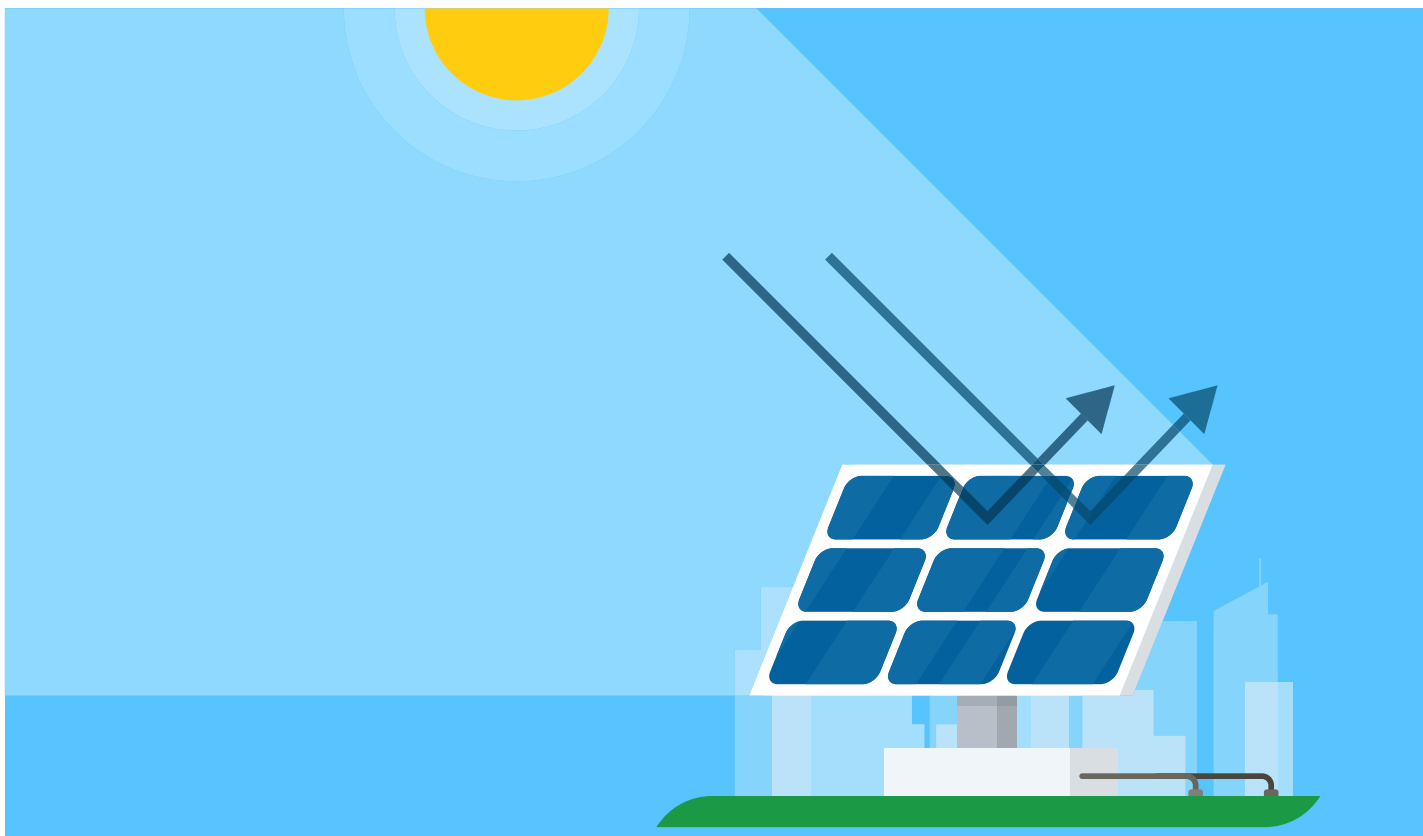




Revisión del estado actual de los Sistemas de Energía Fotovoltaico

Review of the current state of the photovoltaic energy systems.

Arenas, Daniel

Tecnólogo en Electrónica (en formación) Sena– Centro Industrial del Mantenimiento Integral (CIMI) Giron, Santander, Colombia.
dnarenas4@miSena.edu.co móvil:
Móvil: 3164429847

Chacón-Pinzón, Enrique

Ingeniero Eléctrico, Instructor Sennova en CIDM, Floridablanca Santander. Líder del grupo de investigación Vestigium. Líder del “Semillero de Ciencias y Tecnologías Promisorias del Sena”, Promisum. enchaconp@Sena.edu.co Móvil: 3123156258

Belky Jazmín

Ingeniero electrónico, Instructora Sennova en CIDM. bparrag@Sena.edu.co Movil: 3004289087

Resumen

En este trabajo se presenta un análisis de un sistema fotovoltaico, explicando módulo por módulo la implementación de dicho sistema, desde el funcionamiento de las células solares y su conexión para formar los paneles, hasta las diferencias entre los reguladores de carga PWM y MPTT; todo esto con el fin de entender el diseño y puesta en marcha de un sistema fotovoltaico completo.

Introducción

La implementación de energías renovables cada día se hace más común, la energía limpia, como comúnmente se le llama, se ha ido popularizando, al punto que empresas de todo el mundo buscan contar con estos sistemas de energía e incluso en hogares residenciales ya se está viendo la puesta en funcionamiento de estos métodos.

La energía renovable busca aprovechar fuentes naturales e inagotables de recursos para crear energía, de una forma que no genere residuos. La energía fotovoltaica se emplea de esta forma y además de ser una fuente de energía limpia, es muy funcional y suele traer beneficios consigo a quien decide hacer uso de ella.

Summary

In this work an analysis of a photovoltaic system is presented, explaining module by module the implementation of said system, since the operation of the solar cells and their connection to form the panels, to the differences between the PWM and MPTT load regulators; all this in order to understand the design and implementation of a complete photovoltaic system.

Introduction

The implementation of renewable energy every day becomes more common, clean energy, as it is commonly called, has become popular, to the point that companies around the world seek to have these energy systems and even in residential homes it is already seeing the implementation of these methods.

Renewable energy seeks to take advantage of natural and inexhaustible sources of resources to create energy, in a way that does not generate waste. Photovoltaic energy is used in this way and besides being a source of clean energy, it is very functional and usually brings benefits to those who decide to use it.

ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La energía fotovoltaica es la conversión de la radiación solar en electricidad. Esta energía eléctrica se obtiene mediante un dispositivo semiconductor denominado panel fotovoltaico. Este efecto es llamado “efecto fotoeléctrico”.

(Figura 1: cubierta fotovoltaica)



Fuente: Som Energía, (2012) “Coberta/Cubierta solar fotovoltaica Riudarenes” (Girona) Flickr

HISTORIA

Edmund bequerel fue la primer persona en observar el efecto fotoeléctrico (1839), al descubrir que exponer a la luz ciertos materiales producía una corriente eléctrica. El efecto fotoeléctrico fue descrito por Albert Einstein en 1905 (más tarde ganaría premio nobel de física por ello). En 1954 bell laboratories desarrollo el primer módulo fotovoltaico, experimentando con semiconductores encontraron que el Silicio con algunas impurezas era muy sensitivo a la luz, aunque este módulo resultaba bastante caro como para ser comercializado (Knier 2002).

PHOTOVOLTAIC ENERGY

Photovoltaic energy is the conversion of solar radiation into electricity. This electrical energy is obtained through a semiconductor device called a photovoltaic panel. This effect is called “photoelectric effect”.



HISTORY

Edmund Bequerel was the first person to observe the photoelectric effect (1839), upon discovering that exposing certain materials to light produced an electric current. The photoelectric effect was described by Albert Einstein in 1905 (later he would win Nobel prize for physics). In 1954 bell laboratories developed the first photovoltaic module, experimenting with semiconductors found that silicon with some impurities was very sensitive to light, although this module was quite expensive to be marketed (Knier 2002).

En 1958 fue lanzado el primer satélite artificial que utilizaba energía solar, el Vanguard 1 (Loff 2015).

Luego de esto, la mejora de la conversión de energía de las células solares fue el enfoque de las tecnologías para naves espaciales, pero las tecnologías de las células solares terrestres se centraron en la investigación de la reducción de costos en la fabricación de energía fotovoltaica. (Avrutin, et al 2011)

¿CÓMO FUNCIONA?

Cuando la luz solar da en la célula fotovoltaica, los electrones se desprenden de los átomos en el material semiconductor. Si los conductores eléctricos están conectados a los lados positivo y negativo, se forma un circuito eléctrico, los electrones se pueden capturar en forma de electricidad. La energía fotovoltaica se genera sin ruido, ni contaminación, es una energía limpia además de que es una fuente de “combustible” inagotable y abundante, está disponible en casi todas partes y no emite gases de efecto invernadero por su uso. Esta tecnología está mejorando constantemente y los beneficios que da su uso aunque son muy conocidos, cada vez son más palpables. (Aster, et al 2012).

CÉLULA FOTOELÉCTRICA.

La célula solar – también llamada célula fotovoltaica – es un dispositivo que usa el efecto fotoeléctrico para convertir la energía luminosa (compuesta por fotones) en energía eléctrica (compuesta por electrones) (Cibira 2018). Son materiales semiconductores en forma de capas delgadas los que componen la célula fotovoltaica, los cuales al ser expuestos a la luz producen una corriente eléctrica. La intensidad de la luz determina la cantidad de energía que genera cada célula. Actualmente el material fotosensible

In 1958, the first artificial satellite using solar energy, the Vanguard 1 (Loff 2015), was launched.

After this, the improvement of the energy conversion of the solar cells was the focus of the spacecraft technologies, but the technologies of the solar solar cells focused on the investigation of the reduction of costs in the manufacture of photovoltaic energy. (Avrutin, et al 2011)

HOW DOES IT WORK?

When sunlight hits the photovoltaic cell, electrons are released from the atoms in the semiconductor material. If the electrical conductors are connected to the positive and negative sides, an electrical circuit is formed, the electrons can be captured in the form of electricity. Photovoltaic energy is generated without noise or pollution, it is a clean energy, it is a source of inexhaustible and abundant “fuel”, it is available almost everywhere and does not emit greenhouse gases due to its use. This technology is constantly improving and the benefits of its use, although they are well known, are becoming more and more palpable. (Aster, et al 2012)

PHOTOELECTRIC CELL

The solar cell - also called photovoltaic cell - is a device that uses the photoelectric effect to convert luminous energy (composed of photons) into electrical energy (composed of electrons) (Cibira 2018). Semiconductor materials in the form of thin layers are those that make up the photovoltaic cell, which when exposed to light produce an electric current. The intensity of the light determines the amount of energy that each cell generates. Currently the most used photosensitive material is silicon, this due to its high efficiency. (Sharma 2011)

más usado es el silicio, esto debido a su alta eficiencia. (Sharma 2011).

Un panel o módulo fotovoltaico es un grupo de células fotovoltaicas. Consisten en una red de células fotovoltaicas que se conectan en serie para aumentar la diferencia de potencial (voltaje) hasta el valor deseado; así como se conectan varias de estas redes de células en paralelo para aumentar la corriente que es capaz de producir y dar una potencia de salida (Watts) más alta.

FABRICACIÓN

El silicio es la materia prima, del cual se obtiene el silicio metalúrgico, que es extraído mediante reducción, este silicio metalúrgico cuenta con una pureza del 98%, aun así se vuelve a purificar hasta llegar al silicio en grado semiconductor, este cuenta con una pureza del 99,999%. (Mundo Solar 2014)

Figura 2: etapas de la fabricación de un panel de silicio policristalino

A panel or photovoltaic module is a group of photovoltaic cells. They consist of a network of photovoltaic cells that are connected in series to increase the potential difference (voltage) to the desired value; as well as connecting several of these cell networks in parallel to increase the current that is able to produce and give a higher power output (Watts).

MANUFACTURING

Silicon is the raw material, from which metallurgical silicon is obtained, which is extracted by reduction, this metallurgical silicon has a purity of 98%, yet it is again purified until it reaches silicon in semiconductor grade, it has a purity of 99.999%. (Solar World 2014)

The purified silicon is melted in crucibles and ingots or ingots are produced, which can be cylindrical or square, depending on whether you want to obtain monocrystalline silicon or



Fuente: First Solar.

El silicio purificado es fundido en unos crisoles y se produce los ingots o lingotes, que pueden ser cilíndricos o cuadrados, dependiendo de si lo que desea obtener es silicio monocrystalino o silicio policristalino (Kumar, et al 2017) (Autosolar 2017).

Los lingotes se cortan en unas láminas muy finas llamadas obleas – wafer (de una décima de milímetro). Entonces las obleas son fotograbadas en celdillas, añadiéndoles polaridades positiva y negativa; se introducen impurezas que en su capa de valencia solo cuentan con tres electrones y por ende les falta uno para estar estables para la polaridad positiva, y para la polaridad negativa se introducen impurezas que en su capa de valencia tengan cinco electrones (les sobre uno). Al unir estos materiales se forma un diodo; un diodo es un dispositivo que deja pasar la corriente solamente en un sentido, y aunque en electrónica es más comúnmente usado para hacer rectificación, aquí mediante el paso de luz por la estructura cristalina, se permite que dentro del material se ocasione un movimiento de electrones, a este diodo se le llama “fotodiodo” o “célula fotoeléctrica”. (Energiza 2013).

La célula solar es demasiado fina, incluso llega a ser más fina que una cáscara de huevo, por lo que su ensamblaje debe ser realizado por maquinaria muy concreta que sea capaz de tratar el material como se requiere. El panel fotovoltaico es un conjunto de células ensambladas y conectadas entre sí.

En este artículo nos vamos a centrar en tres tipos de células fotovoltaicas (cabe aclarar que hay varias más, pero estas son las más usadas, más comerciales y que tienen bastante estudio).

*células monocristalinas.

*células policristalinas.

*células amorfas.

polycrystalline

silicon (Kumar, et al 2017) (Autosolar 2017).

The ingots are cut into very thin sheets called wafers - wafer (one tenth of a millimeter). Then the wafers are photographed in cells, adding positive and negative polarities; impurities are introduced that in their valence layer only have three electrons and therefore they lack one to be stable for positive polarity, and for the negative polarity impurities are introduced that in their valence shell have five electrons (one on one). By joining these materials a diode is formed; A diode is a device that lets the current pass in only one direction, and although in electronics it is more commonly used to make rectification, here through the passage of light through the crystalline structure, electron movement is allowed inside the material, this diode is called “photodiode” or “photoelectric cell”. (Energiza 2013).

The solar cell is too thin, it even becomes thinner than an egg shell, so its assembly must be done by very specific machinery that is capable of treating the material as required. The photovoltaic panel is a set of cells assembled and connected to each other

In this article we will focus on three types of photovoltaic cells (it should be noted that there are several more, but these are the most used, most commercial and have a lot of study).

* monocrystalline cells.

* polycrystalline cells.

* amorphous cells

CÉLULAS MONOCRISTALINAS

Al ser de un color negro bastante oscuro se vuelven fáciles de identificar. Son el material más eficiente para la conversión de energía solar, esto por el hecho de que están fabricadas de un silicio excesivamente puro. Si se compara con las células policristalinas, la eficiencia de las células monocristalinas son considerablemente más altas (15%) y si la comparación es con otro tipo de material la diferencia de eficiencia aumenta hasta más del 20%, aunque si se habla del silicio comercial la eficiencia normalmente se encuentra entre el 15% y el 17%.

(Tyagiab, et al 2013) Además de la eficiencia, la durabilidad también es otro factor en el cual el silicio monocristalino saca ventaja, tanto así, que las garantías que ofrecen los fabricantes suelen ser de hasta 25 años, siendo que su vida útil rebasa por mucho esa cifra. La contra de este sistema es su precio elevado, pues las células monocristalinas resultan siendo la opción más cara de todos los tipos de células solares de silicio, esto por los desechos que se producen por el sistema de corte cuadrado que se le hace.

Los niveles de rendimiento de este tipo de células solares suelen sufrir por un aumento de temperatura. No obstante, termina siendo una pequeña pérdida si se compara con otras formas de células solares. Son el tipo de célula de silicio que mejor se desempeña en niveles bajos de luz solar. [Renewable Energy]

MONOCRYSTALLINE CELLS

Being a fairly dark black color they become easy to identify. They are the most efficient material for the conversion of solar energy, this due to the fact that they are made of an excessively pure silicon. If compared to polycrystalline cells, the efficiency of monocrystalline cells are considerably higher (15%) and if the comparison is with another type of material the difference in efficiency increases to more than 20%, although if we talk about commercial silicon Efficiency is normally between 15% and 17%.

(Tyagiab, et al 2013) In addition to efficiency, durability is also another factor in which monocrystalline silicon takes advantage, so much so, that the guarantees offered by manufacturers are usually up to 25 years, its life exceeds by a lot that number. The counter of this system is its high price, because monocrystalline cells turn out to be the most expensive option of all types of silicon solar cells, due to the waste produced by the square-cut system that is made.

The performance levels of this type of solar cells usually suffer from an increase in temperature. However, it ends up being a small loss compared to other forms of solar cells. They are the type of silicon cell that performs best in low levels of sunlight. [Renewable Energy]

Figura 3: El silicio policristalino es fácil de reconocer por su color negro oscuro



Fuente: Marufish (2012) "Solar Panel" Flickr



Fuente: Marufish (2012) "Solar Panel" Flickr

POLYCRYSTALLINE CELLS

Figura 4: panel policristalino

Fuente: Morrison, J. (2009) "Solar panels on the roof at Google" Flickr.

CÉLULAS POLICRISTALINAS

Figura 4: panel policristalino



Fuente: Morrison, J. (2009) "Solar panels on the roof at Google" Flickr.

Células policristalinas, o células de polisilicio. Cuando comenzó la industria fotovoltaica (década de 1980) fueron las primeras células solares que se desarrollaron. Tienen un proceso de cor-

Polycrystalline cells, or polysilicon cells. When the photovoltaic industry (the 1980s) began, they were the first solar cells to be developed. They have a different cutting process than the monocrystalline cells, in this process the silicon melts and is then poured into a square mold. The difference is that the cost of production becomes lower, which makes polycrystalline silicon more attractive for the economic factor, but its efficiency is reduced compared to monocrystalline cells

te distinto al de las células monocristalinas, en este proceso el silicio se derrite y luego se vierte en un molde cuadrado. La diferencia radica en que el coste de producción se vuelve menor, lo cual vuelve al silicio policristalino más atractivo por el factor económico, pero se ve reducida su eficiencia en comparación con las células monocristalinas y otros materiales en desarrollo (Becker, et al 2011) (Manna, et al 2007). El silicio desperdiciado durante el proceso de fabricación es muy mínimo. La célula policristalina tiene una apariencia estética mejor; en su ciclo de vida consume menos energía. Al ser derretido el silicio durante su fabricación, requiere de menos energía y la estructura cristalina no tiene que ser perfecta. Todo esto se resume en la forma específica del silicio policristalino (Sampaio, et al 2018)

Las altas temperaturas no afectan tanto la eficiencia de la célula en comparación con las células monocristalinas, por ende, termina siendo una opción más atractiva para personas que viven en climas muy cálidos, pues su eficiencia no se ve muy reducida y su precio es menor. [Renewable Energy]

CÉLULAS AMORFAS

A diferencia del silicio cristalino, en el silicio amorfo los átomos de silicio se encuentran en estado aleatorio. Las propiedades electrónicas del material se ven afectadas debido a esta aleatoriedad en la estructura atómica, pues se causa un espacio mayor en el silicio amorfo (1.7 eV) cuando en el silicio cristalino este espacio es de 1.1 eV. En 1976 se construyó la primera célula solar de silicio amorfo, y se empezó a comercializar en el año 1981. El coste de fabricación de las células solares se ve reducido con la imple-

and other materials under development (Becker, et al 2011) (Manna, et al 2007). The silicon wasted during the manufacturing process is very minimal. The polycrystalline cell has a better aesthetic appearance; in its life cycle it consumes less energy. When silicon is melted during its manufacture, it requires less energy and the crystalline structure does not have to be perfect. All this is summarized in the specific form of polycrystalline silicon (Sampaio, et al 2018)

High temperatures do not affect the efficiency of the cell in comparison with monocrystalline cells, therefore, it ends up being a more attractive option for people living in very hot climates, because its efficiency is not greatly reduced and its price is lower. [Renewable Energy]

AMORPHAS CELLS

Unlike crystalline silicon, in silicon amorphous silicon atoms are in a random state. The electronic properties of the material are affected due to this randomness in the atomic structure, since a greater space is caused in amorphous silicon (1.7 eV) when in crystalline silicon this space is 1.1 eV. In 1976 the first amorphous silicon solar cell was built, and it began to be commercialized in 1981. The cost of manufacturing solar cells is reduced with the implementation of this technology. The high expectation that was had towards this material was diminished due to the low efficiency that was obtained and the degradation of this cell when it was induced by light. [Sampaio, P. G.V., González, M.O.A., de Vasconcelos, R.M., dos Santos, M.A. T., de Toledo, J.C., & Pereira, J. P.P.].

mentación de esta tecnología. La alta expectativa que se tenía hacia este material se vio disminuida debido a la baja eficiencia que se obtenía y por la degradación de esta célula al ser inducida por la luz. [Sampaio, P. G. V., González, M. O. A., de Vasconcelos, R. M., dos Santos, M. A. T., de Toledo, J. C., & Pereira, J. P. P.]

La célula amorfa sufre con el tiempo de una degradación de su eficiencia celular, cuando es inducida por la luz ésta célula sufre de una inestabilidad, esto es conocido como el efecto Staebler-Wronski. (Staebler, et al 1977) *Figura 5: panel solar de 12V/4W con marco de aluminio*

Figura 5: panel solar de 12V/4W con marco de aluminio



Fuente: Trejos, m. (2016) “diseño e implementación de un regulador solar de potencia de bajo peso para controlar la carga de la batería de un vehículo solar.

La eficacia en los módulos comerciales se degrada con la exposición a la luz, al punto que si la eficacia inicial de generación de energía era $>12\%$, luego de un periodo de meses esa eficacia se degrada a un $5\% - 6\%$ aproximadamente (Matsuda 2004).

Fuente: Trejos, m. (2016) “diseño e implementación de un regulador solar de potencia de bajo peso para controlar la carga de la batería de un vehículo solar.

The amorphous cell suffers over time from a degradation of its cellular efficiency, when it is induced by light this cell suffers from an instability, this is known as the Staebler-Wronski effect. (Staebler, et al 1977).

The efficiency in commercial modules degrades with exposure to light, to the point that if the initial efficiency of power generation was $> 12\%$, after a period of months that efficiency degrades to approximately $5\% - 6\%$ (Matsuda 2004).

PHOTOVOLTAIC SYSTEM

When implementing a photovoltaic solar energy system, it must be taken into account that a complete photovoltaic energy system that is connected to the electricity grid, be it a home, a

SISTEMA FOTOVOLTAICO

Al momento de implementar un sistema de energía solar fotovoltaica hay que tomar en cuenta que un sistema completo de energía fotovoltaica que se conecte a la red eléctrica, ya sea de un hogar, una fábrica, un edificio, etc... tiene consigo varios módulos, todos necesarios para poder desarrollar su mayor eficacia, módulo por módulo aquí se van a mostrar los aspectos más importantes a tener en cuenta con cada uno de ellos, esto con el fin explicar por qué son útiles y como la energía fluye y se transforma hasta volverse apta en un sistema eléctrico convencional.

Figura 6: grupo de paneles solares con sistema de seguimiento



Fuente: solarbay.com.au (2017) "solar trackers"

La eficiencia de los paneles solares tiene dependencia con respecto a las condiciones climáticas y ambientales, unos tipos de paneles suelen funcionar mejor que otros en diferentes condiciones, por ello la importancia de saber escoger el panel que mejor se adapte al sitio de instalación.

Al aumentar la cantidad de radiación solar que recibe el panel se optimizará la cantidad de energía obtenida de una instalación fotovoltaica; para

factory, a building, etc., has several modules, all of them necessary to develop its effectiveness, module by module here are going to show the most important aspects to be taken into account with each of them, this in order to explain why they are useful and how energy flows and transforms until it becomes fit in a conventional electrical system.

Figura 6: grupo de paneles solares con sistema de seguimiento



Fuente: solarbay.com.au (2017) "solar trackers"

The efficiency of the solar panels is dependent on the climatic and environmental conditions, some types of panels usually work better than others in different conditions, so the importance of knowing how to choose the panel that best suits the installation site.

By increasing the amount of solar radiation received by the panel, the amount of energy obtained from a photovoltaic installation will be optimized; for this, what is sought is that the photovoltaic panel remains constantly perpendicular to the sun

This is achieved by installing solar tracking

esto lo que se busca es que el panel fotovoltaico permanezca constantemente en posición perpendicular al sol.

Esto se logra instalando sistemas de seguimiento solar, estos seguidores se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Según su tipo de movimiento

- Seguidor a un eje: de menor costo, pero con más imprecisión pues no pueden hacer un seguimiento completo al sol.

- Seguidor a dos ejes: mucho más precisos, pues son capaces de hacer un seguimiento más completo al sol, pero con un costo más elevado.

- Según su algoritmo de seguimiento

- Seguidor por punto luminoso: poseen un sensor el cual les indica cual es el punto del cielo más luminoso y al que deben apuntar.

- Seguidor por programación astronómica: están programados para saber en qué punto debería estar el sol a cada hora y apuntan a dicha posición. (Machado, et al 2015)

systems, these followers can be classified as follows:

- According to your type of movement

- Tracker to an axis: lower cost, but with more inaccuracy because they can not make a full tracking to the sun.

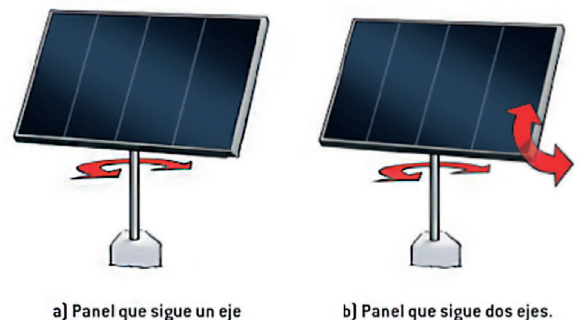
- Tracker with two axes: much more precise, because they are able to follow the sun more fully, but at a higher cost.

- According to its tracking algorithm

- Follower by luminous point: they have a sensor which indicates which is the point of the brightest sky and to which they must aim.

- Follower by astronomical programming: they are programmed to know at what point the sun should be at each hour and point to that position. (Machado, et al 2015)

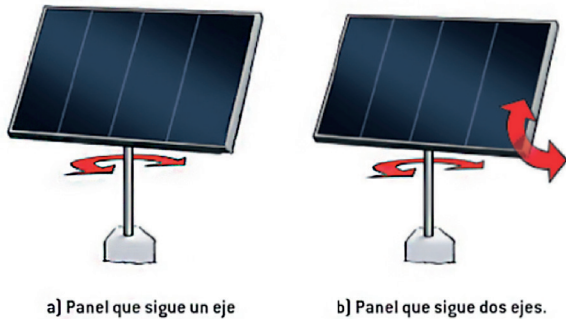
figura 7: sistema de seguimiento de un solo eje, o de dos



Fuente: <http://www.tecnoligente.com> (2018)

With this it is understood that a solar tracking system consists of two blocks, the control block, which is usually made up of a microcontroller

figura 7: sistema de seguimiento de un solo eje, o de dos



Fuente: <http://www.tecnoligente.com> (2018)

Con esto se entiende que un sistema de seguimiento solar consta de dos bloques, el bloque de control, que usualmente está conformado por un microcontrolador y el bloque mecánico, que se encarga de mover el panel según las órdenes del bloque de control.

REGULADOR

Al contar con un sistema de seguimiento funcional ahora sigue conectar el panel a la carga (comúnmente baterías), pero por lo general las cargas no son conectadas de forma directa a la red de paneles fotovoltaicos, se incluye en el sistema de generación fotovoltaica un circuito electrónico regulador cc\cc para ajustar la salida de los paneles a las características de la carga. (Baethge, et al 2011)

Existen dos variantes de reguladores de carga solares: los reguladores PWM (modulación por ancho de pulsos) y los reguladores MPPT (Seguidor punto de máxima potencia)

Para entender la diferencia entre la carga de PWM y MPPT, primero miremos en una curva de potencia típica de un panel fotovoltaico.

La generación de potencia (Watts= voltaje ("V") * corriente ("I")) generada por el panel es indicada

and the mechanical block, which is responsible for moving the panel according to the orders of the control block.

REGULATOR

Having a functional tracking system now continues to connect the panel to the load (commonly batteries), but usually the loads are not directly connected to the grid of photovoltaic panels, a circuit is included in the photovoltaic generation system electronic regulator cc \ cc to adjust the output of the panels to the characteristics of the load. (Baethge, et al 2011).

There are two variants of solar charge controllers: the PWM (pulse width modulation) regulators and the MPPT (Maximum power point follower) regulators

To understand the difference between the load of PWM and MPPT, first let's look at a typical power curve of a photovoltaic panel.

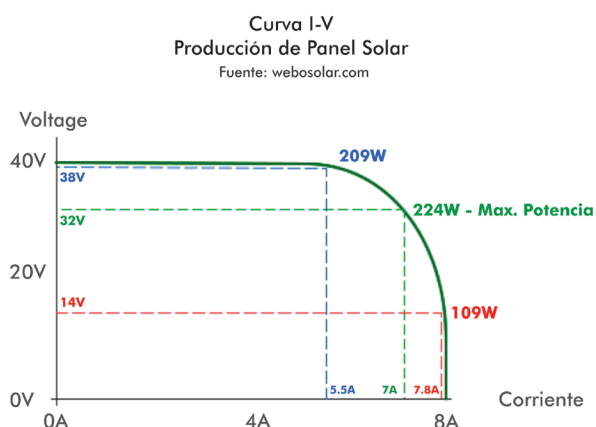
The power generation (Watts = voltage ("V") * current ("I")) generated by the panel is indicated by the power curve. The "Maximum power point" (MPPT) is the point on the curve in which the voltage-current ratio is the most optimal for the production of greater power. Depending on the irradiation conditions and climate factor, the MPPT will change dynamically throughout the day

Figura 8: curva I-V Producción de Panel Solar

Fuente: [Fuente: http://www.webosolar.com](http://www.webosolar.com)

por la curva de potencia. El “Punto de máxima potencia” (MPPT) es el punto de la curva en el cual la relación voltaje-corriente es el más óptimo para la producción de mayor potencia. Dependiendo de las condiciones de irradiación y factor climático, el MPPT cambiará dinámicamente a lo largo del día.

Figura 8: curva I-V Producción de Panel Solar



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

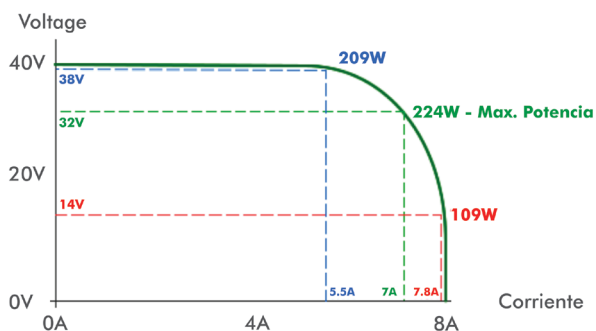
REGULADOR PWM

Permite el paso o no de corriente desde el panel solar hacia las baterías en forma de contactor. En función del voltaje de la batería, el regulador detecta el estado de la misma y la carga que ésta admite.

De esta manera, cuando la batería está descargada el regulador cierra el circuito permitiendo que la corriente fluya desde los paneles, pero cuando detecta que la batería está llegando a su carga completa abre el circuito.

Esto hace que el panel trabaje a un voltaje inferior al máximo que puede dar, pues trabaja a un

Curva I-V
Producción de Panel Solar
Fuente: webosolar.com



PWM REGULATOR

It allows the passage or not of current from the solar panel to the batteries in the form of a contactor. Depending on the battery voltage, the regulator detects the state of the battery and the load it allows.

In this way, when the battery is discharged the regulator closes the circuit allowing the current to flow from the panels, but when it detects that the battery is reaching its full charge it opens the circuit.

This causes the panel to work at a voltage lower than the maximum it can give, since it works at a voltage equivalent to that of the battery so that its charge is possible. When working at a lower voltage than its maximum capacity, the maximum power and efficiency of the panel is not extracted, as its capacity is not optimally utilized.

This type of regulator has its points in favor: its installation is easy, because you just have to put the same voltage in the batteries as in the photovoltaic modules.

Its price is more affordable, it is cheaper than

voltaje equivalente al de la batería para que su carga sea posible. Al trabajar a un voltaje menor de su máxima capacidad no se saca la mayor potencia y eficiencia del panel, pues no se está aprovechando su capacidad de manera óptima.

Este tipo de regulador tiene sus puntos a favor: su instalación es fácil, pues solo hay que poner la misma tensión en las baterías que en los módulos fotovoltaicos.

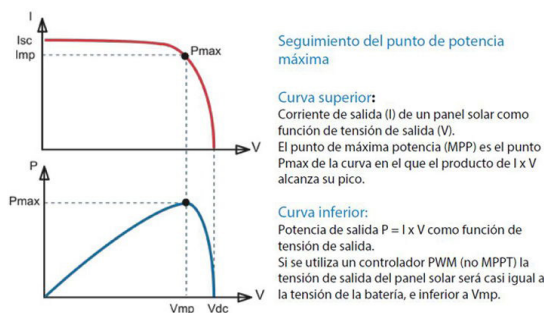
Su precio es más asequible, es más económico que los reguladores MPPT.

No da problemas, es un componente sencillo por ende difícilmente generaría dificultades, resulta siendo muy fiable.

En instalaciones pequeñas donde una pérdida de potencia sea menor se recomienda la instalación de este tipo de reguladores, pues su eficiencia comparada con los reguladores MPPT no sería notable, en cambio su precio si se vería disminuido. [Autosolar].

REGULADOR MPPT

(Figura 9: curva de potencia de un módulo fotovoltaico)



Fuente: Autosolar (2015)

El seguidor-rastreador del punto máximo de potencia (MPPT) es un sistema electrónico que busca que los módulos fotovoltaicos produzcan toda la potencia que son ca-

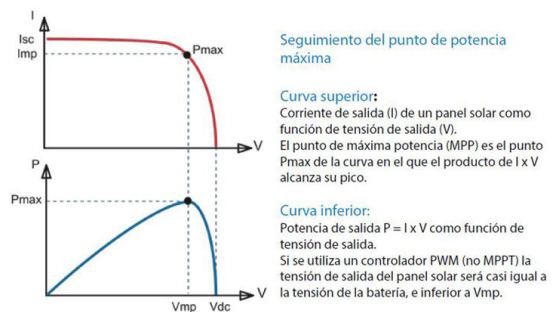
MPPT regulators.

It does not give problems, it is a simple component therefore it would hardly generate difficulties, it turns out to be very reliable.

In small installations where a loss of power is lower, the installation of this type of regulators is recommended, since its efficiency compared with the MPPT regulators would not be noticeable, however its price would be reduced. [Autosolar]

MPPT REGULATOR

(Figura 9: curva de potencia de un módulo fotovoltaico)



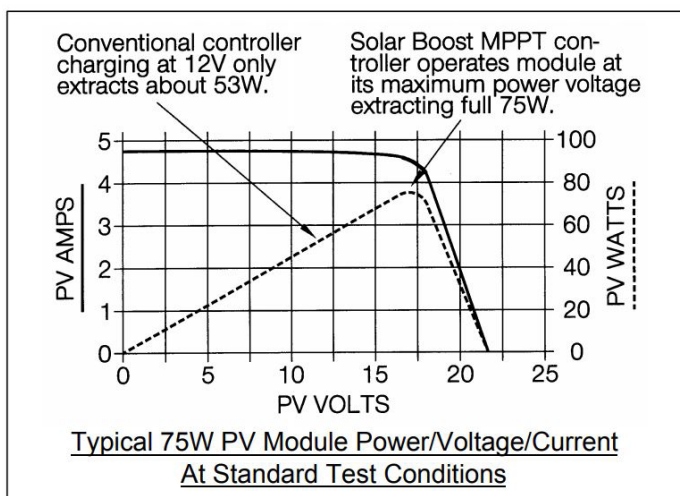
The follower-tracker of the maximum power point (MPPT) is an electronic system that seeks that the photovoltaic modules produce all the power they are capable of generating. Do not confuse the MPPT with the solar tracking system, MPPT is based on moving the voltage, or the operating current of the panels in order to obtain the maximum power. A switching converter is usually required in this tracker to sweep the power generated by the photovoltaic modules (Karami, et al 2017).

The MPPT system is an electronic system in its entirety, it varies the point of electrical operation

paces de generar. No hay que confundir el MPPT con el sistema de seguimiento solar, MPPT se basa en mover la tensión, o la corriente operativa de los paneles con el fin de obtener la potencia máxima. Un convertidor de conmutación se suele requerir en este rastreador para barrer la potencia generada por los módulos fotovoltaicos (Karami, et al 2017).

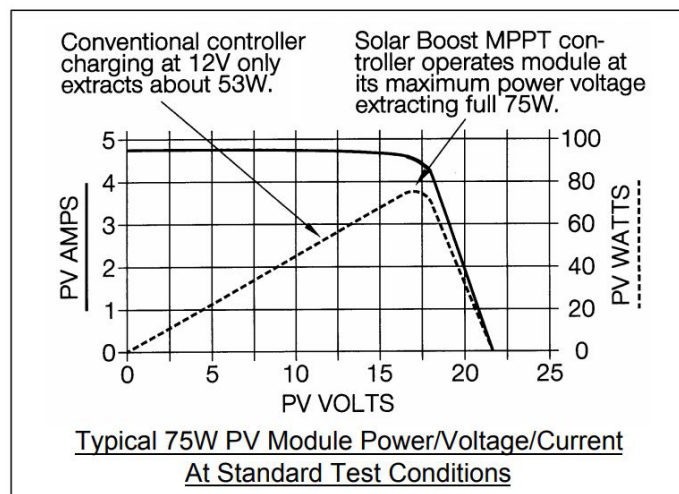
El sistema MPPT es un sistema electrónico en su totalidad, él varía el punto de funcionamiento eléctrico de los módulos fotovoltaicos para que puedan producir la máxima potencia disponible. Esa potencia adicional se usa como una mayor corriente de carga a la batería. El MPPT no se encarga de simplemente conectar el módulo con la batería, él calcula el voltaje con el cual el módulo puede generar una mayor potencia. Sin importar la condición ambiental en que se encuentre el módulo fotovoltaico, el MPPT debe rastrear y extraer su potencia máxima. (Martin, et al 2018)

of the photovoltaic modules so that they can produce the maximum available power. That additional power is used as a higher charge current to the battery. The MPPT is not responsible for simply connecting the module with the battery, it calculates the voltage with which the module can generate more power. Regardless of the environmental condition of the photovoltaic module, the MPPT must track and extract its maximum power. (Martin, et al 2018).



Fuente: Cullen, R. A (Figura 10)

Mediante un convertidor de potencia DC\DC de alta eficiencia se convierte el voltaje de 17V en la entrada del controlador de la batería. Suponiendo que el cableado del sistema fuese eficiente al



Fuente: Cullen, R. A (Figura 10)

The operation of the MPPT tracker can be understood with the following example given by Blue Sky energy:

In graph 10, the voltage of a photovoltaic module of 17V is observed. Regardless of the current battery voltage, the MPPT tracker operates the modules at 17V in order to extract the full 75W.

A high-efficiency DC \ DC power converter converts the 17V voltage into the input of the battery controller. Assuming that the wiring of the system was 100% efficient, in this example the load current would be: $V_{MODULO} / V_{BATERIA} \times I_{MO}$

100%, en este ejemplo la corriente de carga sería: $V_{MODULO} / V_{BATERIA} \times I_{MODULO}$, o $17V / 12V \times 4.45 = 6.30^a$. El aumento de carga que se lograría sería de 1.85A, equivalente al 42%, esto mediante la recolección de la potencia del módulo, dicha potencia que un controlador convencional habría dejado atrás, pero que el sistema MPPT convirtió en corriente utilizable. Pero hay que tomar en cuenta que siempre existe un factor error y nada es 100% efectivo, por lo cual el aumento de la corriente de carga será algo menor, pues por el cableado, fusibles, interruptores y el mismo controlador de carga, se perderá algo de corriente.

(Cullen 2000)

Como inconvenientes encontramos que los reguladores MPPT son más caros, a veces incluso doblan con facilidad el precio de los PWM a igualdad de potencia, también son bastante más grandes.

Es importante pensar en qué tipo de sistema de paneles vamos a instalar nuestro regulador a la hora de elegir entre un PWM y un MPPT. Si el voltaje del campo de paneles es muy superior al voltaje de baterías lo más recomendable es un regulador MPPT. Es más económica y suficiente la utilización de un regulador PWM en las instalaciones que sean pequeñas como el alumbrado de una pequeña vivienda o el suministro a unos pocos electrodomésticos.

En caso de que la instalación es de grandes dimensiones y la potencia proporcionada es bastante, lo mejor es utilizar un regulador MPPT, disminuiría notablemente la pérdida de potencia además de que ayuda a un mejor mantenimiento de las baterías, ya que suelen incorporar más

DULO, or $17V / 12V \times 4.45 = 6.30^a$. The increase in load that would be achieved would be 1.85A, equivalent to 42%, this by collecting the power of the module, said power that a conventional controller would have left behind, but that the MPPT system converted into usable current. But you have to take into account that there is always an error factor and nothing is 100% effective, so the increase in the load current will be somewhat less, because the wiring, fuses, switches and the same charge controller will be lost something of current.

(Cullen 2000).

As disadvantages we find that MPPT regulators are more expensive, sometimes they even easily double the price of PWMs with equal power, they are also quite bigger

It is important to think about what type of panel system we are going to install our regulator when choosing between a PWM and an MPPT. If the voltage of the panel field is much higher than the battery voltage, an MPPT regulator is recommended. It is more economical and sufficient to use a PWM regulator in installations that are small, such as the lighting of a small dwelling or the supply of a few household appliances.

In case the installation is of large dimensions and the power provided is enough, it is best to use an MPPT regulator, it would significantly reduce the loss of power as well as help to better maintenance of the batteries, as they usually incorporate more advanced algorithms to load and protect it. [Autosolar]

At this point it is only necessary to connect the energy given by the photovoltaic system to the

avanzados algoritmos para cargarla y protegerla. [Autosolar]

Llegado a este punto solo hace falta conectar la energía dada por el sistema fotovoltaico a la red eléctrica donde se vaya a utilizar, si esta red es de una casa, oficina, incluso para maquinarias, haría falta convertir la corriente que viene del sistema fotovoltaico (corriente DC) a corriente que pueda ser utilizada por esta red eléctrica (AC).

Para esto se requiere de un inversor (DC-AC).

INVERSOR

Los voltajes de las corrientes continua y alterna se diferencian por como fluyen, mientras que en la corriente continua el voltaje es constante y permanente con el tiempo, en la corriente alterna la magnitud y dirección del flujo cambia de forma periódica, creando unos valles y picos que imitan unos intervalos regulares. Mediante un circuito electrónico el inversor de voltaje hace que la corriente continua cambie de dirección de manera periódica de forma parecida a la corriente alterna. De manera que la energía eléctrica final pueda ser usada de manera convencional en una red eléctrica el inversor usa una serie de filtros para que los cambios de dirección sean suaves y regulares. [38]

(Figura 11: onda hecha a base de pulsos)

electrical network where it will be used, if this network is a house, office, even for machinery, it would be necessary to convert the current coming from the photovoltaic system (DC current) to current that can be used by this electrical network (AC).

For this, an inverter (DC-AC) is required.

INVERTER

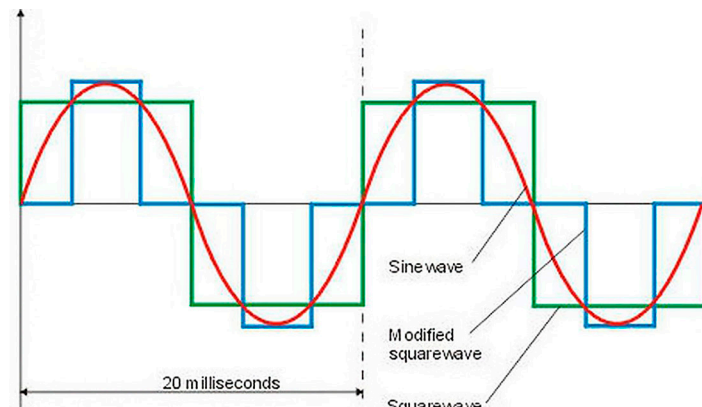
The voltages of the continuous and alternating currents are differentiated by how they flow, while in the direct current the voltage is constant and permanent with time, in the alternating current the magnitude and direction of the flow changes periodically, creating valleys and peaks that mimic regular intervals. By means of an electronic circuit the voltage inverter causes the direct current to change direction periodically in a similar way to the alternating current. So that the final electrical energy can be used in a conventional way in an electrical network the investor uses a series of filters so that the changes of direction are smooth and regular. [38].

(Figura 11: onda hecha a base de pulsos)

Fuente: <https://sciencing.com> (2017)

The inverters are based on transistors (electrical switches). A controller sends signals to the transistors that handle the positive voltage, so that they emit a positive pulse (Arahal, et al 2016). Then it does the same with the negative voltage transistors. An alternating soft wave called sinusoidal wave is created. Although most inverters do not create a real sine wave, they do create an

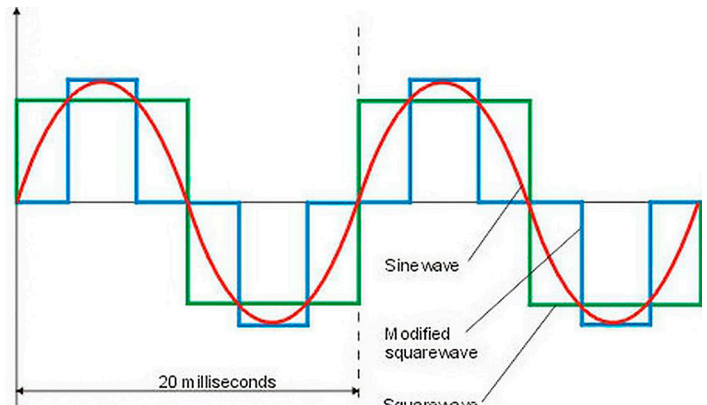
Fuente: <https://sciencing.com> (2017)



Los inversores se basan en transistores (interruptores eléctricos). Un controlador le envía señales a los transistores que manejan el voltaje positivo, para que estos emitan un pulso positivo (Arahal, et al 2016). Luego hace lo mismo con los transistores de voltaje negativo. Se crea una onda suave y alterna llamada Onda sinusoidal. Aunque la mayoría de los inversores no crean una onda sinusoidal real, si crean una aproximación de ella basada en pulsos eléctricos individuales como se ve en la figura 11 (David 2017).

Luego de esto, la conversión de corriente continua a corriente alterna está lista, quedaría solo conectarlo a la red eléctrica que se desea utilizar, esta red puede estar conectada a un tablero de distribución (al cual se conectaría la energía dada por el sistema fotovoltaico) para facilitar el suministro de corriente (Scarabelot, et al 2018).

approximation of it based on individual electrical



pulses as seen in Figure 11 (David 2017).

After this, the conversion of direct current to alternating current is ready, it would only be connected to the electrical network that you want to use, this network can be connected to a distribution board (to which the energy given by the photovoltaic system would be connected) to facilitate the current supply (Scarabelot, et al 2018).

Conclusiones

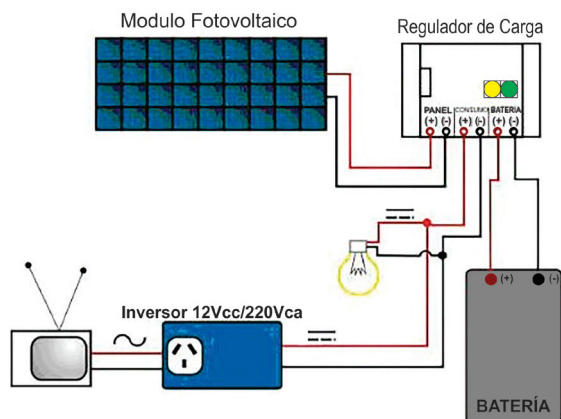


Figura 12: sistema fotovoltaico completo, ejemplificado en red doméstica

Fuente: <https://sciencing.com> (2017)

Los inversores se basan en transistores (interruptores eléctricos). Un controlador le envía señales a los transistores que manejan el voltaje positivo, para que estos emitan un pulso positivo (Arahal, et al 2016). Luego hace lo mismo con los transistores de voltaje negativo. Se crea una onda suave y alterna llamada Onda sinusoidal. Aunque la mayoría de los inversores no crean una onda sinusoidal real, si crean una aproximación de ella basada en pulsos eléctricos individuales como se ve en la figura 11 (David 2017).

Luego de esto, la conversión de corriente continua a corriente alterna está lista, quedaría solo conectarlo a la red eléctrica que se desea utilizar, esta red puede estar conectada a un tablero de distribución (al cual se conectaría la energía dada por el sistema fotovoltaico) para facilitar el suministro de corriente (Scarabelot, et al 2018).

Conclusions

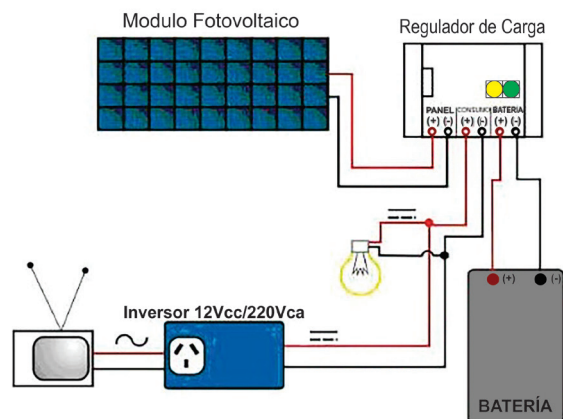


Figura 12: sistema fotovoltaico completo, ejemplificado en red doméstica

Fuente: <https://sciencing.com> (2017)

The implementation of a solar photovoltaic system brings many benefits, while it takes a great effort to carry it out. Every aspect to be taken into account when installing a panel is essential, because even climatic variations can mean that we do not get the desired benefit from our photovoltaic system and that its efficiency is lower than expected. Electric power is vital for the human being, and the sun is a giant source of energy, of course, implementing a functional photovoltaic system involves an investment, but the results show that it is worth making the effort.

The production of clean energy from the sun represents a significant economic saving, since it is an inexhaustible source of energy that is not subject to fluctuations in the markets or the effects derived from speculation. And most importantly, it is a source of continuous and unlimited energy production that does not require additional maintenance or usage costs.

REFERENCIAS (REFERENCES)

Arahal, M. R., Barrero, F., Ortega, M. G., & Martin, C. (2016). Harmonic analysis of direct digital control of voltage inverters. *Mathematics and Computers in Simulation*, 130, 155-166.

Aster, N., Siegel, R. P. (2012, August) Advantages of Solar Energy. *Solar Photovoltaics: Pros and Cons*. Recuperado de: <https://www.triplepundit.com/2012/08/advantages-of-solar-energy/>

Autosolar (2015) ¿Qué es un regulador MPPT? Recuperado de: <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/que-es-un-regulador-mppt>

Autosolar. (2017) Diferencias entre Silicio Monocristalino y Multicristalino o Policristalino. Recuperado de <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/diferencias-entre-silicio-monocristalino-y-multicristalino-o-policristalino>

Autosolar (2018) ¿Cómo es un regulador de carga PWM? Recuperado de <https://autosolar.pe/blog/aspectos-tecnicos/como-es-un-regulador-de-carga-pwm>

Avrutin, V., Izyumskaya, N., & Morkoç, H. (2011). Semiconductor solar cells: recent progress in terrestrial applications. *Superlattices and Microstructures*, 49(4), 337-364.

Baethge, E., Berzoy, A., Guzmán, V., & Giménez, M. I. (2011). Nuevo sistema de control para el seguimiento del punto de máxima potencia en paneles solares basado en el control predictivo de corriente de convertidores cc-cc. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 15(60), 151-160.

Becker, C., Sontheimer, T., Steffens, S., Scherf, S., & Rech, B. (2011). Polycrystalline silicon thin films by high-rate electronbeam evaporation for photovoltaic applications—Influence of substrate texture and temperature. *Energy Procedia*, 10, 61-65.

Cibira, G. (2018). Relations among photovoltaic cell electrical parameters. *Applied Surface Science*.

Cullen, R. A. (2000). What is maximum power point tracking (MPPT) and how does it work?. *Blue Sky Energy*, 16. Curiosoando (2014). “¿Qué es un inversor de voltaje?”. <https://curiosoando.com/que-es-un-inversor-de-voltaje>

David, Isaiah. “How Does a DC to AC Power Converter Work?” *Sciencing*. Recuperado de <https://sciencing.com/dc-ac-power-converter-work-5202726.html>

Energiza. (2013) Paneles fotovoltaicos: Conceptos y tipos. *Solar Fotovoltaica*. Recuperado de <http://www.energiza.org/component/content/article/22-solar-fotovoltaica/627-paneles-fotovoltaicos-concepto-y-tipos>

Karami, N., Moubayed, N., & Outbib, R. (2017). General review and classification of different MPPT Techniques. *Renewable and sustainable energy Reviews*, 68, 1-18.

Knier, G. (2002). How do photovoltaics work? *Science@NASA*.

Kumar, A., Bieri, M., Reindl, T., & Aberle, A. G. (2017). Economic Viability Analysis of Silicon Solar Cell Manufacturing: Al-BSF versus PERC. *Energy Procedia*, 130, 43-49.

Loff, S. (2015, March) Vanguard Satellite, 1958. Recuperado de <https://www.nasa.gov/content/vanguard-satellite-1958>

Machado Toranzo, N., Lussón Cervantes, A., Carralero, O., Leysdian, L., Bonzon Henríquez, J., & Escalona Costa, O. (2015). Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar. *Ingeniería Energética*, 36(2), 190-199.

Manna, T. K., & Mahajan, S. M. (2007, May). Nanotechnology in the development of photovoltaic cells. In *Clean Electrical Power, 2007. ICCEP'07. International Conference on* (pp. 379-386). IEEE.

Martin, A. D., Vazquez, J. R., & Cano, J. M. (2018). MPPT in PV systems under partial shading conditions using artificial vision. *Electric Power Systems Research*, 162, 89-98.

Matsuda, A. (2004). Microcrystalline silicon.: Growth and device application. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 338, 1-12.

Mundo Solar. (2014) Fabricación de células solares recuperado de: <http://www.dforcesolar.com/Energía-solar/fabricacion-de-celulas-solares/>

None, N. (2008). Solar Energy Technologies Program: Multi Year Program Plan 2008-2012, Page 28. EERE Publication and Product Library, Washington, DC (United States).

Renewable Energy (2016) What is the Difference Between Monocrystalline and Polycrystalline Solar Panels? Recuperado de <https://www.renewableenergyhub.co.uk/solar-panels/what-is-the-difference-between-monocrystalline-and-polycrystalline-solar-panels.html>

Rodríguez Murcia, H. (2008). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Revista de ingeniería, (28).

Sampaio, P. G. V., González, M. O. A., de Vasconcelos, R. M., dos Santos, M. A. T., de Toledo, J. C., & Pereira, J. P. P. (2018). Photovoltaic technologies: Mapping from patent analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 93, 215-224.

Scarabelot, L. T., Rambo, C. R., & Rampinelli, G. A. (2018). A relative power-based adaptive hybrid model for DC/AC average inverter efficiency of photovoltaics systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 92, 470-477.

Sharma, A. (2011). A comprehensive study of solar power in India and World. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(4), 1767-1776.

Schock, H. W. (1996). Thin film photovoltaics. Applied surface science, 92, 606-616.

Staebler, D. L., & Wronski, C. R. (1977). Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si. Applied physics letters, 31(4), 292-294.

Tyagiab V.V., Nurul A.A. Rahimb N.A.Rahimb Jeyraj A./L.Selvarajb (2013, April) Progress in solar PV technology: Research and achievement. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 20, Pages 443-461. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.017>