueno, M. (2016). *ELECTRÓNICA DE POTENCIA: Aspectos Generales y Convertidores Electrónicos*. UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR.
- [3] Abella, M. A. (2005). *Sistemas Fotovoltaicos, Master en Energías Renovables y Mercado Energético*. Madrid.
- [4] Astudillo, C. W., & Lema, G. O. (2017). *Proyecto Técnico Investigativo: Simulación de un Sistema Fotovoltaico Residencial con Regulación de Potencia Inyectada a la Red*. Cuenca - Ecuador.
- [5] Attaway, S. (2013). *"A Practical Introduction to Programming and Problem Solving" MATLAB/SIMULINK*. Oxford.
- [6] C. Jara P. Galarza. (2015). *Simulación y evaluación de sistemas fotovoltaicos*.
- [7] Cruz Carrascal, E., & Fuente Casal, P. d. (2012). *Inversores en aplicaciones Fotovoltaicas*.
- [8] H. J. Neri, R. (2016). *Sistema Fotovoltaico con Seguimiento de MPPT y Regulación de Tensión Bajo Condiciones de Sombreado Parcial; Tesis de Maestría en Ciencias*. México.
- [9] Hart, D. (2001). *Electrónica de Potencia* (1 ed.). Madrid: Pearson Educación S.A.
- [10] Hassaine, L. (2010). *Implementación de un Control Digital de Potencia Activa y Reactiva, Aplicación a Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red*. Madrid, España.
- [11] IEEE. (1547 - 2003). *"Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System"*.
- [12] IEEE. (519-2014). *"IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems"*.
- [13] Martín Delgado, R. (Junio 2012). *"Diseño e implementación experimental de un inversor monofásico operando en modo isla"*. Madrid.
- [14] Ministerio de Energía y Minas. (Junio 2003). *"Atlas de energía solar del Perú"*. Lima, Perú.
- [15] Ortiz Valencia, P. A., & Ramos Paja, C. A. (Noviembre 2015). *"Sliding-Mode Controller for Maximum Power Point Tracking in Grid-Connected Photovoltaic Systems"*. Medellín.
- [16] Rashid, M. (1995). *Electrónica de Potencia*. Hall Hispanoamericana S. A.
- [17] Subudhi, B., & Pradhan, R. (2013). *Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems*. IEEE.
- [18] T. Esram, P. C. (Junio 2007). *"Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques"*. IEEE Transactions on Energy Conversion.

ANEXOS

Anexo A: Código para la radiación solar

Código para el bloque radiación

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
funcion [radiacio, horari, tiempo_ant, tiempo_posicionamiento_ant] =
fcnradiacio(lati, pressio, estatcel, altitut, horari_ant, tiempo,
tiempo_posicionamiento, radiacio_ant, azimutplaca, inclinacioplaca,
seguir, seguiment, incl, dia, mes)
% Declaraciones previas %%
stepsimulation=1e-6; % Frecuencia de simulación
pi=3.1415926;
d2r=pi/180;
%Tiempos de contadores
tiempo_posicionamiento_ant=tiempo_posicionamiento+1; tiempo_ant=tiempo+1;
% Ingresar en bucle el movimiento Sol y panel)
    if (mes==2) dia = dia+31; end
    if (mes==3) dia = dia+31+28;end
    if (mes==4) dia = dia+31+28+31;end
    if (mes==5) dia = dia+31+28+31+30;end
    if (mes==6) dia = dia+31+28+31+30+31;end
    if (mes==7) dia = dia+31+28+31+30+31+30;end
    if (mes==8) dia = dia+31+28+31+30+31+30+31;end
    if (mes==9) dia = dia+31+28+31+30+31+30+31+31;end
    if (mes==10) dia = dia+31+28+31+30+31+30+31+31+30;end
    if (mes==11) dia = dia+31+28+31+30+31+30+31+31+30+31;end
    if (mes==12) dia = dia+31+28+31+30+31+30+31+31+30+31+30;end

% Declinación del sol según el número del día del año
decli=23.45*sin(d2r*360*(284+dia)/365);
% Calculo la radiación según el día del año
radiaextraterreste=1.373724637 *
(1+(0.032904)*(cos(pi/180*(360/365)*dia)));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
MOVIMIENTO SOL
intervalo=1; % Cálculo en cada segundo
evalua=tiempo_ant*stepsimulation;
if (evalua==intervalo)
    % incrementos cada minuto: 15°= 1 hora= 60 minutos
    tiempo_ant=0; %Inicializamos tiempos contador
    tiempo=0;
    horari=horari_ant+15; %Incrementamos 15° corresponde a 1h

    % calculo la altura del sol sobre el horizonte, servirá para tener en
    cuenta el efecto de la atmosfera (fórmula G. Volk)
    singamma=sin(d2r*lati)*sin(d2r*decli) +
    cos(d2r*lati)*cos(d2r*decli)*cos(d2r*horari);
    horasolar=(horari+180)/15;
    gamma=asin(singamma)/d2r;
    % Cuando el sol está por debajo del horizonte consideramos gamma=0
    if gamma <0 gamma=0; end

```

```

gamma=asin(singamma)/d2r;
% Cuando el sol está por debajo del horizonte consideramos gamma=0
if gamma <0 gamma=0; end
% Calculo del azimut del sol
sintau=cos(d2r*decli) * sin(d2r*horari)/cos(d2r*gamma);
tau=asin(sintau)/d2r;
azimut_sol=abs(tau);

%%% MOVIMIENTO PANEL %%%
interva=1; % Queremos hacer cálculos cada 1h que equivale a 1seg en
simulación
evaluacion=tiempo_posicionamiento_ant * stepsimulation;
if (evaluacion==interva)
    tiempo_posicionamiento_ant=0; %Inicializamos tiempos contador
    tiempo_posicionamiento=0;
    % Seguimiento a (1) eje
    if seguir==1
        % Fijamos "manualmente" inclinación para seguimiento a un
        eje:
        if seguiment==1
            inclinacioplaca=fix(lati-15*((-1)^(1-incl)));
            if incl > 2 inclinacioplaca= incl;
            end
        end;
        % Fijamos "automáticamente" inclinación para seguimiento
        a (2) ejes y también fijamos el azimut de la placa para
        ambos seguimientos:
        if seguiment==2
            inclinacioplaca=90-gamma;
        end;
        azimutplaca=azimut_sol-180;
    end
end

% Cálculo del ángulo de incidencia (Adolfo del Castillo)
cosfi=cos(d2r*decli) * cos(d2r*horari) * sin(d2r*inclinacioplaca)
* sin(d2r*lati) * cos(d2r*azimutplaca) + cos(d2r*decli) *
cos(d2r*horari) * cos(d2r*lati) * cos(d2r*inclinacioplaca) -
sin(d2r*decli) * sin(d2r*inclinacioplaca) * cos(d2r*azimutplaca) *
cos(d2r*lati) + sin(d2r*decli) * cos(d2r*inclinacioplaca) *
sin(d2r*lati) + cos(d2r*decli) * sin(d2r*horari) *
sin(d2r*inclinacioplaca) * sin(d2r*azimutplaca);

% Calculo la incidencia multiplicando por la constante solar
ra=radiaextraterreste*cosfi;
% Cálculo de la radiación, teniendo en cuenta la presión
atmosférica según G. Volk
m=1/(sin(d2r*gamma) + 0.50572/((gamma+6.07995)^1.6364));
p=pressio * exp(-0.033675*altitut/(288-0.00325*altitut));

```

```

radiacio=ra * exp(0-(1-0.75)*(p/pressio)*m);
if estatcel==1
    radiacio=(radiacio/1.1933);
end;
radiacio=radiacio*1000;
if radiacio < 0
    radiacio = 0;
end
else
    radiacio=radiacio_ant;
    horari=horari_ant;
end
end

```

Anexo B: Código para el panel solar

```

%%%%%%%%% SIMULACION DE PANEL FOTOVOLTAICO 135W %%%%%%%%%%
s=10;      % número paneles en serie
p=5;      % número paneles en paralelo
Ein= 1000; % constante de irradiación
Tn= 25;   % constante de temperatura
CV= 0.8;
b= 0.0684; % parámetro de ajuste
Isc= 8.40; % corriente de cortocircuito
Voc= 21.40; % voltaje de circuito abierto
Vpmax= 18.00; % voltaje en el punto de máxima potencia
Ipmax= 7.50; % corriente en el punto de máxima potencia
TCv= -0.1261; % coeficiente de voltaje
TCi= 0.00418; % coeficiente de corriente
Vmax= 22.042;
Vmin= 18.190;

%%% ecuación de la corriente
Ix= p*(Ei/Ein)*(Isc+(TCi*(T-Tn)));
Vx= (s*(Ei/Ein)*(TCv)*(T-Tn))+ (s*Vmax)- ((s*(Vmax-
Vmin))* (exp((Ei/Ein)*(log((Vmax-Voc)/(Vmax-Vmin))))));
Iv= ((Ix/(1-(exp(-1/b))))*(1-(exp((voc/(b*Vx))- (1/b)))));

%%%%%%%%%

```

Anexo C: Código para P&O

```

% Controlador MPPT algoritmo Perturbación & Observación
function D = PandO(Param, Enabled, V, I)

% D salida = Ciclo de trabajo para el
% convertidor boost (valor 0 entre 1)
% Activación = 1 activación del algoritmo
% V = Voltaje del panel (V)
% I = Corriente del panel (A)
%
% Parametros de entrada:
Dinit = Param(1); %Valor inicial de D
Dmax = Param(2); %Maximo valor para D
Dmin = Param(3); %Minimum valor para D
deltaD = Param(4); %Valor utilizado para el incremento_
                    % decremento del ciclo de trabajo D

persistent Vold Pold Dold;

dataType = 'double';

if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;

if dP ~= 0 & Enabled ~=0
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = Dold - deltaD;
        else
            D = Dold + deltaD;
        end
    else
        if dV < 0
            D = Dold + deltaD;
        else
            D = Dold - deltaD;
        end
    end
else D=Dold;
end

if D >= Dmax | D<= Dmin
    D=Dold;
end

Dold=D;
Vold=V;
Pold=P;
%%%%%% End %%%%%%%%%%

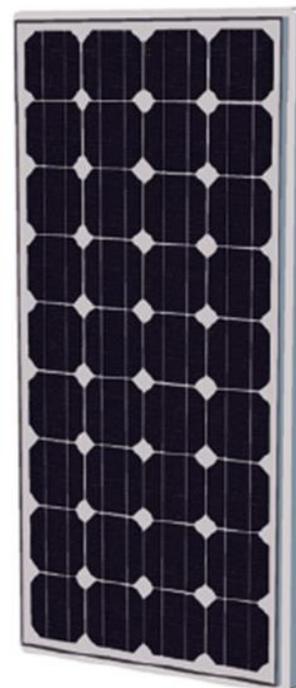
```

Anexo D: Datasheet del panel solar



Exiom Solution designs, manufactures and delivers high-performance solar electric technology worldwide. Our high-efficiency solar cell let us manufacture the different kinds of panels to get the most efficient in your installations.

Exiom Solution diseña, fabrica y distribuye la más alta calidad en Energía Solar a nivel mundial. La alta eficiencia de nuestras células solares nos permite producir diferentes tipos de paneles para a su vez dar la mayor eficiencia posible a sus instalaciones.



monocrystalline modules | módulos monocristalinos
EX-135-150 M (156)

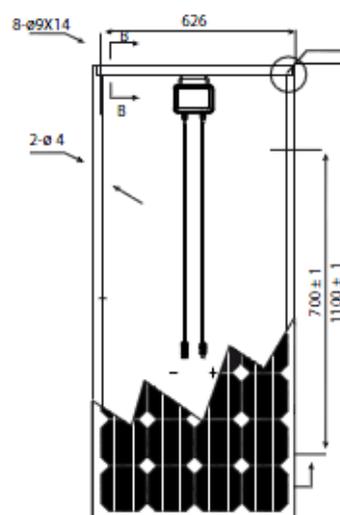
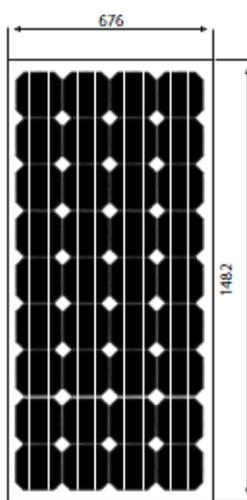
MODULE MONOCRYSTALLINE MÓDULOS MONOCRISTALINOS	135 W	140 W	145 W	150 W
Trade Mark	EX-135M(156)	EX-140M(156)	EX-145M(156)	EX-150M(156)
STANDARD TEST CONDITIONS TEST DE CONDICIONES ESTANDAR: 1000 W/M², AM 1.5, 25°C (STC)				
Maximum Power Voltage, VMP Máximo voltage, VMP	18.0 V	18.42 V	18.71 V	19.11 V
Maximum Power Current, IMP Tensión máxima actual, IMP	7.50 A	7.60 A	7.75 A	7.85 A
Open Circuit Voltage, VOC Tensión de circuito abierto, VOC	21.40 V	21.80 V	22.30 V	22.60 V
Short Circuit Current, ISC Corriente de cortocircuito, ISC	8,40 A	8,55 A	8,67 A	8,85 A
Max. System Voltage, VMAX Tensión máxima del sistema, VMAX	1000V (IEC)			
Maximum Power Tolerance Tolerancia potencia máxima	0-3%			
Cell Efficiency Eficiencia Celda	15.7 (%)	16.3 (%)	16.9 (%)	17.4 (%)
Module Efficiency Eficiencia Módulo	13.5 (%)	14.0 (%)	14.5 (%)	15.0 (%)
NOCT	45°C ± 2°C			
TEMPERATURE COEFFICIENTS COEFICIENTES DE TEMPERATURA				
Temp. Coefficient of P _{MAX} Coeficiente de temperatura P _{MAX}	- 0.4677%/°C			
Temp. Coefficient of I _{SC} Coeficiente de temperatura I _{SC}	0.0492%/°C			
Temp. Coefficient of V _{OC} Coeficiente de temperatura V _{OC}	-0.3374%/°C			
WARRANTIES GARANTÍAS				
Product Producto	10 years 10 años			
Performance: 90% during the first 10 years. Min. 80% during the first 25 years. Rendimiento: 90% durante los primeros 10 años. Mínimo 80% durante los 25 primeros años				

Note: Specifications subject to change without notice. | Nota: Especificaciones sujetas a cambios sin previo aviso.



MECHANICAL CHARACTERISTICS | CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Cell Celda	156 x 156
Nº of cells Número de celdas	9 X 4 = 36
Dimensions Dimensiones	1482 x 676 x 40 mm
Weight Peso	12 kg
Junction Box Caja de conexión	IP65
Type of Connector Tipo de conector	Compatible Type IV and Type III
No. of Draining Holes in Frame Nº agujeros drenaje marco	10
Glass, Type and Thickness Vidrio, tipo y espesor	High Transmis, Low Iron, Tempered Glass 3.2mm Alta transmisión, nivel bajo de hierro, vidrio templado 3,2 mm
Cable type, diameter and length Tipo cable, diámetro y long	4mm ² , TUV certified, 1000mm
Mechanical Load Carga soportada	< 5400 Pa

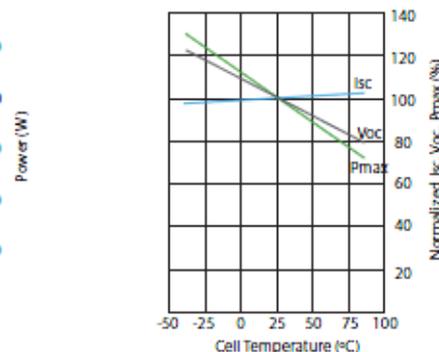
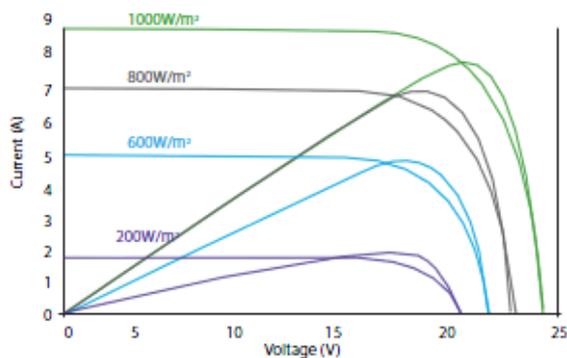


This module has an excellent positive power tolerance peaking up to +5 Wp. The durable MC4 brand plug connection provides optimum power contact in all weather conditions.

The torsionally rigid and corrosion-free cavity frame made of anodized aluminum is compatible with all commercially available assembly systems.

Estos módulos tienen una productividad excelente, con una tolerancia siempre positiva superando los 5Wp. La marca de conexiones MC4 es muy duradera y proporciona una potencia óptima en todas las condiciones climatológicas.

La rigidez y material anticorrosión de nuestros marcos fabricados en aluminio anodizado es compatible con todos los sistemas de montaje disponibles comercialmente.



Head Office Spain:
C/ San Francisco, 5 5A.
33003 Oviedo Ph.: +34 984
033 709

Madrid Office:
Ph.: +34 91 620 38 39

Morocco Office
23 Rue Nadaud
20000, Casablanca
Ph.: +212 522 20 73 02

France Office:
ZI
Villeprovert
41160. Morée
Ph.: +33 0 2 54 23 39 90

Shanghai Office:
Room 908, Jintian
Commercial Centre nr
1295, Lujiazang Road.
Ph.: +8621-61652528