



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

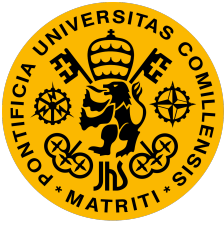
DISEÑO E IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE  
ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO AUTO-SOSTENIBLE  
PARA LA CAPTACIÓN DE AGUA Y SU DISTRIBUCIÓN A  
UN COLEGIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA EN  
MOUNT DARWIN (ZIMBABUE)

Autor: Ignacio Moldenhauer Fernández

Director: Miren Tellería Ajuriaguerra

Madrid

Octubre de 2019



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)

Ignacio Moldenhauer



**AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO**

**1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.**

El autor D. **Ignacio Moldenhauer Fernández**

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: “**Diseño e implantación de un sistema de abastecimiento energético auto-sostenible para la captación de agua y su distribución a un colegio de agricultura y ganadería en Mount Darwin (Zimbabue)**”, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

**2º. Objeto y fines de la cesión.**

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

**3º. Condiciones de la cesión y acceso**

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

**4º. Derechos del autor.**

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

**5º. Deberes del autor.**

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.



- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

**6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.**

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 21 de octubre de 2018

**ACEPTA**

Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título “**DISEÑO E IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO AUTO-SOSTENIBLE PARA LA CAPTACIÓN DE AGUA Y SU DISTRIBUCIÓN A UN COLEGIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA EN MOUNT DARWIN (ZIMBABUE)**” en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2018/2019 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

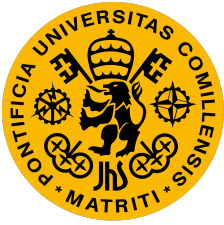
Fdo.: Ignacio Moldenhauer Fernández

Fecha: 28/10/2019

Autorizada la entrega del proyecto  
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

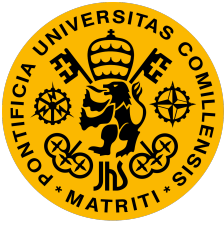
Fdo.: Miren Tellería Ajuriaguerra

Fecha: 28 /10 /2019



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)

Ignacio Moldenhauer



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

## TRABAJO FIN DE GRADO

### DISEÑO E IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO AUTO-SOSTENIBLE PARA LA CAPTACIÓN DE AGUA Y SU DISTRIBUCIÓN A UN COLEGIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA EN MOUNT DARWIN (ZIMBABUE)

Autor: Ignacio Moldenhauer Fernández

Director: Miren Tellería Ajuriaguerra

Madrid

Octubre de 2019



# **DISEÑO E IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO AUTO-SOSTENIBLE PARA LA CAPTACIÓN DE AGUA Y SU DISTRIBUCIÓN A UN COLEGIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA EN MOUNT DARWIN (ZIMBABUE)**

**Autor:** Ignacio Moldenhauer Fernández

**Director:** Miren Tellería Ajuriaguerra

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

En el mundo que nos rodea, el acceso a la energía es una cuestión vital para satisfacer las necesidades propias de cualquier comunidad. De este modo, no se trata de un bien exclusivo para los países ricos sino de un recurso que debería de estar al alcance de todos para incrementar la productividad y desarrollar la economía, y a su vez reducir la pobreza y mejorar la salud.

Ante esta necesidad de carácter urgente, se propone el presente Trabajo de Fin de Grado, con el objetivo de dotar de un sistema de abastecimiento energético para la captación y distribución de agua a una comunidad rural en la región de Mount Darwin, Zimbabwe, y a un colegio de formación profesional donde se impartirán cursos de agricultura y ganadería.

La instalación que se propone, pertenece a un conjunto de proyectos llevados a cabo por un grupo de estudiantes de la Escuela Superior de Ingeniería ICAI, en colaboración con la ONG Child Future Africa. Estos realizarán la construcción de un colegio de formación profesional, dos pozos, un estanque de peces para consumo de la comunidad y diversos un sistema de biodigestión, con el cual se obtendrán fertilizantes naturales para uso de la comunidad.



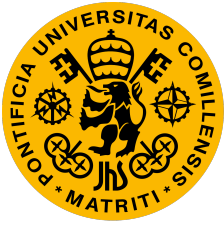
En la toma de decisiones incluidas en el desarrollo de este proyecto, el criterio económico ha tenido un papel de gran importancia, ya que se disponía de un capital limitado para la ejecución de todos los proyectos. De todas formas, se ha tratado de diseñar un sistema sencillo que no supusiera un problema añadido a la comunidad, buscando que fuera auto-sostenible y que requiriese un mantenimiento muy básico y esencial.

El objetivo principal de este proyecto es el diseño y dimensionamiento de una instalación fotovoltaica aislada. En base a justificar la elección de este tipo de sistema, se realizará un análisis de las diferentes alternativas existentes.

Se realizará un estudio previo de la radiación solar disponible en el emplazamiento de la instalación. El recurso energético utilizado va a ser la energía solar, de modo que resulta de vital importancia conocer en qué cuantía se dispone del mismo. A continuación se hará un análisis del consumo estimado. Si bien una parte importante de este proyecto es el sistema de captación y distribución de agua, los cálculos relativos al mismo están fuera del alcance del presente estudio. Dicho análisis está reflejado en el proyecto de fin de grado de otro alumno de ICAI, Matías Llorente Areses. Una vez estimado el consumo, se procederá al dimensionamiento del conjunto del sistema de bombeo solar. Se estudiará el número de módulos fotovoltaicos necesarios, su disposición y el ángulo óptimo de inclinación. Se elegirá el tipo de bomba que más se ajuste a la instalación, junto con el regulador de carga. Se diseñará el tipo de cable necesario para la conexión de los paneles al regulador y del regulador a la bomba. Por último, se darán una serie de pautas necesarias para la puesta a tierra de la instalación.

Más allá de la parte teórica de la instalación, la parte ejecutiva del mismo cobra especial importancia. Al tratarse de una localidad tan remota, tener claros los pasos a seguir con antelación es crucial.

Por último, se expondrán los métodos de recaudación llevados a cabo para la financiación del proyecto.



**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SELF-SUSTAINABLE  
ENERGY SUPPLY SYSTEM FOR THE COLLECTION OF WATER  
AND ITS DISTRIBUTION TO AN AGRICULTURAL AND  
LIVESTOCK SCHOOL IN  
MOUNT DARWIN (ZIMBABWE)**

**Author:** Ignacio Moldenhauer Fernández

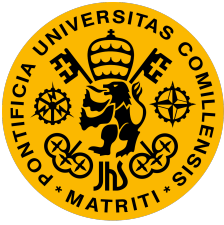
**Director:** Miren Tellería Ajuriaguerra

**PROJECT BRIEF**

In the world around us, access to energy is a vital issue to meet the needs of any community. Thus, it is not an exclusive good for rich countries, but a resource that should be available to everyone in order to increase productivity and develop the economy of any community, while reducing poverty and improving health.

Faced with this urgent need, this Final Degree Paper is proposed with the aim of providing an energy supply system for the collection and distribution of water to a rural community in the Mount Darwin region of Zimbabwe, and a vocational college where courses in agriculture and livestock will be taught.

The proposed facility is part of a series of projects carried out by a group of students from the ICAI School of Engineering, in collaboration with the NGO Child Future Africa. They will build a vocational school, two wells, a fish pond for the community's consumption and a biodigestion system, with which natural fertilizers will be obtained for the community's use.



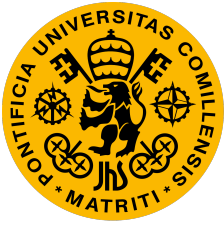
In the decision making included in the development of this project, the economic criterion has played a very important role, since a limited capital was available for the execution of all the projects. In any case, we have tried to design a simple system that does not pose an added problem to the community, seeking to be self-sustainable and that requires very basic and essential maintenance.

The main objective of this project is the design and dimensioning of an isolated photovoltaic installation. On the basis of justifying the choice of this type of system, an analysis of the different existing alternatives will be carried out.

A preliminary study of the solar radiation available at the installation site will be carried out. The energy resource used will be solar energy, so it is vitally important to know how much is available. An analysis of the estimated consumption will follow. Although an important part of this project is the water collection and distribution system, the calculations relating to it are beyond the scope of the project. This analysis is reflected in the end-of-degree project of another ICAI student, Matías Llorente Areses. Once the consumption has been estimated, the whole solar pumping system will be dimensioned. The number of photovoltaic modules required, their arrangement and the optimum angle of inclination will be studied. The type of pump most suited to the installation will be chosen, together with the charge regulator. The type of cable needed to connect the panels to the regulator and the regulator to the pump will be designed. Finally, a series of guidelines will be given for the grounding of the installation.

Beyond the theoretical part of the installation, the executive part of it takes on special importance. As this is such a remote location, it is crucial to have clear steps to follow in advance.

Finally, the collection methods used to finance the project will be explained.



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)

Ignacio Moldenhauer



# Índice General

---

|                                                       |           |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. MEMORIA.....</b>                                | <b>15</b> |
| 1.1 Introducción.....                                 | 15        |
| 1.2 Estudio de la cuestión .....                      | 17        |
| 1.3 Contextualización del Proyecto .....              | 19        |
| 1.4 Estudio de alternativas .....                     | 23        |
| 1.4.1 Extensión de redes.....                         | 23        |
| 1.4.2 Sistemas aislados tradicionales.....            | 24        |
| 1.4.3 Sistemas con energías renovables.....           | 25        |
| 1.5 Potencial Solar en Africa .....                   | 26        |
| 1.6 Tipos de Sistemas de Energía Solar .....          | 28        |
| 1.6.1 Sistemas Aislados .....                         | 28        |
| 1.6.2 Sistemas Interconectados .....                  | 29        |
| <b>2 DISEÑO ELÉCTRICO .....</b>                       | <b>31</b> |
| 2.1 Contexto de la instalación eléctrica .....        | 31        |
| 2.1.1 Localización y Clima.....                       | 31        |
| 2.1.2 Estudio de la radiación solar .....             | 33        |
| 2.1.3 Obtención del consumo .....                     | 37        |
| 2.2 Dimensionado y elección de equipos .....          | 40        |
| 2.2.1 Bomba .....                                     | 41        |
| 2.2.2 Regulador de carga .....                        | 43        |
| 2.2.3 Módulos Fotovoltaicos .....                     | 46        |
| 2.3 Estudio del cableado .....                        | 51        |
| 2.4 Puesta a Tierra de la Instalación .....           | 56        |
| <b>3 EJECUCIÓN Y MANTENIMIENTO .....</b>              | <b>59</b> |
| 3.1 Ejecución .....                                   | 59        |
| 3.2 Mantenimiento .....                               | 65        |
| 3.2.1 Mantenimiento de los módulos fotovoltaicos..... | 66        |
| 3.2.2 Mantenimiento del regulador .....               | 67        |
| <b>4 MARCO ECONÓMICO .....</b>                        | <b>68</b> |
| <b>5 FICHAS TÉCNICAS.....</b>                         | <b>73</b> |
| <b>6 BIBLIOGRAFÍA.....</b>                            | <b>76</b> |



## Índice de Ilustraciones

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1 Acceso a la electricidad en África. Fuente: AFROBAROMETER .....                                        | 15 |
| Ilustración 2 Iluminación cotidiana a base de velas. Fuente: Propia .....                                            | 16 |
| Ilustración 3 Vivienda en zona rural de Zimbabwe. Fuente Propia .....                                                | 19 |
| Ilustración 4 Clase de secundaria en el colegio contruido en 2017 por una alumna de ICAI.<br>Fuente: Propia .....    | 20 |
| Ilustración 5 Vendedora ambulante de naranjas en la carretera principal del norte del<br>pais. Fuente: propia.....   | 21 |
| Ilustración 6 Billeto de Cien Trillones de Bonds, emitido durante la hiperinflación de 2008.<br>Fuente: Propia ..... | 22 |
| Ilustración 7 Grupo Electrónico Monofásico. Fuente: DirectIndustry .....                                             | 24 |
| Ilustración 8 Fuentes de Energías Renovables .....                                                                   | 25 |
| Ilustración 9 Cartografía de radiación solar mundial. Fuente GIS & Beers .....                                       | 26 |
| Ilustración 10: Mapa de radiación solar en Zimbabwe. Fuente: Solargis. ....                                          | 27 |
| Ilustración 11: Esquema de un sistema fotovoltaico aislado. ....                                                     | 28 |
| Ilustración 12: Esquema básico de una instalación fotovoltaica conectada a red .....                                 | 29 |
| Ilustración 13 Localización del colegio marcada con punto rojo.....                                                  | 32 |
| Ilustración 14 Interfaz de la herramienta online PVGIS .....                                                         | 33 |
| Ilustración 15 Gráfica explicatoria de las horas solares pico .....                                                  | 34 |
| Ilustración 16 Ángulo óptimo de los paneles fotovoltaicos.....                                                       | 35 |
| Ilustración 17 Esquema de una instalación de bombeo solar. Fuente: Google images                                     | 40 |
| Ilustración 18 Pack de bombeo solar. Fuente: propia.....                                                             | 42 |
| Ilustración 19 Curva I-V de producción de un panel solar. Fuente: websolar.com .....                                 | 44 |
| Ilustración 20. Contenido del pack de bombeo solar (Sensores, regulador de carga y<br>bomba). Fuente: propia.....    | 45 |
| Ilustración 21 Izq: Monocristalina. Dcha: Policristalina. Fuente: Jardín Solar .....                                 | 47 |
| Ilustración 22 Cable Solar PV ZZ (Fuente: Top Cable) .....                                                           | 53 |
| Ilustración 23 Esquema de puesta a tierra de instalación fotovoltaica. Fuente:<br>SunFields .....                    | 56 |
| Ilustración 24 Trabajadores locales. Fuente: propia .....                                                            | 59 |
| Ilustración 25 Primeras etapas de construcción. Fuente: propia. ....                                                 | 60 |
| Ilustración 26 Miembros de la comunidad celebrando el éxito de la perforación. Fuente: propia<br>.....               | 61 |
| Ilustración 27 Llegada del material desde la capital en camión. Fuente: propia.....                                  | 62 |
| Ilustración 28 Izq: Instalación Fotovoltaica Instalada. Dcha: Agua extraída del pozo. Fuente:<br>Propia .....        | 63 |
| Ilustración 29 Colegio De Agricultura y Ganadería casi finalizado. Fuente: Propia .....                              | 64 |
| Ilustración 30 Paneles limpios vs Paneles sucios. Fuente: Generatuluz .....                                          | 66 |
| Ilustración 31 Flyers de la fiesta benéfica. Fuente: Propia.....                                                     | 69 |
| Ilustración 32 Flyer de promoción del mercadillo. Fuente: Propia .....                                               | 70 |
| Ilustración 33 Camisetas, Pulseras y Papeletas de PZ. Fuente: Propia.....                                            | 70 |
| Ilustración 34 Empresas Colaboradoras. Fuente: Propia.....                                                           | 71 |

# 1. MEMORIA

## 1.1 Introducción

En el mundo que nos rodea, el acceso a la energía es una cuestión vital para satisfacer las necesidades propias de cualquier comunidad. De este modo, no se trata de un bien exclusivo para los países ricos sino de un recurso que debería de estar al alcance de todo el mundo para incrementar la productividad y desarrollar la economía de cualquier comunidad, y a su vez reducir la pobreza y mejorar la salud.

Desafortunadamente, cerca del 20% de la población mundial (en torno a 1.300 millones de personas) no tiene acceso a la electricidad. El 95% de estas personas sin acceso a servicios energéticos fiables habitan en el África subsahariana y en áreas en vías de desarrollo de Asia, con el 84% de ellas habitando en zonas rurales. La siguiente figura muestra algunos resultados del estudio llevado a cabo por Afrobarometer, que a través de encuestas en 36 países africanos obtuvo una aproximación de las fracciones de gente que tiene acceso a electricidad en el continente.

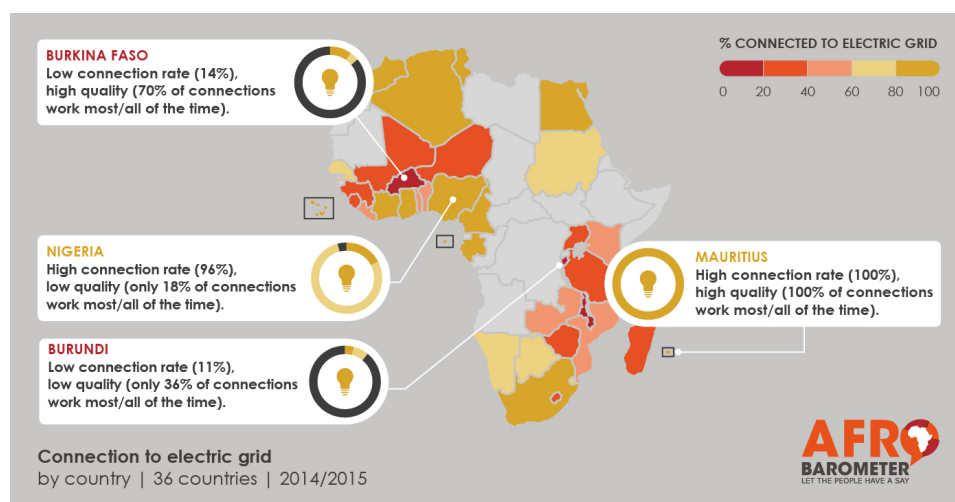


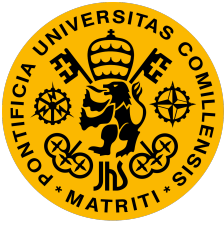
Ilustración 1 Acceso a la electricidad en África. Fuente: AFROBAROMETER

El problema no solo reside en establecer conexiones eléctricas sino en garantizar un funcionamiento ininterrumpido: “En Sudáfrica el 14% de las personas con acceso entrevistadas sugieren que la conexión no funciona nunca o casi nunca, con aún más proporción en Zimbabwe (44%), Zambia (33%), Botswana (23%), Namibia (19%) y Kenia (15%)”. [1] .



Ilustración 2 Iluminación cotidiana a base de velas. Fuente: Propia

De este modo, existen otras alternativas como pueden ser los sistemas de energías renovables auto-sostenibles, dotando a pequeñas comunidades rurales de una solución más inmediata, y autonomía a la hora de depender de grandes sistemas y de sus posibles y frecuentes carencias. Ante esta necesidad de alternativas energéticas para las comunidades rurales más desfavorecidas se propone este Trabajo de Fin de Grado, en el cual se diseñará e implementará un sistema de abastecimiento energético auto-sostenible para la captación y



distribución de agua a un colegio de agricultura y ganadería en la región de Dotito, Mount Darwin (Zimbabwe).

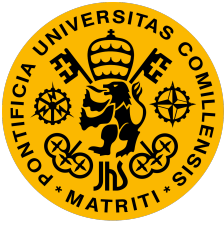
## 1.2 Estudio de la cuestión

---

Para abordar la electrificación de la zona en cuestión, resulta imprescindible hacer un estudio de las posibles alternativas para posteriormente escoger aquella que más se adapte a las necesidades del proyecto.

Es habitual que los organismos encargados de llevar a cabo esta clase de proyectos sean empresas o gobiernos regionales, que frecuentemente carecen de recursos fiables para estudiar a fondo las alternativas disponibles en la zona rural en cuestión. Esto conlleva que se establezcan soluciones estandarizadas que en la mayoría de los casos acaban siendo más perjudiciales que beneficiosas para la población:

- Sistemas sobredimensionados que originan costes muy superiores a los que pueden afrontar los usuarios.
- Generación de conflictos entre los usuarios debido a la privacidad de los sistemas, gestionando externamente a quien suministrar sin tener en cuenta los intereses y cultura de la comunidad.
- Insatisfacción de la población debido a no cubrir sus necesidades.
- Imposibilidad de afrontar los costes de mantenimiento y reparaciones de equipos si el usuario no obtiene los recursos económicos mínimos que hagan viable la instalación.



Esta serie de inconvenientes ponen en duda el éxito del proyecto y probablemente tengan repercusiones en futuros proyectos, debido a la generación de un sentimiento de duda y de falta de confianza por parte de la comunidad. Es por ello que resulta preferible adoptar métodos de electrificación sencillos, cuyo impacto socioeconómico sea leve y que permita una progresiva adaptación de los usuarios.

## 1.3 Contextualización del Proyecto

---

Para poder entender el porqué de este proyecto, es esencial conocer la situación social y económica de Zimbabwe, que transcurre paralela a los acontecimientos sociopolíticos [2] [3],.

Zimbabwe tiene una superficie de 390.760 kilómetros cuadrados, con una densidad de población de 37 habitantes por Km cuadrado. A partir del año 2008, su economía cambió el rumbo drásticamente, entrando en una senda de desindustrialización y empobrecimiento.



Ilustración 3 Vivienda en zona rural de Zimbabwe. Fuente Propia

El Índice de Desarrollo Humano o IDH, es un indicador del progreso de un país elaborado por Naciones Unidas, y muestra el nivel de vida de sus habitantes, y en 2010 Zimbabwe ocupaba el último lugar en el ranking de países. En cuanto a la facilidad para hacer negocios, Zimbabwe ocupa el puesto 155 sobre 190 según el indicador Doing Business. Un 72% de la población estaba bajo la línea de pobreza en 2004, el desempleo era del 95% en 2009. Entre 2009 y 2013 creció un 12%.

Tiene una de las tasas de alfabetización más elevadas de África. En 2015 y 2016 el país sufrió una fuerte crisis económica. Para aliviar esta situación, el gobierno ha emitido una nueva moneda, el bond, extendiéndose los medios de pago electrónicos, y ha implementado los controles al capital, y restricciones a la importación de mercancías, con las consecuencias deducibles.



Ilustración 4 Clase de secundaria en el colegio contruido en 2017 por una alumna de ICAI. Fuente: Propia

Según el Informe Sosioeconómico de la Oficina económica y comercial de España en Johannesburgo [3], la CIA estima una tasa de electrificación del 40%, llegando al 80% en las ciudades. La capacidad instalada es de 1.960 megavatios (MW) y la capacidad per cápita es de 146 MW, cifras entre tres y siete veces superiores que las de otros países de bajo ingreso del continente. El país se enfrenta actualmente a un déficit de energía debido a la sequía y a la insuficiente capacidad de generación.



Ilustración 5 Vendedora ambulante de naranjas en la carretera principal del norte del país. Fuente: propia.

Según el citado informe, Zimbabwe tiene una red de carreteras con una densidad de 100 kms por cada 1.000 kms cuadrados, el doble que Zambia, el triple que Mozambique, bien integrado regionalmente, dentro del grupo de los 14 corredores de África para el comercio. La mayoría de esas carreteras necesitan rehabilitarse, constituyendo el sector una oportunidad de inversión.

La ley de indigenización ha sido modificada a principios de 2018 en una voluntad de mejorar el mundo de los negocios, y se ha reducido el número de sectores donde están prohibidas las inversiones extranjeras, planeándose para un futuro simplificar los trámites administrativos. Sudáfrica es su principal socio comercial, con 40% de las importaciones y 80% de las exportaciones, seguido en cuanto a importaciones de Singapur con el 20% y Reino Unido en novena posición.

En el ámbito público-privado varios proyectos energéticos están promovidos por la Zimbabwe Investment Authority: Central térmica Gowke North, Central térmica Gwayi, Central eléctrica Western Area, Lupane Coal Bed Methane, Centrales hidroeléctricas (minihydro), Centrales térmicas, Canales de distribución y transmisión.



Ilustración 6 Billeto de Cien Trillones de Bonds, emitido durante la hiperinflación de 2008. Fuente: Propia

La deuda acumulada de Zimbabwe es de 1100 millones con el banco mundial, y 600 millones con el banco africano de desarrollo.



## 1.4 Estudio de alternativas

---

Una vez planteado el problema de la falta de acceso a la electricidad, se presentan varias alternativas para dotar de servicios energéticos al colegio de agricultura y ganadería, en concreto para la explotación de un pozo perteneciente al mismo. De entre todas ellas, se escogerá la mas adecuada teniendo en cuenta aspectos económicos, medioambientales y de independencia en el suministro. Las tres alternativas a estudiar son las siguientes:

- Extensión de redes
- Sistemas aislados tradicionales
- Sistemas con energías renovables

### 1.4.1 Extensión de redes

---

Se trata de conectar la zona rural a las líneas eléctricas más cercanas, mediante el uso de transformadores. Este método permitiría dotar al centro de una oferta eléctrica amplia, de modo que se podría utilizar la misma para otras funciones más allá del bombeo solar.

Este método presenta varios inconvenientes. En primer lugar, la gran distancia que hay entre las líneas existentes y los futuros puntos de consumo hacen que el coste de cableado y de los transformadores de tensión sea muy superior a los límites económicos con los que trabajamos. A estos costes habría que sumarle una factura periódica de luz, entrando en discordia con el objetivo de facilitar la vida y el desarrollo de estas comunidades

Por otra parte, en el hipotético caso de que estuvieran a una distancia accesible, los numerosos cortes eléctricos que se dan en Zimbabwe a lo largo del día suponen el no cumplimiento de nuestro objetivo.

#### 1.4.2 Sistemas aislados tradicionales

---

La utilización de motores de combustión diésel es un método de electrificación aislado, que cuenta con un largo recorrido en las últimas décadas. Se trata de la generación eléctrica a partir de un grupo electrógeno. Este grupo está compuesto por un generador eléctrico accionado a través de un motor de combustión.



Ilustración 7 Grupo Electrónico Monofásico. Fuente: DirectIndustry

Este método presenta una dependencia del combustible a emplear. La remota localización de la zona de estudio y la falta de recursos económicos de los usuarios, dificulta que se garantice la disponibilidad de combustible. Esto, sumado al alza del precio del combustible debido a la grave crisis económica que sufre Zimbabwe, hacen que rechacemos esta alternativa para nuestro proyecto.

Por otra parte, se trata de un sistema muy agresivo con el medio ambiente, generando un volumen considerable de emisiones que dañan el ecosistema.

### 1.4.3 Sistemas con energías renovables

Debido al constante crecimiento del precio de los combustibles y al desarrollo de los sistemas renovables en los últimos años, éstos se han convertido en una solución muy recomendable para electrificar zonas remotas y dispersas de países en vías de desarrollo.

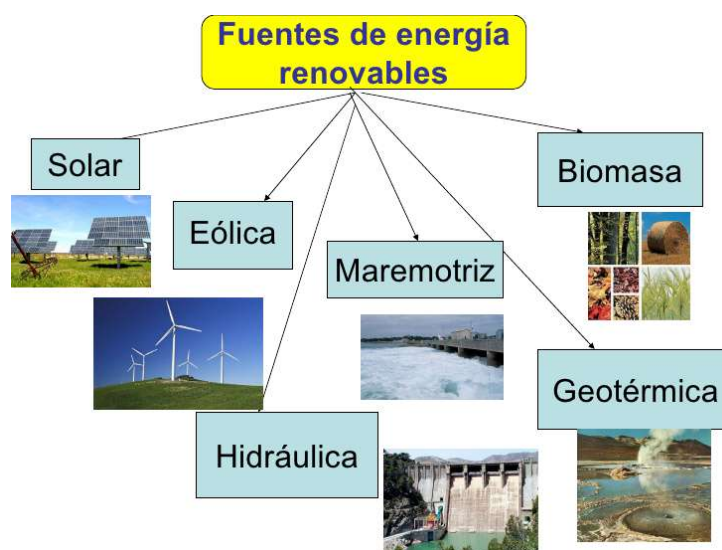
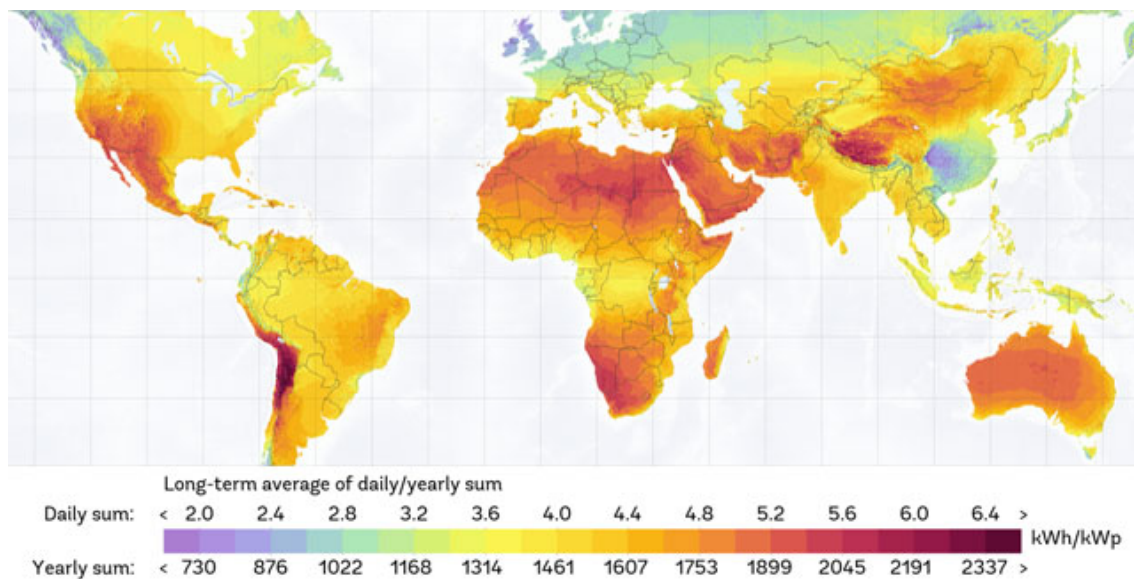


Ilustración 8 Fuentes de Energías Renovables

La principal ventaja del uso de la energía renovable es su dependencia de recursos naturales infinitos. Se pueden distinguir diversos tipos de sistemas con energías renovables, dependiendo del recurso natural que utilizan como fuente de energía. De este modo, podemos distinguir energía solar (utiliza la energía procedente del sol en forma de radiación solar), eólica (utiliza el viento como recurso natural), geotérmica (calor de la tierra), hidráulica (movimiento de grandes masas de agua), biomasa (calor desprendido por la combustión de materia orgánica), etc.

## 1.5 Potencial Solar en Africa

El continente africano es a menudo considerado como el ‘continente Sol’ debido a la gran influencia que tiene el astro sobre su superficie, mucho mayor que en el resto de continentes, como se puede observar en la siguiente figura:



**Ilustración 9 Cartografía de radiación solar mundial. Fuente GIS & Beers**

Con una media de 8.3 horas de sol al día, Zimbabwe está considerado como uno de los países más soleados del planeta. Según el Departamento de Servicios Meteorológicos de Zimbabwe (MSD), esta cualidad se intensifica notablemente en la estación seca, comprendida entre los meses de abril y noviembre, caracterizada por la presencia prácticamente nula de nubes en el cielo.

En la siguiente figura se aprecia la alta irradiación solar del país. Como se puede observar, la gran mayoría de la superficie recibe una media diaria de entre 5.8 y 6 kWh/m<sup>2</sup>, lo que supone hasta tres veces más energía que en muchos países centroeuropeos.

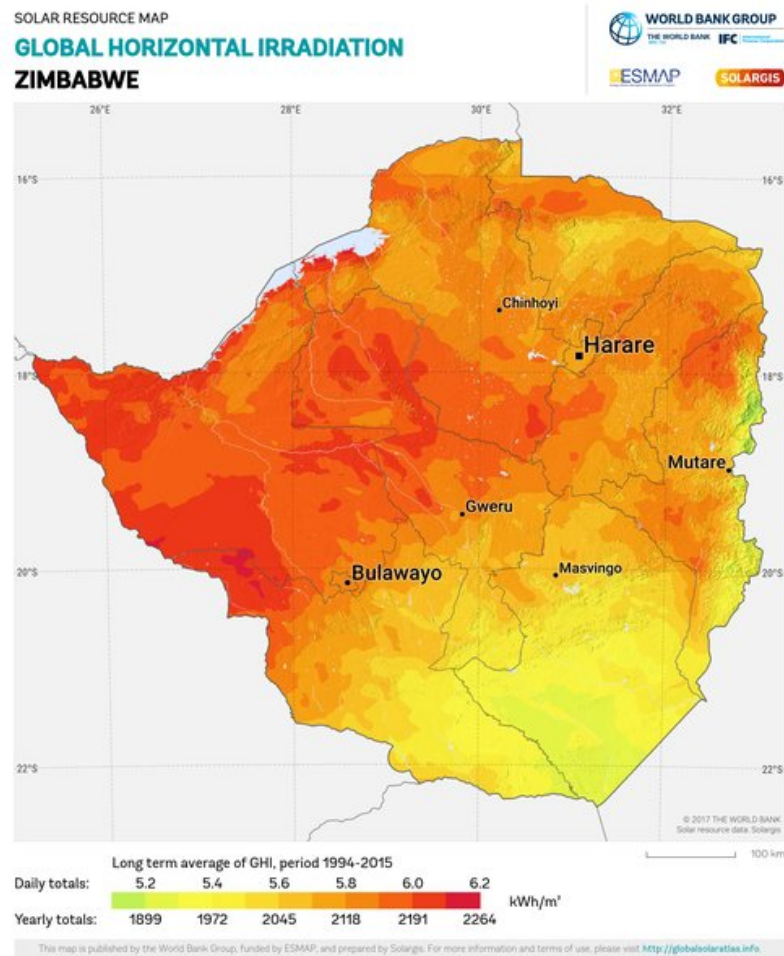


Ilustración 10: Mapa de radiación solar en Zimbabwe. Fuente: Solargis.

## 1.6 Tipos de Sistemas de Energía Solar

En base a la información anterior, y dada la necesidad de un sistema cuya fuente de generación no suponga un coste adicional para la población de la zona, la mejor opción para llevar a cabo la electrificación del colegio es un sistema fotovoltaico. A continuación se presentan las dos alternativas posibles para dichos sistemas: aislados o interconectados.

### 1.6.1 Sistemas Aislados

Un sistema aislado o también conocido como sistema de energía independiente (SEI), es un sistema eléctrico que carece de conexión a la red, generalmente utilizado en zonas donde el acceso a la red es complicado o inexistente. Estos sistemas se caracterizan por una o varias fuentes de generación, un sistema de almacenamiento de energía y un controlador encargado de su regulación. En la siguiente figura se aprecia el esquema básico de una instalación aislada:

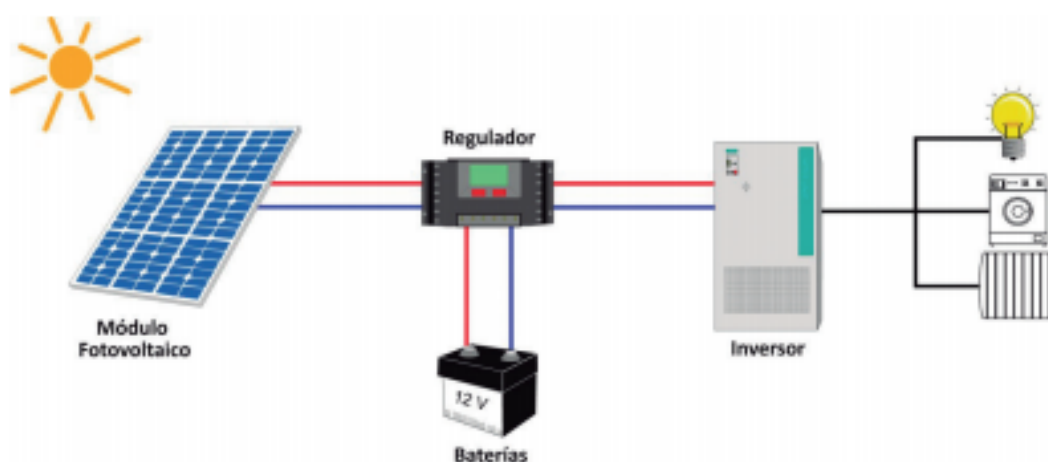
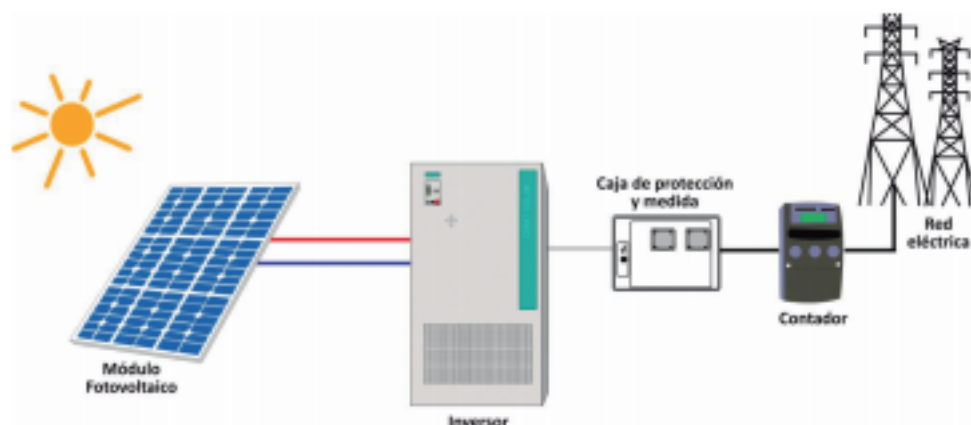


Ilustración 11: Esquema de un sistema fotovoltaico aislado.

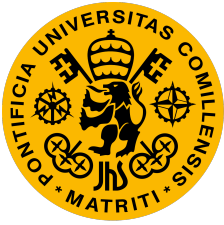
### 1.6.2 Sistemas Interconectados

Por otra parte, los sistemas interconectados son aquellos que funcionan acoplados a la red eléctrica. De este modo, en caso de que haya una demanda superior a la energía que se está generando, la red aporta este déficit de energía. Por lo contrario, si el sistema genera más de lo que se consume, éste es capaz de inyectar esa energía sobrante a la red, recibiendo una compensación económica por ello. El esquema básico de una instalación conectada a red es el que se muestra en la siguiente ilustración:



**Ilustración 12: Esquema básico de una instalación fotovoltaica conectada a red**

Como se observa en la figura, se aprecia la ausencia de un sistema de acumulación de energía. Pueden tratarse de baterías o como mas adelante veremos en nuestro caso, depósitos que acumulan el agua a cierta altura, almacenando así la energía en forma de energía potencial.



En la zona a tratar, como hemos señalado anteriormente, el punto de red mas cercano está a muchos kilómetros del emplazamiento del colegio, por lo que resultaría muy costoso establecer dicha conexión. De todos modos, a pesar de que fuera viable conectarse a la red, en Zimbabue la red presenta numerosos cortes a lo largo del día, y no se garantiza la continuidad del servicio.

Si bien es cierto que como nuestro objetivo es dotar de electricidad al colegio, lo debemos de hacer de la manera más sencilla posible, para que esto suponga una ayuda y no un problema adicional en el futuro.

De este modo, vamos a optar por la implantación de un **sistema fotovoltaico aislado**. Esta elección se debe a los factores descritos anteriormente, y a la familiarización de estas comunidades con este tipo de sistemas, de modo que si en el futuro ocurre algún problema, ellos mismos sean capaces de solucionarlo.



## 2 DISEÑO ELÉCTRICO

---

### 2.1 Contexto de la instalación eléctrica

---

Para llevar a cabo el diseño eléctrico de la instalación es fundamental hacer un estudio previo del lugar donde se va a ejecutar. Como se ha apuntado anteriormente, se trata de una aldea en la región de Kazai, de la cual habrá que analizar el clima y hacer un estudio de la radiación solar que incide sobre esta zona. También es necesario hacer una aproximación del consumo necesario para poder dimensionar los aparatos necesarios.

#### 2.1.1 Localización y Clima

---

##### ➤ Localización

El emplazamiento de la instalación fotovoltaica está situado en el colegio de agricultura y ganadería diseñado y llevado a cabo simultáneamente por otro alumno de ICAI, Alberto Mascareñas. Está situado en una aldea de la zona de Kazai, perteneciente al distrito de Mount Darwin, Zimbabue. Las coordenadas exactas del mismo son las siguientes:

| Longitud     | Latitud      |
|--------------|--------------|
| 31°31'20.9"E | 16°33'05.3"S |

Tabla 1 Coordenadas del colegio de agricultura y ganadería

Concretamente, el sistema de placas solares fotovoltaicas estará situado a unos 80 metros del edificio, próximo al pozo del cual se va a extraer el agua.

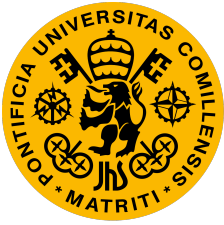


Ilustración 13 Localización del colegio marcada con punto rojo

### ➤ Clima

La región en cuestión presenta un clima subtropical, a pesar de encontrarse en la zona tropical. Esto se debe a la altitud que presenta gran parte del territorio, en el que se pueden distinguir dos claras estaciones: seca y húmeda. La estación seca transcurre entre los meses de mayo a octubre. Las lluvias ocurren entre los meses de noviembre a marzo, acentuándose entre enero y febrero. [2]

## 2.1.2 Estudio de la radiación solar

De acuerdo a la importancia que tiene la energía solar que incide sobre los paneles solares, es imprescindible conocer de cuánta energía se dispone en el emplazamiento para el correcto dimensionamiento de la instalación.

Existen diversas herramientas online para consultar bases de datos de radiación solar y otros parámetros climáticos integrados en un sistema geográfico de información (GIS). Esta herramienta permite la estimación de la producción eléctrica fotovoltaica en cualquier lugar del planeta. [3]

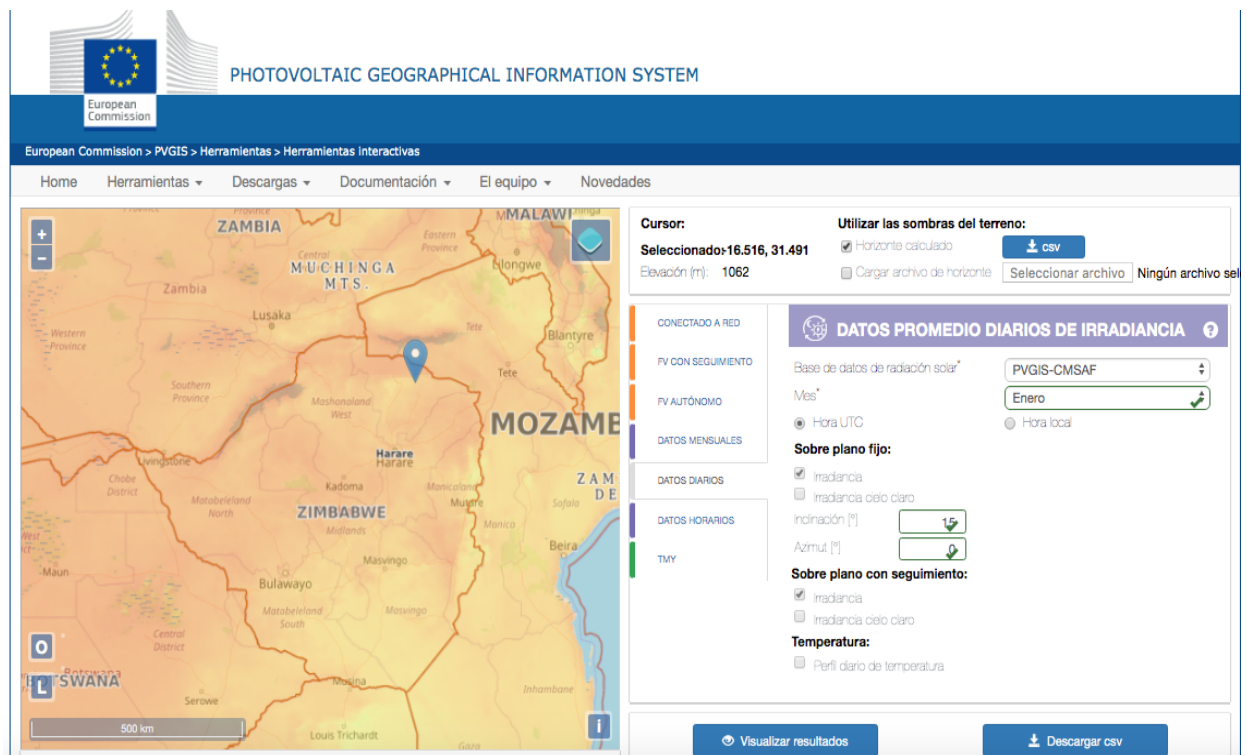


Ilustración 14 Interfaz de la herramienta online PVGIS

Con el objetivo de dimensionar correctamente el sistema y la correcta elección de la potencia de la bomba, es imprescindible presentar el concepto de horas solares pico. Definimos una Hora Solar Pico (HSP) como la cantidad de energía solar que recibe un metro cuadrado de superficie con una hipotético irradiación solar constante de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Los gráficos de irradiación solar a lo largo del día presentan una distribución gaussiana que se ve simplificada con este concepto. De este modo, el área debajo de la curva de irradiación solar a lo largo de un día es equivalente al área del rectángulo representado por las horas solares pico. La siguiente gráfica muestra este concepto con claridad:

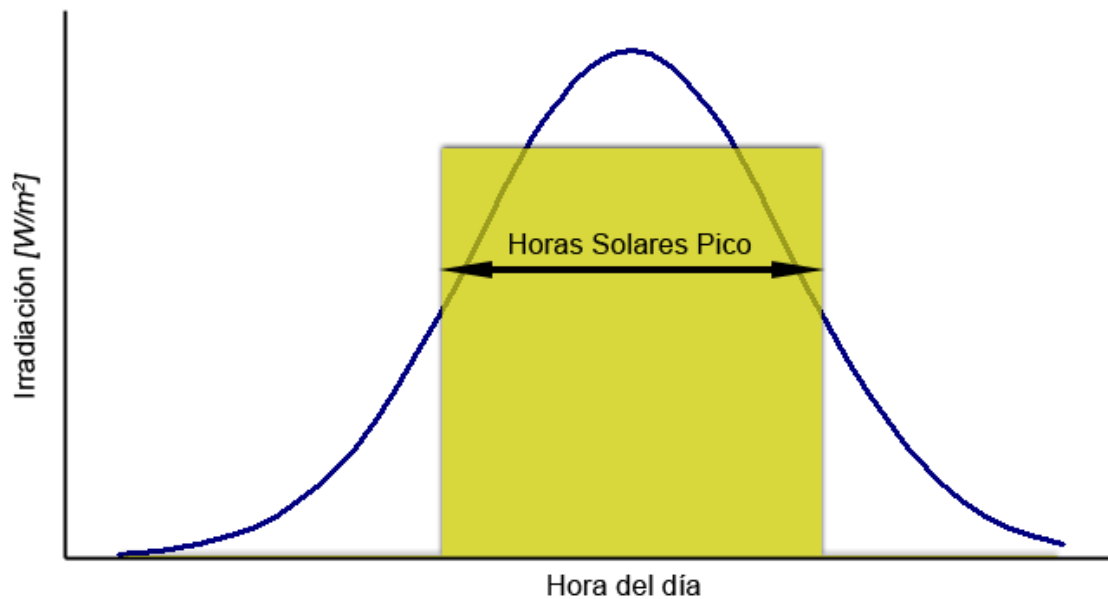
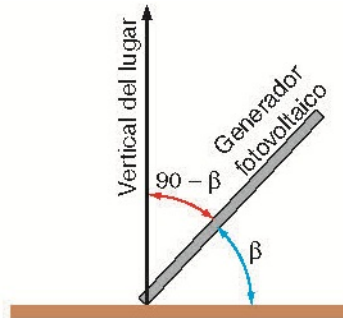


Ilustración 15 Gráfica explicatoria de las horas solares pico

Por otra parte, el ángulo de inclinación que debe de tener la placa también es objeto de estudio en este proyecto, ya que la correcta elección del mismo hará que el sistema esté funcionando en condiciones óptimas.

La herramienta PVGIS también facilita este ángulo, teniendo en cuenta las coordenadas y la altitud del lugar en cuestión. En nuestro caso, el ángulo óptimo será de  $15^\circ$ .



**Ilustración 16 Ángulo óptimo de los paneles fotovoltaicos**

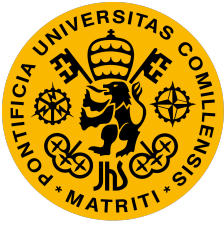
También es posible obtener el ángulo óptimo del panel fotovoltaico mediante el método de la inclinación óptima anual. Este método está basado en el análisis estadístico de la radiación solar que reciben lugares del planeta con distintas latitudes, de esta forma, mediante la siguiente fórmula, es sencillo obtener dicho ángulo:

$$\beta_{\text{optimo}} = 3.7 + 0.69 * |\phi|$$

Siendo:

$\beta_{\text{optimo}}$ : Ángulo óptimo de inclinación en grados

$|\phi|$ : Latitud del lugar, en valor absoluto y en grados



De este modo, al tratarse de una localización con una latitud de  $16^{\circ}33'$ , el ángulo óptimo resultante sería el siguiente, coincidiendo con el ángulo obtenido a través de la herramienta PVGIs:

$$\beta_{optimo} = 3.7 + 0.69 * |16.55| \approx 15^{\circ}$$

Por otra parte, resulta imprescindible hacer un análisis de la irradiación que recibe el lugar en cuestión a lo largo del año, para poder dimensionar nuestro sistema acorde a los resultados obtenidos. La siguiente tabla presenta los valores de irradiación media a lo largo de un año.

| Mes        | Irradiación<br>global horizontal<br>(0°) (Wh/m2/día) | Irradiación<br>global optima<br>(15°)<br>(Wh/m2/día) | HPS<br>(21°) |
|------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------|
| Enero      | 5730                                                 | 5410                                                 | 5,41         |
| Febrero    | 6125                                                 | 5960                                                 | 5,96         |
| Marzo      | 6360                                                 | 6515                                                 | 6,52         |
| Abril      | 5650                                                 | 6205                                                 | 6,21         |
| Mayo       | 5180                                                 | 6100                                                 | 6,10         |
| Junio      | 4670                                                 | 5610                                                 | 5,61         |
| Julio      | 4835                                                 | 5690                                                 | 5,69         |
| Agosto     | 5860                                                 | 6630                                                 | 6,63         |
| Septiembre | 6810                                                 | 7210                                                 | 7,21         |
| Octubre    | 7440                                                 | 7400                                                 | 7,40         |
| Noviembre  | 6700                                                 | 6360                                                 | 6,36         |
| Diciembre  | 6040                                                 | 5630                                                 | 5,63         |
| Año        | 5950                                                 | 6227                                                 | 6,23         |

Tabla 2 Tabla con los valores de irradiación mensual en Kazai, Zimbabue.



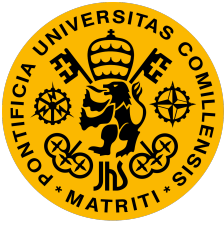
En la tabla podemos observar los distintos valores de irradiación que presenta Kazai a lo largo de un año. En este caso, los valores son del año 2016, y a pesar de que el proyecto se ha llevado a cabo en 2019, los resultados finales no se verán afectados por esta diferencia de 3 años. Se puede apreciar como el mes que presenta la menor irradiación global es enero, con una irradiación global óptima de 5410 Wh/m<sup>2</sup>/día. Al tratarse de la situación mas desfavorable, se utilizará este mes para el dimensionamiento de la placa, y así garantizar el correcto funcionamiento de la misma en el resto de condiciones factibles.

### 2.1.3 Obtención del consumo

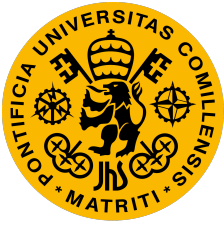
---

Si bien una parte importante de este proyecto es todo el sistema de captación y distribución de agua, los cálculos relativos al mismo están fuera del alcance de este proyecto. Dicho análisis está reflejado en el proyecto de fin de grado de otro alumno de ICAI, Matías Llorente Areses. Al tratarse de un proyecto conjunto, ambos proyectos han sido coordinados y ejecutados simultáneamente durante el verano de 2019, con la colaboración de dos expertos en la materia de la zona, un fontanero y un electricista especializado en sistemas fotovoltaicos.

Sin embargo, fruto de su estudio acerca del agua necesaria para tanto el colegio de agricultura y ganadería, como para instalar un grifo que proporcionara agua para la comunidad aledaña al colegio, derivaron los siguientes resultados:



- El terreno del colegio destinado al cultivo es de aproximadamente 2 hectáreas, y se estima un consumo medio de 2.5 m<sup>3</sup> por hectárea, obteniendo un consumo diario de aproximadamente 5.000 litros (5 m<sup>3</sup>).
- Se estima que el número de personas que reside en la comunidad próxima al colegio es de 120 personas. Estimando un consumo diario de 40 litros de agua por persona, resulta un total de 4.800 litros (4.8 m<sup>3</sup>).
- Se dispone de un tanque un tanque cedido de 5.000 litros. Dado que los tanques disponibles en el mercado local presentan las mismas dimensiones, se procede a comprar un segundo tanque de 5.000 litros.
- Fue necesaria la contratación de una empresa de perforación, y según la misma, el pozo perforado contiene agua desde 3 metros hasta 40 metros de profundidad, cumpliendo con las expectativas de consumo. De todos modos, el informe de dicha empresa apuntaba que se trata de un pozo de regeneración rápida por lo que no presentaría ningún problema en cuanto a escasez de agua.
- El caudal de bombeo viene fijado por la bomba escogida. De este modo, tras hacer un estudio de mercado en Harare, se optó por una bomba que funcionaba con un caudal nominal de 1.2 m<sup>3</sup>/hora, de modo que en condiciones de trabajo óptimas tardaría 8.33 horas en llenar ambos tanques (10.000 litros).
- Sumando la profundidad del pozo (40 metros), la cota del nivel superior de los tanques (5.5 metros) y las pérdidas totales (1.45 metros), aplicando Bernoulli, se estima una altura de bombeo de  $H_{bomba} = 46.95 \text{ metros}$ .



En vista a los resultados anteriores, se procede a calcular la potencia necesaria que debe de tener la bomba. Para el cálculo de la potencia que deben de proporcionar los paneles solares, se ha supuesto un rendimiento del 72% para la bomba.

$$P_u = Q * \rho * g * H_{bomba}$$

$$P_u = 3.33 * 10^{-4} * 998 * 9.81 * 46.95 = 153.22 \text{ W}$$

$$P_{PANELES} = \frac{P_u}{\eta_{bomba}} = \frac{153.22}{0.72} = \mathbf{212.8 \text{ W}}$$

Siendo:

$P_u$  = Potencia útil de la bomba expresada en Watios

$Q$  = Caudal de la bomba expresado en  $m^3/s$

$\rho$  = Densidad del agua ( $998 \text{ kg/m}^3$ )

$H_{bomba}$  = Altura efectiva de bombeo expresada en metros

$P_{PANELES}$  = Potencia suministrada por los paneles expresada en W

$\eta_{bomba}$  = Rendimiento de la bomba

## 2.2 Dimensionado y elección de equipos

Como se ha visto con anterioridad, los sistemas de bombeo solar presentan tres componentes principales: bomba, variador y panel solar. La principal particularidad de este tipo de instalaciones es la falta de acumuladores químicos de energía, ya que los tanques de agua situados en altura funcionan como acumulador de energía (potencial).

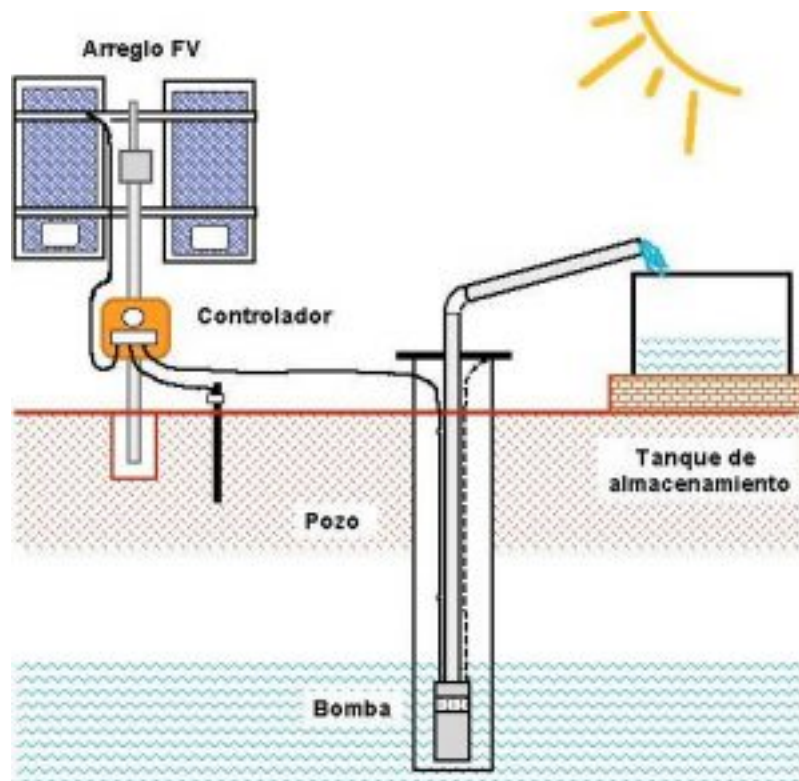


Ilustración 17 Esquema de una instalación de bombeo solar. Fuente: Google images

En este apartado se presentan los distintos equipos necesarios para el correcto funcionamiento de la instalación, y las correspondientes tomas de decisión para desempeñar correctamente su función en este proyecto.



### 2.2.1 Bomba

---

Es propio de los sistemas de bombeo solar el uso de motobombas, de modo que el motor y la bomba aparecen integrados en un mismo aparato.

Existen dos posibles tipos de motobombas para este tipo de instalaciones: motobombas de inducción y motobombas de corriente continua.

Las bombas accionadas por motores de corriente alterna presentan mejores rendimientos para potencias superiores a los 3 CV. Sin embargo, es necesario el uso adicional de un inversor para convertir la señal de corriente continua proveniente de los paneles solares a corriente alterna. Como nuestro sistema de bombeo necesita una potencia de aproximadamente 0.5 CV, este tipo de accionamiento no sería el aconsejable en nuestro caso, ya que prima ante todo el criterio económico, y el inversor supondría un gasto adicional innecesario.

Las bombas que trabajan en corriente continua, gracias a su arranque progresivo y suave, presentan un desgaste de piezas menor que las bombas de alterna. Esto se ajusta a las condiciones de trabajo de nuestro sistema, ya que según la potencia solar que recibamos, la bomba podrá trabajar de manera gradual acorde a la misma. Estas bombas requieren de un regulador de carga que optimice el rendimiento de la bomba y regule el voltaje generado por los paneles para maximizar su punto de máxima potencia.

En nuestro caso, como se ha calculado anteriormente, la potencia necesaria de la bomba es de 212.5 W. De este modo, tras un estudio del mercado local de bombas, se optó por una bomba de 210 W de corriente continua a una tensión nominal de 36 V. La bomba venía en conjunto con un regulador de carga MPPT y dos sensores que permiten

controlar los niveles tanto del pozo como de los tanques, cuyo funcionamiento detallado se explica en el siguiente epígrafe. Como se ha mencionado antes, se trata de un producto adquirido en el mercado local, favoreciendo de este modo la economía de la zona.



Ilustración 18 Pack de bombeo solar. Fuente: propia.



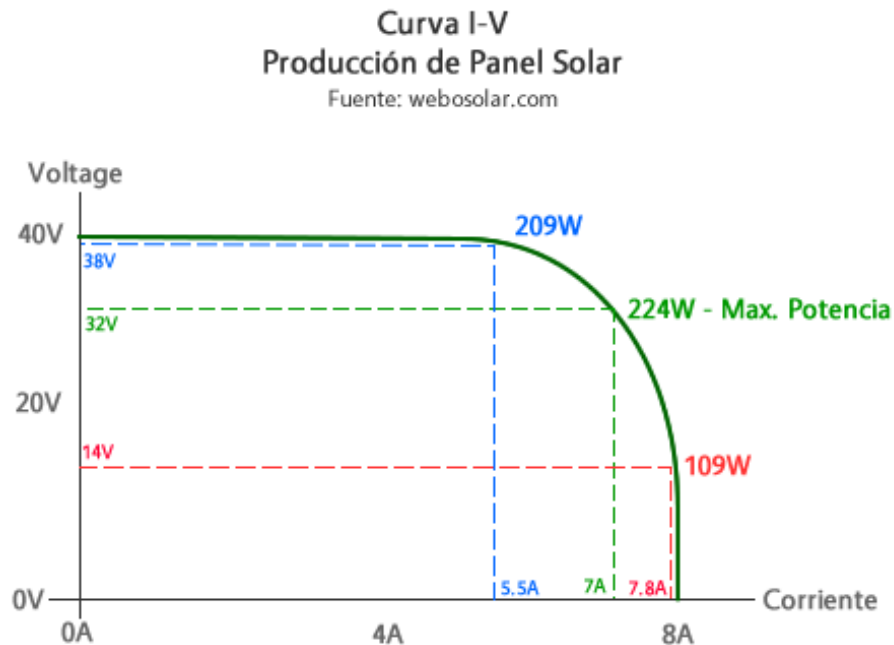
### 2.2.2 Regulador de carga

---

Como su propio nombre indica, un regulador o controlador de carga es un equipo cuya función es controlar el paso de corriente desde los paneles solares a la motobomba. Es el encargado de evitar sobrecargas en la bomba y de limitar su tensión de entrada a los valores máximos y mínimos que permitan su correcto funcionamiento.

De este modo, se podría sintetizar el regulador como un interruptor conectado en serie entre los paneles y la carga, que permanecerá cerrado cuando los valores de intensidad y tensión sean los adecuados, y se abrirá cuando estos sobrepasen sus límites.

Hoy en día, la mayoría de los reguladores de carga utilizados para instalaciones de bombeo solar, presentan la tecnología MPPT, por sus siglas en inglés Maximum Power Point Tracking, o seguidor de punto de máxima potencia. Estos controladores aprovechan el hecho de que la potencia es el producto del voltaje y la intensidad, de modo que siempre buscarán el balance entre ambos para que la potencia resultante sea la máxima. En una curva típica de producción de un panel solar, el punto de máxima potencia se encuentra en la esquina superior derecha de la curva, como se puede observar en la Ilustración 19. El controlador de carga con MPPT se va a cerciorar que los paneles operen lo mas cerca posible de este punto. [4]



**Ilustración 19** Curva I-V de producción de un panel solar. Fuente: websolar.com

Un regulador MPPT rastrea el punto de máxima potencia que por lo general, en casi todas las ocasiones, será diferente de las condiciones de prueba estándar. Por ejemplo, en condiciones muy frías, un panel de 200W sería capaz de generar más de 200W debido a que la potencia que genera el panel es inversamente proporcional a la temperatura del mismo. Sin embargo, si no eres capaz de rastrear ese punto de potencia, ese incremento de potencia será desaprovechado. En el caso contrario, en condiciones de mucho calor perderemos potencia debido a la elevada temperatura del panel, lo que supone menores ganancias de potencia en los meses más calurosos. [5]

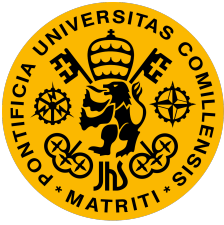
Por otro lado, también es necesario controlar los niveles de agua tanto del pozo como de los depósitos. De este modo, si el pozo no tiene agua, la bomba no arrancará, y por otro lado, si los depósitos están llenos, no es necesario seguir bombeando agua. Esto se consigue a través de dos sensores, uno en la menor cota del pozo, y otro en la cota más alta del depósito.

Ambos sensores van conectados al regulador, de modo que cuando se de alguna de las dos situaciones expuestas en el párrafo anterior, el regulador desconectará automáticamente la bomba.

En nuestro caso, como se ha indicado anteriormente, tanto el regulador como los dos sensores utilizados para la instalación vienen incluidos en el pack de bombeo solar junto con la bomba.



**Ilustración 20. Contenido del pack de bombeo solar (Sensores, regulador de carga y bomba).**  
Fuente: propia



### 2.2.3 Módulos Fotovoltaicos

---

La función de los módulos fotovoltaicos es suministrar la potencia eléctrica a la instalación a partir de la energía solar. Prácticamente la totalidad de los paneles utilizados para este tipo de instalaciones están fabricados de células de Silicio, distinguiendo entre Silicio Monocristalino o Policristalino, según el proceso de transformación del material. La siguiente tabla muestra algunas de las principales diferencias entre ambas tecnologías de construcción de paneles:

| Silicio Monocristalino               | Silicio Policristalino      |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| Utilizado desde hace décadas         | Descubrimiento más reciente |
| Lentitud absorbiendo calor           | Rapidez absorbiendo calor   |
| Alto coste energético de fabricación | Fabricación más económica   |
| Fabricación lenta                    | Fabricación rápida          |
| Más eficiente                        | Menos eficiente             |

Tabla 3 Silicio Monocristalino VS Policristalino

Las placas solares monocristalinas son recomendables en instalaciones con climas fríos de cielos poco claros, ya que este tipo de tecnología presenta un mayor índice de absorción de radiación solar y soporta peor el sobrecalentamiento. Por otro lado, las placas solares policristalinas son recomendables en instalaciones con climas mas cálidos puesto que absorben el calor con mayor rapidez y aguantan mejor el sobrecalentamiento. [6]

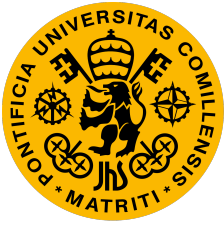


Ilustración 21 Izq: Monocrystalina. Dcha: Policristalina. Fuente: Jardín Solar

En definitiva, dado que en nuestro proyecto prima el criterio económico y puesto que se trata de una localización con clima cálido la mayor parte del año, se opta por el uso de **placas solares policristalinas**.

Según hemos calculado antes, el consumo energético de la bomba, obtenido en función del caudal suministrado y de la altura de descarga, resultó de 212.8 W.

Como nuestra bomba va a estar funcionando una media de 7 horas diarias, finalmente el consumo energético diario estimado ( $C_{ed}$ ) será de 1489.6 Wh.



Para el cálculo del número de paneles necesarios que satisfagan la demanda prevista, empleamos la siguiente expresión:

$$N_{mod} = \frac{C_{ed}}{P_{MP} * HSP_{crit} * PR} = 2.677 \approx 3$$

Siendo:

$C_{ed}$ : consumo estimado diario de energía en W\*h

$P_{MP}$ : Potencia pico del panel fotovoltaico en W

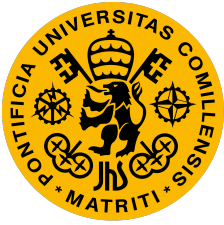
$HSP_{crit}$ : Valor de las horas de sol pico del mes crítico

$PR$ : 'PerformanceRatio' de la instalación, en nuestro caso de 85.7%, calculado a continuación

### Cálculo del 'Performance Ratio'

Este coeficiente expresa el rendimiento energético de la instalación, teniendo en cuenta diversas pérdidas originadas en el sistema. Según la el Manual de Instalaciones Solares de Ingemecánica [9], podemos distinguir las siguientes pérdidas:

- *Pérdidas por dispersión de potencia de los módulos ( $\%P_{MAX}$ )*: Según se puede consultar en la ficha técnica de los paneles solares elegidos, la tolerancia de potencia máxima es de un **3%**.



- *Pérdidas por variación de temperatura de las células fotovoltaicas ( $P_T$ ):* El rendimiento de los paneles solares se ve reducido al aumentar la temperatura de los mismos. Por eso resulta de vital importancia que estén situados en un espacio que permita su ventilación. Sin embargo, dicho incremento de temperatura se produce en mayor o menor medida en la superficie de los paneles. El cálculo del factor que considera las pérdidas por dicha variación de temperatura se expresa mediante la siguiente relación:

$$P_T = K_T * (T_C - 25^\circ C)$$

Siendo:

$P_T$ : Pérdidas por incremento de temperatura en %

$K_T$ : coeficiente de temperatura, dado por el fabricante, en nuestro caso  $0.0041^\circ C^{-1}$ .

$T_C$ : Temperatura media mensual, calculada generalmente con la siguiente expresión, donde  $T_{amb}$  es la temperatura media de Kazai ( $28^\circ C$ ),  $T_{opN}$  es la temperatura nominal de operación, dada por el fabricante,  $30^\circ C$  en nuestro caso, y  $H$  es la irradiación media,  $619 W/m^2$ .

$$T_C = T_{amb} + (T_{opN} - 20^\circ C) * \frac{H}{800} = 35.74^\circ C$$

$$P_T = K_T * (T_C - 25^\circ C) = 0.429 = 4.3\%$$

De este modo, el factor de pérdidas por incremento de temperatura resulta ser de un **4.3%**.



- *Pérdidas por acumulación de suciedad en las células fotovoltaicas ( $P_s$ ):*  
Si se realiza un mantenimiento adecuado de la instalación, siguiendo las pautas descritas en el apartado de 'Mantenimiento de los paneles fotovoltaicos', este factor de pérdidas no debería resultar superior al 3%.
- *Pérdidas eléctricas:* Según el pliego de condiciones técnicas del Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía (IDEA), la caída de tensión máxima es de 1.5% en el tramo de instalación que funcione en corriente continua, de modo que nuestro porcentaje de pérdidas eléctricas adopta este valor (1.5%), al tratarse de una instalación que funciona en su totalidad con corriente continua.
- *Pérdidas por reflectancia:* Según la estimación del Instituto de Ginebra, estas pérdidas se consideran un 3.5%, y se generan debido a los efectos angulares de la reflexión en los paneles.
- *Pérdidas por degradación:* Este porcentaje de pérdidas se debe al desgaste natural de los paneles debido a las condiciones meteorológicas y a su exposición permanente a la radiación solar. Suele rondar en torno al 2%.

De este modo, sumando todas las pérdidas expuestas anteriormente, podemos obtener el valor del *Performance Ratio*, que refleja la eficiencia de la instalación en condiciones reales de funcionamiento:

$$PR = 100\% - 3\% - 4.3\% - 1.5\% - 3.5\% - 2\% = \mathbf{85.7\%}$$



De este modo, se instalarán **3 módulos** fotovoltaicos del tipo MÓDULO POLICRISTALINO EX-120. Cabe mencionar que los cálculos eléctricos se han realizado con dicho módulo de la marca EXIOM, a pesar de que en la ejecución real, se compraron módulos de otra marca pero de idénticas características.

Se dispondrán los tres módulos conectados en serie, ya que la tensión nominal de cada módulo es de 12V, y nuestra bomba trabaja a una tensión nominal de 36V.

## 2.3 Estudio del cableado

---

Al tratarse de un proyecto ejecutado en Zimbabwe, las instalaciones eléctricas deberán cumplir el reglamento del país. Sin embargo, calcularemos el diseño del cableado según el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión de España. Según dicho reglamento, para el cálculo de la sección de cualquier conductor eléctrico, se deben de cumplir las siguientes tres condiciones:

1. Criterio Térmico: La temperatura del conductor del cable no deberá superar en ningún momento la temperatura máxima admisible asignada de los materiales aislantes del cable. Esta condición también se conoce como criterio de la intensidad máxima admisible.
2. Criterio de la caída de tensión: Debido a la circulación de corriente a través de los conductores, se produce una caída de tensión entre el inicio y el final del conductor. Esta caída de tensión debe de ser inferior a los límites marcados por el reglamento.



3. Criterio de la intensidad de cortocircuito: Cuando se da un cortocircuito, el cable puede alcanzar temperaturas muy elevadas debido a la elevada corriente. Esta temperatura no debe de sobrepasar la máxima admisible por los materiales utilizados para el aislamiento del conductor. Este criterio es determinante en instalaciones de media y de alta tensión, pero no lo es en instalaciones de baja tensión, de modo que no se analizará en este caso, al resultar suficientes los dos criterios anteriores.

En nuestra instalación, podemos distinguir dos tramos. El primer tramo de cableado comprende desde los paneles solares hasta el regulador de carga, estando el mismo a la intemperie. El segundo tramo tendrá la peculiaridad de ser sumergible, ya que conectará el regulador con la bomba.

#### ➤ Tramo Panel-Regulador

El tramo de la instalación que conecta los paneles solares con el regulador estará situado a la intemperie, de modo que se opta por la utilización de un cable tipo PV ZZ-F de cobre. Este tipo de cables son comúnmente utilizados en instalaciones solares debido a su gran resistencia a fenómenos atmosféricos como la lluvia o a la constante radiación solar. Se dispondrá de dos cables unipolares, conectando ambos polos positivos y negativos. Los cables serán no propagadores del incendio y con emisión de humos y opacidad reducida. [8]



**Ilustración 22 Cable Solar PV ZZ (Fuente: Top Cable)**

Para el cálculo de la sección, utilizaremos la fórmula general siguiente:

$$S = \frac{2 * P * L}{\gamma * e * U}$$

Siendo:

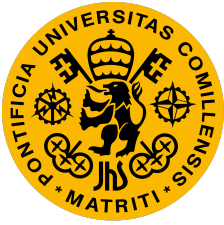
$L$ : Longitud del cable en metros

$P$ : Potencia prevista en Watios

$\gamma$ : Resistividad del cable (Cobre a 90 °C = 44 m/Ωmm<sup>2</sup>)

$e$ : caída de tensión en voltios

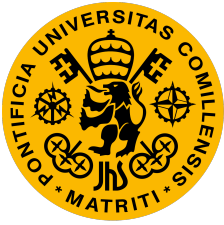
$U$ : tensión nominal en voltios



De este modo, siendo la longitud del cable de 2 metros, una potencia solar instalada de 360W (Superior a la demandada, pero en este caso sobredimensionar el cable resulta beneficiario por si en un futuro instalamos mas cargas), una caída de tensión del 1%, (0.36V), obtenemos una sección de  $2.53\text{mm}^2$ . Elegimos la sección inmediatamente superior en la lista de secciones comercializadas, que podemos observar en la Tabla 4, que corresponde a una sección de **10 mm<sup>2</sup>**.

| COBRE | $\text{mm}^2$ |
|-------|---------------|
|       | 1.5           |
|       | 2.5           |
|       | 4             |
|       | 6             |
|       | 10            |
|       | 16            |
|       | 25            |
|       | 35            |
|       | 50            |
|       | 70            |
|       | 95            |
|       | 120           |

Tabla 4 Secciones comerciales de cobre. Fuente: REBT



Comprobamos que la caída de tensión no sea superior al 1.5% de la tensión nominal con esta sección (0.54V).

$$e = \frac{2 * P * L}{S * U * \gamma} = 0.09V < 0.54V$$

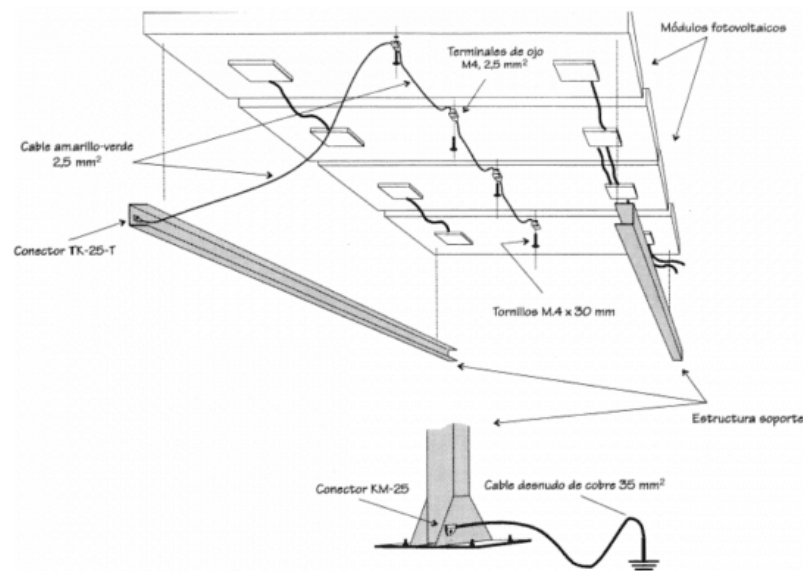
En vista de los resultados obtenidos, comprobamos que el cable PV ZZ-F de cobre con sección de  $10 \text{ mm}^2$  cumple los criterios requeridos.

### ➤ Tramo Regulador- Bomba

A la hora de dimensionar este tramo, tenemos que tener en cuenta que se trata de una distancia de 50 metros, y que el mismo tiene que ser sumergible. El procedimiento resultaría idéntico al tramo previo. En el mercado de Zimbabwe, el técnico en instalaciones solares que colaboró con la instalación, propuso un mismo cable para ambos tramos y así reducir el coste, de modo que se optó por utilizar cable sumergible para los dos metros del tramo anterior.

## 2.4 Puesta a Tierra de la Instalación

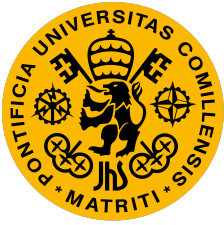
Según José Alfonso Alonso Lorenzo, experto en Solar Fotovoltaica por el CIEMAT, la puesta a tierra de instalaciones con placas solares genera una gran controversia debido a la ausencia de una reglamentación técnica específica para este tipo de instalaciones, quedando al criterio y buena práctica del instalador. [9]



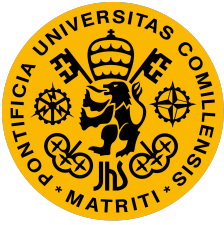
**Ilustración 23 Esquema de puesta a tierra de instalacion fotovoltaica. Fuente: SunFields**

Hay una serie de detalles que el instalador debe de tener presentes a la hora de diseñar la puesta a tierra de la instalación:

- La toma de tierra se realizará a través de un orificio que presentan la mayoría de los módulos solares, pensado para esta función y comúnmente señalizado con el símbolo de tierra.



- La parte metálica de los paneles solares suele estar tratada superficialmente con aluminio anodizado, comportándose como un aislante fiable, de modo que conectar a tierra cualquier parte que no sea el orificio señalado anteriormente no es recomendable. No obstante, todo el marco metálico de la instalación, a pesar del tratamiento superficial, se considerará parte metálica expuesta.
- Es recomendable conectar la estructura a los conductores de puesta a tierra de los paneles, y posteriormente conectar ambos al electrodo principal de tierra.
- La instalación debe de estar conectada a tierra en un único punto, que generalmente será de tipo pica. De manera resumida, habrá que conectar todas las tierras para posteriormente conectarlas a la pica general.



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)

Ignacio Moldenhauer

## 3 EJECUCIÓN Y MANTENIMIENTO

---

### 3.1 Ejecución

---

Más allá de la parte teórica de la instalación, la parte ejecutiva del mismo cobra especial importancia. Al tratarse de una localidad tan remota, tener claros los pasos a seguir con antelación es crucial.

Este proyecto fue ejecutado simultáneamente junto a la construcción del colegio, coordinado por Alberto Mascareñas Brito, y a la instalación del sistema de tuberías acordes a la captación, almacenamiento y distribución del agua del pozo, coordinado por Matías Llorente Areses. La coordinación resultó fundamental, ya que, a la hora de la verdad, funcionamos como un solo agente encargado del proyecto global. Contábamos con un amplio grupo de trabajadores locales, que gracias a su esfuerzo y dedicación lograríamos con éxito nuestros objetivos.



Ilustración 24 Trabajadores locales. Fuente: propia

En primer lugar, hubo una gran controversia para elegir la localización exacta del colegio. Resultó que las tierras cedidas por el gobierno para este proyecto, estaban siendo utilizadas por unas personas sin permiso, de modo que tras varias deliberaciones, se llegó a un mutuo acuerdo entre las dos partes. La localización elegida, contaba con un pozo de poca profundidad, que serviría de manera provisional para abastecer el agua necesaria para hacer el cemento del edificio en las primeras etapas, ya que posteriormente se procedería a la perforación del pozo definitivo. En la siguiente imagen, se aprecian las primeras etapas de la construcción del edificio.



Ilustración 25 Primeras etapas de construcción. Fuente: propia.

Se hizo un estudio exhaustivo de las empresas especializadas en perforaciones de pozos, tratando de buscar la mejor oferta. La mayor parte del presupuesto iría destinado a esta tarea, ya que debido a la remota localización, llevar la máquina perforadora hasta el lugar sería muy costoso. Además de este pozo, otros dos compañeros de la escuela estaban llevando a cabo el abastecimiento de agua para un Colegio de Primaria cercano, de modo que tratamos de buscar la empresa que nos hiciera los dos pozos al mejor precio. Se trataba de una tarea muy arriesgada para nosotros, ya que estas empresas cobran por adelantado, de modo que si al perforar no se encuentra agua, o el acuífero es pequeño, perdíamos el dinero. Sin embargo, ambas perforaciones fueron un éxito absoluto, encontrando agua a una profundidad de 45 metros. La felicidad de la comunidad al ver salir las primeras gotas de agua recompensó todo el esfuerzo.



Ilustración 26 Miembros de la comunidad celebrando el éxito de la perforación. Fuente: propia

La máquina encargada de la perforación, a medida que perforaba iba recubriendo las paredes del pozo con tuberías metálicas, de modo que en 3 horas de trabajo, el pozo estaría listo para ser explotado.

La instalación de los paneles solares se demoró unos días, debido a que surgió la posibilidad de ampliar la instalación solar para abastecer la futura ampliación del centro. Finalmente, se decidió mantener lo establecido, y en un futuro se estudiará la instalación de más paneles fotovoltaicos.

El principal problema al que nos enfrentamos a lo largo de la ejecución del proyecto fue la demora de los materiales necesarios, tanto para la construcción del colegio, como para la instalación del sistema de bombeo solar.



Ilustración 27 Llegada del material desde la capital en camión. Fuente: propia

Previo al inicio de la construcción, el equipo de voluntarios estuvo unos días en la capital recorriendo tiendas proveedoras y encargando todos los materiales necesarios, que más tarde serían enviados en un camión al emplazamiento del colegio. Dado que la estancia en Zimbabue de los voluntarios fue de 40 días de media, las demoras por parte de los proveedores hicieron que el tiempo previsto para la finalización del proyecto excediera el tiempo calculado.

La instalación de los paneles solares estuvo supervisada en todo momento por un especialista en la materia, con mucha experiencia previa en este tipo de instalaciones. Esto fue de gran ayuda, ya que el autor del presente TFG conocía muy bien la teoría, pero era la primera vez que ejecutaba una instalación de este estilo en la práctica.



**Ilustración 28 Izq: Instalación Fotovoltaica Instalada. Dcha: Agua extraída del pozo. Fuente: Propia**

Los paneles solares se colocaron sobre una estructura metálica, prefabricada para esta función. Dicha estructura estaba pensada para sujetar más peso del que resultaría con los tres paneles seleccionados, de modo que se garantizaría la seguridad de los mismos. Como se puede ver en la Ilustración 28 Izq: Instalación Fotovoltaica Instalada. Dcha: Agua extraída del pozo. Fuente: Propia, los paneles están colocados a la intemperie, de modo que se optó por un anclaje al suelo de hormigón.



Ilustración 29 Colegio De Agricultura y Ganadería casi finalizado. Fuente: Propia

## 3.2 Mantenimiento

Los sistemas de bombeo solar se caracterizan por ser sistemas robustos y simples, lo que supone un mantenimiento básico y poco especializado. Si bien es cierto que un buen mantenimiento de la instalación repercutirá en una mayor vida útil de la misma. Al igual que el cálculo del sistema de tuberías y depósitos, el mantenimiento de los mismos no es objeto de estudio del presente proyecto. Dicho estudio viene detallado en el Proyecto de Fin de Grado del alumno Matías Llorente Areses, encargado del sistema de captación y distribución de agua.

Podemos distinguir dos agentes en cuando al mantenimiento de la instalación: el primero, sin necesidad de tener conocimientos eléctricos, será alguien cercano a la instalación, y su labor será determinante. El segundo, debe de ser alguien especializado en la materia, que conozca perfectamente el funcionamiento de la instalación, y que sea capaz de comprobar que todos los equipos funcionan correctamente, y en caso de que algo falle, saber localizar el foco del problema. La siguiente tabla muestra los requisitos de mantenimiento necesarios para garantizar el correcto funcionamiento de la instalación y con que frecuencia se deben de realizar:

|                            | Semanalmente, por persona no cualificada                     | Semestralmente, por técnico especializado                                                     |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Módulo Fotovoltaico</b> | Limpieza e inspección visual en busca de grietas o corrosión | Comprobar conexiones eléctricas y medida de valores de tensión e intensidad del panel.        |
| <b>Regulador</b>           |                                                              | Comprobar las conexiones eléctricas y medida de valores de tensión a la salida del regulador. |

Tabla 5 Mantenimiento de la Instalación. Fuente: Fundación ICAI para el desarrollo.

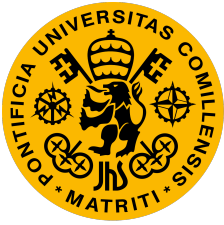
### 3.2.1 Mantenimiento de los módulos fotovoltaicos

El usuario deberá seguir los siguientes pasos para garantizar el correcto funcionamiento de los módulos:

- Limpieza de los módulos aconsejablemente todas las mañanas, y si no es posible, una vez a la semana como mínimo. Evitar el uso de jabones.
- Asegurar la rigidez de la estructura, y comprobar que el ángulo de inclinación es el adecuado.
- Comprobar la uniformidad del panel, buscando posibles grietas o corrosión entre las células.
- Comprobar el correcto conexionado de los cables.



Ilustración 30 Paneles limpios vs Paneles sucios. Fuente: Generatuluz



### 3.2.2 Mantenimiento del regulador

---

Las tareas de mantenimiento del regulador serán llevadas a cabo por un técnico especializado ya que se trata de un componente electrónico muy delicado. Sin embargo, al tratarse de un elemento electrónico en sus totalidad, no precisa prácticamente de mantenimiento alguno. Únicamente se deberá de comprobar su conexionado cada seis meses. [10]



## 4 MARCO ECONÓMICO

---

En este capítulo se va a estudiar la rentabilidad y la fiabilidad de este proyecto. Al tratarse de un proyecto de carácter solidario y carecer de inversión inicial por parte de la comunidad donde se ha instalado el colegio, se puede garantizar que se trata de un proyecto 100% rentable. En adición, el objetivo de la construcción del colegio de agricultura y ganadería es dotar a las generaciones futuras de una serie de herramientas que les reporten, en última instancia, un beneficio económico, a través de impulsar la optimización de las técnicas agrícolas rudimentarias y, en la medida de lo posible, dotándolos de nuevas técnicas que faciliten su desarrollo.

De este modo, al tratarse de un proyecto puramente benéfico, la financiación de la totalidad del proyecto ha sido social. Bajo el nombre de "Project Zimbabwe", el autor del presente documento junto a otros estudiantes de ICAI y bajo la supervisión y coordinación de Miren Tellería, tutora del presente proyecto, han trabajado durante el año previo a la puesta en marcha del proyecto en la financiación del mismo. A lo largo de dicho año, se han recaudado en torno a 30.000 € que harán posible la ejecución de todos los proyectos planteados. Esta recaudación se ha llevado a cabo mediante la organización de distintos eventos y con donaciones individuales y de empresas. A continuación se muestran algunas de las actividades llevadas a cabo:

- Fiesta Benéfica: Se organizó un evento en la Discoteca B12, en el que hubo actuaciones en directo de distintos grupos musicales. Se vendieron un total de 330 entradas, sumado a un porcentaje de lo recaudado en consumiciones por el local, la suma total recaudada en este evento fue de 3129,63€.



Ilustración 31 Flyers de la fiesta benéfica. Fuente: Propia

- Mercadillo Solidario: Se organizaron un total de dos mercadillos, en los cuales los distintos integrantes del proyecto se encargaron de recolectar todo tipo de artículos, para su posterior venta. El primero se llevó a cabo en el garaje de Carlos Ruiz, cooperante de la organización y alumno de ICAI. El segundo tuvo lugar en una sala con acceso directo a la vía pública, facilitada por la Parroquia Santísimo Redentor. El total recaudado en ambos mercadillos fue de 4500€.

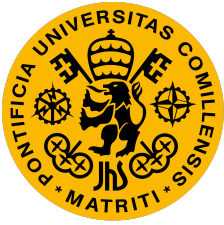
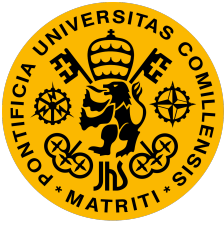


Ilustración 32 Flyer de promoción del mercadillo. Fuente: Propia

- Merchandising : Se diseñó una línea de productos compuestos por pulseras y camisetas, que facilitó la recaudación. También se vendieron papeletas para el sorteo de dos noches de hotel en cualquier hotel en territorio nacional de la cadena Iberostar.



Ilustración 33 Camisetas, Pulseras y Papeletas de PZ. Fuente: Propia

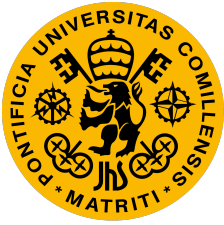


- Donaciones: De la suma total recaudada, un porcentaje predominante se obtuvo a través de donaciones de particulares y empresas. Sin la gran aportación de estas empresas, no hubiera sido posible realizar la totalidad de los proyectos.



Ilustración 34 Empresas Colaboradoras. Fuente: Propia

Por otro lado, al tratarse de un proyecto de cooperación social al desarrollo, el análisis económico debe de estar ligado a un análisis social que cobrará una importancia determinante.



Dada la situación de precariedad y los problemas ligados a la mala gestión de la energía en el país, el principal objetivo del proyecto es dotar al colegio de una fuente de energía aislada que no dependa de decisiones gubernamentales. De este modo, se ha cumplido dicho objetivo buscando una solución sostenible a dicho problema, tratando de alargar su vida útil el máximo posible. Es por ello que se ha tratado de sobredimensionar la instalación como una medida de precaución ante posibles imprevistos, a la vez de cerciorarse de que se dispone de gente próxima a la zona con los conocimientos necesarios para solventar cualquier problema futuro. Dichas medidas de mantenimiento vienen detalladas en el apartado previamente expuesto con título ‘Mantenimiento de la Instalación’.

## 5 FICHAS TÉCNICAS

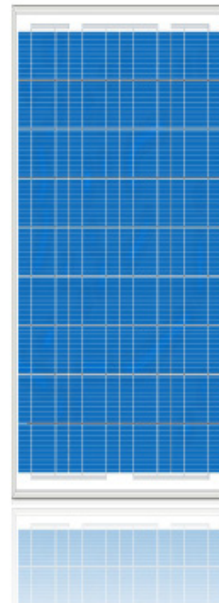


Exiom Solution designs, manufactures and delivers high-performance solar electric technology worldwide. Our high-efficiency solar cell let us manufacture the different kinds of panels to get the most efficient in your installations.

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

polycrystalline modules | módulos policristalinos

### EX-120 P (156\*129)

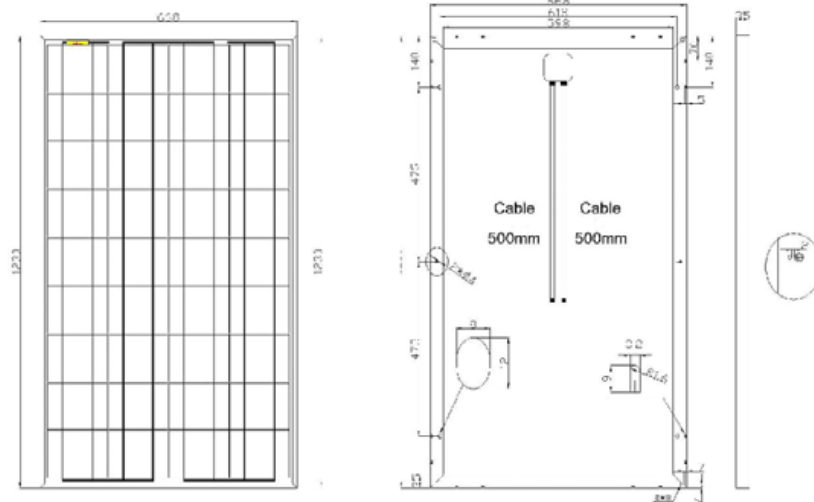


|                                                                                                                                                                           |  |                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------|
| POLYCRYSTALLINE MODULES   MÓDULOS POLICRISTALINOS                                                                                                                         |  | 120 W              |
| Trade Mark                                                                                                                                                                |  | EX-120P            |
| STANDARD TEST CONDITIONS   TEST DE CONDICIONES ESTANDAR: 1000 W/M , AM 1.5, 25°C (STC)                                                                                    |  |                    |
| Maximum Power Voltage, VMP   Máximo voltage, VMP                                                                                                                          |  | 18.45 V            |
| Maximum Power Current, IMP   Tensión máxima actual, IMP                                                                                                                   |  | 6.60 A             |
| Open Circuit Voltage, VOC   Tensión de circuito abierto, VOC                                                                                                              |  | 21.97 V            |
| Short Circuit Current, ISC   Corriente de cortocircuito, ISC                                                                                                              |  | 6.96 A             |
| Maximum Power Tolerance   Tolerancia potencia máxima                                                                                                                      |  | ±3%                |
| Cell Efficiency   Eficiencia Celda                                                                                                                                        |  | 16.90 (%)          |
| Module Efficiency   Eficiencia Módulo                                                                                                                                     |  | 14.90 (%)          |
| NOCT                                                                                                                                                                      |  | 47°C ± 2°C         |
| TEMPERATURE COEFFICIENTS   COEFICIENTES DE TEMPERATURA                                                                                                                    |  |                    |
| Temp. Coefficient of P <sub>MAX</sub>   Coeficiente de temperatura P <sub>MAX</sub>                                                                                       |  | -0.47%/°C          |
| Temp. Coefficient of I <sub>SC</sub>   Coeficiente de temperatura I <sub>SC</sub>                                                                                         |  | +0.04%/°C          |
| Temp. Coefficient of V <sub>OC</sub>   Coeficiente de temperatura V <sub>OC</sub>                                                                                         |  | -0.38%/°C          |
| WARRANTIES   GARANTÍAS                                                                                                                                                    |  |                    |
| Product   Producto                                                                                                                                                        |  | 10 years   10 años |
| Performance: 90% during the first 10 years. Min. 80% during the first 25 years.<br>Rendimiento: 90% durante los primeros 10 años. Mínimo 80% durante los 25 primeros años |  |                    |

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

#### MECHANICAL CHARACTERISTICS | CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

|                                                    |                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cell   Celda                                       | 156 x 129                                                                                                       |
| Nº of cells   Número de celdas                     | 4 x 9 / 32                                                                                                      |
| Dimensions   Dimensiones                           | 1230 x 668 x 35 mm                                                                                              |
| Weight   Peso                                      | 9.7 kg                                                                                                          |
| NBypass Diode Rating(A)                            | 10                                                                                                              |
| Glass, Type and Thickness   Vidrio, tipo y espesor | High Transmis, Low Iron, Tempered Glass 3.2mm<br>Alta transmisión, nivel bajo de hierro, vidrio templado 3,2 mm |
| Mechanical Load   Carga soportada                  | < 5400 Pa                                                                                                       |



This module has an excellent positive power tolerance peaking up to +5 Wp.

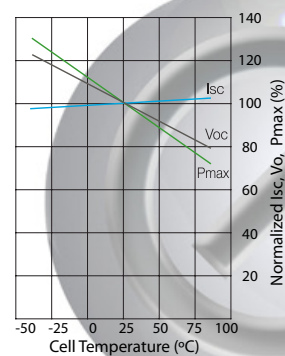
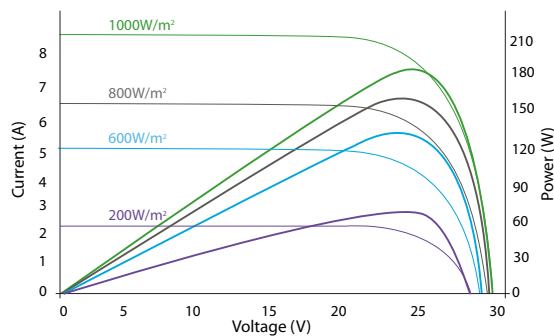
The durable MC4 brand plug connection provides optimum power contact in all weather conditions.

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

Estos módulos tienen una productividad excelente con una tolerancia positiva superando los 5Wp.

La marca de conexiones MC4 es muy duradera y proporciona una potencia óptima en todas las condiciones climatológicas.

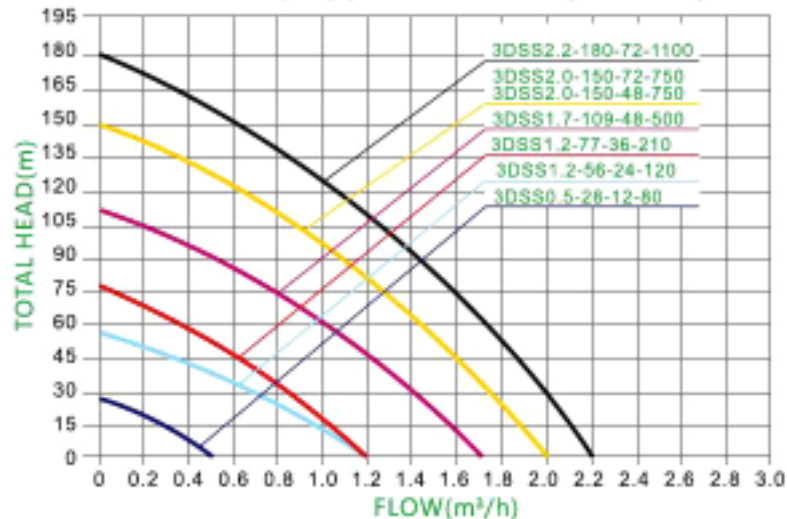
La rigidez y material anticorrosión de nuestros marcos fabricados en aluminio anodizado es compatible con todos los sistemas de montaje disponibles comercialmente.



**Specifications:**

|                                  |                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Basics</b>                    | SKU                                                | ATO-SWP-36V210                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                  | Shipping weight                                    | 15kg                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                                  | Cable length                                       | 2m                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                  | Package included                                   | 1 * Solar water pump with 2m cable<br>1 * DC controller<br>1 * Stainless steel float switch (water level sensor for the tank)<br>1 * Pump outlet joint connector<br>1 * Splice kit for cable join<br>1 * Splice kit for waterproof<br>1 * User manual |
|                                  | Warranty                                           | 2 years                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Solar water pump features</b> | Model                                              | 3DSS1.2-77-36-210                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                  | Voltage                                            | 36V DC                                                                                                                                                                                                                                                |
|                                  | Power                                              | 210W                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                                  | Max. flow                                          | 1.2m <sup>3</sup> /h (317 gph, American system)                                                                                                                                                                                                       |
|                                  | Max. head                                          | 77m (250ft)                                                                                                                                                                                                                                           |
|                                  | Length                                             | 60cm                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                                  | Inlet diameter                                     | 3 inch                                                                                                                                                                                                                                                |
|                                  | Outlet diameter                                    | 0.75 inch                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                  | Screw structure                                    | Stainless steel single screw                                                                                                                                                                                                                          |
|                                  | Internal motor                                     | Brushless DC motor                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                  | Speed                                              | 4000rpm                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                  | Material of shaft                                  | 304 stainless steel                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                  | Material of outlet/connector/oil cylinder          | Stainless steel                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                  | No water protection function                       | The water pump stops working automatically when there is no water in the well, and it will automatically restart working 30 minutes later.                                                                                                            |
|                                  | Required open circuit voltage (VOC) of solar panel | <50V DC                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Controller features</b>       | Required power of solar panel                      | ≥1.3*pump power                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                  | Efficiency                                         | 45%                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                  | Model                                              | DF-36                                                                                                                                                                                                                                                 |
|                                  | Best MPPT voltage range                            | 30-58V DC                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                  | Max. input current                                 | 15A                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                  | Working temperature                                | -15~+60°C (5~140°F)                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                  | Display                                            | LED display can show power, voltage, current and speed value.                                                                                                                                                                                         |
|                                  | Functions                                          | Automatic charging (for battery)<br>Variable frequency<br>Automatic power ON/OFF<br>Soft start<br>High voltage/low voltage/over-current/high temperature protection                                                                                   |
|                                  | Protection class                                   | IP65                                                                                                                                                                                                                                                  |

**210W 36V DC solar water pump performance curves (see red line):**

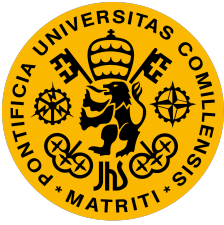




## 6 BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] <http://www.itd.upm.es/iberdrola/lo-que-hay-detras-de-la-falta-de-acceso-a-la-electricidad-en-africa/> .
- [2] <https://www.britannica.com/place/Zimbabwe/Administration-and-social-conditions>.
- [3] «Informe Económico y Social, Oficina Económica y Comercial de España en Johannesburgo Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España,» 2018.
- [4] <https://www.studycountry.com/es/guia-paises/ZW-climate.htm>.
- [5] [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_static/es/intro\\_tools.html](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_static/es/intro_tools.html).
- [6] <https://webosolar.com/foro/controlador-carga-mppt-punto-maxima-potencia/> .
- [7] <https://www.generatuluz.com/tu-propia-instalacion-aislada/reguladores/que-es-un-regulador-solar-mppt/> .
- [8] <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/diferencias-entre-silicio-monocristalino-y-multicristalino-o-policristalino> .
- [9] «Manual de Instalaciones Solares, Ingemecánica».
- [10] <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/calculo-seccion-de-cable-para-paneles-solares/> .
- [11] J. A. A. Lorenzo. <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/puesta-a-tierra-de-instalaciones-con-placas-solares/> .
- [12] [http://calculationsolar.com/pdfs/Calculationsolar\\_regulator\\_ISO FOTO N\\_ISOLER30D151.pdf](http://calculationsolar.com/pdfs/Calculationsolar_regulator_ISO FOTO N_ISOLER30D151.pdf) .



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)

Ignacio Moldenhauer