

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

GRADO DE FÍSICA
FACULTAD DE FÍSICA Y MATEMATICAS



TRABAJO DE FIN DE GRADO

**DISEÑO Y ESTUDIO DE UNA BOMBA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA
EXTRACCIÓN DE AGUA EN UNA ZONA RURAL EN SENEGAL**

Autor:

AYMAN LASFAR EL HALLAL

Tutores:

FERNANDO LAHOZ ZAMARRO, BENJAMÍN GONZÁLEZ DÍAZ

Abstract

The following work has been carried out to help the citizens of Sampathé, a town in the south of Senegal, with their irrigation needs: the aim of the project is to install a photovoltaic solar pump that operates entirely on renewable energy. The project is being carried out in collaboration with the NGDO Alegria sin fronteras. The report mentions the situation of the Senegalese people and the positive impact that the project will have on the people and the environment, which are the main reasons for carrying out this project.

The theoretical framework of the report explains the physics of these systems. Firstly, the band theory of solids is explained, which is mainly used to distinguish between the three types: conductors, semiconductors and insulators. Semiconductors are then examined, distinguishing between intrinsic semiconductors, which are completely pure, and extrinsic semiconductors, which are doped with impurities. This doping can be of the N type, which aims to increase the density of electrons in relation to the density of holes, or of the P type, which aims to increase the density of holes in relation to electrons. By joining semiconductors with different doping, the P-N junction is obtained in semiconductors, where a mathematical analysis is carried out that culminates in obtaining the diode. In addition, the behaviour of the P-N junction under radiation, which is the basis for the operation of solar cells, is explained in detail.

On the other hand, a more technical part is carried out, where the type of irrigation system to be used is approached, which is an isolated system, as it works entirely with renewable energies. This system is mainly made up of solar panels, the pump, the inverter and the pond where the water is stored. In order to find out which instrumentation is suitable for the needs presented, preliminary calculations are carried out in order to obtain the necessary flow, energy and power requirement, the number of panels to be installed, the pipe lengths and their material. Once this information has been obtained, the most suitable products are specified.

Contents

1	Introducción	3
1.1	Objetivo	3
1.2	Justificación	3
2	Marco Teórico	5
2.1	Teoría de bandas en sólidos	5
2.2	Unión P-N en semiconductores	7
2.3	Unión P-N bajo radiación	14
3	Estado del arte y antecedentes	19
3.1	Beneficios de la energía renovable fotovoltaica	19
3.2	Instalación bombeo solar	20
3.2.1	Paneles solares fotovoltaicos	21
3.2.2	Controlador de la bomba o inversor solar de la bomba	22
3.2.3	Bomba de agua	23
3.2.4	Sistemas de seguimiento solar (Manual o automáticos)	24
4	Memoria técnica	25
4.1	Datos de partida	25
4.2	Cálculo y diseño del sistema de bombeo solar	26
4.2.1	Cálculo del caudal de impulsión	26
4.2.2	Cálculo de energía y potencia necesaria para la bomba	28
4.2.3	Selección de la bomba e inversor	28
4.2.4	Número de paneles fotovoltaicos	31
4.2.5	Diseño hidráulicos. Generalidades.	33
5	Bibliografía	36
	References	36

1 Introducción

This section introduces the topic to be discussed, explaining the objective and the reasons why this project is being carried out. The aim of the project is the installation of a photovoltaic solar pump to realise irrigation systems that work completely with renewable energies in Sampathé, a village located 6 kilometres from Kolda. This project is carried out in collaboration with the non-governmental organisation (NGO) Alegria sin fronteras. The project will facilitate the transport of water to the population of Sampathé, there by improving their quality of life.

The rationale for this project is primarily driven by its social impact. The installation of this photovoltaic solar pump will facilitate the growth of the regional economy and enhance the quality of life for the inhabitants of Sampathé. The provision of certain facilities that were previously unavailable will be a significant benefit for the local community. Another rationale for this project is environmental protection. The project will utilise renewable and clean energy sources, such as solar energy, which avoids the use of polluting fuels, and therefore, the environmental impact is lower.

1.1 Objetivo

La finalidad de esta memoria es la instalación de una bomba solar fotovoltaica para realizar sistemas de regadío que funcionen completamente con energías renovables en una zona rural de Senegal. Este proyecto se lleva a cabo en colaboración con la Organización No Gubernamental para el Desarrollo (ONGD) Alegria Sin Fronteras. Esta entidad tiene como objetivo impulsar políticas, actuaciones y proyectos para el desarrollo de colectivos en riesgo de exclusión, como es el caso de la población de Sampathé, un pueblo ubicado en el sur de Senegal que se encuentra en una situación de precariedad socio-económica y que se enfrenta a limitaciones en términos de infraestructura y acceso a recursos básicos. [1]

Con este proyecto se quiere garantizar el regadío de los cultivos a través del sistema fotovoltaico con el objetivo de evitar que las familias del poblado transporten el agua manualmente.

1.2 Justificación

La principal justificación para la realización de este proyecto se debe a la finalidad social del mismo. La instalación se va a realizar en Sampathé, un pueblo ubicado a seis kilómetros de Kolda, en el sur de Senegal. La región de Kolda representa el 7 % de todo el territorio senegalés, en donde se encuentra limitada por el norte con Gambia, por el sur con Guinea-Bissau y Guinea-Conakry, al este con la región de Tambacunda y en el oeste por la región de Ziguinchor (Ver Figura 1).



Figure 1: Mapa Senegal, en donde se puede distinguir la región de Kolda y su limitación territorial.

El clima que predomina en la región es el sur-guineano, un clima Tropical húmedo y seco o de sabana. La temporada de lluvia suelen ser entre Diciembre y Enero, donde las temperaturas varían entre los 25°C y 30°C considerándose una temporada muy caliente y nublada. Mientras que la temporada seca se registran las temperaturas más altas llegando hasta los 40°C. En general, las temperaturas a lo largo del año varían entre los 15°C y 40°C. [2] [3]

Senegal se considera uno de los países de África Occidental con mayor estabilidad; sin embargo, más de la mitad de la población vive por debajo del umbral de pobreza. La economía del país se basa en el cultivo del cacahuete, la pesca y los servicios. Centrándose en la región de Kolda, la economía de la región se basa en la agricultura y la ganadería. La agricultura representa el 80% de los activos de la región, siendo este la actividad del sector primario más importante. Los principales cultivos que se generan son alimentarios, como el trigo y el arroz, y comerciales, como el cacahuete y el algodón. [4] En relación al acceso de los servicios de energía en Kolda, sólo el 21% de los hogares tienen acceso a la electricidad, que además, es muy inadecuado ya que sufren cortes eléctricos temporales. Por otro lado, la infraestructura vial presenta grandes carencias, pues gran parte de la región se encuentra aislada ya que no existen infraestructuras viales de calidad, siendo este un gran obstáculo para el crecimiento de la economía en la región.

Por otro lado, se ha elegido este proyecto por la protección medioambiental. En la actualidad, varias centrales energéticas se abastecen de combustibles fósiles para la generación de energía, produciendo un impacto negativo en el cambio climático. Sin embargo, la energía solar es una energía limpia y renovable que sustituye a la energía de la red eléctrica producida por combustibles contaminantes. Uno de los principales

motivos de la escasez de agua es el cambio climático, por ello es de vital importancia ser precavidos con el medio-ambiente.

2 Marco Teórico

This section presents a discussion of band theory in solids, p-n bonding in semiconductors and P-N bonding under radiation. Band theory describes the behaviour of electrons in a solid. In order to explain the theory, the concept of the atom is introduced and the behaviour of electrons in it is explained. It is noted that only two electrons are allowed per energy level and that they can jump between these levels by absorbing or emitting energy. Conversely, a solid is composed of numerous atoms, each of which has an atomic orbital divided into many energy levels, forming continuous bands. The structure of these bands, determined by the electronic properties of the atoms and the atomic bonds, defines whether the solid is a conductor, semiconductor or insulator. Conductors have the valence band filled with electrons and the conduction band partially occupied, allowing current to flow. In the case of insulators, the valence band is fully occupied, while the conduction band is completely empty. With regard to semiconductors, they have a full valence band and an empty conduction band, but their forbidden band is narrower. Consequently, there is a possibility that electrons can acquire sufficient energy to jump into the conduction band and produce current. In order to do so, the electrons must acquire an energy greater than or equal to the forbidden band. Within the category of semiconductors, two distinct types can be identified: intrinsic and extrinsic semiconductors. Intrinsic semiconductors are characterised by a semiconductor that has been subjected to minimal impurity introduction, resulting in a semiconductor with a high degree of purity. In contrast, extrinsic semiconductors are semiconductors that have been subjected to the introduction of impurities with the objective of enhancing their electrical conductivity. The impurities are introduced by doping, and there are two forms: the N-type, which increases the density of electrons with respect to the density of holes, and the P-type, which increases the density of holes with respect to electrons. Consequently, the P-N junction is a structure formed by neighbouring regions with different doping and types, P and N. In order to gain a deeper understanding of how the P-N junction functions, the diffusion mechanism and the drag mechanism are elucidated in greater detail. Based on these mechanisms, the information presented throughout the chapter is quantified. And finally, it specifies the most efficient part of the spectrum for the creation of electron-hole pairs of the P-N junction representation under solar radiation and performs a mathematical development for obtaining maximum power output.

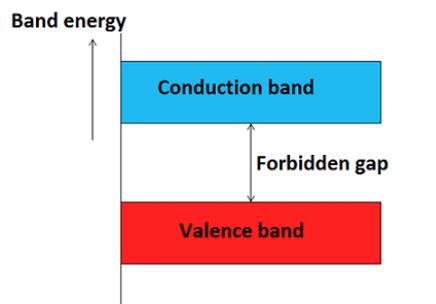
2.1 Teoría de bandas en sólidos

La Teoría de bandas en sólidos describe el comportamiento de los electrones en un sólido. Para explicar este modelo teórico es conveniente partir del concepto de átomo. Los átomos se caracterizan por niveles de energía discretos, donde solo se permiten 2 electrones por nivel de energía. Se sabe que si un átomo absorbe energía del exterior, un electrón puede saltar a un nivel de energía superior. Luego, los electrones también pueden saltar un nivel de energía inferior puesto que al absorber energía, estos pasan a niveles de energías superiores que son inestables, y por consiguiente tienden a regresar a su nivel de energía

original, emitiendo un fotón cuando este suceso ocurre.[5]

Se encuentra esto estrechamente ligado con los sólidos, pues están formados por un gran número de átomos. Como consecuencia de esto, cada orbital atómico se divide en un gran número de niveles, tan próximos en energía que forman un continuo, o banda, de niveles permitidos. Por ende, se caracteriza a los sólidos en base a la estructura de las bandas de energía. La estructura energética de las bandas dependen de las propiedades electrónicas de los átomos y de la fuerza de los enlaces entre ellos. Entre dichas bandas no se les permite a los electrones de un sólido tener energías. Al igual que ocurre en los átomos, donde un electrón en un átomo no puede tener energías entre niveles de energías atómicas. [5]

Considerando que el sólido está formado por N átomos, se procede a añadir electrones al sólido partiendo desde el nivel de menor energía. Al igual que ocurre con los niveles de energía atómicos, solo se permiten 2 electrones en cada nivel de energía debido al Principio de Exclusión de Pauli. Al llenar el material con los electrones asociados a los N átomos, la estructura de las bandas determinarán si el material es un conductor, un semiconductor o un aislante.



copyright@2013-2014, Physics and Radio-Electronics, All rights reserved

Figure 2: Esquema de la banda de valencia, representada en rojo, la banda de conducción, representada en azul y la banda prohibida, marcada en medio de ambas. Imagen extraída de [6].

Para facilitar su comprensión, se introduce la Figura 2, donde se puede observar la estructura de bandas. En ella se distingue la banda de valencia, que es la banda más alta ocupada por electrones, la banda prohibida, donde no puede haber ningún electrón, y la banda de conducción, que es la banda desocupada más baja del sólido.

Para distinguir los diferentes tipos de sólidos se observarán dichas bandas de energía, pues los niveles de energía inferiores están completamente ocupados por electrones y no cambian bajo las operaciones normales del sólido.

En el caso de los conductores, la banda de valencia se encuentra llena de electrones, seguida por la banda de energía prohibida y por la banda de conducción, parcialmente llena de electrones. El hecho de que la banda de conducción esté parcialmente llena indica que el material es un conductor, puesto que los electrones son capaces de trasladarse a niveles de energía ligeramente superiores dentro de la banda generándose corriente. [5]

A diferencia de los conductores, los aislantes tienen la banda de valencia totalmente ocupada mientras que la banda de conducción está vacía. Entre ambas se encuentra la banda prohibida, la cual es lo suficientemente ancha como para no permitir que los electrones fluyan hacia niveles de energías superiores, evitando así que se produzca la corriente. En otras palabras, los electrones no adquieren la energía necesaria para pasar de la banda de valencia a la de conducción ya que la energía de estos es menor que la energía de la banda prohibida. Este suceso ocurre siempre en este tipo de sólidos, independientemente de si se le aplica energía desde una fuente exterior.[5]

En cuanto a los semiconductores, este tipo de sólido también tiene la banda de valencia llena y la de conducción vacía. Sin embargo, los semiconductores se distinguen de los aislantes debido a que el ancho de la banda prohibida de los semiconductores es lo suficientemente estrecha como para permitir transiciones desde la banda de valencia a la de conducción. Para que se concrete esto, los electrones deben adquirir una energía suficiente para poder saltar la banda prohibida. Esto quiere decir que el electrón debe adquirir una energía mayor o igual que la energía de la banda prohibida:[5]

$$E \geq E_{\text{gap}}$$

siendo

$$E_{\text{gap}} = \text{Energía de la banda prohibida}$$

En la Figura 3, se muestra como varía la banda prohibida para cada tipo de material. Como se ha comentado con anterioridad, la banda de valencia en el conductor se encuentra muy cerca de la banda de conducción. Todo lo contrario ocurre en el aislante, en donde la separación entre dichas bandas es muy grande. En cuanto a los semiconductores, la banda prohibida ocupa una distancia considerable pero con mayor cercanía que en el caso de un aislante.

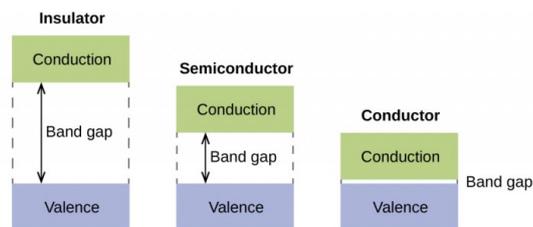


Figure 3: Esquema de la estructura de las bandas de los distintos tipos de sólidos. Observando de izquierda a derecha se distingue la estructura de un sólido aislante, a su lado la de un semiconductor y por último la de un conductor. Imagen extraída de [7].

2.2 Unión P-N en semiconductores

Los semiconductores se pueden dividir en dos grupos, intrínsecos y extrínsecos. Los semiconductores intrínsecos son semiconductores totalmente puros que poseen el mismo número de huecos que de electrones libres a cualquier temperatura. Este tipo de material actúa como aislante a temperatura ambiente. Sin embargo, al aumentar la temperatura, es decir, aportando energía, puede dar lugar a que se rompan enlaces covalentes produciendo de esta manera átomos ionizados obteniéndose así portadores libres que pueden dar lugar a una corriente eléctrica. El número de electrones que se trasladan a la banda de conducción

es pequeño. Por consiguiente, se obtiene una pequeña corriente al aplicar un voltaje. Con el fin de mejorar la conducción, se le pueden añadir impurezas a este tipo de material para modificar las características eléctricas del semiconductor. De este modo, la densidad y la naturaleza de los portadores en el semiconductor se pueden controlar mediante la adición de determinadas cantidades de impurezas. Este hecho es lo que se conoce como 'doping'. Al añadir las impurezas, se obtiene un semiconductor con distintas características que el puro, estos se denominan semiconductores extrínsecos. [8]

Existen dos formas de dopar('doping') a los semiconductores: tipo N y tipo P. En este caso, se habla del dopaje sobre el Silicio debido a que es el elemento que fundamentalmente forma los paneles fotovoltaicos.

- En el dopaje de tipo N (Ver Figura 4) se busca aumentar la densidad de electrones respecto a la de huecos. Para ello, introducen impurezas de elementos del grupo V de la tabla periódica puesto que disponen de cinco electrones de valencia. Al disponer de cinco electrones de valencia, un electrón queda liberado de manera que puede moverse libremente a través de la red cristalina. Es de interés que los nuevos niveles de energía se encuentren cerca de la parte inferior de la banda de conducción, pues, de esta manera, es relativamente fácil que los electrones se desplacen a dicha banda.

Los electrones libres son los principales portadores de carga en este tipo de semiconductores. Gracias a la presencia de un exceso de electrones libres, el semiconductor se vuelve altamente conductor y debido a este exceso es que se denomina de tipo N. Las impurezas que se agregan en este tipo de dopaje(doping) se les denominan 'donor impurity' (donante de la impureza).

- En el dopaje de tipo P se busca lo contrario, se busca aumentar la densidad de huecos, que actúan como cargas positivas, respecto a la de electrones. Por tanto, se introducen átomos del grupo III de la tabla periódica en el semiconductor intrínseco. Estos átomos disponen de tres electrones de valencia por lo que se genera un hueco en la estructura electrónica de la red cristalina. Lo ideal es que este hueco se localice cerca de la parte superior de la banda de valencia, debido a que facilita la ocupación de electrones.

En este caso, los portadores de carga son los huecos, que actúan como portadores de carga positiva contribuyendo a la conductividad del semiconductor. Estos portadores se mueven dentro de la red cristalina aceptando electrones de los átomos vecinos. Por consiguiente, se van generando lugares desocupados permitiendo el movimiento de los electrones por todo el semiconductor (Ver Figura 5).

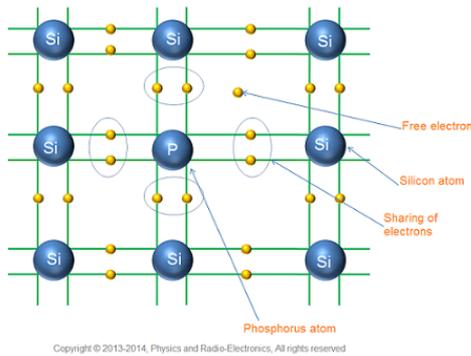


Figure 4: Ilustración esquemática de un dopaje de tipo N. Se observa que el fósforo actúa como donante de la impureza frente al silicio, que es el semiconductor al que se le modifican las características eléctricas. Imagen extraída de [9].

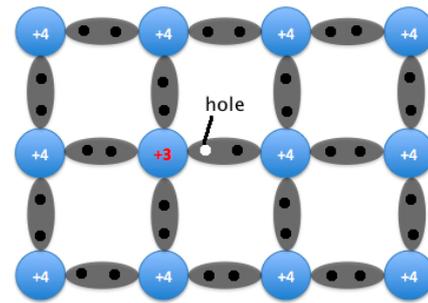


Figure 5: Ilustración esquemática de un dopaje de tipo P. Se observa un semiconductor intrínseco que es dopado con un aceptor. Imagen extraída de [10].

Una vez introducidos los conceptos de dopaje de tipo N y de tipo P, se trata la unión de ambos materiales.

La unión P-N es una estructura formada por regiones vecinas con diferente dopaje, tipo P y tipo N. Para entender el funcionamiento de la unión P-N, se debe hablar de dos mecanismos capaces de generar corriente eléctrica: el mecanismo de difusión y el mecanismo de arrastre.

- El mecanismo de difusión es el mecanismo físico que da lugar a que las partículas se propaguen intentando ocupar el máximo volumen posible.
- El mecanismo de arrastre consiste en un movimiento provocado por el campo eléctrico, el cual empuja a las cargas móviles positivas en un sentido y a las negativas en el opuesto. Al haber un campo eléctrico (E) en una región del espacio, existe un potencial eléctrico (V) asociado al mismo. El campo eléctrico apuntará en el sentido el cual, el potencial eléctrico decrece. El potencial eléctrico actúa como barrera para el movimiento de las cargas. Dependiendo de la energía cinética de las partículas, la barrera podrá ser superada o no.

Para fabricar una unión P-N, se parte de un semiconductor con impurezas de un tipo al que se le introducen impurezas del tipo opuesto. Como se ha nombrado con anterioridad, el semiconductor de tipo P tiene una gran concentración de huecos, que actúan como partículas cargadas positivamente, mientras que el de tipo N tiene una menor concentración de huecos. En cambio, el semiconductor de tipo N tiene mayor concentración de electrones, partículas cargadas negativamente, que el de tipo P. Por consiguiente, habrá una difusión de huecos de la región P a la región N. De la misma manera, habrá una difusión de electrones de la región N a la región P. La difusión de huecos y electrones deja atrás las impurezas de las que estos proceden. Como consecuencia, aparecerán regiones en la unión P-N donde haya carga eléctrica neta. Esto dará lugar a un campo eléctrico y, a su vez, a un potencial eléctrico asociado al campo. Este potencial actúa como una barrera que frena las cargas móviles. El equilibrio se alcanzará cuando la corriente de difusión de las cargas móviles se iguale a la corriente de arrastre:

$$I_{\text{difusión}} = I_{\text{arrastre}}$$

La región producida por el potencial eléctrico se conoce como depletion region, es decir, región de agotamiento (Ver Figura 6).

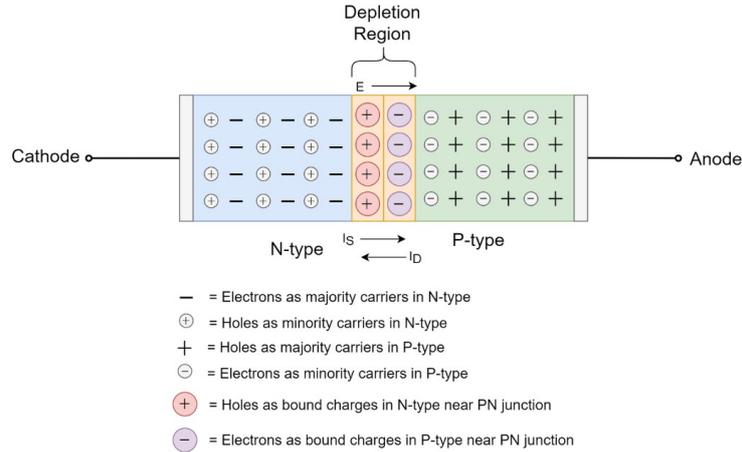


Figure 6: Ilustración de la unión P-N donde se indica la región de agotamiento, la región de tipo P y de tipo N. Imagen extraída de [11].

Una vez explicado de forma teórica, se pasa a cuantificar la información. El campo eléctrico, que se va a definir como E , requiere de un potencial electrostático. Dicho potencial está ligado con el campo eléctrico mediante la siguiente relación [5]:

$$E = -dV/dx \text{ siendo } V = \text{potencial electrostático.}$$

Esto produce un paso opuesto en la energía del electrón, pues la energía se define como $E = qV$, siendo q la carga del electrón, la cual es negativa.

Así, en equilibrio, las estructuras de bandas de la unión P-N aparecerá como se muestra en la Figura 7. En la figura, se observa que hay un incremento de energía en la región de tipo P respecto de la región de tipo N. Este incremento viene definido por ΔE . La magnitud de ΔE es suficiente para asegurar que el flujo de electrones, tanto en sentido hacia la región P como en el de la región N, esté equilibrado. Los electrones del material P que llegan a la unión no tienen dificultades para pasar al material N y producir un flujo de electrones f_2 . Al igual que los electrones del material N que producen un flujo de electrones f_1 hacia el material P. Originalmente, f_1 es mayor que f_2 puesto que hay mayor número de electrones en la región N que en la P. Sin embargo, el desplazamiento de la banda de energía impide que parte de los electrones del material N puedan desplazarse hacia el material P, ya que estos se colocarían en la banda prohibida del material P (Nótese que los electrones se deben mover en línea recta a través del diagrama de energía ya que su energía permanece constante). Por consiguiente, solo los electrones con energía superior a la energía de la banda superior prohibida podrán desplazarse dentro del material de tipo P y ajustando E , este flujo se puede hacer coincidir con f_2 . Para poder cuantificar esto, se

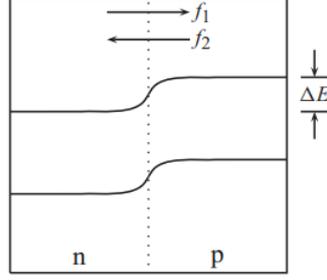


Figure 7: Diagrama de energía de la unión P-N. En ella, se distingue la banda de valencia, en la parte inferior, la banda de conducción, en la parte superior, y la región de agotamiento. Se puede observar la diferencia de energía en cada región. En la parte superior se observa el flujo f_1 , que va de la región N a la región P, y el flujo f_2 que va de la región P a la N. Imagen extraída de [5].

debe observar que los electrones en la banda de conducción han sido promovidos gracias a la energía térmica. Un resultado básico de la física térmica postula que la densidad de partículas F con energía E en un sistema de temperatura T viene dada por:

$$F = Ae^{-E/kT} \quad (1)$$

donde A es una constante de normalización y k es la constante de Boltzmann. Considerando el número de partículas(en este caso electrones), N , con energía por encima de un nivel $E_0 + \Delta E$, se obtiene:

$$N = \int_{E_0+\Delta E}^{\infty} e^{-E/kT} dE = -AkT(e^{-\infty} - e^{-(E_0+\Delta E)/kT}) = AkTe^{-E_0}e^{-\Delta E/kT} \quad (2)$$

En este caso, E_0 hace referencia a la energía en la parte inferior de la banda de conducción. Como el flujo f_1 es proporcional a este número, se tiene que :

$$f_1 = Ce^{-\Delta E/kT} \quad (3)$$

Donde se han agrupado todas las constantes en C . Al estar en equilibrio, no existe flujo neto de electrones, por lo que el flujo f_2 viene definido como:

$$f_2 = Ce^{-\Delta E/kT} \quad (4)$$

Esta estructura explicada anteriormente es una de las tres posibles estructuras de banda de la unión p-n. Para el caso de las otras dos estructuras, es necesario aplicar una tensión externa V_0 a la unión p-n.

Uno de estos casos es el de polarización directa. En él se aplica el lado negativo de la tensión al material N y el lado positivo al material P. Esta se muestra en la Figura 8 . Se puede observar que los niveles de la región P se han reducido una cantidad eV_0 , siendo e la carga de un electrón. Esto supondrá una facilidad para la fluidez de los electrones del material N hacia el material P, y esto es consistente con la noción de que los electrones tenderán a ser atraídos de la polarización positiva en la región P. Cuantificando este efecto, el flujo de partículas desde la región P a la N, f_1 , vendrá definido por:

$$f_1 = Ce^{-(\Delta E - eV_0)/kT} \quad (5)$$

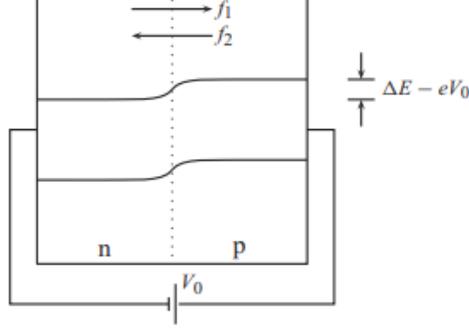


Figure 8: Diagrama de energía de la unión P-N aplicando una tensión externa V_0 de manera directa. En ella, se puede observar que el incremento de energía se reduce una cantidad eV_0 . Imagen extraída de [5].

No obstante, el desplazamiento de los niveles de energía no afecta sobre el flujo f_2 , por lo que este viene definido por la Ec. 4. Por tanto, el flujo neto de electrones se define como:

$$f_{net} = f_1 - f_2 = Ce^{-\Delta E/kT}(e^{eV_0/kT} - 1) \quad (6)$$

Por consiguiente, para cualquier valor V_0 considerable, el primer término de la Ec. 6 domina y se tendrá un incremento exponencial en el flujo de electrones desde la región P a la región N. Debido a que el paso de energía en la estructura de bandas es menor que en el caso de equilibrio, la capa de agotamiento se estrecha.

El otro caso, es el caso de polarización inversa. En él se aplica el lado positivo al material N y el lado negativo al material P, como se muestra en la Figura 9. Se puede observar que los niveles de energía de la región P se han alejado una cantidad eV_0 . Por lo cual, esto supondrá un dificultad para la fluidez de los electrones del material N hacia el material P, y esto es consistente con la noción de que los electrones tenderán a ser repelidos de la polarización negativa en el lado P. Siguiendo el mismo procedimiento que en el caso anterior, se pasa a reescribir el flujo f_1 , pues es el afectado por la aplicación de una tensión externa.

$$f_1 = Ce^{-(\Delta E + eV_0)/kT} \quad (7)$$

Al igual que antes, el flujo f_2 no se ve afectado por el desplazamiento de los niveles de energía. Por lo cual, el flujo neto de electrones viene dado por:

$$f_{net} = f_1 - f_2 = Ce^{-\Delta E/kT}(e^{-eV_0/kT} - 1) \quad (8)$$

A temperatura ambiente, $kT \approx 0.025eV$ para cualquier valor de V_0 . Por tanto, el término $e^{-eV_0/kT} \rightarrow 0$. En definitiva, el flujo neto de electrones se puede aproximar como:

$$f_{net} = f_1 - f_2 = -Ce^{-\Delta E/kT} \quad (9)$$

Cabe destacar que en este caso, el flujo neto es independiente de la tensión aplicada pero si depende de la temperatura.

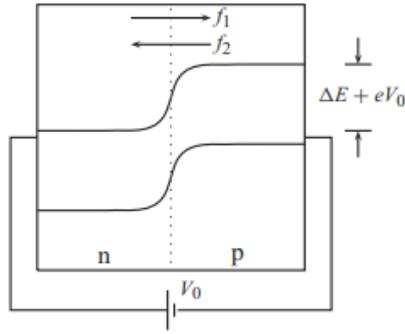


Figure 9: Diagrama de energía de la unión P-N aplicando una tensión externa V_0 de manera directa. En ella, se puede observar que el incremento de energía aumenta una cantidad eV_0 . Imagen extraída de [5].

Combinando el comportamiento de la unión P-N de las tres estructuras se obtiene el diodo. Se puede definir como dispositivo electrónico de dos terminales que solo permite el paso de la corriente en un sentido. En otras palabras, solo permite el paso de corriente en el caso de polarización directa.

En definitiva el comportamiento del diodo se puede resumir tal que:

$$I = I_0(e^{eV_d/kT} - 1) \quad (10)$$

siendo $I_0 = Ce^{-\Delta E/kT}$ y V_d la tensión aplicada en la polarización directa.

En la Figura 10, se puede observar la curva característica del diodo en donde se distingue las zonas de polarización inversa y polarización directa. En la zona de polarización directa se observa un crecimiento exponencial de la corriente con la tensión, que viene definido por la Ec. 10. En cuanto a la zona de polarización inversa, se observa que la tensión del diodo es negativa y cercana a cero. La corriente generada por este tipo de polarización se denomina corriente de fuga.

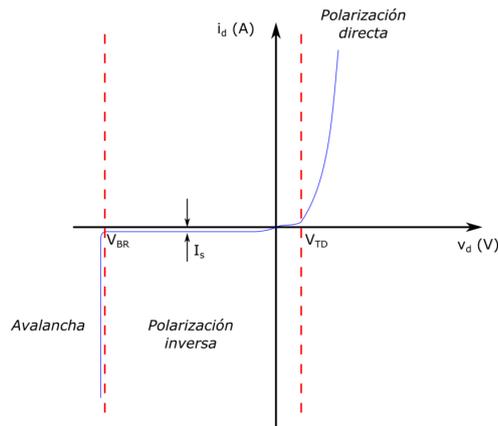


Figure 10: Curva característica de un diodo. Imagen extraída de [12].

La Figura 11 representa el símbolo electrónico del diodo. En ella se observa que el ánodo hace referencia a la región P del material mientras que el cátodo hace referencia a la región N. También se observa el sentido de la corriente.

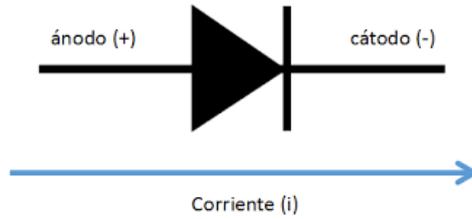


Figure 11: Símbolo electrónico del diodo. Imagen extraída de [13].

2.3 Unión P-N bajo radiación

La unión P-N bajo radiación solar es la base del funcionamiento de las células solares, que convierten la luz solar en electricidad.

El espectro solar contiene radiaciones electromagnéticas con longitudes de ondas variables. La parte del espectro más eficaz para la creación de pares electrón-hueco en los materiales semiconductores es la luz visible. Esto ocurre porque la energía del fotón aumenta conforme disminuye la longitud de onda ya que son inversamente proporcionales: $E = hc/\lambda$ siendo E la energía del fotón, h la constante de Planck, c la velocidad de la luz y λ la longitud de onda.

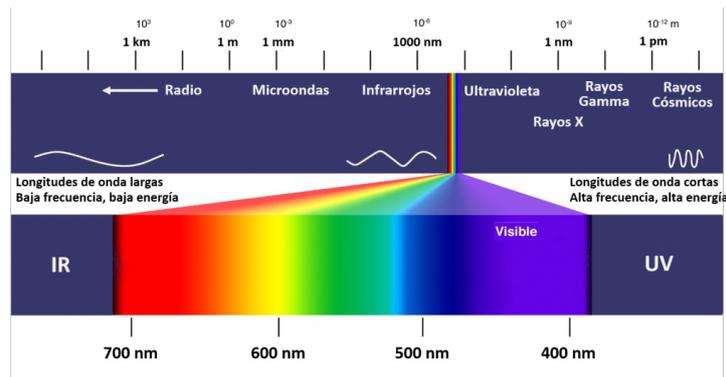


Figure 12: Radiación Electromagnética. Imagen extraída de [14].

Como se observa en la Fig. 12, la luz visible contiene longitudes de onda de entre 400 y 700 nm. Por lo que la energía del fotón en el espectro visible está entre 1.2 y 3.1 eV. Estos valores de energía que se han obtenido suelen ser los suficientemente grandes como para que los fotones sean absorbidos, dependiendo del material del semiconductor.

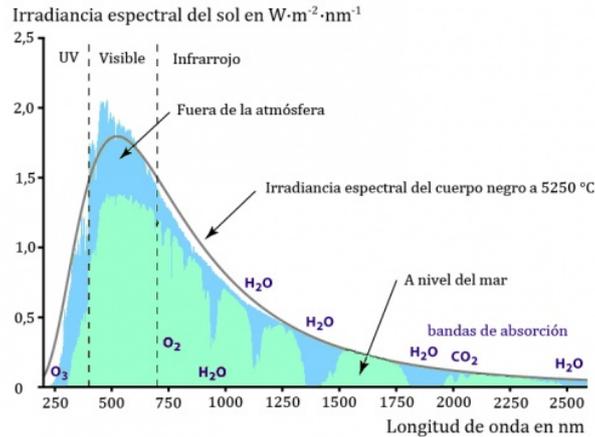


Figure 13: Irradiación solar frente longitud de onda. En azul se hace referencia a la irradiación fuera de la atmósfera, en verde en la superficie terrestre y la línea continua negra la irradiancia espectral del cuerpo negro a 5250° . Imagen extraída de [15].

Es de especial interés especificar el rango espectral en el que el Silicio absorbe la radiación solar. Para que se lleve a cabo la absorción del fotón, este debe tener una energía mínima de 1.12 eV . O lo que es lo mismo, debe tener una longitud de onda máxima de $1.1\ \mu\text{m}$. Por tanto, las partes relevantes del espectro que cumplen con esta condición son la región ultravioleta (UV), la visible (VIS) y el espectro de Infrarrojo cercano (NIR) que cubre las longitudes de onda con rango entre los 700 y 1100 nm. Como se puede observar en la Figura 13, la longitud de onda mas pequeña que llega de la irradiancia solar a la superficie terrestre es un poco mayor que 250 nm. Por tanto, el rango de absorción del silicio se encuentra en un intervalo de longitud de onda de entre 250 nm a 1100 nm.

Una vez comentada la parte del espectro más eficaz para la creación de pares electrón-hueco, se pasa a hablar de la representación de la unión P-N bajo radiación solar y se procede a realizar un desarrollo matemático para obtener la potencia máxima de salida. Se puede observar la Figura 14, donde consta de una unión P-N poco profunda formada en la superficie, una franja de contacto óhmico frontal y posterior que cubre toda la superficie posterior y un revestimiento antirreflectante en la superficie frontal. Cabe destacar que es importante el coeficiente de reflexión del material usado; A modo de ejemplo, se puede hablar de las células de silicio que es un material comúnmente usado, el cual tiene un coeficiente de reflexión de 0.31. En otras palabras, el silicio reflejará el 31% de la luz incidente, la cual no está disponible para su conversión en energía eléctrica en la célula solar de silicio.

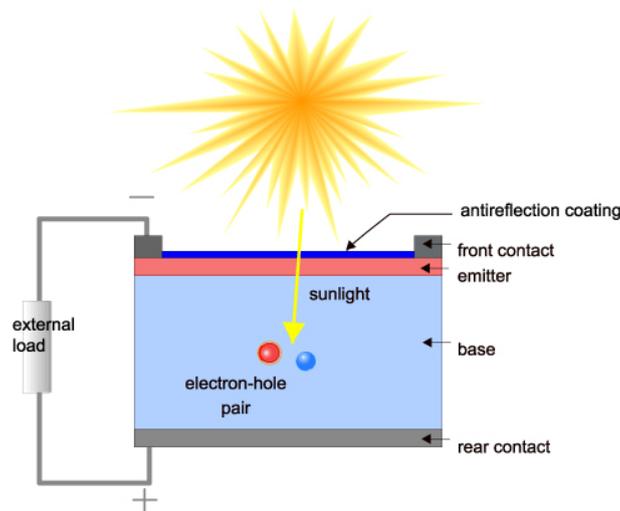


Figure 14: Representación esquemática de una célula solar de unión P-N. Imagen extraída de [16].

Cuando la célula está expuesta al espectro solar, un fotón con energía menor a la energía de la banda prohibida no contribuye al rendimiento de la célula. En cambio, los fotones que tienen energía superior si pueden contribuir. La diferencia de energías entre el valor de la energía del fotón superior a la energía de la banda prohibida se desperdicia en forma de calor. Cuando se crean los pares electrón-hueco en la capa de agotamiento se encuentran separados por el campo eléctrico incorporado. Por lo que la diferencia de potencial está limitada por el voltaje incorporado, que a su vez está determinado por la brecha de energía (La energía que consta en la banda prohibida).

Por otra parte, en un semiconductor solo se absorben fotones con energías superiores a la de la banda prohibida, por lo que la corriente generada por la luz disminuye con el aumento de la brecha energética debido a la limitación del espectro solar.

El circuito ideal que representa la célula solar de la unión P-N se representa en la Figura 16. Previamente es conveniente introducir el diagrama de bandas de energía de una unión P-N bajo radiación solar (Figura 15):

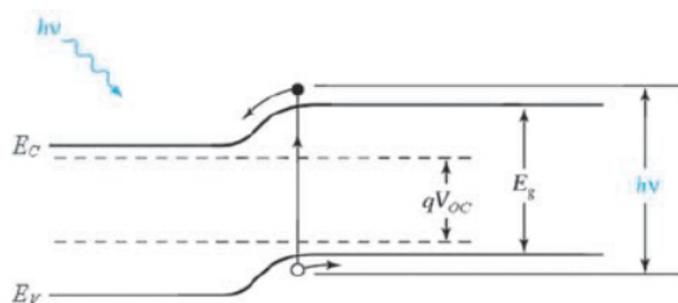


Figure 15: Diagrama de bandas de energía de una unión P-N bajo radiación. Imagen extraída de [17].

Se puede observar que la diferencia de potencial depende de la intensidad de la luz. Por tanto, se puede presentar el circuito equivalente ideal de una célula celular de la siguiente manera:

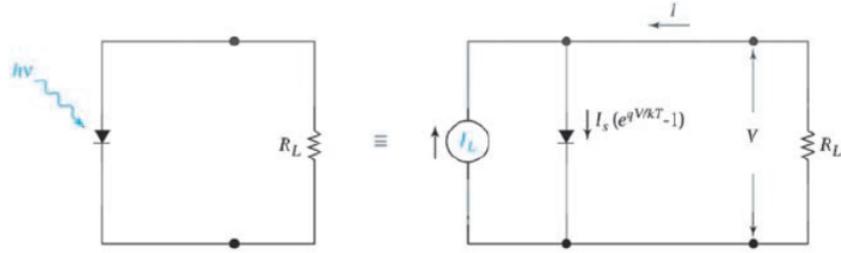


Figure 16: Circuito equivalente idealizado de una célula solar. Imagen extraída de [17].

En la Figura 16 se observa una fuente de corriente constante en paralelo con la unión P-N. La fuente I_L resulta de la excitación del exceso de portadores por la radiación solar, I_S es la corriente de saturación del diodo y R_L es la resistencia de la carga. Las características I-V ideales de un dispositivo de este tipo vienen dadas por:

$$I = I_S(e^{qV/kT} - 1) - I_L \quad (11)$$

$$J_S = \frac{I_S}{A} = qN_C N_V \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right) e^{-E_g/kT} \quad (12)$$

siendo E_g la energía de la banda prohibida y A el área del dispositivo. A modo de ejemplo en la Figura 17, se muestra un gráfico de la Ecuación 11 para $I_L=100$ mA, $I_S=1$ nA, $A=4$ cm² y T=300 k.

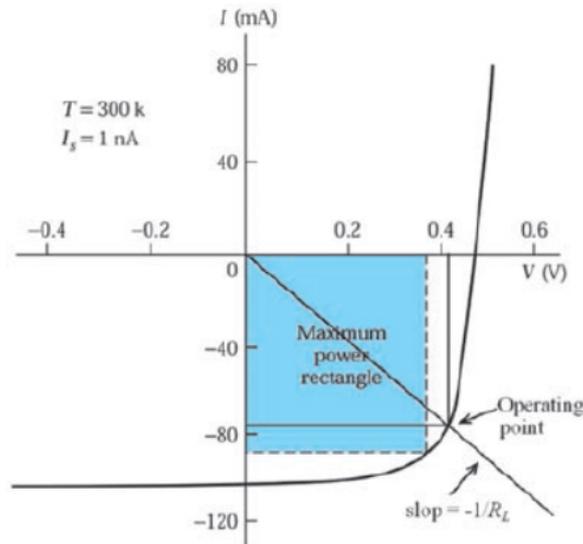


Figure 17: Características I-V de una célula solar bajo iluminación. Imagen extraída de [17].

Al pasar la curva por el cuarto cuadrante se puede extraer potencia del dispositivo. A modo de observar mejor la curva I-V se representa la inversa de la Figura 17 sobre el eje de tensión. De esta manera se observa lo siguiente:

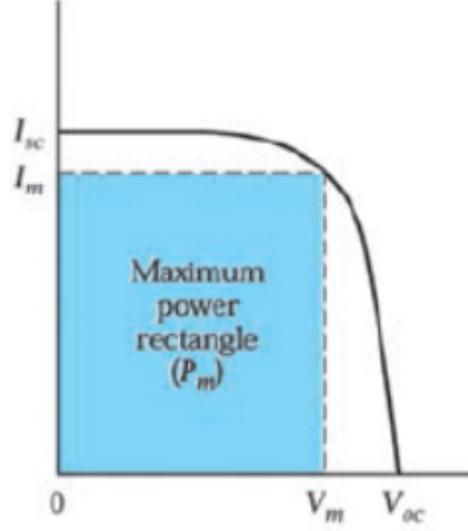


Figure 18: Inversión de la Figura 17. Imagen extraída de [17].

Se conecta una carga R_L a la célula solar como se muestra en la Figura 16. La corriente a través de la R_L es en la dirección opuesta al flujo de corriente convencional. Por tanto:

$$I = -V/R_L \quad (13)$$

Dicha corriente y la corriente en el circuito deben satisfacer simultáneamente las características I-V de la célula solar (Ecuación 11) y la de la carga (Ecuación 13). La línea de carga con pendiente $-1/R_L$ se muestra en la Figura 17.

De la ecuación 11 se obtiene para intensidad nula ($I=0$) la siguiente expresión:

$$V = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_S} + 1\right) \approx \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_S}\right) \quad (14)$$

Por tanto, para una I_L dada, V aumenta logarítmicamente con la corriente de saturación I_S . La potencia de salida viene dada por:

$$P = IV = I_S V (e^{(qV/kT)} - 1) - I_L V \quad (15)$$

La condición de potencia máxima se obtiene cuando $dP/dV = 0$, es decir:

$$V_m = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{1 + (I_L/I_S)}{1 + (qV_m/kT)}\right) \approx V - \frac{kT}{q} \ln\left(1 + \frac{qV_m}{kT}\right) \quad (16)$$

$$I_m = I_S \frac{qV_m}{kT} e^{qV_m/kT} \approx I_L \left(1 - \frac{1}{qV_m/kT}\right) \quad (17)$$

Finalmente, la potencia máxima de salida viene dada por:

$$P_m = I_m V_m \approx I_L \left(V - \frac{kT}{q} \ln\left(1 + \frac{qV_m}{kT}\right) - \frac{kT}{q}\right) \quad (18)$$

3 Estado del arte y antecedentes

This section will examine the advantages of photovoltaic renewable energy and the installation of solar pumping. The initial point of discussion is the topic of renewable energy, given the detrimental impact of global warming on the environment. This is largely attributed to the increase in greenhouse gases, which is a consequence of human activities. This is related to the use of non-renewable energies, such as coal, oil and natural gas, whose reserves are limited and whose burning contributes to global warming, causing environmental, social and economic changes. The potential of renewable energies to replace conventional sources is presented as a viable option, given that they are inexhaustible and have a lower environmental impact. In addition to the environmental benefits, they also offer economic advantages, due to the high maintenance costs of fossil fuels. In this project, photovoltaic renewable energy is employed to pump water from the well to the irrigation fields, thereby replacing conventional systems that rely on fuel-powered electric generators. This has the effect of reducing both the environmental impact and the maintenance costs. In contrast, the type of installation to be employed is specified. In this instance, the system comprises a solar pumping apparatus with an isolated photovoltaic power supply. The apparatus is primarily composed of solar photovoltaic panels, a pump controller/inverter, a submersible water pump, a tank and a support structure for the modules. A more detailed examination of the aforementioned components is provided in the subsequent section, where the various types are discussed in greater detail.

3.1 Beneficios de la energía renovable fotovoltaica

En la actualidad, el medio ambiente se está viendo afectado por el incremento de temperatura que se está produciendo en la Tierra. Este incremento se debe al aumento de gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera, generado, en su gran mayoría, por efecto antropogénico.

Este hecho se relaciona directamente con la utilización de energías no renovables, cuyas reservas son limitadas. La principal fuente de energía en la mayoría de los países proviene de fuentes no renovables, destacándose el carbón, el petróleo y el gas natural como principales combustibles de origen fósil. La quema de estos combustibles contribuye al calentamiento global, desencadenando cambios en el ambiente y por ende, en la realidad social y económica.

Por ello, la utilización de energías renovables es la opción más interesante para reemplazar a las fuentes de energía convencionales. Este tipo de energía tiene un carácter inagotable, pues las fuentes de energía se renuevan constantemente. Además, son energías limpias, es decir, la tecnología de la energía renovable trabaja sobre fuentes con mucho menor impacto ambiental en comparación con las tecnologías energéticas convencionales. Los beneficios presentados son principalmente medioambientales, sin embargo, también existen beneficios económicos puesto que el mantenimiento de las fuentes de combustibles fósiles supone un coste elevado al encontrarse las mismas limitadas.

En este proyecto, la energía renovable fotovoltaica es la utilizada para bombear el agua desde el pozo hasta los campos que se pretenden regar. Gracias a este recurso natural, el bombeo de agua no continuará sustentándose sobre tecnologías convencionales, en donde los sistemas de bombeo de agua son alimentados por un generador eléctrico de combustible. El mantenimiento de este tipo de generador supondría unas consecuencias

negativas sobre el medio ambiente, así como un coste continuo de cara a la conservación de la instalación. Por ello, con el sistema propuesto se sustituye el generador eléctrico de combustible por uno fotovoltaico, reduciendo de manera significativa el impacto medioambiental y económico.

3.2 Instalación bombeo solar

En esta sección, se va a detallar el tipo de instalación y los componentes que forman el sistema de bombeo solar de agua.

Los sistemas de bombeo solar pueden configurarse de maneras distintas en relación a la fuente de alimentación(Ver Figura 19):

- **Bombeo solar con alimentación fotovoltaica aislada:** en este sistema, el equipo se alimenta con energía solar, únicamente. El inconveniente del mismo es que para bombear agua, la radiación solar debe ser suficiente. En caso contrario, se queda inoperativo.
- **Bombeo solar con alimentación fotovoltaica conmutada:** a diferencia del sistema aislado, este equipo se puede alimentar mediante alimentación de red y/o generador diésel o mediante paneles fotovoltaicos, conmutando según las condiciones de operación.
- **Bombeo solar con alimentación fotovoltaica híbrida:** este sistema permite la alimentación simultánea a través de la red o el generador y del panel fotovoltaico. En este caso, se usa la energía del campo fotovoltaico en su totalidad y, en caso de que la radiación solar no sea suficiente, se consumirá la restante de la red o generador.



Figure 19: Representación de los sistemas de bombeo solar posibles dependiendo de la fuente de alimentación, en donde se distinguen tres tipos: aislada, conmutada e híbrida. Imagen extraída de [18].

De los tipos de sistemas presentados anteriormente, el que se va a llevar a cabo en este proyecto es el aislado ya que el uso de red o generador no es viable por el coste que supone en mantenimiento y gasoil, en el caso del generador, y por la inaccesibilidad a la red por la situación presentada en dicha región.

Este tipo de sistema está compuesto principalmente por los paneles solares fotovoltaicos, un controlador/inversor de la bomba, la bomba de agua, el depósito y la estructura de soporte para los módulos.

3.2.1 Paneles solares fotovoltaicos

El panel solar, o módulo fotovoltaico, conecta varias células en serie, cuando se pretende aumentar la corriente, y/o en paralelo, para incrementar el voltaje.

Los tipos de paneles solares (Ver Figura 20) vienen dados por la tecnología de fabricación de las células, y son principalmente:

- Silicio monocristalino
- Silicio policristalino

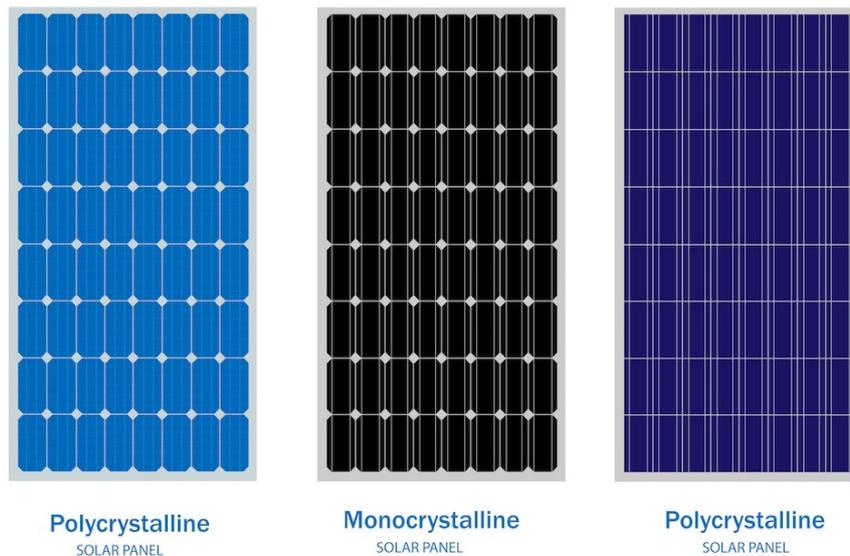


Figure 20: Representación gráfica de los tipos de paneles solar según la tecnología de fabricación de las células. Se observa el panel solar monocristalino es el más oscuro mientras que los paneles de policristalino son mas claros, distinguiéndose una tonalidad más oscuras entre ellos. Imagen extraída de [19].

En la Tabla 1 se muestra una comparación entre las características y en la Figura se presenta el aspecto de las mismas.

Tipo de panel	Monocristalino	Policristalino
Índice de rendimiento	13 al 17%	11 al 15%
Ventajas	-Mejor índice de rendimiento en condiciones de poca luz	-Más barato -Huella de carbono reducida
Desventajas	-Mayor tiempo de vida -Más caro -Rendimiento bajo a altas temperaturas	-Baja sensibilidad a las fluctuaciones de la temperatura -Peor rendimiento en términos generales -Tiempo de vida un poco más corto

Table 1: Tabla que muestra la comparativa entre las características que presentan las células monocristalinas y policristalinas [20].

Como se puede observar, ambos tipos de paneles son muy similares y se pueden instalar indistintamente. El monocristalino es ligeramente más caro que el policristalino, pero tiene un rendimiento mayor. Para suministrar la misma potencia, se necesita una mayor superficie de células policristalinas que monocristalinas, por lo que la diferencia de coste ya no es relevante. Por tanto, se tiene una situación casi equivalente en cuanto a rendimiento-precio siendo la disponibilidad del producto en el mercado el criterio más importante.

3.2.2 Controlador de la bomba o inversor solar de la bomba

En ambos instrumentos, se presentan principalmente las siguientes funciones [20]:

- Botón manual donde se puede encender y apagar la bomba.
- Protege de niveles de agua bajos, deteniendo automáticamente la bomba cuando no hay agua por encima de ella
- Visualiza la potencia de funcionamiento de la bomba, verificando si la bomba funciona correctamente o tiene poca carga, principalmente por la mañana y por la noche cuando hay poca luz solar.

Estas funciones son las principales, sin embargo hay otras funciones existentes, dependiendo del modelo.

A continuación, se va a detallar cuando se debe usar un controlador de la bomba o un inversor solar para bombas. Ambos instrumentos tienen la misma función, accionar la bomba. Sin embargo, el tipo de bombeo que se generan en ambos instrumentos son distintos:

- Bombas pequeñas ($< 2 \text{ kW} / 3 \text{ CV}$) funcionan con corriente continua (CC) y se controlan mediante la variación de tensión
- Las bombas medianas y pesadas ($> 4 \text{ kW} / 5.5 \text{ CV}$) funcionan con corriente alterna (CA) y se controlan mediante la variación de frecuencia. Esto solo es posible, si la CC de los paneles se alterna o invierte, siendo este el origen de 'inversor solar de bomba'.
- Para potencias intermedias (entre 2kW y 4kW) las bombas dependerán del fabricante, pues pueden funcionar con CC, CA o que admitan ambos tipos de voltaje.

En el caso de los controladores de la bomba (ver Figura 21), controlan la velocidad de rotación de la bomba a través de la tensión de alimentación, es decir, cuanto mayor sea la tensión, mayor será la velocidad de rotación de la bomba.



Figure 21: Ejemplo de distintos controladores que se diferencian por los fabricantes. Imagen extraída de [20].

En el caso de inversores solares de las bombas (ver Figura 22), controlan la velocidad de rotación mediante la tensión alterna. Por tanto, el inversor producirá una frecuencia variable en función de la tensión continua que reciba de los paneles. Generalmente, los inversores solares arrancan la bomba a una frecuencia mínima de 25 Hz. Esta frecuencia aumenta conforme aumenta la tensión continua de los paneles, hasta alcanzar una frecuencia máxima de 50 o 60 Hz en las horas puntas. [20]



Figure 22: Ejemplos de distintos inversores que se diferencian por los nombres de los fabricantes. Imagen extraída de [20].

3.2.3 Bomba de agua

El sistema de bombeo que se va a instalar dispone de una bomba sumergible, cuyas componentes principales se muestran en la Figura 23.

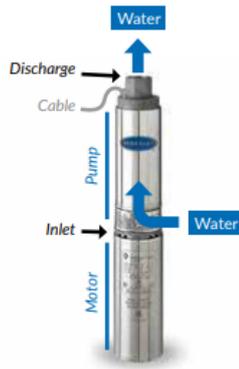


Figure 23: Representación de una bomba sumergible estándar en donde se diferencian sus principales componentes: motor, entrada (inlet), la bomba (pump), salida (outlet) y cable. Imagen extraída de [20].



Figure 24: Representación gráfica de un sensor de nivel de agua bajo. En el se observa el modelo típica y su usual ubicación en las tuberías. Imagen extraída de [20].

Entre las componentes principales de la bomba se distinguen:

- **El motor (CA, CC o multitensión):** se sitúa en la parte inferior y necesariamente se encuentra sumergido para su refrigeración.
- **El orificio de aspiración (inlet):** está equipado con un grueso colador con el fin de filtrar las impurezas grandes del agua.
- **La bomba:** se situada en la parte superior.
- **Orificio de descarga o salida (outlet):** suele estar equipada con una válvula de retención. Contiene una rosca para enroscar el tubo de descarga.
- **Cable:** tramo corto, entre 0.5 y 1 m, de cableado sellado en el motor con el fin de que el instalador no tenga que abrir el motor para conectar el cable de alimentación y romper su estanqueidad.

De cara a la protección de la bomba y del sistema de bombeo, se recomienda instalar un sensor de nivel de agua bajo. Este sensor protege la bomba de la falta de agua que se produce cuando el caudal de bombeo es superior a la capacidad del pozo, como puede ocurrir en épocas de sequía. El sensor se suele colocar entre 10 y 30 cm por encima de la bomba y se trata de una sonda independiente que se fija en la tubería de descarga (Ver Figura 24). Además, todas las piezas expuestas al agua deben ser de acero inoxidable.

3.2.4 Sistemas de seguimiento solar (Manual o automáticos)

Los paneles solares fotovoltaicos funcionan de manera más eficiente cuando estos se encuentran orientados perpendicularmente a los rayos del sol. Si los paneles se encuentran en una posición fija, solo se captará luz solar de manera perpendicular durante un corto tiempo, tanto en el día como a lo largo del año. Sin embargo, se puede maximizar el rendimiento del panel instalando un soporte de panel con capacidad para cambiar su orientación y/o inclinación en función de la estación y la hora del día. Estos sistemas pueden ser manuales o automáticos. Sin embargo, ambos casos suponen un coste elevado para el proyecto y, por tanto, no son una opción viable.

Por consiguiente, el soporte de los paneles en este proyecto va a ser fijo, con una cierta altura del suelo, ya que no hay un tratamiento previo del terreno, y con cierta inclinación (Ver Figura 25), que se determinará en la parte técnica del dimensionado.



Figure 25: Soporte de paneles fotovoltaicos fijos, con una determinada altura sobre el suelo y con cierta inclinación. Imagen extraída de [21].

4 Memoria técnica

This section calculates and designs the solar pumping system using the baseline data provided by the project. It calculates the flow rate, the peak solar hours HSP at Sampathé, the energy and power required for the pump to select the instrumentation required for the project. It selects the pump, the inverter and provides the number of photovoltaic panels required, the lengths of piping and electrical wiring, and selects the piping material.

En este punto se trata de definir el procedimiento que se sigue para dimensionar el sistema completo. En cada una de las etapas del diseño y cálculo se aplicarán los criterios expuestos al caso práctico que se han definido con anterioridad.

4.1 Datos de partida

- **Localización Geográfica:** la instalación se va a realizar en Sampathé, pueblo situado a 6 kilómetros de Kolda, en el sur de Senegal. La latitud/longitud del lugar es : 13.129, -14.418.
- **Necesidades hídricas:** el agua esta destinada al uso para actividades de horticultura. Las necesidades diarias se estiman en 60 metros cúbicos (m^3).
- **Descripción del sistema hidráulico:** El agua a bombear se ubica en un pozo de 8 metros de profundidad y que es transportado a 2 tanques principales. Uno de ellos

es usado para la ganadería, el cuál tiene una altura de 1 m (metro) y un volumen de 3 m³ (metro cúbico), mientras que el otro estanque alimenta tres cuencas de 3 m³ cada uno y de 1 m de altura, que es utilizado para la horticultura.

- **Ubicación del sistema de bombeo:** La distancia que existe entre el estanque del ganado y el pozo es de 6 m, mientras que el estanque de la huerta se encuentra a 35 m del pozo.

4.2 Cálculo y diseño del sistema de bombeo solar

4.2.1 Cálculo del caudal de impulsión

El objetivo de este apartado es llegar a conocer el requerimiento mínimo en m³/hora para cumplir con las necesidades de la demanda de agua bombeada y poder de esta manera determinar el tipo de bomba que se ajusta a las necesidades presentadas.

Para ello, primeramente se debe obtener información acerca de la irradiación solar en la ubicación elegida. Más concretamente, de las Horas Solar Pico (HSP).

Se puede definir como HSP a la cantidad de energía que recibe un metro cuadrado de superficie, es decir, equivale a 1 Kwh/m² [22]. En otras palabras, HSP es una cantidad de tiempo teórico que equivale a las horas en las que el sol produce la máxima irradiación sobre una superficie concreta. Sin embargo, es importante aclarar que la energía definida por la HSP no es la misma dependiendo de la localización y de la época del año, ya que la diferente inclinación de la trayectoria solar hace que el ángulo de incidencia sobre una superficie no sea igual de óptimo dependiendo de las circunstancias (Ver Figura 26).

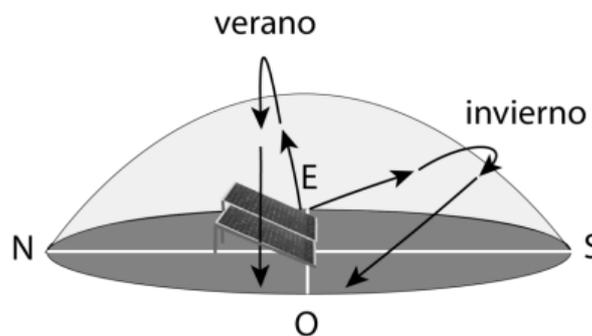


Figure 26: Se representa la trayectoria que sigue el Sol en verano e invierno, donde se puede distinguir que en verano sigue una trayectoria mas perpendicular que en invierno con respecto de la superficie representada. Imagen extraída de [23].

Para la obtención de la HSP se ha hecho uso del programa PVGIS, en donde especificando la localización, inclinación de los módulos y tipo de placa solar, proporciona la HPS.

En este caso, para paneles de Silicio cristalino instalados con una inclinación de 35° y con unas pérdidas estimadas del sistema del 14% y en la localización facilitada anteriormente de la latitud/longitud, los resultados proporcionados por la página PVGIS vienen representados en las Figuras 27 y 28.

PVGIS-5 valores estimados de la producción eléctrica solar:

Datos proporcionados:		Resultados de la simulación	
Latitud/Longitud:	13.129,-14.418	Ángulo de inclinación:	35 °
Horizonte:	Calculado	Ángulo de azimut:	0 °
Base de datos:	PVGIS-SARAH2	Producción anual FV:	1607.61 kWh
Tecnología FV:	Silicio cristalino	Irradiación anual:	2202.63 kWh/m ²
FV instalado:	1 kWp	Variación interanual:	26.61 kWh
Pérdidas sistema:	14 %	Cambios en la producción debido a:	
		Ángulo de incidencia:	-2.88 %
		Efectos espectrales:	0.28 %
		Temperatura y baja irradiancia:	-12.86 %
		Pérdidas totales:	-27.01 %

Figure 27: Figura en donde se visualizan los datos proporcionados y los resultados de la simulación.

Energía FV y radiación solar mensual

Mes	E_m	H(i)_m	SD_m
Enero	162.0	217.9	8.7
Febrero	149.6	205.1	6.4
Marzo	155.1	217.2	3.1
Abril	134.2	190.7	2.9
Mayo	118.1	166.7	4.3
Junio	103.0	143.1	3.7
Julio	103.0	139.5	2.8
Agosto	105.9	141.7	4.2
Septiembre	118.3	158.9	4.7
Octubre	143.8	195.5	4.3
Noviembre	151.3	206.7	6.8
Diciembre	163.3	219.8	9.1

E_m: Producción eléctrica media mensual del sistema definido [kWh].
H(i)_m: Suma media mensual de la irradiación global recibida por metro cuadrado por los módulos del sistema dado [kWh/m²].
SD_m: Desviación estándar de la producción eléctrica mensual debida a la variación interanual [kWh].

Figure 28: Tabla que contiene la energía fotovoltaica y radiación solar mensual con un ángulo de inclinación de 35°. En esta tabla se representan los meses del año, con la producción eléctrica mensual, la suma media mensual de la irradiación global recibida y la desviación estándar de la producción eléctrica mensual.

Para la obtención de la HSP, el dato relevante de los proporcionados por la simulación es el de irradiancia anual. A partir de él, se obtiene la irradiancia diaria que sería:

$$I_d = I_a/365 = \frac{2202,63[kW * h/m^2]}{365[dias]} = 6,035[\frac{kW * h}{m^2}] \quad (19)$$

donde I_d es la irradiancia diaria e I_a la irradiancia anual. Luego, al haber aplicado una potencia pico de 1 Kw y aplicando la definición de HSP, en donde se define como cantidad de energía solar que recibe 1 m² de superficie, se tiene que:

$$\mathbf{HSP = 6,035 h.}$$

Una vez se ha obtenido el valor HSP, se puede obtener el caudal mínimo diario requerido para la instalación. Para ello se divide el volumen diario necesario entre HSP, es decir:

$$Q[m^3] = \frac{60[m^3/dia]}{6,035} = 9,942[m^3/h] \approx 10[m^3/h] \quad (20)$$

Sin embargo, se va a considerar una necesidad diaria de 100 m³ para garantizar que el sistema pueda cubrir las necesidades reales de agua, incluyendo posibles pérdidas por fugas, evaporación o escurrimiento, así como posibles variaciones en la demanda y el crecimiento futuro.

Por tanto, haciendo uso de la Ecuación 20, se obtiene que el caudal necesario es:

$$Q' = 16.57 [m^3/h]$$

4.2.2 Cálculo de energía y potencia necesaria para la bomba

En este apartado, se realiza el cálculo asociado a la cantidad de energía eléctrica que hay que suministrar diariamente a la bomba para poder elevar la cantidad de agua a la altura determinada fijada por la necesidad del proyecto. Para ello, es necesario tener en cuenta el rendimiento de la bomba, que varía en función del tipo. En este caso, al desconocer el rendimiento de la bomba se utilizarán los valores de referencia facilitados por la Tabla 2:

Tipo de bomba	Volumetrica	Centrifugal (< 2 HP)	Centrifugal (> 2 HP)
Índice de rendimiento	0.6	0.4	0.6

Table 2: Tabla en donde se exponen los valores de referencia acerca de los índices de rendimiento dependiendo del tipo de bomba [20].

Para el caso que se plantea, el valor estándar asociado al índice de rendimiento es de 0.6 .

La obtención de la energía eléctrica necesaria por día, se obtiene de la siguiente expresión [20]:

$$E = \frac{\text{Necesidad diaria}[m^3/h] * H * 2.725}{\text{Índice de rendimiento}} \quad (21)$$

siendo H la altura manométrica, que en este caso, es la altura del pozo.

Es decir, H = 8 m. Por tanto, sustituyendo los valores de la Ecuación 21 se obtiene:

$$E = \frac{100[m^3/dia] * 8 * 2.725}{0.6} = 3.633[kW/dia] * 3.6 * 10^6 [J/kW] = 13.079 * 10^6 [J/dia] \quad (22)$$

Una vez es hallada la energía eléctrica necesaria por día, se pasa a calcular la potencia de la bomba. En general, el caudal de agua nominal instalada equivale al 20 % de la necesidad energética diaria. Por tanto, la potencia de la bomba viene dada por:

$$P = \frac{1}{5} * E = \frac{3.633[kW/dia]}{5} = 726.27[W/dia] \quad (23)$$

4.2.3 Selección de la bomba e inversor

Para la selección de la bomba se ha hecho uso de la página web de Grundfos que ofrece un servicio de dimensionado inteligente, en donde introduciendo el tipo de bomba, el caudal y la altura, sugiere las bombas que mejor se adaptan a las necesidades requeridas. (Ver Figura 29)

Selecciona tus parámetros

Seleccione aplicación.	Aplicaciones industriales
Seleccione el tipo de instalación ?	<input checked="" type="radio"/> Máquina herramienta <input type="radio"/> Lavado/limpieza
Seleccione el tipo de hidráulica	<input type="radio"/> Sencilla <input checked="" type="radio"/> Paralela
Número total de bombas	1 <input type="button" value="v"/>
Seleccione la aplicación	<input checked="" type="radio"/> Sumergible <input type="radio"/> Instalación en seco
Caudal de dimensionamiento *	16.57 <input type="button" value="m³/h"/> <input type="button" value="v"/>
Altura total *	8 <input type="button" value="m"/> <input type="button" value="v"/>
Criterio de evaluación	Índice preferencia <input type="button" value="v"/>

Figure 29: Imagen que representa la página inicial de Grundfos al iniciar la búsqueda para seleccionar la bomba. Imagen extraída de [24].

Al introducir el caudal calculado, Q' , y la altura manométrica, que en este caso corresponde a la altura estática del pozo que son 8 metros, la página sugiere el modelo de bomba MTRE 15-2/1 representado en la Figura 30.



Figure 30: Imagen de la bomba MTRE 15-2/1, extraída de [24].

Cuyas características se pueden observar en la Figura 31

Tipo	MTRE 15-2/1	Perfil carga ⓘ	
Cantidad	1		
Motor	1.1 kW	1	
Caud	16.57 m ³ /h	Caud (%)	100
Alt.	8.001 m	Caud (m ³ /h)	16.57
Entrad presión min	-0.75 bar (40 °C, contra la atmosfera)	Alt. (%)	100
Pot. P1	0.637 kW	Alt. (m)	8.001
Pot. P2 requerida en el punto de trabajo	0.549 kW	P1 (kW)	0.637
BombaEta	65.8 %	Total Eta (%)	56.7
Motor Eta	86.1 %	Time (h/a)	1113
Bomb+motor Eta	56.7 % =Bomba Eta *motor Eta	Consumo energia (kWh/Año)	710
Total Eta	56.7 % =Eta relativa punto de trabajo	Cantidad	1
Consumo energia	710 kWh/Año		
Emisión CO2	188 kg/Año		
Prec.	4,373,00		
Cte ciclo vital	5526 EUR /5Años		

Figure 31: Representación del resultado del dimensionamiento.

Este modelo de bomba, tiene tensión nominal: 1 x 200-240 V. Este dato indica que la bomba trabaja en corriente alterna (CA) y, por consiguiente, se va a necesitar seleccionar un inversor que logre convertir la corriente continua (CC), generada por los paneles, en corriente alterna (CA). Por otro lado, la tensión nominal indica que la bomba debe ser alimentada con un voltaje entre 200-240 voltios (V).

Para la selección del inversor se va a tener en cuenta la potencia diaria necesaria calculada anteriormente.

El inversor Sunny Boy 1.5 es una buena elección, pues cumple con los requerimientos establecidos y además, debido a su diseño innovador, permite una instalación sencilla. (Ver Figura 32).



Figure 32: Inversor Sunny Boy 1.5 . Imagen extraída de [25].

Por otro lado, como se observa en la Figura 33, el inversor tiene un rango de voltaje de red de 230-400 V por lo que es adecuada para alimentar la bomba seleccionada que requiere de una tensión nominal de 200-240 V.

1 x SB 2.5-1VL-40		 SB 2.5-1VL-40
Peak power:	2,88 kWp	
Total number of PV modules:	12	
Number of inverters:	1	
Max. DC power (cos φ = 1):	2,65 kW	
Max. AC active power (cos φ = 1):	2,50 kW	
Grid voltage:	230V (230V / 400V)	
Nominal power ratio:	92 % 	
Displacement power factor cos φ:	1	
Technical data		
Input A: PV array 1		
12 x SMA SMA Demo Poly 240, Azimuth angle: 0 °, Tilt angle: 30 °, Mounting type: Roof		
	Input A:	
Number of strings:	1	
PV modules per string:	12	
Peak power (input):	2,88 kWp	
Typical PV voltage:	 330 V	
Min. PV voltage:	303 V	
Min. DC voltage (Grid voltage 230 V):	50 V	
Max. PV voltage:	 495 V	
Max. DC voltage:	600 V	
Max. current of PV array:	 8,1 A	
Max. DC current:	10 A	

Figure 33: Ficha Técnica del inversor Sunny Boy 1.5. En ella se observa la capacidad máxima de entrada de voltaje y corriente, la potencia máxima y los valores típicos de voltaje, corriente y potencia. Imagen extraída de [25].

4.2.4 Número de paneles fotovoltaicos

A continuación se calcula el número de paneles fotovoltaicos que son necesarios instalar para el sistema. La producción de los paneles dependen de la cantidad de energía recibida a nivel de suelo, y del modo de instalación ya que existe una pérdida de eficacia debida al mantenimiento y el envejecimiento de los paneles con el paso del tiempo. Los rendimientos fotovoltaicos que se observan regularmente viene dada por la Tabla 3:

Índice de rendimiento	Instalación fija de paneles solares
En ambiente polvoriento/Falta de mantenimiento	0.5
Con un buen nivel de mantenimiento	0.6

Table 3: Tabla donde se recogen los índices de rendimiento de los paneles según el tipo de instalación y de las condiciones de funcionamiento.

Para obtener el número de paneles fotovoltaicos, se va a obtener la potencia del panel solar necesaria y se va a dividir entre la potencia de los paneles que se quieran instalar:

$$\text{Número de paneles solares} = \frac{\text{Potencia necesaria panel solar}}{\text{Potencia del panel a instalar}} \quad (24)$$

La potencia requerida de los paneles necesarios viene dada por la siguiente expresión:

$$P_p = \frac{E}{I_d * \text{Índice de rendimiento del panel}} \quad (25)$$

Aplicando la expresión 25 en el caso práctico, donde se considera un índice de rendimiento del panel de 0.6, se obtiene que $P_p = 1345.56$ [Wp].

Ya calculado la potencia necesaria de los paneles, se obtiene el número de paneles fotovoltaicos necesarios para cubrir las necesidades. Se va a considerar que los paneles son de 350 [W]. Sustituyéndolo en la ecuación 24 se obtiene un valor de 3.81, es decir, son necesarios 4 paneles solares de 350 [W].

Se van a elegir los paneles fotovoltaicos de 350 W Policristalino 24V de WccSolar. La ficha técnica viene facilitada en la Figura 34.

Ficha Técnica

- Potencia del Panel Solar: 350W
- Tipo de Célula del Panel Solar: Policristalino
- Rigidez del Panel Solar: Rígido
- Dimensiones del Panel Solar: Largo x Ancho x Grueso (mm) 1958 x 990 x 30 mm
- Tensión Máxima Potencia: 37.6V
- Corriente en Cortocircuito ISC: 9.30A
- Amperios Máximos de Salida IMP: 9.79A
- Tensión en Circuito Abierto: 46.11V
- Peso del Panel Solar: 21 Kg
- Marco del Panel Solar: Blanco y Gris
- Garantía del Panel Solar: 20 años

Figure 34: Ficha técnica del panel fotovoltaico de 350 W de WccSolar. Imagen extraída de [26].

A continuación, se va a seleccionar la configuración de los paneles. Para saber si esta va a ser en serie o en paralelo se deben tener en cuenta el voltaje y la corriente necesaria para el sistema y el rango de entrada del inversor.

Para el panel fotovoltaico, según se observa en la ficha técnica facilitada por la Figura 34, se tiene que el voltaje a potencia máxima es de 37.6 V y la corriente a potencia máxima es de 9.3 A.

Por un lado, en las conexiones en serie se conectan las placas solares directamente entre sí, conectando el polo positivo de un panel con el negativo del siguiente panel. En este tipo de conexión, se mantiene la intensidad y se suma el voltaje, es decir:

$$V_{total} = 4 * 37.6[V] = 150.4[V] \quad (26)$$

$$I_{total} = 9.3[A] \quad (27)$$

Mientras que en las conexiones en paralelo se conectan por un lado todos los polos positivos de las placas de la instalación solar, y por el otro, conectando todos los polos negativos. De esta manera, se mantiene el voltaje de las placas solares mientras que se suma la intensidad:

$$V_{total} = 37.6[V] \quad (28)$$

$$I_{total} = 4 * 9.3[A] = 37.2[A] \quad (29)$$

Comparando los resultados obtenidos para las distintas configuraciones, se observa que la configuración en serie se encuentra dentro del rango de voltaje y corriente del inversor, por lo que esta es la configuración que se debe instalar para el caso estudiado.

En la Figura 35 se representa el esquema eléctrico del dimensionado:

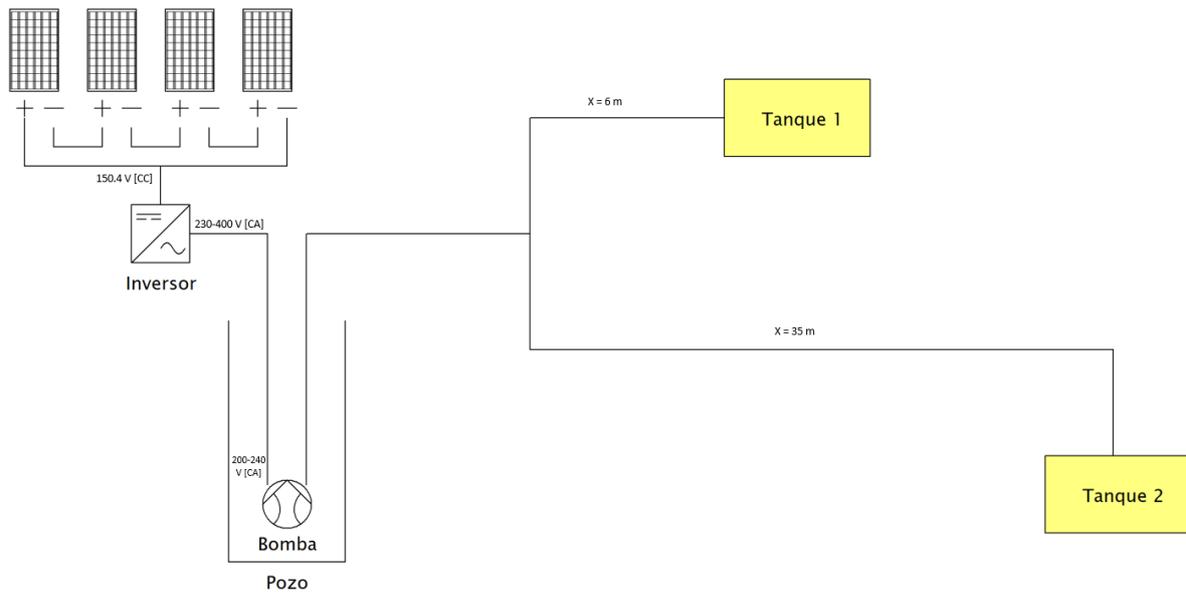


Figure 35: Esquema eléctrico del dimensionado descrito. Se observa los paneles conectados en serie que se conectan a inversor, en donde se transforma la corriente continua en corriente alterna y luego este se conecta a la bomba sumergible ubicada en el pozo. Luego, se conecta con los distintos tanques.

4.2.5 Diseño hidráulicos. Generalidades.

Los datos necesarios sobre el diseño hidráulico ha sido facilitado por el proyecto. Observando los datos previamente facilitados en la sección 'Datos de partida', se conoce la distancia que separa el pozo de los distintos estanques. Con la introducción de la Tabla 36 se puede obtener el diámetro nominal de la tubería, que es el diámetro interior de un tubo. Para ello, se debe conocer el caudal volumétrico y asegurar que la velocidad final del fluido se encuentre dentro del rango aceptable, ya que el diámetro de la tubería afecta a la velocidad del fluido y a las pérdidas de carga continuas.

		Condiciones generales (impulsión)	
dN _{prop.} "	dN _{prop.} mm	qh m ³ /h	u _{max} m/s
	10	0,23	0,8
	15	0,5	0,8
¾	20	1	0,8
1	25	1,5	0,8
1 ¼	32	2,5	0,8
1 ½	40	3,8	0,8
2	50	6	0,8
2 ½	65	16	1,2
3	80	30	1,5
4	100	50	1,7
5	125	80	1,9
6	150	125	2,1
8	200	300	2,5
10	250	500	2,7
12	300	800	2,9
14	350	1000	3
16	400	1.400	3,1
20	500	2.500	3,4
24	600	4.000	3,6

Figure 36: Figura donde se observa una tabla en donde se presentan el diámetro de tuberías de agua y pérdida de carga. En la tabla se propone en función del caudal, un diámetro nominal en tuberías de impulsión en donde se presenta la velocidad máxima para cada diámetro. Para este caso práctico, se marca en azul el los valores según los datos obtenidos.

El caudal calculado tiene un valor de 16 m³/h, que le corresponde un diámetro nominal recomendado de 65 mm y una velocidad máxima de 1.2 m/s. Conocido estos datos, se calcula la velocidad mediante la siguiente ecuación:

$$u = \frac{4 * q}{\pi * D_{int}^2} \quad (30)$$

donde q es el caudal volumétrico [m³/s], u la velocidad [m/s] y D_{int} es el diámetro interno [m].

Por tanto, sustituyendo los valores se obtiene:

$$u = \frac{4 * 10}{\pi * (0.065)^2 * 3600} = 0.837[m/s] < u_{max} = 1.2[m/s] \quad (31)$$

En definitiva, se comprueba que la velocidad obtenida es inferior a la velocidad máxima accesible para un diámetro interno de 65 mm.

Una vez definido el diámetro nominal de la tubería, se pasa a seleccionar el material del mismo.

Las tuberías de agua pueden ser metálicas, de Policloruro de vinilo (PVC) o de polietileno (PE). Debido a la flexibilidad y su resistencia a los impactos, los tubos de PE se utilizan en sistemas solares de bombeo de agua como tubería dentro de un pozo para la bomba de perforación. Los tubos metálicos no son recomendables, pues es el tipo más común son los tubos de hierro galvanizado que terminan oxidándose. Además, estos tubos contienen una superficie interior ligeramente rugosa, lo que conlleva que presenten mayores pérdidas por fricción que las tuberías de plástico.

Por otro lado, existen tuberías de PVC con paredes de mayor grosor para aplicaciones de bombeo de agua. Sin embargo, si estas se encuentran expuestas al sol, deben ser resistentes a los rayos ultravioletas o se deben pintar con una pintura de bloqueo de rayos UV adecuada para el material de la tubería.

Para el caso propuesto, el material seleccionado para la tubería es el PVC.

En cuanto a la longitud de las tuberías y del cableado eléctrico, se estiman las longitudes siguientes:

- Longitud de cableado entre paneles e inversor de unos 5 metros.
- Longitud de cableado entre bomba e inversor de 13 metros.
- Longitud de tubería para proteger el cableado entre inversor y bomba de 5 metros.
- Longitud de tubería de 5 metros entre paneles de control.
- Longitud de tubería de unión que une la bomba con las 2 principales minibalsas es de 10 metros

Por otro lado, para hallar las pérdidas de carga generadas por las tuberías se obtiene a través del diagrama representado en la Figura 37:

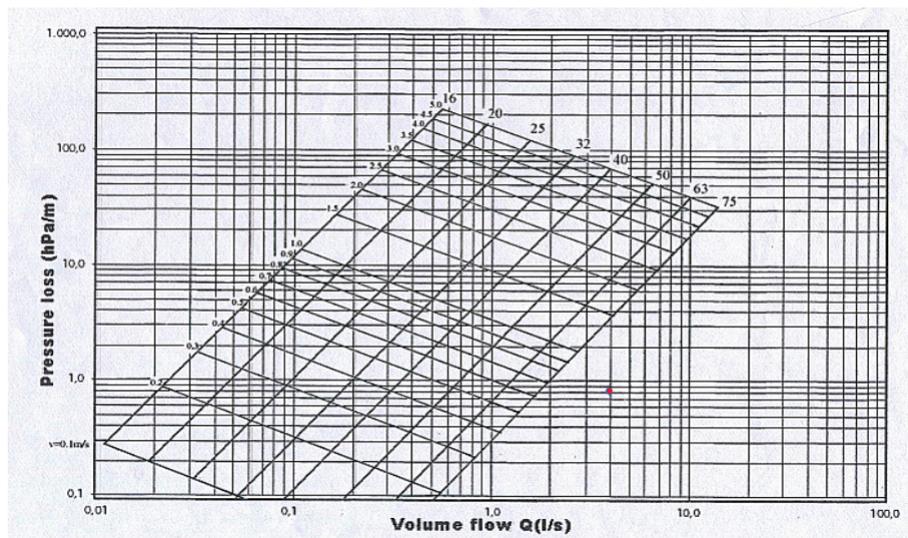


Figure 37: Se representa la tabla de pérdida de carga para el agua, según el caudal en litros por segundo y su velocidad. En esta imagen se presenta un punto de color rojo que indica la unión de los valores de velocidad y caudal de este caso práctico.

Para obtener las pérdidas, se ha pasado el caudal a litros por segundo, de manera que:

$$Q(L/S) = 16.57[m^3/h] * \frac{1000[L/m^3]}{3600[s/h]} = 4.6[L/s] \quad (32)$$

Teniendo en cuenta el valor del caudal y que la velocidad obtenida es de 0.837 [m/s], se obtiene que habrá un total de pérdida de 8 [hPa/m]. Es decir, de 0.008 [bar/m]. Considerando una presión de 1 [bar], estas pérdidas son aceptables en la bomba.

5 Bibliografía

References

- [1] [HTTPS://WWW.ALEGRIASINFRONTERAS.ORG/LA-ONG/ONGD/](https://www.alegriasinfronteras.org/la-ong/ongd/)
- [2] [HTTPS://ES.WEATHERSPARK.COM/Y/31733/CLIMA-PROMEDIO-EN-KOLDA-SENEGAL](https://es.weatherspark.com/y/31733/clima-promedio-en-kolda-senegal)
- [3] [HTTPS://WEATHERANDCLIMATE.COM/SENEGAL/KOLDAT3](https://weatherandclimate.com/senegal/koldat3)
- [4] [HTTPS://SENEGAL2019.ORG/GOUVERNANCE-LOCALE/KOLDA/](https://senegal2019.org/gouvernance-locale/kolda/)
- [5] EGGLESTON, DENNIS L. BASIC ELECTRONICS FOR SCIENTISTS AND ENGINEERS. CAMBRIDGE: CAMBRIDGE UP, 2011.
- [6] [HTTPS://EARTHBONDHON.COM/SOLID-STATE-BAND-THEORY/](https://earthbondhon.com/solid-state-band-theory/)
- [7] BHARDWAJ, YAGYA. (2017). TOPOLOGICAL INSULATOR: A NEXT GENERATION. 10.13140/RG.2.2.30679.57766.
- [8] (PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR MATERIALS) JENNY NELSON - THE PHYSICS OF SOLAR CELLS PHOTONS IN ELECTRONS OUT-IMPERIAL COLLEGE PRESS (2003)
- [9] [HTTPS://WWW.PHYSICS-AND-RADIO-ELECTRONICS.COM/ELECTRONIC-DEVICES-AND-CIRCUITS/PASSIVE-COMPONENTS/RESISTORS/PHOTORESISTOR.HTML](https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/passive-components/resistors/photoresistor.html)
- [10] [HTTPS://WWW.ELECTRONICEDU.COM/2020/05/EXTRINSIC-SEMICONDUCTOR.HTML](https://www.electronicedu.com/2020/05/extrinsic-semiconductor.html)
- [11] [HTTPS://FACTS.NET/SCIENCE/CHEMISTRY/10-ASTONISHING-FACTS-ABOUT-P-N-JUNCTION/](https://facts.net/science/chemistry/10-astonishing-facts-about-p-n-junction/)
- [12] RAMOS GUARDARRAMA, JOSNIER & PÉREZ MARTÍNEZ, MAYKOP. (2022). MODELOS MATEMÁTICOS DE LOS DIODOS SEMICONDUCTORES.
- [13] [HTTPS://AGELECTRONICA.BLOG/2019/05/28/ELECTRONICA-BASICA-DIODOS/](https://agelectronica.blog/2019/05/28/electronica-basica-diodos/)
- [14] [HTTPS://ISQCH.WORDPRESS.COM/2015/06/28/LA-QUIMICA-Y-LAS-OTRAS-LUCES-I/](https://isqch.wordpress.com/2015/06/28/la-quimica-y-las-otras-luces-i/)
- [15] [HTTPS://CYT-AR.COM.AR/CYT-AR/INDEX.PHP/ARCHIVO:IRRADIANCIA_SOLAR.JPG](https://cyt-ar.com.ar/cyt-ar/index.php/archivo:irradiancia_solar.jpg)
- [16] TWO-DIODE MODEL PERFORMANCE ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC PANELS - SCIENTIFIC FIGURE ON RESEARCHGATE. AVAILABLE FROM: [HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/FIGURE/CROSS-SECTION-OF-A-SOLAR-CELL-30_FIG1_274736635](https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-of-a-solar-cell-30_fig1_274736635)
- [17] SZE, S. M. & LEE, M. K. SEMICONDUCTOR DEVICES: PHYSICS AND TECHNOLOGY. 2012, 3RD EDITION.

- [18] [HTTPS://WWW.EDITORES-SRL.COM.AR/EMPRESA/CIRLATINA/20201207_APLICACION_SOLAR_EN_TAREAS_DE_BOMBEO](https://www.editores-srl.com.ar/empresa/cirlatina/20201207_aplicacion_solar_en_tareas_de_bombeo)
- [19] [HTTPS://ECOINVENTOS.COM/DIFERENCIA-PANELES-SOLARES-MONOCRISTALINOS-POLICRISTALINOS/](https://ecoinventos.com/diferencia-paneles-solares-monocristalinos-policristalinos/)
- [20] KUMAR, L. A., LAKSHMIPRASAD, C. N., RAMARAJ, G., & SIVASURYA, G. (2022). DESIGN, SIMULATION OF DIFFERENT CONFIGURATIONS AND LIFE-CYCLE COST ANALYSIS OF SOLAR PHOTOVOLTAIC-WATER-PUMPING SYSTEM FOR AGRICULTURE APPLICATIONS: USE CASES AND IMPLEMENTATION ISSUES. CLEAN ENERGY, 6(2), 335-352.
- [21] [HTTPS://PANSOGAL.COM/LOS-PANELES-SOLARES-NECESITAN-SOL-DIRECTO-O-FUNCIONAN-EN-INVIERNO/](https://pansogal.com/los-paneles-solares-necesitan-sol-directo-o-funcionan-en-invierno/)
- [22] [HTTPS://WWW.EFIMARKET.COM/BLOG/LA-HORA-SOLAR-PICO-HSP-SIRVE-CALCULARLO](https://www.efimarket.com/blog/la-hora-solar-pico-hsp-sirve-calcularlo)
- [23] [MANSUR-OLAR.COM/WIKISOLAR/ORIENTACION-E-INCLINACION/](https://mansur-olar.com/wikisolar/orientacion-e-inclinacion/)
- [24] [HTTPS://PRODUCT-SELECTION.GRUNDFOS.COM/ES/SIZING-RESULT-PAGE?SQCID=2351148843&SJOBID=4CC78493-30A4-499A-8364-539C0D89F167](https://product-selection.grundfos.com/es/sizing-result-page?sQCID=2351148843&sJOBID=4cc78493-30a4-499a-8364-539c0d89f167)
- [25] [HTTPS://WWW.SMA.DE/ES/PRODUCTOS/INVERSOR-FOTOVOLTAICO/SUNNY-BOY-15-20-25](https://www.sma.de/es/productos/inversor-fotovoltaico/sunny-boy-15-20-25)
- [26] [HTTPS://WWW.WCCSOLAR.NET/PRODUCT-PAGE/PANEL-SOLAR-350W-POLICRISTALINO-12V-24V-48V](https://www.wccsolar.net/product-page/panel-solar-350w-policristalino-12v-24v-48v)