



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
Especialidad Mecánica

DISEÑO DE KITS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO PARA SITUACIONES DE CRISIS HUMANITARIAS

Autor: Paloma Gómez de Olea Ballester

Director: Hanane Meliani

Madrid

Junio 2018

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

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

El autor D. Paloma Gómez de Olea Ballester DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: *Diseño de kits de bombeo solar fotovoltaico para situaciones de crisis humanitarias*, 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) Reproducirla 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

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.

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:

- Madrid, a 13 de junio de 2018

Fdo.....

--

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Desarrollo de kits de bombeo solar fotovoltaico para
situaciones de crisis humanitarias

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2017/2018 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.: (Nombre del alumno)

Fecha: 06/06/2018

Paloma Gómez de Olea Ballester



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: (Nombre del Director)

Fecha: 06/06/2018

Houane Meliani



[la fabrique]

<http://lafabrique.centralesupelec.fr>





ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
Especialidad Mecánica

DISEÑO DE KITS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO PARA SITUACIONES DE CRISIS HUMANITARIAS

Autor: Paloma Gómez de Olea Ballester

Director: Hanane Meliani

Madrid

Junio 2018

DISEÑO DE KITS DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO PARA SITUACIONES DE CRISIS HUMANITARIAS

Autor: Gómez de Olea Ballester, Paloma.

Directores: Meliani, Hanane.

Entidad Colaboradora: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

El objetivo de este proyecto es diseñar un kit de bombeo solar fotovoltaico portátil para una ONG francesa, Solidarités International. Esta ONG, fundada en 1980, lleva a cabo más de 120 programas de ayuda humanitaria en dieciocho países en el mundo entero. Trabajan en campamentos con entre dos mil y veinte mil personas, a las que proporcionan refugio, comida, y agua.

A Solidarités International le gustaría tener un kit de bombeo portátil, es decir, fácil y rápidamente transportable, además de simple de instalar y de utilizar: un kit que incluyese todos los elementos necesarios para el bombeo solar fotovoltaico que pudiesen utilizar en situaciones de crisis humanitaria para las que se necesitase una actuación inmediata. El kit sería, por lo tanto, una solución a corto plazo, y debe respetar unos límites de peso y tamaño.

Debería incluir la bomba, el(los) panel(es) solar(es), el motor, los elementos de control, un pequeño tanque y todos los accesorios necesarios (como cables, tuberías, etc.). Estos elementos no han de ser diseñados y contruidos, si no que han de seleccionarse entre elementos ya existentes en el mercado, de manera que la ONG sea capaz de reemplazar piezas rápidamente si fuese necesario. La ONG pide privilegiar la calidad al precio, para tener un kit más duradero, aunque preferiría un kit lo menos costoso posible.

El kit debe respetar un cierto número de restricciones en lo que concierne el peso y las dimensiones máximas. No debe contener una batería por exigencias de la ONG, que opina por experiencia que las baterías no son fiables en el terreno. Cada persona necesita un mínimo de 15 L de agua por día.

Como la ONG actúa en países muy distintos, se pretende hacer un primer kit para un caso particular: un campamento de dos mil personas en la región de Borno, en Nigeria. La idea es establecer una metodología para que la ONG pueda rediseñar otro kit para otras condiciones de uso distintas (luz solar, fuente de agua, talla del campamento...).

Metodología

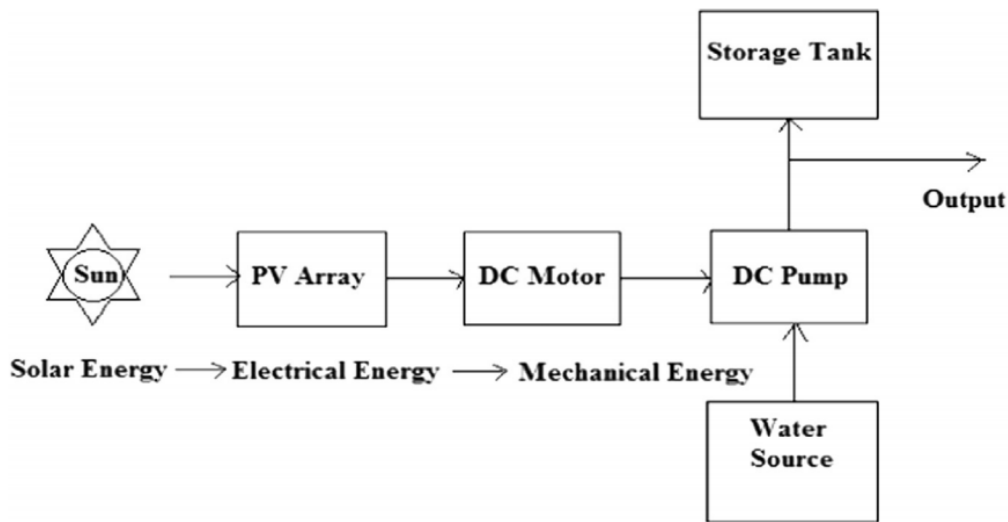


Figura 1: Sistema de bombeo fotovoltaico con motor DC

Fuente: ScienceDirect

Se estudiará pues un sistema cerrado en el que la energía utilizable para bombear provenga únicamente de la luz solar. Para ello, se analizará en un primer lugar el recurso solar, a través de los datos de la NASA. Así, se determinará la energía que el sol podrá proveer a los paneles, utilizando el método de integración numérica trapezoidal con MATLAB. En el caso de Borno, se ha escogido utilizar los datos del mes con menos luz, el mes de agosto, pero también se podría trabajar con una media anual.

Sabiendo que cada persona requiere un mínimo de 15 L de agua por día, y conociendo el número de personas a las que se desea entregar agua, se determina el caudal necesario que debe bombearse cada día, que es de 30 m^3 en el caso estudiado, por lo que, si se bombea durante seis horas, se necesitará un caudal de $5 \text{ m}^3/\text{hora}$.

El siguiente paso es la selección de bombas que puedan conseguir ese caudal (o caudales mayores) en las condiciones de uso (altura de bombeo, fuente de agua, etc.). Se seleccionan distintas bombas disponibles en el mercado y se comparan para escoger la mejor opción. Se ha de calcular la potencia necesaria para bombear el caudal necesario, y verificar que los paneles puedan proveer esa potencia, teniendo en cuenta la luz que reciben del sol y su propio rendimiento. Estos cálculos se realizarán con la ayuda de MATLAB.

Para escoger un panel, es importante tener en cuenta que al variar las condiciones de temperatura, también varía el rendimiento de los paneles. Además, hay que tener en cuenta las características eléctricas (tensión, corriente) del motor, que va con la bomba, y el panel, y asegurarse que el sistema trabaje en las buenas condiciones en todo momento.

Escoger la bomba implica a la vez escoger el motor. En el caso estudiado se privilegian las bombas DC ya que son fáciles de utilizar en sistemas de bombeo fotovoltaico, ya que los paneles solares trabajan en corriente continua.

Es importante incluir en el kit un regulador MPPT para que el sistema trabaje en el punto de máxima potencia. Algunos fabricantes incluyen estos reguladores con las bombas, como Lorentz, pero de no ser el caso, habría que adquirir uno por separado.

A continuación, después de seleccionar los elementos principales (bomba, motor, panel, MPPT) se han de escoger los demás: el tanque y los accesorios. Los criterios para su selección dependen del peso, del precio, la capacidad de agua deseada para el tanque, etc.

Finalmente, se realizará un análisis de los costes de inversión, los costes operacionales y los costes de mantenimiento del proyecto.

Resultados

Aplicando los pasos presentados en la sección anterior, es posible seleccionar los distintos elementos a incluir en el kit de Solidarités International para su uso en la región de Borno, Nigeria.

El estudio de las distintas bombas permite hallar el caudal que cada una puede bombear con la energía proveniente del sol, teniendo en cuenta los distintos rendimientos y especificaciones del proyecto. En las condiciones estudiadas, algunas bombas no alcanzan un caudal suficiente, otras superan sus límites de potencia, y otras se adaptan al caso.

Los elementos seleccionados para el kit son, pues, la bomba PS2-600 C-SJ5-8 de Lorentz, junto con su MPPT integrado; dos paneles VBHN330SJ47 de Panasonic, una *bladder* (pequeño tanque elástico) de 10 m³ de Oxfam, así como tuberías y mangueras de Oxfam. Estos elementos tendrían un coste de 3938.69€. El peso total sería de 248.8 kg.

Los costes de inversión serían de mínimo 4030.84€. Los costes operacionales y de mantenimiento serían de 13 970.00€ para un uso de veinticinco años (por lo tanto, de 533.98€ al año durante ese período). El proyecto supondría un coste de al menos 18 000.84€, sin contar el transporte en avión del kit ni el arancel de aduanas de Nigeria, que habrán de incluirse en el coste final.

Conclusiones

Se ha visto, por lo tanto, que se pueden escoger distintas opciones para el kit. Se ha hecho una selección final, pero Solidarités International siempre puede elegir otra opción si la encontraran más conveniente.

Este estudio se ha centrado en un caso específico, el del kit para la región de Borno, en Nigeria. Sin embargo, como se ha mencionado al principio, Solidarités International

trabaja en dieciocho países. En cada uno de estos países cambia la radiación solar, las condiciones de bombeo, el clima, el número de personas en los campamentos, etc., por lo que el kit escogido no tiene por qué adaptarse a todos los casos. La ONG debe ser capaz de volver a dimensionar otros kits para otros casos de uso diferentes, siguiendo la misma metodología.

Algunos fabricantes, como Grundfos, proponen kits que incluyen paneles y bombas. Podrían ser opciones interesantes para la ONG en el futuro, ya que así solamente dependerían de un fabricante, y podrían establecer colaboraciones para disminuir los costes.

Además de la selección de los elementos constituyentes del kit real, se ha realizado una pequeña maqueta de un kit de bombeo solar fotovoltaico para la ONG. El objetivo de esta maqueta es poder utilizarla en formaciones internas y presentaciones.

Referencias

[BEFO15] Be Forward. African Utility. A look at the most continent's best selling trucks. 2015. <https://blog.beforward.jp/car-comparison/best-selling-pickup-trucks-africa.html>

[ARGA03] N. Argaw, R. Foster, and A. Ellis. Renewable energy for water pumping applications in rural villages. National Renewable Energy Laboratory. 2003. 117 p. NSN 7540-01-280-5500

[BARL93] Roy Barlow, Bernard McNelis, Anthony Derrick. Solar Pumping. An Introduction and Update on the Technology, Performance, Costs and Economics. 1993. World Bank 168. pp.91-113.

[CAMP12] Pietro Elia Campana, Hailong Li, Jinyue Yan. Dynamic modelling of a PV pumping system with special consideration on water demand. ScienceDirect. Elsevier. 2012. pp.635-645. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.073>

[CHAN15] S.S. Chandel, M. Nagaraju Naik, Rahul Chandel. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. ScienceDirect. Elsevier. 2015. pp. 1085-1098. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>

[CHAU13] Jacques Chaurette. Pump Fundamentals. <http://www.pumpfundamentals.com/index.htm>

[GLOB18] Global Petrol Prices. Petrol Price in Nigeria. 2018. https://www.globalpetrolprices.com/Nigeria/gasoline_prices/

[GRUN18] Grundfos. Grundfos Product Center. <https://www.grundfos.com/>

[HAMI08] A. Hamidat, B. Benyoucef. Systematic procedures for sizing photovoltaic water systems, using water tank storage. ScienceDirect. Elsevier. 2008. pp.1489-1500. doi:10.1016/j.enpol.2008.12.014

[KHAT10] Tamer Khatib. Design of Photovoltaic Water Pumping Systems at Minimum Cost for Palestine: A Review. Journal of Applied Sciences. 2010. pp. 2773-2777

[LORE18] Lorentz. Produits et Technologie. <https://www.lorentz.de/fr/>

[MATA03] Claudio Mataix. Turbomáquinas Hidráulicas. Editorial ICAI. 2003.

[NASA18] NASA Atmospheric Science Data Center. NASA Surface meteorology and Solar Energy - Available Tables. 2018. <https://eosweb.larc.nasa.gov/>

[OSHE14] Michael O'Shea. Backpack Weight and the Scaling of the Human Frame. The Physics Teacher. 2014. <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.4897584>

[OSSI18] Ossila. Solar Cells Theory. <https://www.ossila.com/pages/solar-cells-theory>

[OXFA15] Oxfam. Oxfam Supply Centre Equipment Catalogue. 2015.

[PVED16] Average solar radiation. [pv.education.org](https://www.pveducation.org/pvcdrom/average-solar-radiation)
<https://www.pveducation.org/pvcdrom/average-solar-radiation>
Effect of Temperature <https://www.pveducation.org/pvcdrom/effect-of-temperature>

[SOLA18] Solaris Store. Information on Solar Panels. <https://www.solaris-store.com/>

[TOYO18] Toyota Store. Information on Toyota Hilux. <https://www.toyota.fr/new-cars/hilux/index.json>

[TROY15] Jean Yves Troy et al. Annual report Solidarités International 2015

DEVELOPMENT OF PHOTOVOLTAIC WATER PUMPING KITS FOR HUMANITARIAN AID

Author: Gómez de Olea Ballester, Paloma.

Directors Meliani, Hanane.

Collaborating Entity: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

PROJECT OVERVIEW

Introduction

The objective of this project is the design of a portable photovoltaic water pumping system for a French NGO, Solidarités International. This NGO, founded in 1980, carries out more than 120 humanitarian aid programs in eighteen countries around the world. They work in camps with between two thousand and two hundred thousand people, for whom they provide shelter, food and water.

Solidarités International would like to have a portable photovoltaic water pumping kit, that is, easy to transport quickly, as well as easy to install and to use: a kit that would include all the necessary elements to pump water in crisis situations. This kit would be a short-term solution for humanitarian aid programs. The kit should respect a number of constraints concerning its weight and dimensions.

The kit should include the pump, the solar panel(s), the control elements, the motor, a small tank, and all the necessary accessories (such as wires, pipes, etc.). These elements should not be created from scratch but selected among those present in the market, so the NGO could have the opportunity to quickly replace an item were it damaged. The NGO favours quality rather than money, to have a kit that would last them for a long time, but they would also appreciate an affordable kit.

There are certain constraints concerning the weight and the dimensions to be taken into account for the design. The NGO specifically asks that the kit should not include a battery. Each person requires at least 15L of water per day.

As the NGO operates in various countries, the idea is to develop a first kit for a specific use case: a camp of two thousand people in the region of Borno, in Nigeria; and then give the NGO a methodology they could apply to redesign other kits for other regions with different specifications (solar radiation, water sources, size of the camps...).

Methodology

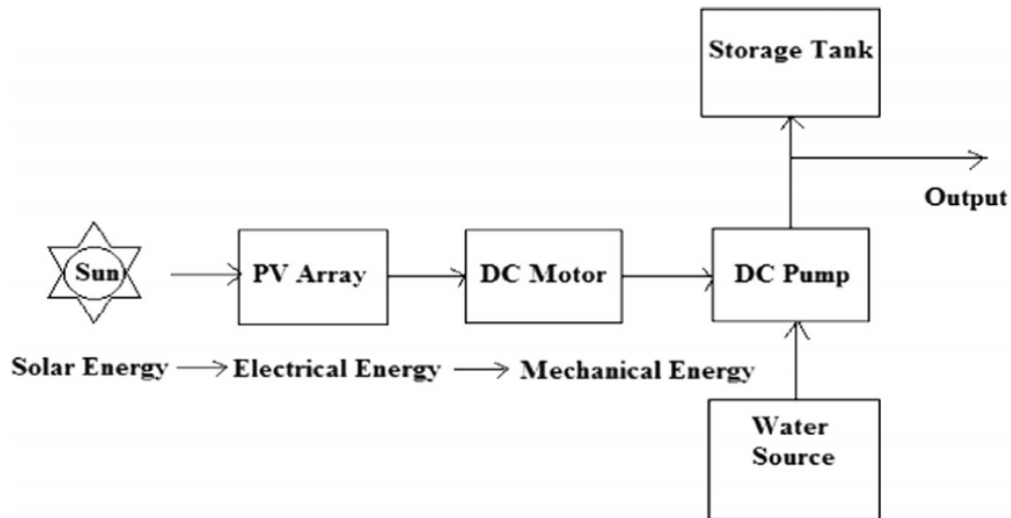


Figure 1: Photovoltaic pumping system with DC motor

Source: ScienceDirect

The study will focus on a closed system in which the available energy that the pump will use will be provided only by the sun. To that purpose, the solar data provided by NASA will be studied. The energy available from the sun, and that the panels will receive, will be calculated with MATLAB's trapezoidal integration method. In the case of the region of Borno, the data used will be that of the month of August (the month with the least radiation), but it would also be possible to size the system using the mean value of yearly irradiation.

Knowing that each person requires a minimum of 15 L of water per day, and knowing the number of people in the camp, it is possible to determine the needed flow rate per day, which is, in this case, 30 m^3 . This means that for a system, which works during six hours per day, the needed flow rate would be of $5 \text{ m}^3/\text{hour}$.

The next step is the selection of pumps that could obtain that flow rate (or bigger flow rates) in the specific use case conditions (pumping head, water source, etc.). Several pumps are chosen from those available in the market, and compared so to select the best option for the kit. The power needed to pump the desired flow rate must be calculated, as well as the power that the panels will be able to provide. These calculations will be done with MATLAB.

To choose a panel it is important to bear in mind that, when the temperature conditions vary, so will the panel's efficiency. One must also take into account the electric characteristics (voltage, current) of the motor, which comes with the pump, and the panel, to make sure the system works in good conditions at all times.

Selecting a pump implies choosing the motor. In the studied case, DC pumps are privileged, as they are easy to use in photovoltaic pumping systems, due to the fact that

the panels work in DC.

It is important to include a MPPT regulator in the kit, so that the system works at its maximum power point. Some manufacturers, such as Lorentz, include these regulators with their pumps; but if that were not the case, the NGO should buy one separately.

After selecting the main components (pump, motor, panel, MPPT), the rest of the accessories, such as the small tank and the pipes, have to be chosen. The selection criteria are the weight, the price, the capacity of the tank, etc.

At last, a cost analysis will be done, including the investment, operational and maintenance costs.

Results

Following the steps presented in the previous section, it is possible to select the different components to be included in Solidarités International's kit for its use in the Borno region of Nigeria.

The study of the different pumps allows the selection of the most adapted one: by calculating the flow rate that each can pump in the specific conditions of the use case, taking into account all the yields and specifications, we find that some pumps cannot pump the needed flow rate and that some others cannot work at the adapted power conditions.

The final selection is the following: the PS2-600 C-SJ5-8 Lorentz pump, with its integrated MPPT; two VBHN330SJ47 Panasonic panels, an Oxfam 10 m³ *bladder* (small elastic tank), as well as Oxfam hoses and pipes, with a total cost of 3938.69€. The total weight would be of 248.8 kg.

The investment costs would be of at least 4030.84€. The operational and maintenance costs would be of 13 970.00€ for twenty-five years of use (that is 533.98€ per year during that period). The project would cost at least 18 000.84€, without taking into account neither the transport by plane nor the Nigerian customs, which would have to be included to have the total cost.

Conclusions

We have seen that it is possible to select different options for the kit. One final selection has been made, but Solidarités International can always choose a different one if they reckoned it would suit their needs better.

This study has focused on a specific case, that of the Borno region in Nigeria. However, as it has been mentioned at the beginning, the NGO works in eighteen different countries. In all these countries, the use case specifications (pumping head, solar irradiation, size of the camps, climate...) vary. The kit will not be adapted for all the crisis situations. The NGO must thus be able to size other kits, following the same

methodology.

Some manufacturers, like Grundfos, offer kits that include panels and pumps. They could be interesting options for the NGO in the future, as they would only rely on one manufacturer and might be able to obtain partnerships to reduce costs.

Apart from the selection of the main components for the real kit, a small model has also been made for the NGO, to be used in presentations or trainings.

References

[BEFO15] Be Forward. African Utility. A look at the most continent's best selling trucks. 2015. <https://blog.beforward.jp/car-comparison/best-selling-pickup-trucks-africa.html>

[ARGA03] N. Argaw, R. Foster, and A. Ellis. Renewable energy for water pumping applications in rural villages. National Renewable Energy Laboratory. 2003. 117 p. NSN 7540-01-280-5500

[BARL93] Roy Barlow, Bernard McNelis, Anthony Derrick. Solar Pumping. An Introduction and Update on the Technology, Performance, Costs and Economics. 1993. World Bank 168. pp.91-113.

[CAMP12] Pietro Elia Campana, Hailong Li, Jinyue Yan. Dynamic modelling of a PV pumping system with special consideration on water demand. ScienceDirect. Elsevier. 2012. pp.635-645. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.073>

[CHAN15] S.S. Chandel, M. Nagaraju Naik, Rahul Chandel. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. ScienceDirect. Elsevier. 2015. pp. 1085-1098. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>

[CHAU13] Jacques Chaurette. Pump Fundamentals. <http://www.pumpfundamentals.com/index.htm>

[GLOB18] Global Petrol Prices. Petrol Price in Nigeria. 2018. https://www.globalpetrolprices.com/Nigeria/gasoline_prices/

[GRUN18] Grundfos. Grundfos Product Center. <https://www.grundfos.com/>

[HAMI08] A. Hamidat, B. Benyoucef. Systematic procedures for sizing photovoltaic water systems, using water tank storage. ScienceDirect. Elsevier. 2008. pp.1489-1500. doi:10.1016/j.enpol.2008.12.014

[KHAT10] Tamer Khatib. Design of Photovoltaic Water Pumping Systems at Minimum Cost for Palestine: A Review. Journal of Applied Sciences. 2010. pp. 2773-2777

[LORE18] Lorentz. Produits et Technologie. <https://www.lorentz.de/fr/>

[MATA03] Claudio Mataix. Turbomáquinas Hidráulicas. Editorial ICAI. 2003.

[NASA18] NASA Atmospheric Science Data Center. NASA Surface meteorology and Solar Energy - Available Tables. 2018. <https://eosweb.larc.nasa.gov/>

[OSHE14] Michael O'Shea. Backpack Weight and the Scaling of the Human Frame. The Physics Teacher. 2014. <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.4897584>

[OSSI18] Ossila. Solar Cells Theory. <https://www.ossila.com/pages/solar-cells-theory>

[OXFA15] Oxfam. Oxfam Supply Centre Equipment Catalogue. 2015.

[PVED16] Average solar radiation. [pv.education.org
https://www.pveducation.org/pvcdrom/average-solar-radiation](https://www.pveducation.org/pvcdrom/average-solar-radiation)
Effect of Temperature <https://www.pveducation.org/pvcdrom/effect-of-temperature>

[SOLA18] Solaris Store. Information on Solar Panels. <https://www.solaris-store.com/>

[TOYO18] Toyota Store. Information on Toyota Hilux. <https://www.toyota.fr/new-cars/hilux/index.json>

[TROY15] Jean Yves Troy et al. Annual report Solidarités International 2015

Índice

1. Introducción	1
1.1. Introducción general	1
1.2. Objetivos del proyecto	2
1.3. Fases del proyecto y metodología de trabajo	2
1.4. Recursos empleados	3
2. Especificaciones de los casos de uso	5
3. Estado del arte	9
3.1. Bombas	9
3.1.1. Bombas centrífugas	9
3.1.2. Bombas volumétricas	11
3.2. Motores eléctricos	13
3.2.1. Motores DC	13
3.2.2. Motores AC	14
3.3. Nociones relativas a los sistemas fotovoltaicos	14
3.3.1. Radiación solar	14
3.3.2. Células fotovoltaicas	15
3.3.3. Módulos fotovoltaicos	16
3.3.4. Característica de una célula fotovoltaica	17
3.3.5. Tipos de paneles	17
3.4. Sistemas de bombeo fotovoltaicos	19
3.4.1. Sistemas existentes	19
3.4.2. Maximum Power Point Tracking	20
4. Dimensionamiento del sistema	21
4.1. Recurso solar: un recurso muy variable	21
4.2. De la energía solar a la energía mecánica utilizada para bombear	25
4.2.1. Necesidad de agua	25
4.2.2. Selección del tipo de motor	25
4.2.3. Selección del tipo de bomba	25
4.2.4. Dimensionamiento básico	26
4.2.5. Estudio de una selección de bombas	28
4.2.6. Estimación del volumen de agua obtenido por día y selección de una bomba	37
4.2.7. Activación de la bomba	44
4.2.8. Efecto de la temperatura en los paneles	44
4.2.9. Selección del tipo de panel	45
4.2.10. Comparación entre paneles disponibles en el mercado	45
4.2.11. Conexiones y ángulo de inclinación	46
4.2.12. Elementos de control del sistema	47
4.2.13. Almacenamiento del agua y de la energía	47
4.3. Accesorios	47
4.4. Maqueta	48

5. Análisis de costes	51
5.1. Costes de inversión	51
5.2. Costes operacionales y de mantenimiento	52
6. Conclusión	55
6.1. Kit final	55
6.2. Resumen de la metodología	55
Anexo I: Programas de MATLAB	57
Anexo II: Fichas técnicas de los elementos del kit	61

Índice de figuras

1.	Precio de un panel solar por vatio	1
2.	Países de intervención de Solidarités International	2
3.	Ciclo de gestión de riesgos y desastres	5
4.	Localización de la región estudiada, Borno, en Nigeria	6
5.	Tanque flexible de Oxfam	8
6.	Bomba centrífuga	9
7.	Funcionamiento de una bomba centrífuga	10
8.	Bombas volumétricas	11
9.	Funcionamiento de una bomba volumétrica de pistón	12
10.	Esquemas de los cuatro tipos principales de motores eléctricos	13
11.	Diagrama de una unión PN de un semiconductor	14
12.	Diagrama de una unión PN de un semiconductor	15
13.	Funcionamiento básico de una célula solar	16
14.	Conexiones en serie (izqda.) y paralelo (dcha.) de células fotovoltaicas	16
15.	Curva I-V de una célula fotovoltaica	17
16.	Panel monocristalino	18
17.	Panel policristalino	18
18.	Panel de capa fina	18
19.	Sistema de bombeo fotovoltaico con motor AC	19
20.	Sistema con de bombeo fotovoltaico motor AC y batería	19
21.	Sistema de bombeo fotovoltaico con motor DC	20
22.	Principio del MPPT	20
23.	Variabilidad del recurso solar durante el día	21
24.	Media mensual de la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal en Maiduguri	22
25.	Radiación solar incidente sobre una superficie horizontal durante el mes de agosto	23
26.	Curva anterior suavizada, entre las 06:00 y las 18:00	23
27.	Potencia necesaria para bombear en función del caudal	27
28.	Curvas de funcionamiento de la bomba PS150 C-SJ5-8	29
29.	Curvas de funcionamiento de la bomba PS150 C-SJ5-8 para $H = 10$ m	29
30.	Curvas de funcionamiento de la bomba PS2-150 C-SJ5-8	30
31.	Curvas de funcionamiento de la bomba PS2-150 C-SJ5-8 para $H = 8$ m	30
32.	Curvas de funcionamiento de la bomba PS2-600 CS-F3-7	31
33.	Curvas de funcionamiento de la bomba PS2-600 CS-F3-7 para $H = 15$ m	31
34.	Curvas de funcionamiento de la bomba PS2-600 C-SJ5-8	32
35.	Curvas de funcionamiento de la bomba PS2-600 C-SJ5-8 para $H = 10$ m	32
36.	Curvas de funcionamiento de la bomba CRIF 10-01 A-CA-I-E-HQQE	33
37.	Curvas de funcionamiento de la bomba CRIF 10-01 A-CA-I-E-HQQE para $H = 8$ m	33
38.	Curvas de funcionamiento de la bomba CRIF 10-01 A-CA-I-E-HQQE	34
39.	Curvas de funcionamiento de la bomba CRNF 10-01 A-CA-G-E-HQQE para $H = 8$ m	34
40.	Curvas de funcionamiento de la bomba CRNF 15-01 A-CA-G-E-HQQE	35
41.	Curvas de funcionamiento de la bomba CRNF 15-01 A-CA-G-E-HQQE para $H = 8$ m	35
42.	Curvas de funcionamiento de la bomba CRIF 15-01 A-CA-I-E-HQQE	36

43.	Curvas de funcionamiento de la bomba CRIF 15-01 A-CA-I-E-HQQE para $H = 8$ m	36
44.	Resultados para PS2-600 CS-J5-8 con dos paneles	39
45.	Resultados para PS150 C-SJ5-8 con un panel	39
46.	Resultados para PS150 C-SJ5-8 con dos paneles	40
47.	Resultados para PS2-600 CS-F3-7 con tres paneles	40
48.	Resultados para PS2-150 C-SJ5-8 con un panel	41
49.	Resultados para PS2-150 C-SJ5-8 con dos paneles	41
50.	Resultados para CRIF 10-01 A-CA-I-E-HQQE	42
51.	Resultados para CRNF 10-01 A-CA-G-E-HQQE	42
52.	Resultados para CRIF 15-01 A-CA-I-E-HQQE	43
53.	Resultados para CRNF 15-01 A-CA-G-E-HQQE	43
54.	Efectos de la temperatura en la característica IV de una célula fotovoltaica	44
55.	Tabla comparativa de los distintos tipos de paneles solares fotovoltaicos	45
56.	Bomba PS2-600 C-SJ5-8 con MPPT integrado	47
57.	Característica del panel de la maqueta	49
58.	Maqueta del sistema de bombeo	49
59.	Kit en el maletín	50
60.	Sistema funcionando desde el maletín	50
61.	Código de MATLAB para dibujar la curva de la PS2-600 C-SJ5-8	57
62.	Cálculo con MATLAB del área bajo la curva con el método de los trapecios	58
63.	Cálculo con MATLAB del caudal para las bombas de Lorentz	58
64.	Cálculo con MATLAB del caudal para las bombas de Grundfos	59

Índice de cuadros

1.	Número de beneficiarios de los sistemas empleados actualmente	7
2.	Energía entregada por el sol por m ² con un paso de 15 minutos	24
3.	Bombas volumétricas: Pros y contras	25
4.	Bombas centrífugas: Pros y contras	26
5.	Coste de los elementos incluidos en el kit	51
6.	Costes de inversión	52
7.	Costes operacionales y de mantenimiento	53
8.	Coste del proyecto	53

1. Introducción

1.1. Introducción general

El futuro de la revolución energética está en la transición progresiva a las energías renovables. La energía solar fotovoltaica ha crecido exponencialmente durante los últimos veinte años. Desde 1975, al haber disminuido el precio del watio de un panel solar, se han instalado más y más paneles, en particular durante la última década (cf. Figura 1).

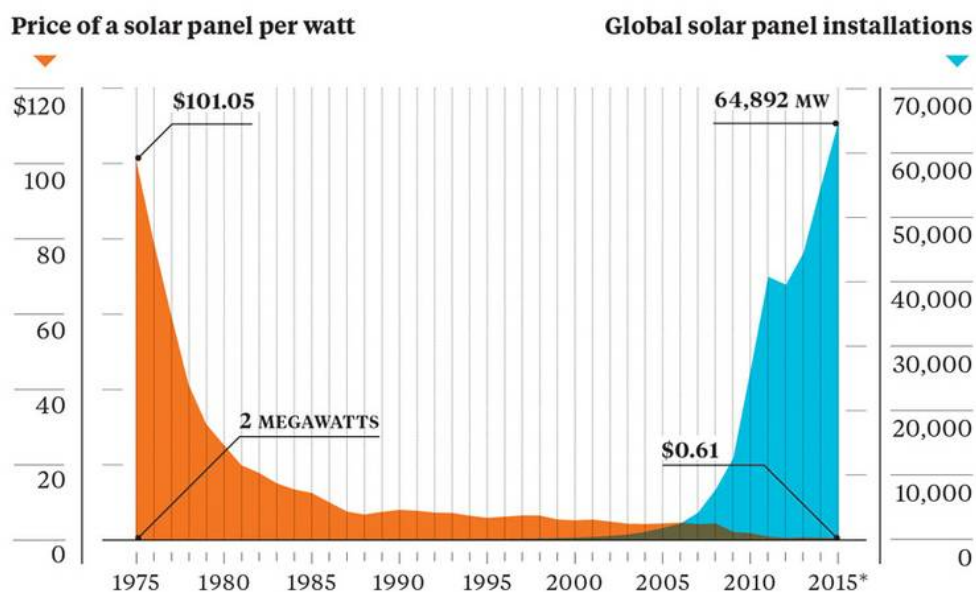


Figura 1: Precio de un panel solar por watio

Fuente: Bloomberg

Mientras que en muchos países desarrollados se fomenta el paso de las energías fósiles a las renovables, a través de programas de subvenciones por ejemplo, en los países en vías de desarrollo esta transición no resulta tan evidente. Para empezar, muchos de estos países ni siquiera disponen de suficiente energía para vivir dignamente en su día a día. En áreas de conflicto, las energías fósiles siguen siendo las más usadas, sobre todo en primeras intervenciones.

El acceso a la energía es una necesidad para todos. En particular, es de vital importancia en situaciones de crisis humanitarias. En estas situaciones de emergencia, hay que prever grandes cantidades de ayuda humanitaria, mayores que las habituales. Es a esto a lo que se dedica la ONG Solidarités International, que ha propuesto este proyecto.

Solidarités International es una ONG francesa, fundada en 1980 por Alain Boinet. Su objetivo fundamental es socorrer rápida y eficazmente a aquellos cuyas condiciones de vida están amenazadas; y cubrir las necesidades vitales de estas personas, proporcionándoles agua, comida y refugio. La ONG emplea a 2180 empleados locales y 160 expatriados. Lleva a cabo más de 120 programas de ayuda humanitaria en 18 países, como Afganistán, Bangladesh, Nigeria, Mali, Siria, y muchos



Figura 2: Países de intervención de Solidarités International

Fuente: Solidarités International

1.2. Objetivos del proyecto

El objetivo del proyecto es el diseño de un kit de bombeo fotovoltaico portátil para situaciones de crisis humanitarias. Este kit debe incluir una bomba, un motor, uno o varios paneles solares (el mínimo número posible, para minimizar los costes), los elementos de control (como un controlador MPPT, Maximum Power Point Tracking), el cableado y los accesorios, así como un pequeño tanque. Debe ser diseñado según ciertos criterios especificados por la ONG y desarrollados en la sección 2 (criterios de peso, de tamaño...). Los elementos del kit no deben ser diseñados y construidos, si no que deben ser seleccionados entre elementos ya existentes en el mercado, de manera que la ONG sea capaz de reemplazar piezas rápidamente si fuese necesario.

1.3. Fases del proyecto y metodología de trabajo

El proyecto se divide en varias fases.

En primer lugar, la identificación del caso y de los objetivos del proyecto. A lo largo de esta fase se analizan aplicaciones típicas de bombeo fotovoltaico en situaciones de crisis humanitarias y se determinan los objetivos del proyecto.

En segundo lugar, la evaluación de los aspectos técnicos del sistema. En esta fase se lleva a cabo el estudio del estado del arte de los distintos elementos: bombas, paneles solares, sistemas fotovoltaicos, motores...

En tercer lugar, el dimensionamiento del sistema, durante el cuál, además de seleccionarse los elementos para el kit real después de un estudio teórico, también se construye una pequeña maqueta.

Por último, el análisis de costes (valoración de los costes de inversión, los costes operacionales y los costes de mantenimiento de la ONG).

1.4. Recursos empleados

Los recursos empleados a lo largo de todo el proyecto han sido:

- Bases de datos: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), ScienceDirect
- Bibliografía sobre turbomáquinas, bombas, bombeo fotovoltaico, paneles solares, etc.
- Herramientas de ofimática (Excel, Word, PowerPoint)
- Herramientas de programación (MATLAB, L^AT_EX)
- Laboratorio de CentraleSupélec

2. Especificaciones de los casos de uso

Como ya ha sido mencionado anteriormente, los países en vías de desarrollo siguen teniendo grandes dificultades en lo que concierne a la transición de las energías fósiles a energías renovables. El abastecimiento de energía es ya difícil de por sí. En este contexto, resulta complicado actuar rápidamente en situaciones de conflicto. Las ONGs como Solidarités International se encuentran con numerosos problemas a la hora de llevar a cabo sus programas de ayuda humanitaria.

El trabajo de Solidarités International está muy relacionado con la gestión de riesgos (cf. Figura3). Este proyecto, en particular, forma parte de la etapa de respuesta inmediata después de una catástrofe. La ONG es capaz de actuar relativamente rápidamente, en menos de 72 horas.

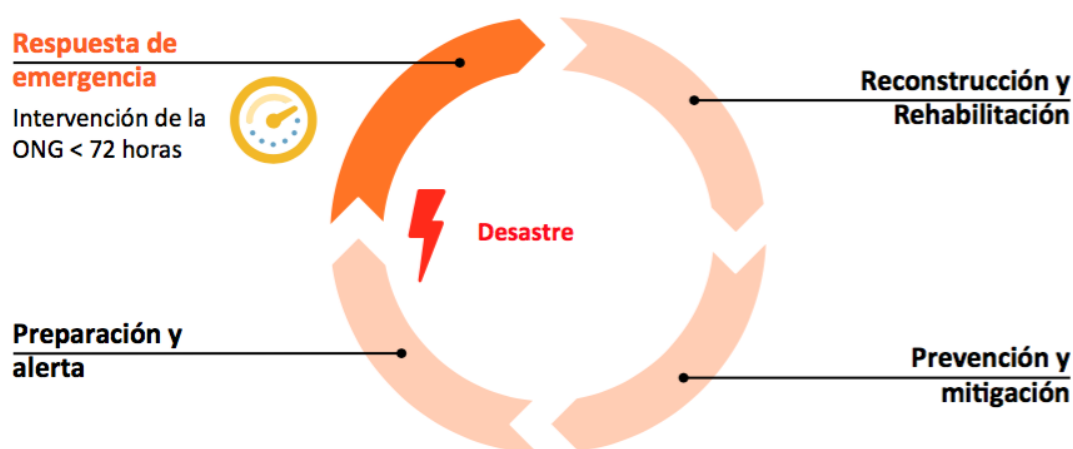


Figura 3: Ciclo de gestión de riesgos y desastres

Fuente: Ilustración del autor

En situaciones de crisis humanitaria, la ONG busca abastecer de agua potable a grandes campamentos, de entre 2000 y 200.000 personas. Hasta ahora habían usado sistemas de bombeo clásicos, pero su intención es pasar a sistemas de bombeo fotovoltaico.

Además del aspecto ecológico fundamental, el paso a sistemas fotovoltaicos es muy interesante para la ONG, ya que le otorga algunas ventajas muy específicas. En áreas de conflicto, resulta a veces complicado asegurar un suministro de energía basado en energías fósiles, ya que a menudo hay escasez de combustible. Otro problema con el que se suelen topar es el transporte de combustibles fósiles, ya que son bienes valiosos, y son frecuentes las emboscadas para robarlos. Las infraestructuras de transporte también pueden resultar dañadas en áreas de conflictos o desastres naturales. Todos estos problemas podrían verse solucionados, en parte, con la existencia de un sistema de bombeo fácil de transportar.

Como hemos mencionado antes, Solidarités International cuenta con 2180 empleados locales y 160 expatriados que trabajan en más de 120 programas de ayuda humanitaria en 18 países, como Myanmar, Pakistán, Yemen, Camerún, Irak... ([TROY15]) La ONG cuenta además con dos

hubs logísticos, París y Dubái. Una gran parte del equipamiento técnico que se utiliza durante las situaciones de crisis se almacena en estos hubs y se envía desde allí a donde haga falta.

La ONG desea usar el kit para intervenciones rápidas, a corto plazo. El kit debe ser enviado desde uno de sus hubs logísticos hasta el lugar de intervención. Allí, deben instalarlo técnicos. La idea es que el kit se quede en las zonas de conflicto durante unos meses, como máximo un año, para darle tiempo a la ONG a instalar una solución a largo plazo. Durante su uso en la zona de crisis, algunos miembros de las poblaciones locales deben ser capaces de ponerlo en marcha, por lo que tiene que ser relativamente fácil de usar. No siempre habrá alguien con conocimientos técnicos para usar el kit. Al acabar el periodo en la zona de intervención, el kit debe ser reenviado a uno de los dos hubs logísticos. Allí ha de comprobarse que todos los elementos siguen funcionando correctamente, para así poder reenviar el kit a otra zona de conflicto. Se trata, por lo tanto, de una solución a corto plazo.

El hecho de que la ONG trabaje en un espectro tan amplio de países es importante para el diseño del kit, ya que las condiciones meteorológicas y los terrenos varían de un país al otro. Es por ello que la ONG desea, en primer lugar, diseñar un kit para usarlo en unas condiciones específicas: en un campamento de 2000 personas en la región de Borno, en el noreste de Nigeria; con una profundidad de bombeo de mínimo 7 m, y hasta 15 m. Después, se podrá usar la misma metodología para diseñar otros kits que cumplan con otras especificaciones. La idea de la ONG es tener dos o tres kits, adaptados a diferentes profundidades de bombeo, diferentes fuentes de agua (superficie, aguas subterráneas...) y diferentes irradiaciones, para así cubrir en grandes líneas todos los casos que se pudiesen dar en todos los países de intervención.



Figura 4: Localización de la región estudiada, Borno, en Nigeria

Fuente: Umoja

El sistema de bombeo fotovoltaico que se quiere diseñar requiere ser transportado rápida y fácilmente. Como se ha señalado anteriormente, los conflictos y desastres naturales pueden dañar las infraestructuras de transporte en los países de intervención. Por otro lado, en general no se dispone de accesorios de elevación in situ. Por lo tanto, es necesario que el kit respete ciertos criterios de peso y tamaño, de manera que pueda ser transportado en pickup, o, en las peores condiciones, por dos hombres adultos.

Para cuantificar este requisito, usaremos como referencia el tamaño del espacio de carga de la Toyota Hilux, la pickup más vendida en países africanos ([BEFO15]). El modelo con cabina simple tiene un espacio de carga de 2,315 x 1,520 m; y el modelo con cabina doble de 1,520 x 1,515 m. Usaremos por lo tanto el tamaño mínimo. Imaginando el kit como una gran caja, las dimensiones máximas de la base de la caja deberían ser inferiores a 1,520 x 1,515 m.

En lo que se refiere al peso, la Toyota Hilux puede soportar una carga de 1000 kg. Sin embargo, si el kit debe ser transportado también por dos personas, sabiendo que una persona de 80 kg puede transportar un máximo de 103 kg ([OSHE14]), el peso máximo del kit se quedaría en alrededor de 200 kg.

La idea inicial es que, efectivamente, todos los elementos del kit quepan en una sola caja, pero la ONG aceptaría también una solución con varias cajas más pequeñas y menos pesadas. El kit debería, pues, en principio, caber en una caja con una base de dimensiones menores a 1,520 x 1,515 m, y con un peso máximo de 200 kg.

Los campamentos en los que interviene Solidarités International son de entre 2000 y 200.000 personas. El consumo mínimo de agua de una persona en uno de estos campamentos es de 15 L por día. Si lo comparamos con el consumo de agua diario en Francia, que es de 164 L, vemos la diferencia abismal que hay entre los dos. Asumiendo que las bombas actuales utilizadas para sistemas fotovoltaicos son capaces de bombear caudales de entre 2,5 y 10 m³/h, y que se bombea continuamente durante seis horas en el día, un kit podría abastecer a entre 1000 y 4000 personas (cf Cuadro 1).

Caudal (m ³)	Volumen de agua (L/day)	Personas (uds.)
2,5	15 000	1000
4	24 000	1600
8	48 000	3200
10	60 000	4000

Cuadro 1: Número de beneficiarios de los sistemas empleados actualmente

En cuanto al almacenamiento del agua, se hace en grandes tanques flexibles (cf Figura 5). De este modo, también se almacena la energía bajo la forma de energía potencial. Se trata de una alternativa interesante para la ONG, que no quiere utilizar sistemas de bombeo con baterías, ya



Figura 5: Tanque flexible de Oxfam

Fuente: Solidarités International

que por experiencia, las baterías fallan cuando más las necesitan, y el hecho de no tener baterías reduce la complejidad del sistema.

Después de bombear el agua y almacenarla en el primer tanque, se va transvasando a otros tanques donde se trata y se purifica para su consumo. Esta parte de purificación no entra en los objetivos del proyecto.

3. Estado del arte

A continuación se estudia el estado del arte de los principales elementos incluidos en el kit que desea Solidarités International, es decir, las bombas, los motores y las células fotovoltaicas. También se presenta el estado del arte de los sistemas de bombeo fotovoltaico existentes.

3.1. Bombas

Las bombas son máquinas de fluido utilizadas para comunicar energía al líquido que las atraviesa ([MATA03]). El líquido puede así ascender y ser impulsado contra la diferencia de presiones.

En los sistemas de bombeo fotovoltaicos se usan dos tipos de bombas: las bombas centrífugas, también denominadas bombas rotodinámicas (cf. Figura 6); y las bombas volumétricas o bombas de desplazamiento positivo (cf. Figura 8).

Dependiendo de diferentes factores, como la altura de bombeo, la fuente de agua (subterránea o superficial), o el caudal; se escoge un tipo de bomba u otro. A continuación se presentará cada tipo de bomba con más detalle.

3.1.1. Bombas centrífugas

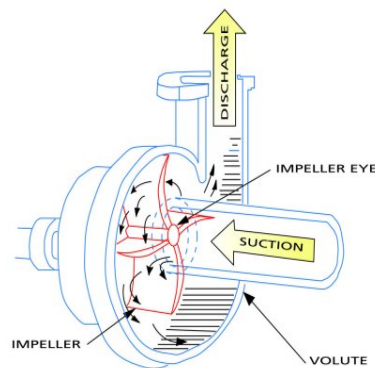


Figura 6: Bomba centrífuga

Fuente: IEEE

Las bombas centrífugas utilizan la fuerza centrífuga para crear un diferencial de presión en un fluido. Tienen un rodete o impulsor, que propulsa el agua hacia el exterior, contra la carcasa de la bomba. Esta carcasa está hecha de tal manera que permite la conversión del momento del agua en presión que permite bombear agua. El caudal es, por lo tanto, proporcional a la velocidad del rodete, que a su vez depende de la potencia entregada por el motor. Una de las características de estas bombas es que su par es proporcional al cuadrado de la velocidad angular del impulsor.

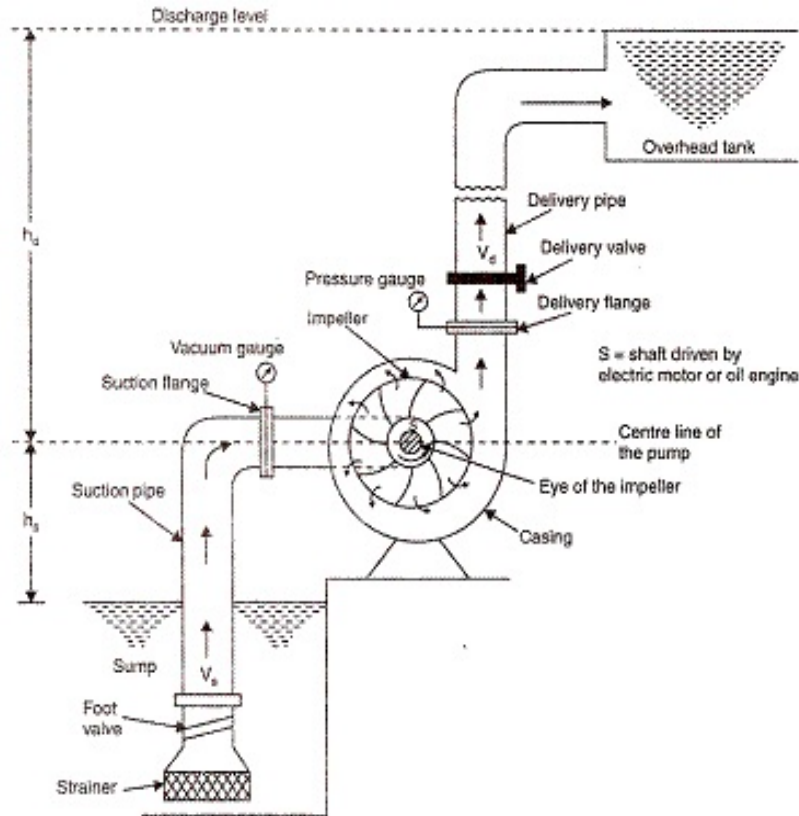


Figura 7: Funcionamiento de una bomba centrífuga

Las bombas rotodinámicas se pueden clasificar de varias maneras distintas [MATA03]:

- Según la dirección del flujo en el rodete: bombas axiales, radiales o diagonales
- Según el número de escalonamientos: bombas simples o compuestas
- Según el número de flujos: aspiración simple o doble
- Según el tipo de difusor
- Según la posición del eje: horizontal, vertical, inclinado
- Según la altura o presión
- Según el tipo de accionamiento (por motor eléctrico, motor de gasolina, etc.)
- Según el líquido bombeado
- Según los materiales utilizados en su fabricación
- Según su fin: suministro a edificios, agrícolas, calderas...

Las bombas centrífugas flotantes poseen un único impulsor, pero es posible apilar varios impulsores, hasta veinte. Utilizar series de impulsores es interesante cuando las bombas están sumergidas en pozos profundos.

Las bombas centrífugas son muy compactas y se adaptan bien a caudales de bombeo altos (entre 25 y 100 m³/día). Se suelen usar para alturas de bombeo bajas o medias (entre 10 y 30 m) y aplicaciones con presiones bajas, especialmente cuando los paneles han de ser directamente conectados a la bomba. En estos casos son particularmente eficientes ([ARGA03]).

Existe un problema con los sistemas de bombeo fotovoltaico que usan bombas centrífugas: cuando la luminosidad no es suficiente, las bombas no consiguen alcanzar las altas velocidades de spin necesarias para bombear correctamente, lo que genera pérdidas de transmisión en el acoplamiento, ya que los motores no alcanzan su par máximo. Sin embargo, cuando la intensidad de la luz es suficiente para alcanzar estas velocidades elevadas de spin, las bombas centrífugas son muy eficientes.

Por un lado, las bombas centrífugas tienen varias ventajas como su simplicidad, fiabilidad, bajo coste, bajo mantenimiento, robustez, bajo par de arranque y su tolerancia frente a las partículas de bombeo. Por otro, no son autocebantes: cuando entra aire en la bomba, aparecen bolsas de aire que evitan bombear correctamente. Existen dos soluciones a este problema. La primera es que existen bombas centrífugas autoaspirantes que poseen una cámara con agua pegada a la carcasa que ayuda a evitar la entrada de aire. La segunda es utilizar estas bombas como bombas sumergibles.

Otro aspecto interesante de las bombas centrífugas es que se pueden acoplar directamente a sistemas fotovoltaicos.

3.1.2. Bombas volumétricas

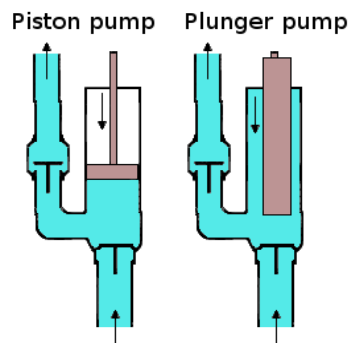


Figura 8: Bombas volumétricas

Fuente: IEEE

En las bombas volumétricas el agua es aspirada a través de mecanismos como pistones, cilindros y diafragmas elásticos. Estas bombas tienen contornos móviles que, al ser modificados de manera mecánica, fuerzan la expulsión del fluido hacia el exterior de la bomba (cf. Figura 9).

Las bombas de desplazamiento positivo se suelen usar para caudales de bombeo bajos (de menos de 15 m³/día) y aplicaciones de alta presión y alturas de bombeo elevadas (entre 30 y 150 m).

Estas bombas tienen un par de arranque alto ya que siempre trabajan contra la presión del sistema. Incluso a velocidades bajas (potencia entregada por el motor baja), la bomba bombeará una cantidad de agua igual a la que entregaría a velocidades altas, aunque más lentamente.

El caudal de bombeo es proporcional a la velocidad del motor. Es, sin embargo, independiente de la altura de bombeo, por lo que estas bombas son muy eficientes para alturas de bombeo elevadas. Además, las bombas volumétricas son autoaspirantes, por lo que no hay que preocuparse del cebado de la bomba como en el caso de las bombas rotodinámicas.

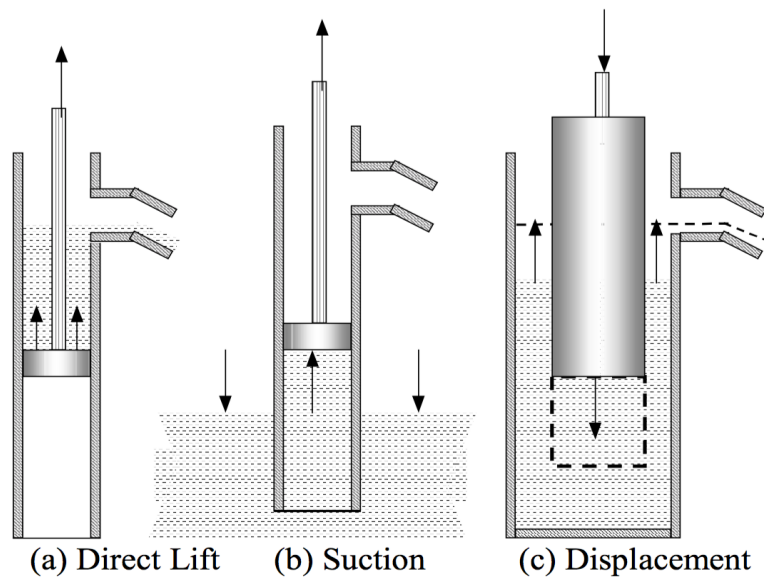


Figura 9: Funcionamiento de una bomba volumétrica de pistón
Fuente: *Renewable Energy for Water Pumping Applications in Rural Villages*

Las bombas volumétricas son más difíciles de acoplar a sistemas de bombeo fotovoltaicos. El motor acoplado a estas bombas necesita no sólo un aporte de corriente inicial, si no también un aporte de corriente constante para una altura de bombeo dada (dos aportes de corriente diferentes). La corriente en los paneles depende de la luz solar. Es necesario el uso de controladores MPPT en este tipo de bombas.

Una desventaja de las bombas volumétricas es que sus superficies de contacto se desgastan rápidamente por lo que requieren mantenimiento regular.

Entre las bombas de desplazamiento positivo se pueden distinguir las bombas sumergibles y no sumergibles. Por ejemplo, las bombas de diafragma, que se utilizan generalmente con motores DC para bombear pequeñas cantidades de agua, son sumergibles. Por otro lado, las bombas rotativas a paletas o bombas de rotor helicoidal no son sumergibles, así como las bombas de varilla, que son muy comunes.

3.2. Motores eléctricos

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas compuestas por un estátor y un rotor y que transforman energía eléctrica en energía mecánica a través de la acción de campos magnéticos. En esta sección se analizarán dos grandes familias de motores eléctricos: los de corriente continua (CC o DC de *direct current* en inglés) y los de corriente alterna (CA o AC de *alternating current*). A continuación se presentan las características de cada una de estas familias.

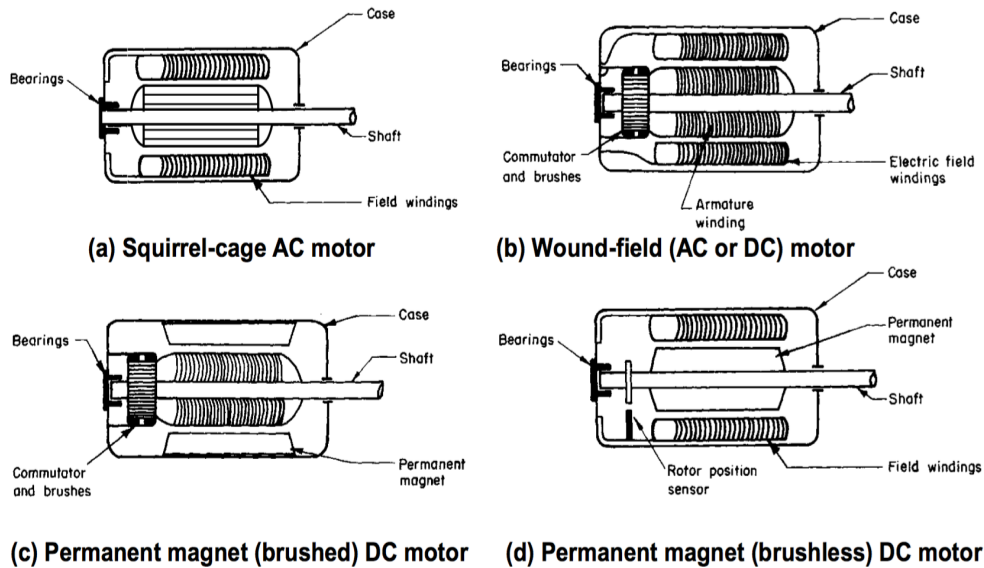


Figura 10: Esquemas de los cuatro tipos principales de motores eléctricos
Fuente: *Renewable Energy for Water Pumping Applications in Rural Villages*

3.2.1. Motores DC

Como se ha mencionado anteriormente, los motores DC constan de dos partes, el rotor y el estátor. Los polos de la máquina se hallan en el soporte mecánico, es decir el estátor. Los motores de imanes permanentes son los más eficaces, en general: sus imanes generan el campo magnético, por lo que no se consume potencia en el inductor. Estos motores son una opción interesante para sistemas fotovoltaicos pequeños, de poca potencia.

Los motores DC de imanes permanentes son simples y eficientes, y no requieren un sistema de control complejo. Sin embargo, son algo limitados en lo relacionado a la velocidad y potencia. Las pérdidas en los cables son elevadas a medida que aumenta la distancia. Además, al tener escobillas, requieren un mantenimiento frecuente. Los motores sin escobillas (*brushless*) no tienen este problema.

Los paneles solares y las baterías son dos ejemplos de elementos que trabajan en corriente

continúa y con los que se usan motores DC. A pesar de las distintas desventajas de los motores DC, hay que resaltar una ventaja muy importante, que es que se pueden conectar muy fácilmente a los paneles solares, sin necesidad de inversor, y ser así utilizados en sistemas de bombeo fotovoltaicos.

3.2.2. Motores AC

Se pueden distinguir los motores síncronos, en los que la rotación del eje está sincronizada con la frecuencia de la alimentación; y los motores asíncronos o motores de inducción, que son transformadores eléctricos con dos partes móviles. Cada parte lleva un bobinado, el primario y el secundario, que forman un circuito magnético con una interfaz de aire entre ellos. El primario recibe corriente alterna e induce una corriente en el secundario (principio de inducción).

Los motores de jaula de ardilla (cf. Figura 10 (a)) son los motores AC más utilizados ya que son simples y baratos. Son motores de inducción asíncronos. Su uso en sistemas fotovoltaicos es bastante frecuente.

Los motores AC son, por lo general, de coste menor que los motores DC. Se utilizan para aplicaciones de potencia media o alta. Su mayor inconveniente es la necesidad de un inversor si se utilizan en sistemas fotovoltaicos, ya que los paneles solares trabajan en corriente continua. El inversor aumenta los costes y el riesgo de averías y problemas en los sistemas.

3.3. Nociones relativas a los sistemas fotovoltaicos

3.3.1. Radiación solar

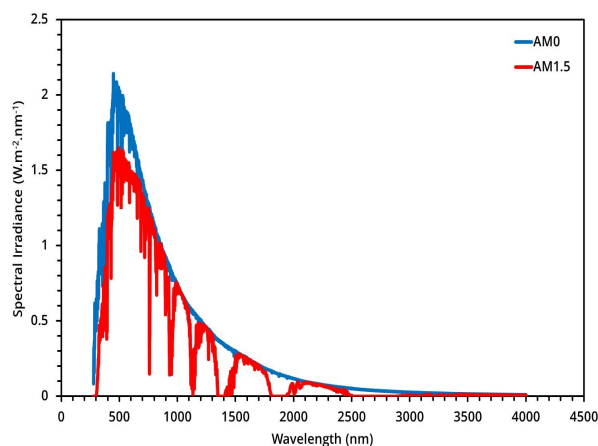


Figura 11: Diagrama de una unión PN de un semiconductor
Fuente: *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO*

La radiación solar es la densidad de potencia incidente en un objeto debido a la iluminación del Sol. El Sol es una estrella que se comporta como un cuerpo negro y emite radiaciones electro-

magnéticas. Su temperatura media es de 6000 K.

La energía que llega a la Tierra desde el Sol depende también de la altitud a la que se mida, ya que depende de la cantidad de atmósferas que atraviesen las radiaciones electromagnéticas, como se puede ver en la Figura 11, donde AM significa *air mass*. Se trata de un coeficiente: la proporción de la atmósfera que la luz debe atravesar antes de llegar al suelo terrestre. AM 1.5 es el coeficiente habitual de los paneles solares.

3.3.2. Células fotovoltaicas

Las células fotovoltaicas están hechas de materiales semiconductores, y producen electricidad cuando están expuestas a la luz. Los materiales semiconductores más comunes son el silicio monocristalino y el silicio amorfo. Más del 95 % de las células fotovoltaicas producidas en el mundo están fabricados con silicio (Si).

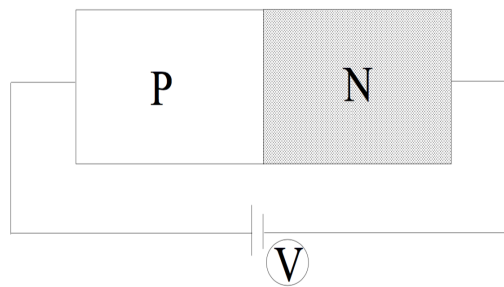


Figura 12: Diagrama de una unión PN de un semiconductor

Fuente: Renewable Energy for Water Pumping Applications in Rural Villages

El material semiconductor absorbe los fotones. Cuando un fotón entra en la zona de cargas de espacio y se topa con un átomo, produce un par electrón-hueco (los huecos en las regiones negativas, y los electrones en las positivas). En presencia de campo eléctrico el electrón es acelerado en la región n y el hueco en la positiva, por lo que se acumula una carga negativa en la región n y una carga positiva en la p, obteniendo fotovoltaje ([ARGA03]).

Los materiales semiconductores son capaces de convertir luz en electricidad dada la estructura de los niveles de energía de sus electrones. Estos se pueden dividir en dos categorías: la banda de conducción y la banda de valencia ([OSSI18]). La diferencia de energía entre estas dos bandas se conoce como *band gap*. Este salto energético es relativamente pequeño en los semiconductores, permitiendo el movimiento de los electrones a la banda de conducción cuando reciben pequeñas cantidades de energía: si el fotón incidente sobre el panel (Figura 13, a)) tiene una energía mayor a la *band gap*, el electrón dejará la banda de valencia para moverse a la banda de conducción (Figura 13, b)), y se creará un campo eléctrico (Figura 13, c)).

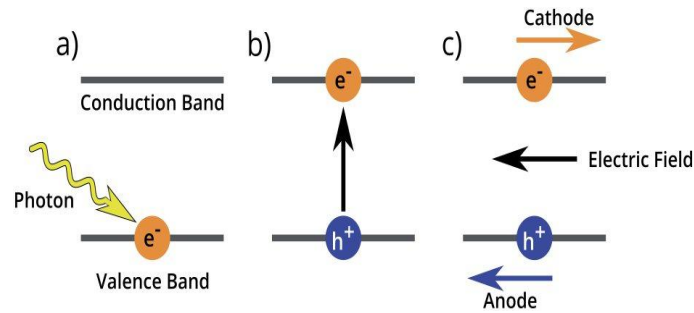


Figura 13: Funcionamiento básico de una célula solar

Fuente: Ossila

3.3.3. Módulos fotovoltaicos

Una célula fotovoltaica tiene un voltaje máximo de 600 mV. Para obtener más voltaje se han de conectar varias células en serie.

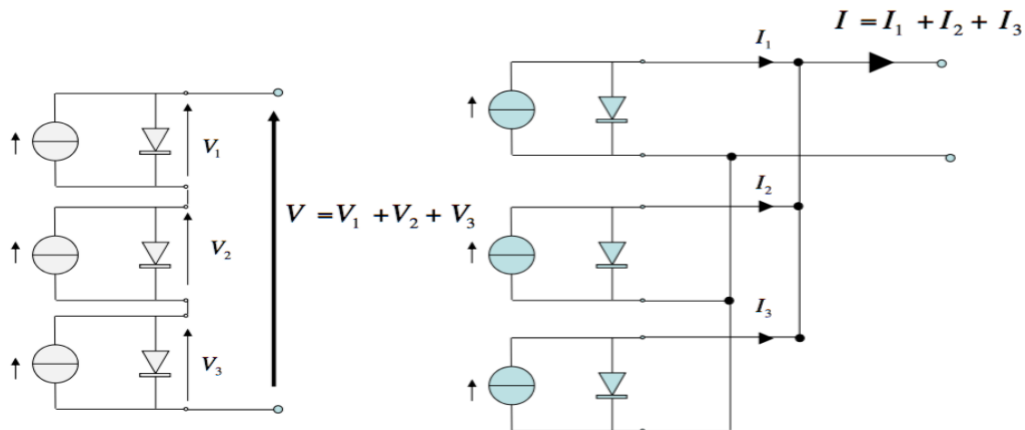


Figura 14: Conexiones en serie (izqda.) y paralelo (dcha.) de células fotovoltaicas

Fuente: Curso sobre energías renovables, CentraleSupélec

Las células fotovoltaicas se combinan en módulos. Con módulos idénticos (mismo tamaño y tipo) se forman paneles. Los módulos están sellados entre capas de cristal o polímeros transparentes, que los protegen. Al combinar paneles, se obtienen matrices o conjuntos fotovoltaicos.

Los paneles pueden estar fijos o ser móviles. Son generalmente módulos de placa plana. En el hemisferio norte tienen que estar orientados hacia el sur, y en el sur, hacia el norte. Para maximizar la cantidad de luz solar recibida, los paneles han de estar inclinados, ya que los rayos no inciden verticalmente. Se pueden utilizar sistemas de seguimiento, como los solar trackers, que permiten seguir la trayectoria del sol y así producir más electricidad. El ángulo de inclinación es muy importante ya que maximiza la cantidad de radiación solar recibida y por lo tanto de electricidad producida. Dependiendo del momento del año, el ángulo con el que inciden los rayos

de sol varía. El ángulo de inclinación óptimo de los paneles es aproximadamente la latitud del lugar donde estos se sitúan. Por lo general, resulta menos caro tener ángulos de inclinación flexibles que usar sistemas de seguimiento.

Es necesario, además, tener en cuenta las condiciones meteorológicas. Si llueve o hay nubes, o si hace mucho calor, las condiciones de funcionamiento de los paneles no son óptimas. Es posible variar el ángulo de inclinación manualmente dependiendo de la estación, por ejemplo, es interesante inclinar los paneles durante las estaciones de lluvia. Hay que tener muy en cuenta el coeficiente de temperatura, como se verá más adelante.

3.3.4. Característica de una célula fotovoltaica

La curva característica de una célula fotovoltaica es como la de un fotodiodo, pero invertida (como generador). El punto de funcionamiento del panel es (V_{mp} , I_{mp}). Multiplicando estos dos valores se halla la potencia de funcionamiento.

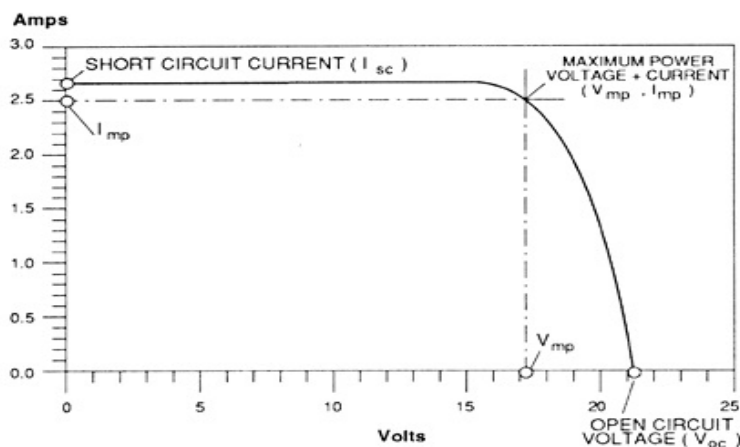


Figura 15: Curva I-V de una célula fotovoltaica

Fuente: David Darling Encyclopaedia

3.3.5. Tipos de paneles

Existen tres grandes tipos de paneles fotovoltaicos: monocristalinos, policristalinos y paneles de capa fina. A continuación se presentan sus principales características.

Paneles monocristalinos

Los paneles monocristalinos fueron los primeros en desarrollarse. Su estructura cristalina es continua. Son los más eficaces (rendimiento entre 15 y 20 % en general, pero hasta 22 % en los paneles más recientes). Son los paneles que menos espacio ocupan, son bastante eficaces a altas temperaturas, y tienen un ciclo de vida largo. Son, sin embargo, los más caros.



Figura 16: Panel monocristalino

Fuente: Solar Reviews

Paneles policristalinos

Los paneles policristalinos representan una opción muy interesante, ya que al ser los más producidos y fáciles de encontrar en el mercado, su precio es menor. Sin embargo, son menos eficientes que los monocristalinos en lo que a temperatura se refiere, y ocupan más espacio.



Figura 17: Panel policristalino

Fuente: Solar Reviews

Paneles de capa fina

Los paneles de capa fina son fáciles de producir en masa, sin embargo, siguen siendo caros comparados con los policristalinos. Se suelen utilizar en barcos y otras estructuras no rectas, ya que son flexibles. Al poder enrollarlos, resultan una muy buena opción ya que se pueden almacenar fácilmente. Son, sin embargo, menos eficientes, y tienen un ciclo de vida corto.



Figura 18: Panel de capa fina

Fuente: Solar Reviews

3.4. Sistemas de bombeo fotovoltaicos

3.4.1. Sistemas existentes

El principio de funcionamiento de un sistema de bombeo fotovoltaico es el siguiente: los paneles solares fotovoltaicos están conectados a un motor, AC o DC, que convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Esta energía mecánica es la que usa la bomba, transformándola en energía hidráulica ([CHAN15]). El agua puede provenir de distintas fuentes: ríos, lagos, pozos, aguas subterráneas... Hoy en día se utilizan tres grandes configuraciones de sistemas de bombeo fotovoltaico: sistemas con motor DC, sistemas con motor AC y sistemas con motor AC y batería, como se puede ver en las figuras siguientes.

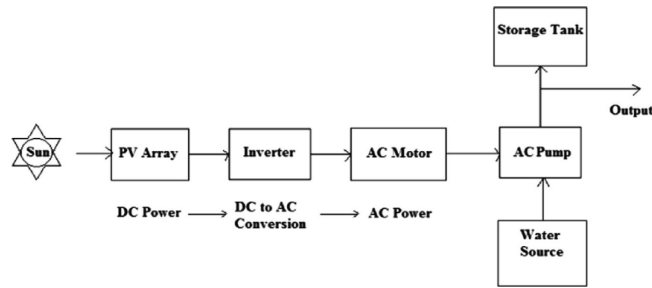


Figura 19: Sistema de bombeo fotovoltaico con motor AC

Fuente: ScienceDirect

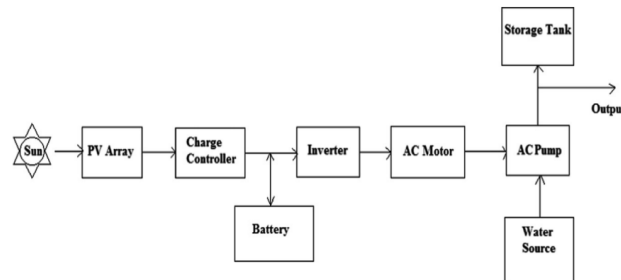


Figura 20: Sistema con de bombeo fotovoltaico motor AC y batería

Fuente: ScienceDirect

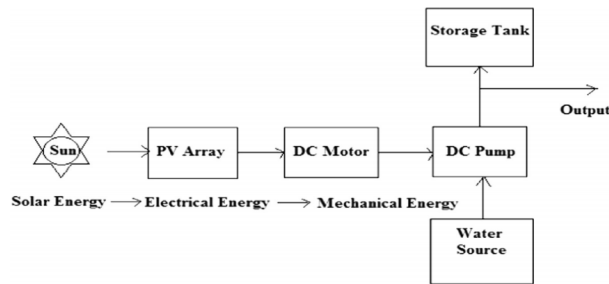


Figura 21: Sistema de bombeo fotovoltaico con motor DC

Fuente: ScienceDirect

3.4.2. Maximum Power Point Tracking

La técnica de Maximum Power Point Tracking (MPPT), cuyo objetivo es la maximización de la potencia, se utiliza con generadores no lineales. Se suele usar en sistemas fotovoltaicos y también en sistemas con turbinas eólicas.

La potencia transferida por las células solares varía dependiendo no solamente del recurso solar, pero también de la carga a la que estén conectados los paneles. La luz solar es un recurso muy variable, como se ha podido ver: depende de la época del año, del momento del día, del clima... Por lo tanto, no es lineal. Al cambiar, la característica que permite al sistema conseguir la potencia máxima cambia también. El objetivo de los reguladores MPPT es mantener la transferencia de potencia a una eficiencia máxima en todo momento, aplicando una resistencia, que varía para que el sistema trabaje siempre en su punto de potencia máxima.

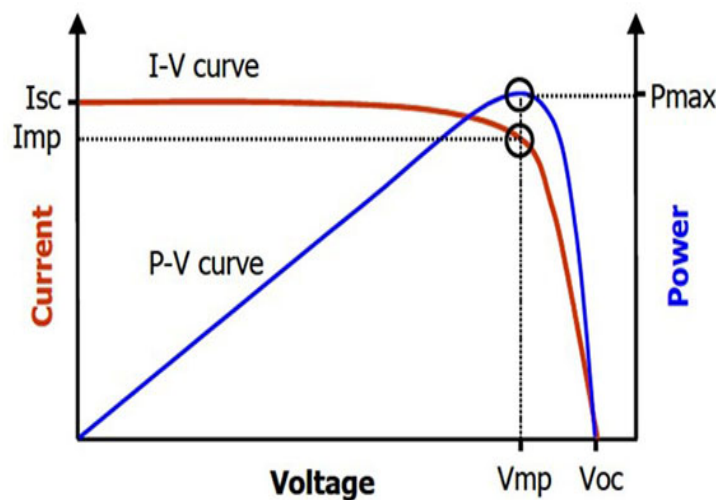


Figura 22: Principio del MPPT

Fuente: Power Electronics

4. Dimensionamiento del sistema

Para dimensionar el sistema, se debe siempre tener en cuenta la primera ley de la termodinámica de Lavoisier: la energía no se crea ni se destruye, pero se transforma.

El sistema estudiado es un sistema cerrado. Esto significa que en cada momento, la energía que se podrá usar para bombear es la energía que obtendremos gracias a la luz solar (en el sistema real, habrá pérdidas en los paneles, pérdidas por la temperatura, pérdidas mecánicas...). La radiación solar no es lineal, por lo que en cada momento del día, el sistema trabajará de manera distinta. El sistema debe ser dimensionado de manera que funcione adecuadamente en cada instante durante el tiempo de bombeo, teniendo en mente que siempre debe haber igualdad entre el recurso y lo que se usa (en un caso ideal).

El dimensionado debe seguir varios pasos. Primero, se seleccionarán un tipo de panel, un tipo de bomba y un tipo de motor. Se analizará el recurso solar. Después se analizarán las necesidades en agua, para el dimensionamiento de la bomba. Se compararán la potencia necesaria con la potencia disponible para elegir un panel y una bomba adaptados. Finalmente se seleccionarán los últimos elementos del kit (regulador MPPT, tanque, otros accesorios...).

Este estudio se centra en un caso específico, la región de Borno, Nigeria. Será posible, a posteriori, dimensionar otros kits para otros casos con especificaciones de uso distintas (alturas de bombeo, condiciones meteorológicas, etc.) siguiendo el mismo método.

4.1. Recurso solar: un recurso muy variable

Para dimensionar el sistema, es necesario analizar el recurso solar, es decir, la cantidad de luz solar disponible en la región estudiada.

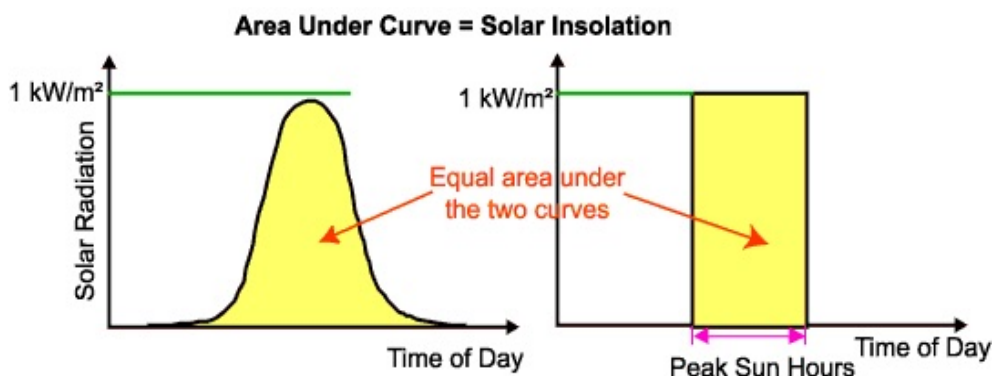


Figura 23: Variabilidad del recurso solar durante el día

Fuente: PV Education

La radiación solar es un recurso muy variable. Depende del momento del día, de la época del

año, del tiempo (si hay nubes, si llueve...). Como se puede ver en la Figura 23 ([PVED16]), sólo será posible bombear durante un tiempo limitado cada día, ya que no se dispondrá de luz solar durante la totalidad del día.

Es posible obtener gran cantidad de datos meteorológicos en la base de datos online de la NASA. Con las coordenadas de Maiduguri, en la región de Borno, Nigeria (11.842 N, 13.149 E), se obtienen los siguientes datos sobre el recurso solar: la media por mes, en kW/m^2 , de la radiación solar total incidente sobre una superficie horizontal, en la superficie de la Tierra, durante intervalos de tres horas. Esta media ha sido calculada con veintidós años de datos (desde julio de 1983 hasta junio de 2005, [NASA18]).

Monthly Averaged Insolation Incident On A Horizontal Surface At Indicated GMT Times (kW/m^2)												
Lat 11.842 Lon 13.149	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Average@00	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Average@03	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Average@06	0.08	0.09	0.12	0.14	0.14	0.12	0.11	0.11	0.12	0.14	0.14	0.10
Average@09	0.61	0.67	0.75	0.76	0.75	0.68	0.60	0.57	0.65	0.70	0.69	0.62
Average@12	0.78	0.87	0.89	0.86	0.83	0.77	0.71	0.67	0.73	0.78	0.78	0.73
Average@15	0.35	0.40	0.41	0.37	0.34	0.34	0.32	0.30	0.30	0.28	0.27	0.28
Average@18	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Average@21	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

Figura 24: Media mensual de la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal en Maiduguri

Fuente: NASA

Con MATLAB y con la ayuda de estos datos, es posible dibujar las curvas de la radiación por mes. Una posibilidad sería dimensionar el sistema basándose en la media anual, pero parece más razonable basarse en los datos del mes con menos sol, es decir, el mes de agosto. De este modo se trata el peor caso posible y se asegura que la ONG pueda bombear la cantidad de agua mínima aún en el mes con las peores condiciones solares.

En la Figura 25 se ha dibujado la curva de la radiación solar en Maiduguri durante el mes de agosto, durante 24 horas. Se puede ver que entre las 06:00 y las 18:00 se centra la mayor potencia solar. Durante el resto del día (lo que viene a ser la noche) apenas hay luz. Esto se puede apreciar aún mejor en la Figura 26, dónde se ha suavizado la curva anterior y se ha centrado entre las 06:00 y las 18:00 horas.

Utilizando esta última curva y la función trapz de MATLAB (es decir, integrando numéricamente con la regla del trapecio), se calcula el área debajo de la curva entre las 09:00 y las 15:00. Se seleccionan estas horas ya que se busca analizar el peor caso posible para la ONG, en el que sólo bombearan durante las seis horas con más intensidad solar del día. Si el sistema es capaz de bombear la cantidad mínima de agua (30 m^3 por día) en tan sólo seis horas, la ONG tendrá

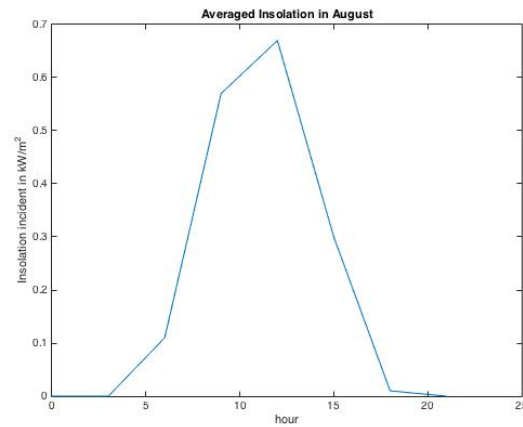


Figura 25: Radiación solar incidente sobre una superficie horizontal durante el mes de agosto

Fuente: Ilustración del autor

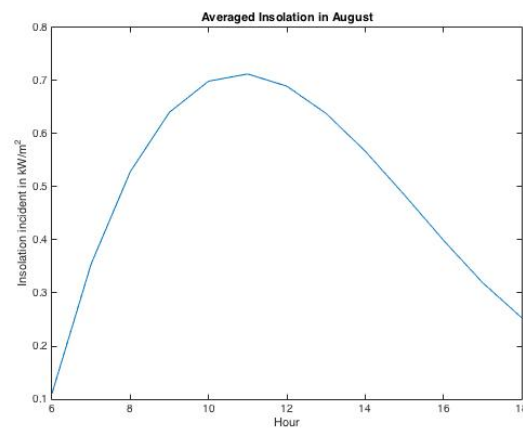


Figura 26: Curva anterior suavizada, entre las 06:00 y las 18:00

Fuente: Ilustración del autor

suficiente agua para el día; y si consigue funcionar durante más tiempo, entonces los resultados serán aún mejores. Integrando con MATLAB (intervalos de quince minutos) se hallan, pues, los siguientes valores (cf. Cuadro 2).

Sumando los valores del Cuadro 2, encontramos la energía proveniente del sol durante el tiempo de bombeo de seis horas.

$$E_{sol} = 3,9308 kWh/m^2$$

Hora	Energía (kWh/m ²)
09:00-09:15	0.1616
09:15-09:30	0.1618
09:30-09:45	0.1620
09:45-10:00	0.1622
10:00-10:15	0.1624
10:15-10:30	0.1626
10:30-10:45	0.1628
10:45-11:00	0.1630
11:00-11:15	0.1632
11:15-11:30	0.1633
11:30-11:45	0.1635
11:45-12:00	0.1637
12:00-12:15	0.1639
12:15-12:30	0.1641
12:30-12:45	0.1643
12:45-13:00	0.1644
13:00-13:15	0.1646
13:15-13:30	0.1648
13:30-13:45	0.1650
13:45-14:00	0.1652
14:00-14:15	0.1653
14:15-14:30	0.1655
14:30-14:45	0.1657
14:45-15:00	0.1659

Cuadro 2: Energía entregada por el sol por m² con un paso de 15 minutos

4.2. De la energía solar a la energía mecánica utilizada para bombear

4.2.1. Necesidad de agua

Solidarités International trabaja, como ya se ha mencionado anteriormente, en campamentos de entre 2000 y 200 000 personas. Cada persona necesita un mínimo de 15 L de agua por día. Todos los cálculos que se van a realizar en esta sección se basan en una demanda de agua de 30 m³ por día.

Al considerarse un tiempo mínimo de bombeo de seis horas, el sistema debería ser capaz de bombear un caudal de 5 m³/h.

Por indicación de la ONG, se debe dimensionar el sistema planteando una altura de bombeo de 7 m como mínimo. Se estudiarán bombas que funcionen entre 10 y 15 m de profundidad.

4.2.2. Selección del tipo de motor

La selección del tipo de motor para el kit es rápida: entre un motor DC y uno AC se elige el DC. A pesar de la fiabilidad de los motores AC y de su bajo coste, en este caso un motor DC resulta una mejor opción. Para la ONG resultará más fácil utilizar el sistema ya que no constará de inversor, lo cual reducirá a su vez el coste del kit. Se buscará por lo tanto una bomba con motor DC.

4.2.3. Selección del tipo de bomba

Pros	Contras
Aplicaciones de alta presión	Caudales de bombeo bajos (<15 m ³ /día)
Caudal prácticamente independiente de la altura de bombeo	Par de inicio alto
Más eficaces que las centrífugas a altas velocidades	Más difíciles de acoplar a sistemas fotovoltaicos
	Mantenimiento regular
	Menos eficaces que las centrífugas a alturas de bombeo bajas

Cuadro 3: Bombas volumétricas: Pros y contras

Pros	Contras
Muy compacta	Necesita altas velocidades de spin
Caudales de bombeo elevados (25 a 100 m ³ /día)	No autocebante
Alturas de bombeo bajas-medias (10-30 m)	
Simple	
Fiable	
Bajo coste	
Bajo mantenimiento	
Robusta	
Par de inicio bajo	
Se puede acoplar directamente a sistemas fotovoltaicos	

Cuadro 4: Bombas centrífugas: Pros y contras

Como se ha podido ver en la sección 3, se pueden usar tanto bombas centrífugas como bombas volumétricas en sistemas de bombeo fotovoltaico. Se escoge un tipo de bomba u otro dependiendo del caudal necesario y de la altura de bombeo. Analizando los pros y contras de cada uno de los tipos de bombas, presentados en los Cuadros 3 y 4, se escoge finalmente para el kit una bomba centrífuga, debido a su simplicidad, a su fácil conexión en sistemas de bombeo fotovoltaico, y al hecho de que son especialmente eficientes para alturas de bombeo poco elevadas ([ARGA03]). Además, las bombas centrífugas exigen menos mantenimiento que las de desplazamiento positivo, y son más baratas en general, por lo que son aún más adaptadas para la ONG, que busca ante todo un kit fácil de usar y lo más barato posible.

4.2.4. Dimensionamiento básico

La potencia (kW) necesaria para bombear un caudal Q (m³/s) se puede en un principio calcular a través de la siguiente fórmula:

$$P = \frac{\rho * g * Q * H}{1000 * \eta_p}$$

donde H es la altura de bombeo (m), ρ la densidad del agua (998 kg/m³), g la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²), 1000 un factor de conversión y η_p la eficiencia de la bomba ([CAMP12]).

Con esta fórmula básica, la potencia requerida para bombear un cierto caudal es proporcional a dicho caudal. La curva de rendimiento de la bomba es en este caso una línea recta.

	Q (m3/h)	H (m)	t (h)	V (m3)	P (kW)	n
Flow rate = 2,5 m3/h						
	2,5	7	6	25	0,048	1666
	2,5	10	6	25	0,068	1666
	2,5	15	6	25	0,102	1666
	2,5	20	6	25	0,136	1666
Flow rate = 5 m3/h						
	5	7	6	30	0,095	2000
	5	10	6	30	0,136	2000
	5	15	6	30	0,204	2000
	5	20	6	30	0,272	2000
Flow rate = 8 m3/h						
	8	7	6	48	0,152	3200
	8	10	6	48	0,218	3200
	8	15	6	48	0,326	3200
	8	20	6	48	0,435	3200
Flow rate = 10 m3/h						
	10	7	10	100	0,19	6666
	10	10	10	100	0,272	6666
	10	15	10	100	0,408	6666
	10	20	10	100	0,544	6666

Figura 27: Potencia necesaria para bombear en función del caudal

Fuente: Autor

Usando esta fórmula, para distintos caudales, y distintas alturas de bombeo, se observa que, como se había comentado anteriormente, el caudal mínimo de la bomba, para poder abastecer al campamento de 2000 personas, es de 5 m³/hora (cf. Figura 27, dónde n es el número de personas abastecidas con el volumen de agua bombeado). Para este caudal y una altura de bombeo de 7 m mínimo, se necesitan pues 0.095 kW. La ONG busca una bomba que trabaje a H = 10 m aproximadamente, por lo que $P_{idealbomba} = 136W$.

Sin embargo, asumiendo que en general, las bombas centrífugas tienen un rendimiento del 70 %, se necesitarían $P_{realbomba} = P_{idealbomba}/0.7 = 194.28 W$ para bombear la cantidad de agua deseada. Es necesario, pues, que el panel provea esta potencia a la bomba para conseguir el resultado buscado.

Con la fórmula básica se necesita pues $E_{realbomba} = 194.28W * 6h = 1165.68 Wh$ para bombear la cantidad deseada. Sabemos de la sección anterior que $E_{sol} = 3930.8 Wh/m^2$. Teniendo en cuenta la eficiencia de los paneles policristalinos, que suele ser estar alrededor del 15 %, tendríamos la siguiente relación, donde A es el área del panel y n el número de paneles usados:

$$E_{realbomba}[Wh] = E_{sol}[Wh/m^2] * 0,15 * n * A[m^2]$$

Si tomamos las dimensiones máximas de la base del kit (asumiendo que todos los elementos van en una sola gran caja y que el panel va tumbado), que son 1.5 x 1.5 m; tendríamos un panel un poco más pequeño, pongamos 1.4 x 1.4 m, con un área de 1.96 m².

Tendríamos pues:

$$1165,68 = 3930,8 * 0,15 * n * 1,96$$

Obtendríamos $n = 1.009$ paneles, es decir, 2 paneles. Con este primer enfoque, parece posible realizar el kit deseado, quizá no con un sólo panel si no con dos. Los paneles solares pesan alrededor de 20 kg y las bombas centrífugas utilizadas para sistemas de bombeo fotovoltaico alrededor de 40 kg. Con tan sólo la bomba y dos paneles alcanzaríamos 80 kg de peso para el kit. Añadiendo los accesorios y el tanque el peso total probablemente exceda los 200 kg, aunque no demasiado.

Con esta fórmula básica, se obtiene una dependencia lineal entre potencia y caudal. Aunque este dimensionamiento es interesante para hacerse una primera idea de la potencia necesaria para bombear el caudal deseado, es una simplificación del caso real. Para seleccionar una bomba para el kit se van a estudiar a continuación distintos modelos de bombas presentes en el mercado. Se analizarán sus curvas de funcionamiento para ver si la luz del sol en Maiduguri es suficiente para bombear lo que la ONG necesita.

4.2.5. Estudio de una selección de bombas

En esta sección se analizan distintas bombas. La relación entre el caudal Q , la potencia de entrada P_{in} y la altura de bombeo H es un polinomio de tercer grado.

$$Q(HP_{in}) = c_1(H)P_{in}^3 + c_2(H)P_{in}^2 + c_3(H)P_{in} + c_4(H)$$

Donde c_1 , c_2 , c_3 y c_4 son coeficientes que vamos a encontrar con la ayuda de la función `polyfit` de MATLAB.

Para hallar una bomba apropiada para el kit, se seleccionan primero bombas interesantes de Lorentz [LORE18] y Grundfos [GRUN18], los dos mayores fabricantes de bombas con los que trabaja la ONG, y con los que prefiere seguir trabajando, privilegiando la calidad al precio (sus bombas son quizás más caras que las de otros fabricantes, pero son muy fiables y además la ONG tiene partenariados con ellos).

Los modelos seleccionados son las bombas PS150 C-SJ5-8, PS2-150 C-SJ5-8, PS2-600 CS-F3-7 and PS2-600 C-SJ5-8 de Lorentz; y CRIF 10-01 A-CA-I-E-HQQE, CRNF 10-01 A-CA-G-E-HQQE, CRNF 15-01 A-CA-G-E-HQQE and CRIF 15-01 A-CA-I-E-HQQE de Grundfos. La selección se basa en el caudal y la altura de bombeo.

En las fichas técnicas se presentan las curvas que relacionan el caudal y la potencia para cada bomba. Usando la función `polyfit` de MATLAB, dibujamos las curvas para las alturas que nos interesan para poder comparar la potencia necesaria para el bombeo con la potencia disponible a la salida de los paneles. En cada caso se escoge la altura más cercana al caso de estudio (7 m mínimo).

PS150 C-SJ5-8, Lorentz

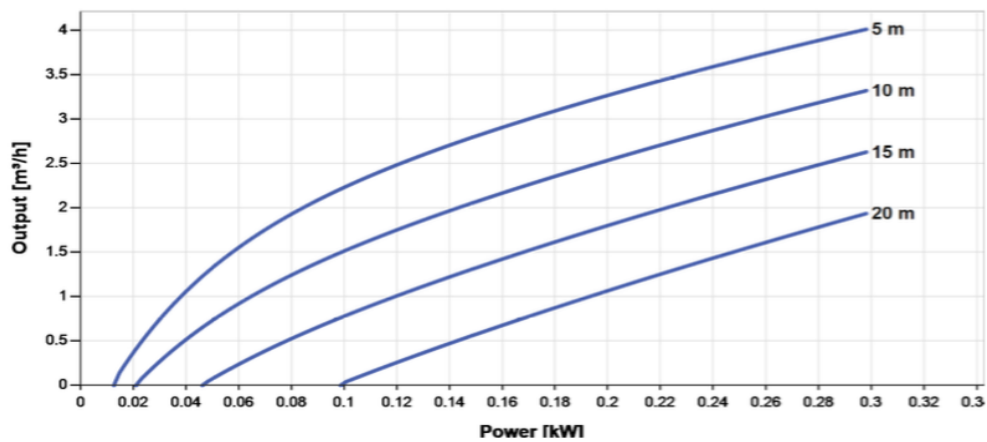


Figura 28: Curvas de funcionamiento de la bomba PS150 C-SJ5-8

Fuente: Lorentz

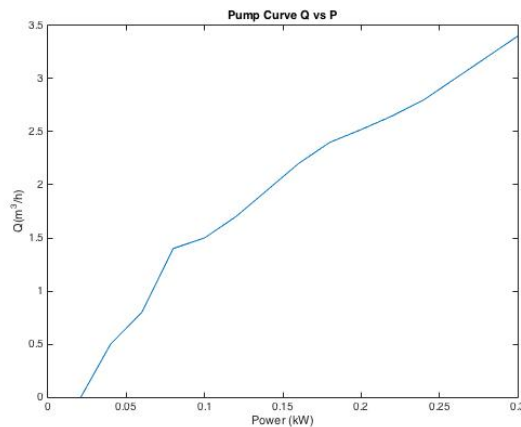


Figura 29: Curvas de funcionamiento de la bomba PS150 C-SJ5-8 para $H = 10$ m

Fuente: Ilustración del autor

Para la curva relativa a $H = 10$ m, los coeficientes hallados son $c_1 = 173.0387$, $c_2 = -107.6400$, $c_3 = 29.9721$ y $c_4 = -0.5656$, por lo que, para la bomba PS150 C-SJ5-8 tenemos

$$Q = 173,0387P^3 - 107,6400P^2 + 29,9721P - 0,5656$$

PS2-150 C-SJ5-8, Lorentz

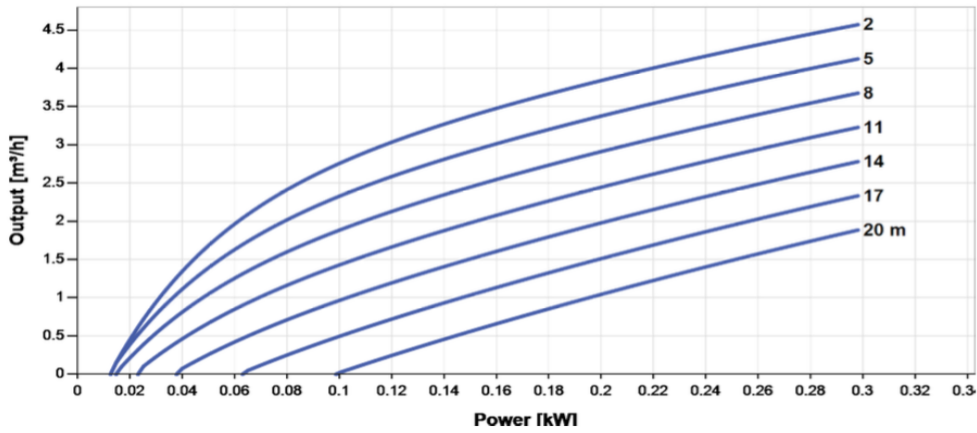


Figura 30: Curvas de funcionamiento de la bomba PS2-150 C-SJ5-8

Fuente: Lorentz

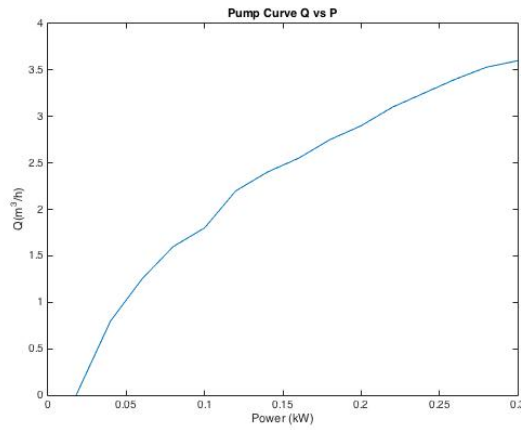


Figura 31: Curvas de funcionamiento de la bomba PS2-150 C-SJ5-8 para H = 8 m

Fuente: Ilustración del autor

Para la curva relativa a H = 8 m, los coeficientes hallados son $c_1 = 169.6265$, $c_2 = -116.7829$, $c_3 = 33.5378$ y $c_4 = -0.4613$, por lo que, para la bomba PS2-150 C-SJ5-8 tenemos

$$Q = 169,6265P^3 - 116,7829P^2 + 33,5378P - 0,4613$$

PS2-600 CS-F3-7, Lorentz

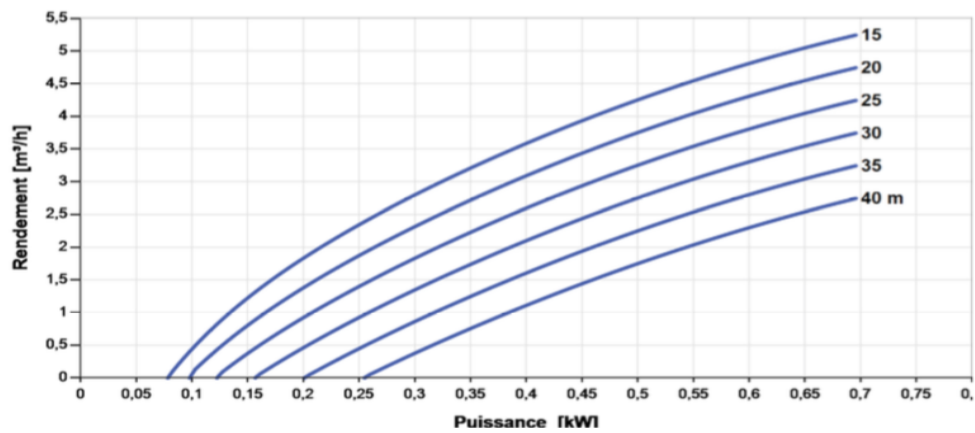


Figura 32: Curvas de funcionamiento de la bomba PS2-600 CS-F3-7

Fuente: Lorentz

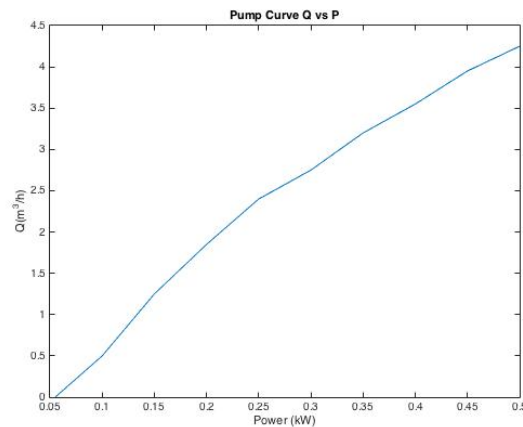


Figura 33: Curvas de funcionamiento de la bomba PS2-600 CS-F3-7 para $H = 15$ m

Fuente: Ilustración del autor

Para la curva relativa a $H = 15$ m, los coeficientes hallados son $c_1 = 11.2787$, $c_2 = -19.3545$, $c_3 = 17.2487$ y $c_4 = -0.9447$, por lo que, para la bomba PS2-600 CS-F3-7 tenemos

$$Q = 11,2787P^3 - 19,3545P^2 + 17,2487P - 0,9447$$

PS2-600 C-SJ5-8, Lorentz

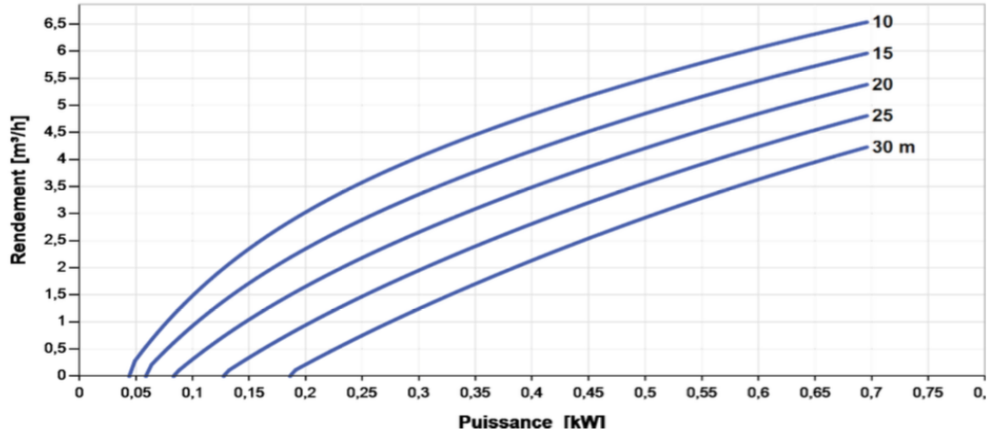


Figura 34: Curvas de funcionamiento de la bomba PS2-600 C-SJ5-8

Fuente: Lorentz

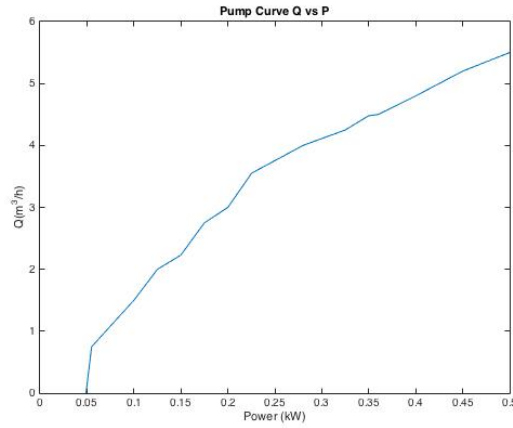


Figura 35: Curvas de funcionamiento de la bomba PS2-600 C-SJ5-8 para $H = 10$ m

Fuente: Ilustración del autor

Para la curva relativa a $H = 10$ m, los coeficientes hallados son $c_1 = 54.2215$, $c_2 = -64.4372$, $c_3 = 31.9820$ y $c_4 = -1.1375$, por lo que, para la bomba PS2-600 C-SJ5-8 tenemos

$$Q = 54,2215P^3 - 64,4372P^2 + 31,9820P - 1,1375$$

CRIF 10-01 A-CA-I-E-HQQE, Grundfos

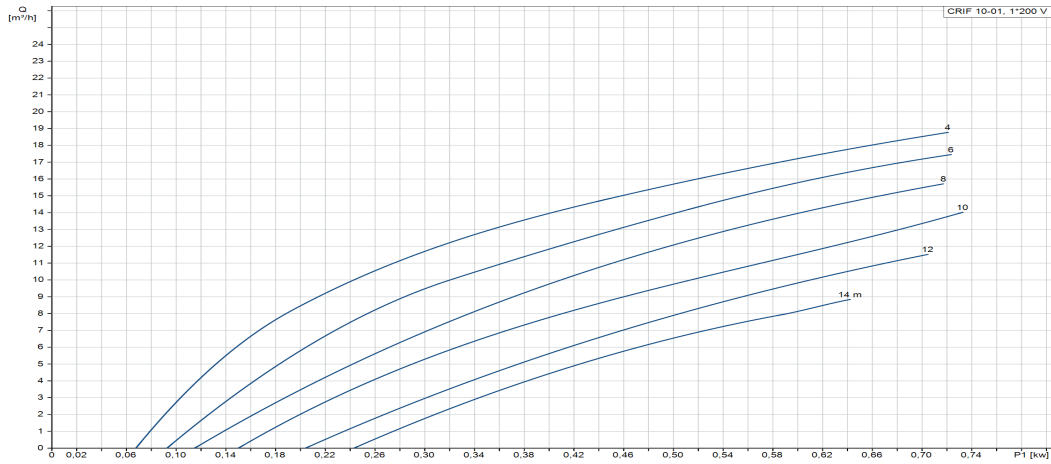


Figura 36: Curvas de funcionamiento de la bomba CRIF 10-01 A-CA-I-E-HQQE

Fuente: Grundfos

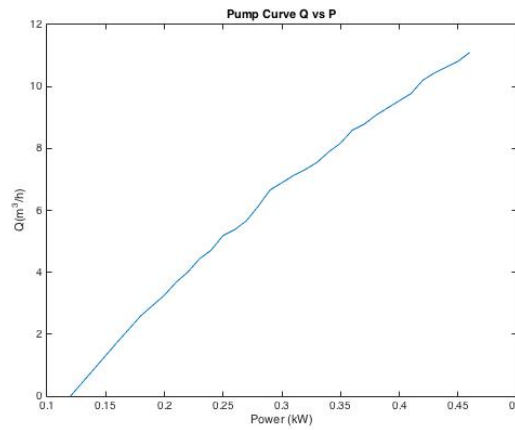


Figura 37: Curvas de funcionamiento de la bomba CRIF 10-01 A-CA-I-E-HQQE para $H = 8$ m

Fuente: Ilustración del autor

Para la curva relativa a $H = 8$ m, los coeficientes hallados son $c_1 = 32.8228$, $c_2 = -59.344$, $c_3 = 57.8106$ y $c_4 = -6.1348$, por lo que, para la bomba CRIF 10-01 A-CA-I-E-HQQE tenemos

$$Q = 32,8228P^3 - 59,344P^2 + 57,8106P - 6,1348$$

CRNF 10-01 A-CA-G-E-HQQE, Grundfos

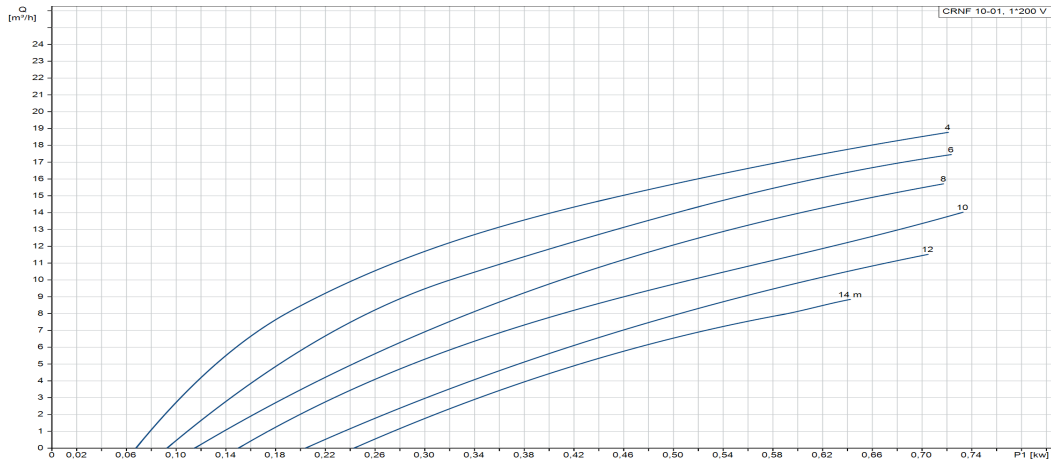


Figura 38: Curvas de funcionamiento de la bomba CRNF 10-01 A-CA-I-E-HQQE

Fuente: Grundfos

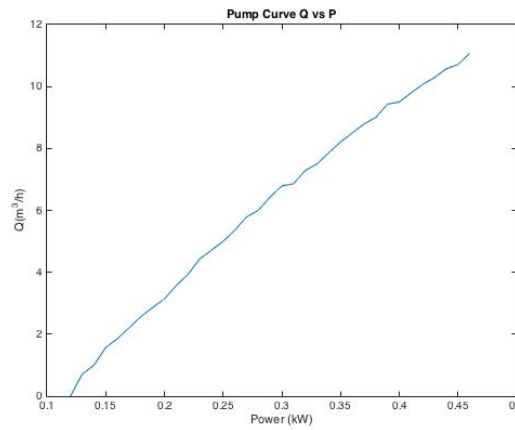


Figura 39: Curvas de funcionamiento de la bomba CRNF 10-01 A-CA-G-E-HQQE para $H = 8$ m

Fuente: Ilustración del autor

Para la curva relativa a $H = 8$ m, los coeficientes hallados son $c_1 = -4.1341$, $c_2 = -22.1970$, $c_3 = 45.8441$ y $c_4 = -4.9678$, por lo que, para la bomba CRNF 10-01 A-CA-G-E-HQQE tenemos

$$Q = -4,1341P^3 - 22,1970P^2 + 45,8441P - 4,9678$$

CRNF 15-01 A-CA-G-E-HQQE, Grundfos

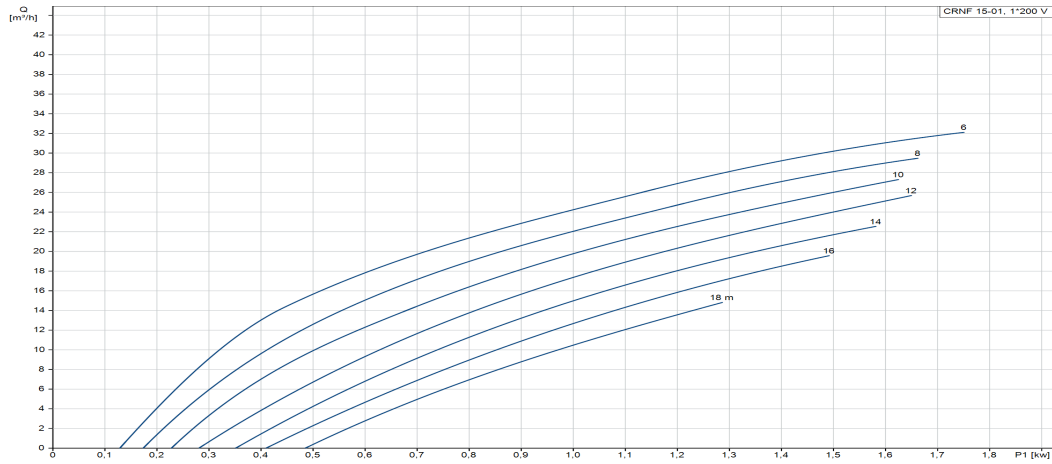


Figura 40: Curvas de funcionamiento de la bomba CRNF 15-01 A-CA-G-E-HQQE

Fuente: Grundfos

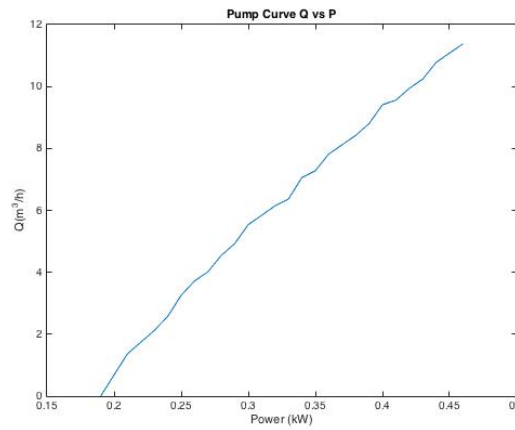


Figura 41: Curvas de funcionamiento de la bomba CRNF 15-01 A-CA-G-E-HQQE para $H = 8$ m

Fuente: Ilustración del autor

Para la curva relativa a $H = 8$ m, los coeficientes hallados son $c_1 = 142.2106$, $c_2 = -173.4086$, $c_3 = 107.1133$ y $c_4 = -14.9833$, por lo que, para la bomba CRNF 15-01 A-CA-G-E-HQQE tenemos

$$Q = 142,2106P^3 - 173,4086P^2 + 107,1133P - 14,9833$$

CRIF 15-01 A-CA-I-E-HQQE, Grundfos

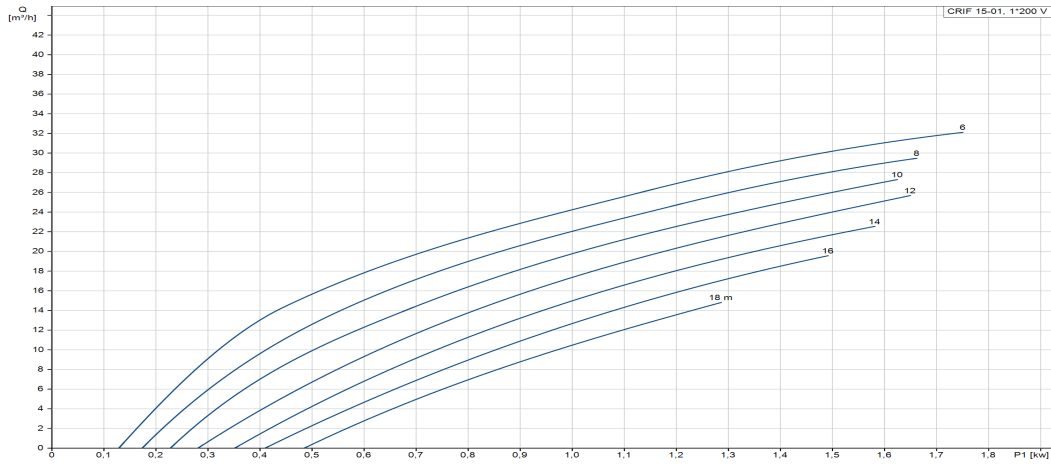


Figura 42: Curvas de funcionamiento de la bomba CRIF 15-01 A-CA-I-E-HQQE

Fuente: Grundfos

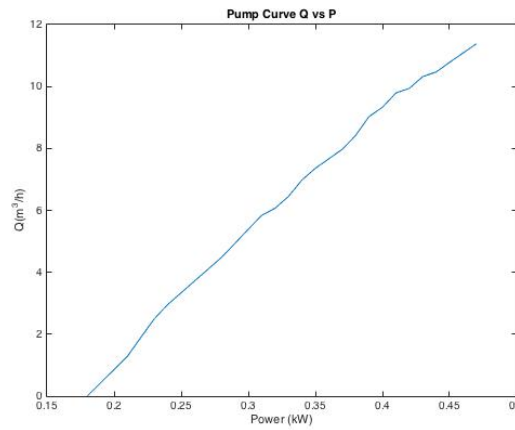


Figura 43: Curvas de funcionamiento de la bomba CRIF 15-01 A-CA-I-E-HQQE para $H = 8$ m

Fuente: Ilustración del autor

Para la curva relativa a $H = 8$ m, los coeficientes hallados son $c_1 = -46.6096$, $c_2 = 13.7381$, $c_3 = 45.9942$ y $c_4 = -8.3917$, por lo que, para la bomba CRIF 15-01 A-CA-I-E-HQQE tenemos

$$Q = -46,6096P^3 + 13,7381P^2 + 45,9942P - 8,3917$$

4.2.6. Estimación del volumen de agua obtenido por día y selección de una bomba

Las curvas halladas para cada bomba en la sección 4.2.5. presentan la relación real entre caudal y potencia de bombeo. Para ver si la cantidad total de agua necesaria podrá ser bombeada, se han de introducir los valores obtenidos a partir de la curva de irradiación solar en las ecuaciones de las curvas obtenidas para cada bomba, para obtener el caudal bombeado por cada bomba. Este caudal ha de ser superior a 5 m³/h, ya que se han de bombear 30 m³ de agua en tan sólo seis horas.

Tenemos pues

$$P_{realbomba} = \frac{E_{sol} * \eta * n * A}{t}$$

Donde n es el número de paneles, η y A la eficiencia y el área, respectivamente, de cada panel policristalino, y t el tiempo en horas. Con esta fórmula tenemos en cuenta la eficiencia del panel.

Para las bombas de Lorentz, se utiliza el área de los paneles VBHN330SJ47, VBHN325SA16 y VBHN330SA16 de Panasonic, que es de 1.67 m². Las dimensiones de estos paneles son 1.59x1.05x0.035 m, por lo que, si el kit es una caja con base cuadrada de máximo 1.5x1.5 m, los paneles tendrían que ir de pie y no tumbados. La eficiencia de estos paneles es de 19% ([SOLA18]).

En cuanto a Grundfos, este proveedor tiene la ventaja de vender sistemas completos (bombas con paneles). Utiliza los paneles GF100S o SW270. Para el estudio utilizaremos este último, ya que es el de mayor área, 1.68 m².

En las páginas siguientes se presentan los resultados de los cálculos con MATLAB para cada bomba. Al lado de cada una de las tablas está apuntado el número de paneles utilizado para cada cálculo.

Las bombas en rojo se adaptan al caso. En algunos casos (marcados en negrita azul), el caudal bombeado no es suficiente; y en otros (marcados en negrita morada), la potencia recibida es mayor que la potencia máxima a la que puede trabajar la bomba.

Las bombas en azul podrían utilizarse para el kit. Entre las bombas de Lorentz, están la PS2-600 C-SJ5-8 (bomba sumergible) con dos paneles, y la PS2-600 CS-F3-7 (bomba de superficie) con tres paneles.

La elección depende del uso que se le vaya a dar a la bomba. La ONG prefiere a ser posible una bomba sumergible, pero ambas bombearían el caudal deseado. En este estudio se han incluido bombas de superficie ya que la ONG desea ser capaz de rediseñar otros kits siguiendo la misma metodología. Es por ello que se explica la selección paso a paso sin dejar de lado ninguna opción hasta el final.

Las bombas de Grundfos se adaptarían todas para la altura de 8 m, utilizando dos paneles. Sin embargo, son todas bombas de superficie. Es importante destacar que, a pesar de que la ONG busca bombas sumergibles, las bombas de superficie serían una muy buena opción para otro posible kit,

ya que permiten bombear caudales mucho mayores (casi el doble que las de Lorentz, de superficie o no).

Para estimar el volumen de agua que se bombeará por día, se ha de añadir el volumen obtenido durante cada hora de bombeo. Utilizando los valores del caudal obtenidos con MATLAB, sumándolos y multiplicándolos por 0.25 (ya que se había utilizado un paso de quince minutos, un cuarto de hora), se obtiene el volumen por día.

Para las bombas de Lorentz, se obtiene un volumen de agua de 30.121 m^3 para la PS2-600 CS-F3-7 y de 29.5 m^3 para la PS2-600 C-SJ5-8. En el primer caso, se podrá abastecer al campamento de 2000 personas, como previsto. En el segundo caso, dividiendo por 15 L por persona, se abastecerían 1966 personas. Sin embargo, este segundo caso sigue siendo una opción plausible, ya que estábamos considerando el peor caso posible: únicamente seis horas de bombeo, durante el mes con menos sol. Si volvemos a la Figura xx, vemos que se podría bombear durante más de seis horas, por lo que se podría conseguir llegar a 30 m^3 de agua al día en el peor de los casos. En lo que concierne a las bombas de Grundfos, se obtienen volúmenes de cerca de 60 m^3 por día, lo cuál sería perfecto para la ONG ya que podrían dar más agua que el estricto mínimo de 15 L por persona. Sin embargo, como ya se ha dicho, estas bombas no son sumergibles por lo que se privilegia la bomba sumergible de Lorentz.

Se escoge por lo tanto para el kit la bomba PS2-600 C-SJ5-8, ya que es la única sumergible que puede abastecer la cantidad necesaria por día. Si la ONG decidiese finalmente utilizar una bomba de superficie, las bombas de Grundfos serían una mejor opción.

ps2600csj58	Insolation(kW*h/m²)	P Panel(kW)	Q (m³/h) H:10m	2 panels
09.00-09.15	0,1616	0,4102	4,8815	
09.15-09.30	0,1618	0,4107	4,8848	
09.30-09.45	0,162	0,4112	4,8881	
09.45-10.00	0,1622	0,4117	4,8913	
10.00-10.15	0,1624	0,4122	4,8945	
10.15-10.30	0,1626	0,4127	4,8977	
10.30-10.45	0,1628	0,4132	4,9009	
10.45-11.00	0,163	0,4137	4,9041	
11.00-11.15	0,1632	0,4142	4,9072	
11.15-11.30	0,1633	0,4146	4,9103	
11.30-11.45	0,1635	0,4151	4,9134	
11.45-12.00	0,1637	0,4156	4,9165	
12.00-12.15	0,1639	0,4161	4,9196	
12.15-12.30	0,1641	0,4165	4,9226	
12.30-12.45	0,1643	0,417	4,9256	
12.45-13.00	0,1644	0,4174	4,9286	
13.00-13.15	0,1646	0,4179	4,9316	
13.15-13.30	0,1648	0,4183	4,9346	
13.30-13.45	0,165	0,4188	4,9375	
13.45-14.00	0,1652	0,4192	4,9404	
14.00-14.15	0,1653	0,4197	4,9433	
14.15-14.30	0,1655	0,4201	4,9462	
14.30-14.45	0,1657	0,4206	4,9491	
14.45-15.00	0,1659	0,421	4,9519	

Figura 44: Resultados para PS2-600 CS-J5-8 con dos paneles

Fuente: Ilustración del autor

ps150csj58	Insolation(kW*h/m²)	P Panel(kW)	Q (m³/h) H:10m	1 panel
09.00-09.15	0,1616	0,2051	2,5466	
09.15-09.30	0,1618	0,2054	2,5486	
09.30-09.45	0,162	0,2056	2,5505	
09.45-10.00	0,1622	0,2059	2,5524	
10.00-10.15	0,1624	0,2061	2,5543	
10.15-10.30	0,1626	0,2063	2,5562	
10.30-10.45	0,1628	0,2066	2,5581	
10.45-11.00	0,163	0,2068	2,5599	
11.00-11.15	0,1632	0,2071	2,5618	
11.15-11.30	0,1633	0,2073	2,5636	
11.30-11.45	0,1635	0,2076	2,5654	
11.45-12.00	0,1637	0,2078	2,5672	
12.00-12.15	0,1639	0,208	2,569	
12.15-12.30	0,1641	0,2083	2,5708	
12.30-12.45	0,1643	0,2085	2,5726	
12.45-13.00	0,1644	0,2087	2,5743	
13.00-13.15	0,1646	0,2089	2,5761	
13.15-13.30	0,1648	0,2092	2,5778	
13.30-13.45	0,165	0,2094	2,5795	
13.45-14.00	0,1652	0,2096	2,5812	
14.00-14.15	0,1653	0,2098	2,5829	
14.15-14.30	0,1655	0,2101	2,5846	
14.30-14.45	0,1657	0,2103	2,5863	
14.45-15.00	0,1659	0,2105	2,5879	

Figura 45: Resultados para PS150 C-SJ5-8 con un panel

Fuente: Ilustración del autor

ps150csj58	Insolation(kW*h/m^2)	P Panel(kW)	Q (m^3/h) H:10m	2 panels
09.00-09.15	0,1616	0,4102	4,8815	
09.15-09.30	0,1618	0,4107	4,8848	
09.30-09.45	0,162	0,4112	4,8881	
09.45-10.00	0,1622	0,4117	4,8913	
10.00-10.15	0,1624	0,4122	4,8945	
10.15-10.30	0,1626	0,4127	4,8977	
10.30-10.45	0,1628	0,4132	4,9009	
10.45-11.00	0,163	0,4137	4,9041	
11.00-11.15	0,1632	0,4142	4,9072	
11.15-11.30	0,1633	0,4146	4,9103	
11.30-11.45	0,1635	0,4151	4,9134	
11.45-12.00	0,1637	0,4156	4,9165	
12.00-12.15	0,1639	0,4161	4,9196	
12.15-12.30	0,1641	0,4165	4,9226	
12.30-12.45	0,1643	0,417	4,9256	
12.45-13.00	0,1644	0,4174	4,9286	
13.00-13.15	0,1646	0,4179	4,9316	
13.15-13.30	0,1648	0,4183	4,9346	
13.30-13.45	0,165	0,4188	4,9375	
13.45-14.00	0,1652	0,4192	4,9404	
14.00-14.15	0,1653	0,4197	4,9433	
14.15-14.30	0,1655	0,4201	4,9462	
14.30-14.45	0,1657	0,4206	4,9491	
14.45-15.00	0,1659	0,421	4,9519	

>0.3kW!!!!

Figura 46: Resultados para PS150 C-SJ5-8 con dos paneles

Fuente: Ilustración del autor

ps2600csf37	Insolation(kW*h/m^2)	P Panel(kW)	Q (m^3/h) H:15m	3 panels
09.00-09.15	0,1616	0,6153	4,9683	
09.15-09.30	0,1618	0,6161	4,973	
09.30-09.45	0,162	0,6168	4,9777	
09.45-10.00	0,1622	0,6176	4,9824	
10.00-10.15	0,1624	0,6183	4,9871	
10.15-10.30	0,1626	0,619	4,9917	
10.30-10.45	0,1628	0,6198	4,9963	
10.45-11.00	0,163	0,6205	5,0008	
11.00-11.15	0,1632	0,6212	5,0054	
11.15-11.30	0,1633	0,6219	5,0099	
11.30-11.45	0,1635	0,6227	5,0143	
11.45-12.00	0,1637	0,6234	5,0188	
12.00-12.15	0,1639	0,6241	5,0232	
12.15-12.30	0,1641	0,6248	5,0276	
12.30-12.45	0,1643	0,6255	5,0319	
12.45-13.00	0,1644	0,6262	5,0362	
13.00-13.15	0,1646	0,6268	5,0405	
13.15-13.30	0,1648	0,6275	5,0448	
13.30-13.45	0,165	0,6282	5,049	
13.45-14.00	0,1652	0,6289	5,0532	
14.00-14.15	0,1653	0,6295	5,0574	
14.15-14.30	0,1655	0,6302	5,0616	
14.30-14.45	0,1657	0,6308	5,0657	
14.45-15.00	0,1659	0,6315	5,0698	

Figura 47: Resultados para PS2-600 CS-F3-7 con tres paneles

Fuente: Ilustración del autor

ps2150csj58	Insolation(kW*h/m^2)	P Panel(kW)	Q (m^3/h) for H:8m	Q (m^3/h) for H:11m	1 panel
09:00-09:15	0,1616	0,2051	2,9682	2,4823	
09:15-09:30	0,1618	0,2054	2,97	2,4843	
09:30-09:45	0,162	0,2056	2,9718	2,4864	
09:45-10:00	0,1622	0,2059	2,9735	2,4884	
10:00-10:15	0,1624	0,2061	2,9752	2,4904	
10:15-10:30	0,1626	0,2063	2,977	2,4924	
10:30-10:45	0,1628	0,2066	2,9787	2,4944	
10:45-11:00	0,163	0,2068	2,9804	2,4964	
11:00-11:15	0,1632	0,2071	2,9821	2,4984	
11:15-11:30	0,1633	0,2073	2,9837	2,5003	
11:30-11:45	0,1635	0,2076	2,9854	2,5023	
11:45-12:00	0,1637	0,2078	2,9871	2,5042	
12:00-12:15	0,1639	0,208	2,9887	2,5061	
12:15-12:30	0,1641	0,2083	2,9903	2,508	
12:30-12:45	0,1643	0,2085	2,9919	2,5099	
12:45-13:00	0,1644	0,2087	2,9935	2,5117	
13:00-13:15	0,1646	0,2089	2,9951	2,5136	
13:15-13:30	0,1648	0,2092	2,9967	2,5154	
13:30-13:45	0,165	0,2094	2,9982	2,5172	
13:45-14:00	0,1652	0,2096	2,9998	2,519	
14:00-14:15	0,1653	0,2098	3,0013	2,5208	
14:15-14:30	0,1655	0,2101	3,0029	2,5226	
14:30-14:45	0,1657	0,2103	3,0044	2,5244	
14:45-15:00	0,1659	0,2105	3,0059	2,5261	

Figura 48: Resultados para PS2-150 C-SJ5-8 con un panel

Fuente: Ilustración del autor

ps2150csj58	Insolation(kW*h/m^2)	P Panel(kW)	Q (m^3/h) for H:8m	Q (m^3/h) for H:11m	2 panels
09:00-09:15	0,1616	0,4102	5,3535	4,4942	
09:15-09:30	0,1618	0,4107	5,3654	4,5019	
09:30-09:45	0,162	0,4112	5,3772	4,5096	
09:45-10:00	0,1622	0,4117	5,3889	4,5173	
10:00-10:15	0,1624	0,4122	5,4007	4,5249	
10:15-10:30	0,1626	0,4127	5,4124	4,5326	
10:30-10:45	0,1628	0,4132	5,424	4,5401	
10:45-11:00	0,163	0,4137	5,4357	4,5477	
11:00-11:15	0,1632	0,4142	5,4473	4,5552	
11:15-11:30	0,1633	0,4146	5,4588	4,5627	
11:30-11:45	0,1635	0,4151	5,4704	4,5701	
11:45-12:00	0,1637	0,4156	5,4819	4,5776	
12:00-12:15	0,1639	0,4161	5,4933	4,585	
12:15-12:30	0,1641	0,4165	5,5047	4,5923	
12:30-12:45	0,1643	0,417	5,5161	4,5997	
12:45-13:00	0,1644	0,4174	5,5274	4,607	
13:00-13:15	0,1646	0,4179	5,5387	4,6142	
13:15-13:30	0,1648	0,4183	5,55	4,6215	
13:30-13:45	0,165	0,4188	5,5612	4,6287	
13:45-14:00	0,1652	0,4192	5,5723	4,6358	
14:00-14:15	0,1653	0,4197	5,5834	4,643	
14:15-14:30	0,1655	0,4201	5,5945	4,6501	
14:30-14:45	0,1657	0,4206	5,6056	4,6571	
14:45-15:00	0,1659	0,421	5,6165	4,6642	

>0.3kW!!!!

Figura 49: Resultados para PS2-150 C-SJ5-8 con dos paneles

Fuente: Ilustración del autor

crif1001acaiehqge	Insolation(kW*h/m ²)	P Panel(kW)	Q (m ³ /h) for H:8m 1 panel	P Panel(kW)	Q (m ³ /h) for H:8m 2 panels
09:00-09:15	0,1616	0,2063	3,5551	0,4127	9,9222
09:15-09:30	0,1618	0,2066	3,5647	0,4132	9,9352
09:30-09:45	0,162	0,2068	3,5741	0,4137	9,9481
09:45-10:00	0,1622	0,2071	3,5836	0,4142	9,9609
10:00-10:15	0,1624	0,2073	3,5929	0,4147	9,9737
10:15-10:30	0,1626	0,2076	3,6022	0,4152	9,9863
10:30-10:45	0,1628	0,2078	3,6114	0,4157	9,9988
10:45-11:00	0,163	0,2081	3,6205	0,4161	10,0113
11:00-11:15	0,1632	0,2083	3,6296	0,4166	10,0237
11:15-11:30	0,1633	0,2086	3,6386	0,4171	10,0359
11:30-11:45	0,1635	0,2088	3,6475	0,4176	10,0481
11:45-12:00	0,1637	0,209	3,6564	0,4181	10,0602
12:00-12:15	0,1639	0,2093	3,6652	0,4185	10,0721
12:15-12:30	0,1641	0,2095	3,6739	0,419	10,084
12:30-12:45	0,1643	0,2097	3,6826	0,4195	10,0958
12:45-13:00	0,1644	0,21	3,6912	0,4199	10,1075
13:00-13:15	0,1646	0,2102	3,6997	0,4204	10,1192
13:15-13:30	0,1648	0,2104	3,7082	0,4209	10,1307
13:30-13:45	0,165	0,2107	3,7166	0,4213	10,1421
13:45-14:00	0,1652	0,2109	3,7249	0,4218	10,1535
14:00-14:15	0,1653	0,2111	3,7332	0,4222	10,1647
14:15-14:30	0,1655	0,2113	3,7414	0,4226	10,1759
14:30-14:45	0,1657	0,2115	3,7496	0,4231	10,187
14:45-15:00	0,1659	0,2118	3,7577	0,4235	10,198

Figura 50: Resultados para CRIF 10-01 A-CA-I-E-HQQE

Fuente: Ilustración del autor

crnf1001acagehqge	Insolation(kW*h/m ²)	P Panel(kW)	Q (m ³ /h) for H:8m 1 panel	P Panel(kW)	Q (m ³ /h) for H:8m 2 panels
09:00-09:15	0,1616	0,2063	3,5099	0,4127	9,8798
09:15-09:30	0,1618	0,2066	3,5191	0,4132	9,8927
09:30-09:45	0,162	0,2068	3,5282	0,4137	9,9055
09:45-10:00	0,1622	0,2071	3,5373	0,4142	9,9182
10:00-10:15	0,1624	0,2073	3,5463	0,4147	9,9309
10:15-10:30	0,1626	0,2076	3,5552	0,4152	9,9434
10:30-10:45	0,1628	0,2078	3,5641	0,4157	9,9558
10:45-11:00	0,163	0,2081	3,5729	0,4161	9,9681
11:00-11:15	0,1632	0,2083	3,5817	0,4166	9,9804
11:15-11:30	0,1633	0,2086	3,5904	0,4171	9,9925
11:30-11:45	0,1635	0,2088	3,599	0,4176	10,0046
11:45-12:00	0,1637	0,209	3,6075	0,4181	10,0165
12:00-12:15	0,1639	0,2093	3,616	0,4185	10,0283
12:15-12:30	0,1641	0,2095	3,6245	0,419	10,0401
12:30-12:45	0,1643	0,2097	3,6329	0,4195	10,0518
12:45-13:00	0,1644	0,21	3,6412	0,4199	10,0633
13:00-13:15	0,1646	0,2102	3,6494	0,4204	10,0748
13:15-13:30	0,1648	0,2104	3,6576	0,4209	10,0862
13:30-13:45	0,165	0,2107	3,6657	0,4213	10,0975
13:45-14:00	0,1652	0,2109	3,6738	0,4218	10,1086
14:00-14:15	0,1653	0,2111	3,6818	0,4222	10,1197
14:15-14:30	0,1655	0,2113	3,6897	0,4226	10,1307
14:30-14:45	0,1657	0,2115	3,6976	0,4231	10,1417
14:45-15:00	0,1659	0,2118	3,7055	0,4235	10,1525

Figura 51: Resultados para CRNF 10-01 A-CA-G-E-HQQE

Fuente: Ilustración del autor

crif1501acaeihqqe	Insolation(kW*h/m^2)	P Panel(kW)	Q (m^3/h) for H:8m 1 panel	P Panel(kW)	Q (m^3/h) for H:8m 2 panels
09:00-09:15	0,1616	0,2063	1,2737	0,4127	9,6523
09:15-09:30	0,1618	0,2066	1,2853	0,4132	9,6694
09:30-09:45	0,162	0,2068	1,2969	0,4137	9,6863
09:45-10:00	0,1622	0,2071	1,3083	0,4142	9,703
10:00-10:15	0,1624	0,2073	1,3197	0,4147	9,7197
10:15-10:30	0,1626	0,2076	1,331	0,4152	9,7362
10:30-10:45	0,1628	0,2078	1,3423	0,4157	9,7526
10:45-11:00	0,163	0,2081	1,3534	0,4161	9,7688
11:00-11:15	0,1632	0,2083	1,3645	0,4166	9,7849
11:15-11:30	0,1633	0,2086	1,3755	0,4171	9,8009
11:30-11:45	0,1635	0,2088	1,3864	0,4176	9,8167
11:45-12:00	0,1637	0,209	1,3973	0,4181	9,8324
12:00-12:15	0,1639	0,2093	1,408	0,4185	9,848
12:15-12:30	0,1641	0,2095	1,4187	0,419	9,8635
12:30-12:45	0,1643	0,2097	1,4293	0,4195	9,8788
12:45-13:00	0,1644	0,21	1,4399	0,4199	9,894
13:00-13:15	0,1646	0,2102	1,4503	0,4204	9,9091
13:15-13:30	0,1648	0,2104	1,4607	0,4209	9,924
13:30-13:45	0,165	0,2107	1,471	0,4213	9,9388
13:45-14:00	0,1652	0,2109	1,4812	0,4218	9,9535
14:00-14:15	0,1653	0,2111	1,4914	0,4222	9,9681
14:15-14:30	0,1655	0,2113	1,5015	0,4226	9,9825
14:30-14:45	0,1657	0,2115	1,5115	0,4231	9,9969
14:45-15:00	0,1659	0,2118	1,5214	0,4235	10,0111

Figura 52: Resultados para CRIF 15-01 A-CA-I-E-HQQE

Fuente: Ilustración del autor

crnf1501acagehqqe	Insolation(kW*h/m^2)	P Panel(kW)	Q (m^3/h) for H:8m 1 panel	P Panel(kW)	Q (m^3/h) for H:8m 2 panels
09:00-09:15	0,1616	0,2063	0,9841	0,4127	9,6819
09:15-09:30	0,1618	0,2066	0,9978	0,4132	9,7005
09:30-09:45	0,162	0,2068	1,0114	0,4137	9,719
09:45-10:00	0,1622	0,2071	1,0248	0,4142	9,7374
10:00-10:15	0,1624	0,2073	1,0382	0,4147	9,7557
10:15-10:30	0,1626	0,2076	1,0514	0,4152	9,7739
10:30-10:45	0,1628	0,2078	1,0646	0,4157	9,7919
10:45-11:00	0,163	0,2081	1,0776	0,4161	9,8098
11:00-11:15	0,1632	0,2083	1,0906	0,4166	9,8276
11:15-11:30	0,1633	0,2086	1,1034	0,4171	9,8453
11:30-11:45	0,1635	0,2088	1,1162	0,4176	9,8628
11:45-12:00	0,1637	0,209	1,1289	0,4181	9,8803
12:00-12:15	0,1639	0,2093	1,1414	0,4185	9,8976
12:15-12:30	0,1641	0,2095	1,1539	0,419	9,9148
12:30-12:45	0,1643	0,2097	1,1663	0,4195	9,9319
12:45-13:00	0,1644	0,21	1,1785	0,4199	9,9488
13:00-13:15	0,1646	0,2102	1,1907	0,4204	9,9657
13:15-13:30	0,1648	0,2104	1,2028	0,4209	9,9824
13:30-13:45	0,165	0,2107	1,2148	0,4213	9,999
13:45-14:00	0,1652	0,2109	1,2267	0,4218	10,0155
14:00-14:15	0,1653	0,2111	1,2385	0,4222	10,0318
14:15-14:30	0,1655	0,2113	1,2502	0,4226	10,0481
14:30-14:45	0,1657	0,2115	1,2618	0,4231	10,0642
14:45-15:00	0,1659	0,2118	1,2733	0,4235	10,0803

Figura 53: Resultados para CRNF 15-01 A-CA-G-E-HQQE

Fuente: Ilustración del autor

4.2.7. Activación de la bomba

El cómo activar la bomba no entra en las especificaciones del proyecto, sin embargo, es necesario hacer ciertos comentarios al respecto. El sistema no va a incluir una batería, ya que a Solidarités International no les gusta trabajar con baterías por su falta de fiabilidad en el terreno. Será, por lo tanto, necesario aportar corriente a la bomba para que empiece a bombear. Esto podría hacerse con capacidades.

Solidarités suele usar un sensor para activar el bombeo. Este dispositivo detecta el nivel solar y activa la bomba a partir de un cierto nivel detectado. También evita que la bomba se active y se pare en casos de irradiación insuficiente. El sistema sólo trabaja cuando hay suficiente luz para hacerlo funcionar.

4.2.8. Efecto de la temperatura en los paneles

Otro punto a mencionar es el efecto de la temperatura en los paneles. La ONG debe tener en cuenta que, con temperaturas altas, el sistema será menos eficiente ([PVED16]). La característica IV de las células fotovoltaicas varía si la temperatura aumenta, como puede verse en la Figura 54: cuando la temperatura aumenta, la corriente de corto circuito aumenta levemente, mientras que la tensión en circuito abierto disminuye. Es importante que, al variar la temperatura del panel, su tensión y corriente de salida sigan siendo las correctas para el funcionamiento del sistema. En general, hay 0.4 % de pérdidas por grado superior a 25°C.

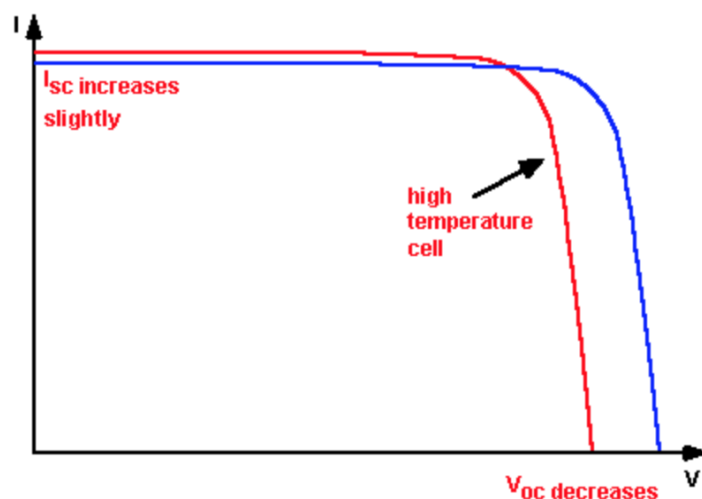


Figura 54: Efectos de la temperatura en la característica IV de una célula fotovoltaica

Fuente: PV Education

4.2.9. Selección del tipo de panel

Antes de escoger un modelo de panel específico, se ha de decidir qué tipo de panel (monocristalino, policristalino o de capa fina) es más apropiado para el caso. Por lo tanto, se procede a comparar los distintos tipos a través de la siguiente tabla.

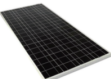
Tipo de panel	Rendimiento	Ciclo de vida	Efecto de la temperatura	Coste	Flexibilidad
Monocristalino 	Alto 15-20 %	Alto Aprox. 25 años	Bajo	Medio	X
Policristalino 	Medio 13-16 %	Medio	Alto	Bajo	X
Capa fina 	Bajo 7-13 %	Bajo	Medio	Alto	✓

Figura 55: Tabla comparativa de los distintos tipos de paneles solares fotovoltaicos

Fuente: Autor

En la figura anterior se puede ver que los paneles policristalinos son la mejor opción para el caso: son relativamente eficientes, muy fáciles de encontrar en el mercado, y los más baratos. Estos dos últimos criterios encajan perfectamente con lo que desea la ONG.

4.2.10. Comparación entre paneles disponibles en el mercado

Para seleccionar un panel para el kit, se realiza en primer lugar una preselección de distintos modelos fáciles de encontrar en el mercado, de buena calidad y tamaños adecuados para el kit. La preselección consta de los paneles siguientes:

- panel GF100S de Grundfos
- panel SW260 de Grundfos / Solar World
- panel GF270 de Grundfos
- panel Panasonic VBHN330SA16
- panel Panasonic VBHN325SA16
- panel Panasonic VBHN330SJ47

- panel Panasonic VBHN295SJ46
- panel Panasonic VBHN245SJ25
- panel JINKO Solar- PA-270Jinko
- panel Amerisolar AS-5Mde

Finalmente, los dos últimos paneles se quitan de las opciones ya que, a pesar de ser más baratos, la ONG prefiere invertir en elementos de más calidad para que el kit dure lo máximo posible. Los paneles de Grundfos se seleccionan para kits de Grundfos, y los de Panasonic para conectarlos con bombas de Lorentz.

El panel de Grundfos utilizado para el estudio de las bombas de Grundfos es el SW260 debido a su área, que es la mayor. Para las bombas de Lorentz se utiliza el área de los paneles VBHN330SJ47, VBHN325SA16 y VBHN330SA16. Las características de los paneles de esta gama son muy parecidas. Como finalmente se escoge una bomba de Lorentz, se elige un panel de Panasonic, el VBHN330SJ47.

4.2.11. Conexiones y ángulo de inclinación

Si se conectan paneles solares en serie, se suman sus tensiones a la salida. Si, al contrario, se conectan en paralelo, lo que se suma son las corrientes a la salida de los paneles.

La tensión en circuito abierto de los paneles de Panasonic presentados anteriormente es de alrededor de 70 V y su corriente de corto circuito de 6 A. Las bombas de Lorentz trabajan de manera óptima para tensiones superiores a 68 V, tensiones máximas de 150 V y corrientes máximas de 13 A.

La bomba escogida, la PS2-600 C-SJ5-8 necesita dos paneles. Éstos se podrían conectar tanto en serie como en paralelo, ya que no sobrepasarían los límites. Si se hubiese escogido otra bomba, como la PS2-600 CS-F3-7, que necesita tres paneles, habría habido problemas al conectar tanto en serie como en paralelo.

En lo que concierne al ángulo de inclinación, este estudio no profundiza en este aspecto. Se sugiere que los paneles estén inclinados con un ángulo igual a la latitud del lugar donde se encuentran. En general, se trata del ángulo óptimo. Existen sistemas de seguimiento solar, los *solar trackers*, pero la ONG prefiere no usarlos en el kit, ya que suponen gastos de más y complicaciones en el momento de instalar el kit. Una solución alternativa es mover manualmente los paneles para seguir el movimiento del sol durante el día. Se puede hacer una vez al día o más. Solidarités International suele optar por esta solución.

4.2.12. Elementos de control del sistema

El sistema debe incluir un regulador MPPT para trabajar en el punto de máxima potencia. Todas las bombas de Lorentz vienen con un MPPT integrado, lo cuál facilita mucho las cosas en este caso. Sin embargo, si la ONG deseara un kit con bombas de Grundfos, tendría que adquirir además un MPPT.



Figura 56: Bomba PS2-600 C-SJ5-8 con MPPT integrado

Fuente: Lorentz

4.2.13. Almacenamiento del agua y de la energía

Como ya se ha mencionado en varias ocasiones, el sistema no ha de incluir una batería, debido a su falta de fiabilidad en el terreno. Toda la potencia absorbida por los paneles tiene que ser utilizada para el bombeo, o almacenada bajo forma de energía potencial en los tanques donde se almacena el agua.

4.3. Accesorios

Después de haber seleccionado la bomba, el MPPT y el panel, se han de elegir los demás elementos del kit.

Solidarités International desea incluir en el kit un tanque pequeño de 10 m³. Suelen trabajar con tanques de Oxfam. Oxfam Supply Centre es un Centro Humanitario de Adquisiciones, que es

una organización sin ánimo de lucro especializada en la gestión técnica y comercial de suministros y servicios necesarios para la implementación de acciones humanitarias ([OXFA15]). Oxfam ofrece distintos modelos de *bladders*, tanques flexibles de plástico muy utilizados por Solidarités International. El modelo escogido para el kit es el *bladder* más pequeño (código TBT10/5). Su peso es de 97 kg y sus dimensiones de 1.2x1.0x1.4 m. Es bastante grande y pesado en proporción a los otros elementos del kit (tan sólo el tanque pesa la mitad de lo que debería pesar el kit como máximo), por lo que sería una opción llevar el tanque en una caja distinta al resto para no sobrecargar el kit.

Además del tanque, hay que incluir los tubos para conectar la bomba al tanque. Se seleccionan tubos de Oxfam de 2" (códigos DP32C/2 y G215, fichas técnicas en el Anexo II).

4.4. Maqueta

Además del kit real, a Solidarités International le interesaría tener un pequeño kit de bombeo solar fotovoltaico para utilizarlo en presentaciones y formaciones dentro de la misma ONG.

Es por ello que se diseña un pequeño sistema en el laboratorio de CentraleSupélec. Se utilizan:

- El panel STP005 de PV Logic, policristalino con una potencia nominal de 5W
- Una pequeña bomba DC del laboratorio de CentraleSupélec, que requiere una entrada mínima de 100 mA y 12V
- Distintas resistencias disponibles en el laboratorio para modelizar el control por MPPT
- Un foco halógeno de 450 W para simular el sol (las condiciones meteorológicas en París siendo poco adaptadas en cuanto a la luz solar)
- Diversos aparatos de medida (voltímetro, amperímetro, solarímetro, termómetro)

En primer lugar se mide la potencia incidente sobre la superficie del panel, y se halla $P_{incidente} = 660 \text{ W} \pm 4 \text{ W/m}^2$. Después se realizan distintas medidas para determinar la característica I-V del panel para $P_{incidente}$, mostrada a continuación. La resistencia característica encontrada es $R = 100 \Omega$ y la potencia máxima $P_{max} = 2.72 \text{ W}$, siendo $I_{mp} = 165 \text{ mA}$ y $U_{mp} = 16.5 \text{ V}$. Se calcula el rendimiento del panel, que es, siendo S la superficie del panel, que es de 346 cm^2 :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{incidente}S}$$

Se halla $\eta = 11.9\%$. Las condiciones de temperatura son de $T = 40^\circ\text{C}$, por lo que el panel no funciona al máximo de su rendimiento (a 25°C).

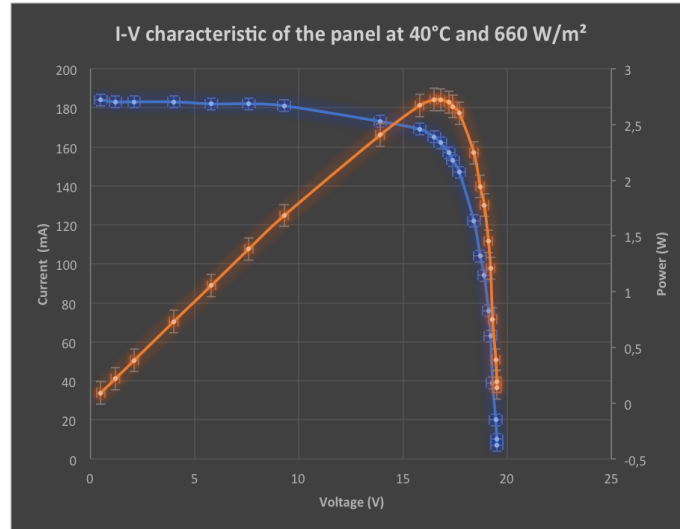


Figura 57: Característica del panel de la maqueta

Fuente: Ilustración del autor

Se mide la resistencia de la bomba, que varía entre $10\ \Omega$ y $70\ \Omega$ (cuando trabaja a la tensión mínima de 5V y a 12 V respectivamente). En los experimentos se utiliza a $30\ \Omega$.

Se ilumina el panel con el foco (misma $P_{\text{incidente}}$). Se mide la altura entre la bomba y la fuente de agua, y la altura relativa entre los dos tubos, que son de 19 cm y 10 cm respectivamente. Se mide un caudal $Q = 0.75\ \text{mL}$. No es mucho, pero al menos sirve para dar un ejemplo que es lo que la ONG quiere a través de esta pequeña maqueta.



Figura 58: Maqueta del sistema de bombeo

Fuente: Ilustración del autor

En primer lugar se realizan los experimentos sobre la mesa, en el laboratorio, pero después se procede a la preparación de un pequeño maletín para la ONG, como se puede ver en las Figura 59 y Figura 60. En el maletín se incluyen además de los elementos del kit, dos botellas: una para simular el pozo y la otra el tanque a rellenar. Una idea para mejorar la maqueta sería incluir condensadores para arrancar la bomba cuando no hay suficiente luz, idea que se ha aconsejado a

la ONG.



Figura 59: Kit en el maletín
Fuente: Ilustración del autor

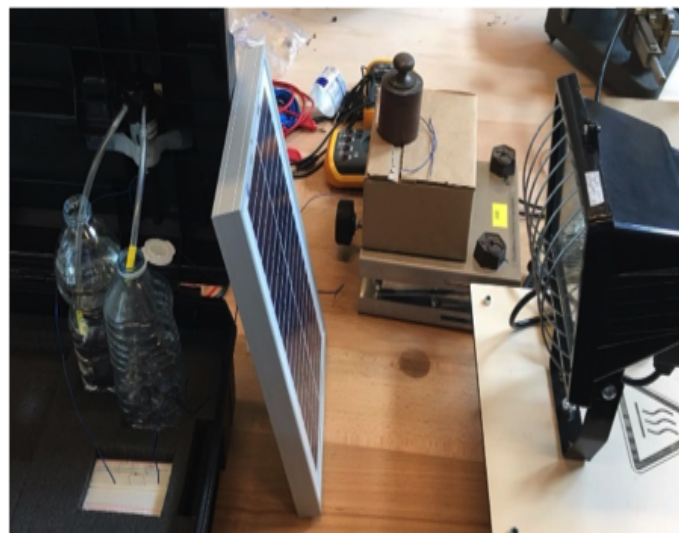


Figura 60: Sistema funcionando desde el maletín
Fuente: Ilustración del autor

5. Análisis de costes

5.1. Costes de inversión

En primer lugar se van a presentar los costes de inversión del kit. Se dividen de la siguiente manera: primero, el coste de los elementos incluidos en el kit, después los costes de instalación, y finalmente los costes de transporte.

A continuación se presentan los costes de los elementos constituyentes del kit. El peso de un panel VBHN330SJ47 es de 19 kg. Para el paso de libras a euros para los elementos de Oxfam, se ha utilizado $\text{£}1 = 1.13 \text{ €}$. En los cálculos se incluye únicamente una tubería para conectar el tanque a la bomba. El tanque incluye distintos componentes, como válvulas y adaptadores, especificados en su ficha técnica (Anexo II).

Elements						
Producto	Modelo	Cantidad	Valor unitario (€)	Coste total (€)	Peso total (kg)	Dimensiones (m)
Panel solar	Panasonic VBHN330SJ47	2	322.00	644.00	38.0	1.59 x 1.053 x 0.035
Bomba	Lorentz PS2-600 C-SJ5-8	1	2390.00	2390.00	22.2	0.524 x 0.098 x 0.098
MPPT	Lorentz	1	incluido con la bomba	incluido con la bomba	5.6	0.333 x 0.207 x 0.124
Bladder 10m ³	Oxfam TBT10/5	1	760.49	760.49	97	1.2 x 1.0 x 0.4
Manguera	Oxfam, 2" plástico reforzado G215 30m	1	101.7	101.7	22	1.08 x 1.08 x 0.23
Tubería	Oxfam DP32C/2 32 mm 50m	1	42.5	42.5	14	1.00 x 1.00 x 0.19
Total				3938.69	248.8	

Cuadro 5: Coste de los elementos incluidos en el kit

Como se puede observar en el Cuadro 5, los elementos del kit tendrían un coste de 3938.69€. A continuación se presentan los otros costes de inversión: los costes de transporte e instalación.

Para los costes de instalación se ha considerado, como la ONG precisó, que los miembros de Solidarités instalan ellos mismos el sistema de bombeo, por lo que no debería costarle nada a la ONG. Sin embargo, si no pudiesen instalarlo ellos mismos, existen empresas nigerianas, como la empresa Fabros Group of Companies, que proveen servicios de instalaciones eléctricas. Si la ONG decidiese instalar el kit contando con una empresa, que también sería una posibilidad, entonces los costes de instalación se verían aumentados.

En lo que concierne al transporte se han tenido en cuenta varios aspectos. En primer lugar, el alquiler de una Toyota Hilux en Nigeria, que es de ₦30000 (aproximadamente 70.5€). En segundo lugar, el consumo de gasolina. En Nigeria hay treinta aeropuertos, de los cuáles solamente siete operan vuelos internacionales. Los más cercanos a la región de Borno son los aeropuertos de Kano y de Abuja. Para los cálculos se asume que el kit llega a Abuja, la capital de Nigeria. Desde Abuja hasta Maiduguri hay 859 km. El precio de la gasolina en Nigeria es de 0.36€/litro [GLOB18]. El consumo de la Toyota Hilux es de 7.0 L/ 100 km. En un trayecto del aeropuerto hacia Maiduguri se consumirían pues aproximadamente 61L, por lo que el coste sería de 21.65€. Tendríamos pues un coste de 92.15€ en lo que se refiere al transporte.

En la siguiente tabla se resumen los costes de inversión a los que deberá hacer frente Solidarités International para llevar a cabo el proyecto.

Costes de inversión	
Tipo de coste	Coste total (€)
Instalación	00.00
Elementos del kit	3938.69
Transporte	92.15
Total	4030.84

Cuadro 6: Costes de inversión

NB: Un aspecto que no se ha especificado es el de arancel de aduanas de Nigeria. Tampoco se ha considerado el coste del transporte aéreo. Al aeropuerto de Abuja se puede volar desde París CDG con Air France y desde Dubái con Emirates. Solidarités International tiene un hub logístico en cada una de estas ciudades por lo que el kit podría ser enviado desde cualquiera de ellas. Es posible para las ONGs obtener partenariados con las aerolíneas para transportar equipaje en situaciones de ayuda humanitaria, pero esto depende de cada caso particular, por lo que no se ha añadido este coste para los cálculos, al no tener suficientes datos al respecto, aunque la ONG habrá de tenerlo en cuenta.

5.2. Costes operacionales y de mantenimiento

Esta sección se centra en los costes operacionales y de mantenimiento del kit de bombeo solar fotovoltaico.

Los costes operacionales para la bomba serán nulos ya que será utilizada (puesta en marcha, uso diario) por miembros voluntarios de la ONG.

En la siguiente tabla se presentan los costes de mantenimiento de la bomba y el panel. Se han calculado basándose en [BARL93]. Algunas de las operaciones de mantenimiento, como la medida de corrientes y tensiones o la inspección de la bomba, pueden ser llevadas a cabo por miembros de la ONG, por lo que se reducen algunos costes. Estas operaciones que no incluyen costes no se incluyen, pues, en los cálculos.

Se considera que el sistema será utilizado durante 25 años (garantía del panel utilizado). En general, una bomba centrífuga que opera 6 horas al día dura entre 7 y 10 años (se consideran 7 años para los cálculos). En los 25 años de vida del sistema habría que reemplazar la bomba tres veces. Los costes de sustitución de piezas ocurren a intervalos de varios años, mientras que los

costes de mantenimiento y reparaciones son anuales. En la siguiente tabla se presenta un resumen de los costes operacionales y de mantenimiento.

Costes operacionales y de mantenimiento				
Elemento	Operación	Frecuencia	Coste anual (€)	Coste total en 25 años (€)
Panel solar	Mantenimiento	Anual	108.00	2700.00
	Limpieza	Cada 1 a 3 años	94.00	2350.00
Bomba	Mantenimiento	Anual	45.18	1750.00
	Sustitución	Cada 7 años	286.80	7170.00
Total			533.98	13 970.00

Cuadro 7: Costes operacionales y de mantenimiento

El coste total del proyecto sería pues de 18 000.84€, como se ve resumido en el siguiente cuadro.

Coste del proyecto	
Tipo de coste	Coste total (€)
Inversión	4030.84
Operacional y mantenimiento	13 970.00
Total	18 000.84

Cuadro 8: Coste del proyecto

6. Conclusión

6.1. Kit final

El kit final consta, pues, de la bomba PS2-600 C-SJ-58 de Lorentz, junto con el MPPT; de dos paneles VBHN330SJ47 de Panasonic, de una *bladder* de 10m³ de Oxfam, y de los distintos accesorios.

El peso total del kit es de 248.8 kg. El objetivo era conseguir un kit de menos de 200 kg para que pudiese ser transportado por dos personas. El kit final pesa más de lo previsto, pero aún así, tres personas juntas serían capaces de transportarlo. No hay que olvidar tampoco que, aunque se haya pensado el kit como una única gran caja, la ONG considera también la posibilidad de separar el kit en varias cajas. Si se transportara el tanque por separado, por ejemplo, se obtendrían dos cajas distintas de 151.8kg y 97 kg, que facilitarían el transporte.

En cuanto a las dimensiones, no deberían sobrepasar los 1.5 x 1.5 m para poder caber en la Toyota Hilux. Los paneles tienen unas dimensiones de 1.59 x 1.053 x 0.035 m por lo que deberían ir colocados con la parte más larga en vertical. En cuanto a los otros elementos, no son especialmente voluminosos, por lo que las dimensiones se respetarían.

Por otro lado, el coste total del proyecto sería de 18 000.84€. En lo que concierne a los materiales, se ha privilegiado la calidad al precio, por indicación de la ONG. Si bien es cierto que existen bombas y paneles más baratos que los escogidos, Solidarités International indicó desde el principio su preferencia por un kit con elementos algo más caros pero de mayor calidad y más duraderos. La ONG no desea tener que reemplazar piezas frecuentemente por ser de menor calidad.

Se ha visto, por lo tanto, que se pueden escoger distintas opciones para el kit. Se ha hecho una selección final, pero Solidarités International siempre puede elegir otra opción si la encontraran más conveniente.

6.2. Resumen de la metodología

Este estudio se ha centrado en un caso específico, el del kit para la región de Borno, en Nigeria. Sin embargo, como se ha mencionado al principio, Solidarités International trabaja en dieciocho países. En cada uno de estos países cambia la radiación solar, las condiciones de bombeo, el clima, el número de personas en los campamentos, etc., por lo que el kit escogido no tiene por qué adaptarse a todos los casos. La ONG debe ser capaz de volver a dimensionar otros kits para otros casos de uso diferentes, por lo que en esta sección se resume brevemente la metodología a seguir para conseguirlo.

En primer lugar, es necesario analizar el recurso solar disponible en el lugar donde se desea utilizar el kit. Con los datos sobre radiación solar que provee la NASA, es posible determinar la energía que el sol podrá proveer a los paneles. En el caso de Borno, se ha escogido utilizar los datos

del mes con menos luz, el mes de agosto, pero también se podría trabajar con una media anual.

Sabiendo que cada persona requiere un mínimo de 15 L de agua por día, y conociendo el número de personas a las que se desea entregar agua, se determina el caudal necesario que debe bombearse.

El siguiente paso es la selección de bombas que puedan conseguir ese caudal (o caudales mayores) en las condiciones de uso (altura de bombeo, fuente de agua, etc.). Se seleccionan distintas bombas disponibles en el mercado y se comparan para escoger la mejor opción. Se ha de calcular la potencia necesaria para bombear el caudal necesario, y verificar que los paneles puedan proveer esa potencia, teniendo en cuenta la luz que reciben del sol y su propio rendimiento.

Para escoger un panel, es importante tener en cuenta que al variar las condiciones de temperatura, también varía el rendimiento de los paneles. Además, hay que tener en cuenta las características eléctricas (tensión, corriente) del motor, que va con la bomba, y el panel, y asegurarse que el sistema trabaje en las buenas condiciones.

Escoger la bomba implica a la vez escoger el motor. En el caso estudiado se privilegian las bombas DC ya que son fáciles de utilizar en sistemas de bombeo fotovoltaico, ya que los paneles solares trabajan en corriente continua.

Algunos fabricantes, como Grundfos, proponen kits que incluyen paneles y bombas. Podrían ser opciones interesantes para la ONG en el futuro, ya que así solamente dependerían de un fabricante, y podrían establecer partenariados para disminuir los costes.

Como se ha visto, es importante incluir en el kit un regulador MPPT para que el sistema trabaje en el punto de máxima potencia. Algunos fabricantes incluyen estos reguladores con las bombas, como Lorentz, pero de no ser el caso, habría que adquirir uno por separado.

Por último, después de seleccionar los elementos principales (bomba, motor, panel, MPPT) se han de escoger los demás: el tanque y los accesorios. Los criterios para su selección dependen del peso, del precio, la capacidad de agua deseada para el tanque, etc.

Anexo I: Programas de MATLAB

A continuación se presentan los códigos utilizados en MATLAB para seleccionar la bomba para el kit.

Curvas de bombas

En primer lugar, un ejemplo de cómo se han obtenido las ecuaciones de las curvas de las bombas de las Figuras de la sección 4.2.5. Se han tomado puntos de las curvas encontradas para cada bomba seleccionada en los sitios web de Grundfos y Lorentz y se ha usado la función polyfit para encontrar la ecuación de la curva de interés. Se adjunta un ejemplo, el de la bomba PS2-600 C-SJ5-8, pero para todas las curvas se usa el mismo método.

```
x=[0.049 0.055 0.1 0.125 0.15 0.175 0.2 0.223 0.225 0.28 0.325 0.35 0.36 0.4 0.425  
0.45 0.5]  
y=[0 0.75 1.5 2 2.23 2.75 3 3.5 3.55 4 4.25 4.48 4.5 4.8 5 5.2 5.5]  
p=polyfit(x,y,3)  
plot(x,y)  
xlabel('Power (kW)')  
ylabel('Q(m^3/h)')  
title('Pump Curve Q vs P')
```

Figura 61: Código de MATLAB para dibujar la curva de la PS2-600 C-SJ5-8

Selección de bombas

En esta parte se presentan los programas usados para escoger una bomba. Después de dibujar la curva de la insolación en el mes de agosto en matlab y hallar la ecuación correspondiente (del mismo modo que para las curvas, pero con los datos de la NASA presentados en la sección 4.1), se calcula la energía entregada por el sol, con un paso de tiempo de 15 minutos, calculando el área bajo esta curva con la ayuda del método de los trapecios.

Después se introducen estos valores en las ecuaciones de curvas halladas en la primera parte para obtener el caudal, teniendo en cuenta el rendimiento de la bomba, el rendimiento del panel y el número de paneles. Se hayan los resultados para todas las bombas de Grundfos y Lorentz estudiadas.

```

global area_partial
dt = 0.01;
t=9:dt:15;
x = zeros(size(t)); %initialize it
x(1) = 9;%setup initial value
for ind=2:length(t)

    x(ind) = x(ind-1)+ dt; %where t in your dKdt is subbed by t(ind);
end

for ind=1:length(t)
    power(ind)=0.0014*x(ind)^3 - 0.0645*x(ind)^2 + 0.9047*x(ind) -3.2980;
end

plot(x,power)

xlabel('Hour')
ylabel('Insolation incident in kW/m^2')
title('Averaged Insolation in August')

area=trapz(x,power);
for ind=1:24

area_partial(ind)=((power(ind)+power(ind+15))/2)*0.25;
end

area_partial
    
```

Figura 62: Cálculo con MATLAB del área bajo la curva con el método de los trapecios

```

function [ Q ] = performance( area_partial )
global area_partial; %Energy calculated from insolation curve kW*h/m^2
area_partial=area_partial.*(1.67)*1*0.19*4;%efficiency of solar panel is selected as 0.19,
%area is 1.67m^2 and # of panels since (1/4)h time intervals kW
Q=173.0387*area_partial.^3 - 107.6400*area_partial.^2 + 29.9721*area_partial - 0.5656; %ps150csj58
Q=11.2787*area_partial.^3 - 19.3545*area_partial.^2 + 17.2487*area_partial - 0.9447 %ps2600csf37
Q=54.2215*area_partial.^3 - 64.4372*area_partial.^2 + 31.9820*area_partial - 1.1375 %ps2600csj58
Q_11=90.5716*area_partial.^3 -66.3608*area_partial.^2 + 23.9715*area_partial -0.4242 %ps2150csj58

M=mean(Q)
power=transpose(area_partial)
Q=transpose(Q)

end
    
```

Figura 63: Cálculo con MATLAB del caudal para las bombas de Lorentz

```
function [ Q ] = performanceg( area_partial )
global area_partial; %Energy calculated from insolation curve kW*h/m^2
area_partial=area_partial.*(1.68)*1*0.19*4;
Q=32.8228*area_partial.^3 - 59.3441*area_partial.^2 + 57.8106*area_partial - 6.1348
%crif1001aca?ehqqe
%Q=142.2106*area_partial.^3 -173.4086*area_partial.^2 + 107.1133*area_partial
-14.9833 %crnf1501acagehqqe
%Q=-4.1341*area_partial.^3 -22.1970*area_partial.^2 + 45.8441*area_partial -4.9678
%crnf1001acagehqqe
%Q= -46.6096 *area_partial.^3 + 13.7381*area_partial.^2 + 45.9942*area_partial
-8.3917 %crifi501acaiehqe
M=mean(Q)
power=transpose(area_partial)
Q=transpose(Q)
end
```

Figura 64: Cálculo con MATLAB del caudal para las bombas de Grundfos

Anexo II: Fichas técnicas de los elementos del kit

A continuación se incluyen las datasheets de los elementos elegidos para el kit. El panel es de Panasonic, la bomba de Lorentz, y el *bladder* y las tuberías de Oxfam.

PS2-600 C-SJ5-8

Système de pompe solaire immergée pour puits 4"

Gamme de systèmes

Chute	max. 30 m
Débit	max. 6,5 m³/h

Données techniques

Contrôleur PS2-600

- Commande et surveillance
- Entrées de commande pour protection contre le fonctionnement à sec, commande à distance, etc.
- Protection contre inversion de polarité, surcharge et surchauffe
- MPPT (Maximum Power Point Tracking) intégré
- Fonctionnement à batterie: protección intégrée contre la décharge profonde

Puissance	max. 0,70 kW
Tension d'entrée	max. 150 V
Optimal Vmp**	> 68 V
Intensité du moteur	max. 13 A
Efficacité	max. 98 %
Temp. ambiante	-40...50 °C
Classe de protection	IP68

Moteur ECDRIVE 600-C

- Entretien minimal, moteur DC sans balais
- Rempli d'eau
- Matériel de haute qualité, acier inoxydable: AISI 304/316
- Moteur sans électronique à l'intérieur

Puissance nominale	0,7 kW
Efficacité	max. 92 %
Vitesse du moteur	900...3 300 rpm
Classe d'isolation	F
Classe de protection	IP68
Submersion	max. 150 m

Extrémité de la pompe PE C-SJ5-8

- Clapet anti-retour
- Matériel de haute qualité, acier inoxydable: AISI 304
- En option : protection contre le fonctionnement à sec
- Centrifugal pump



Pompe PU600 C-SJ5-8 (Moteur, Extrémité de la pompe)

Diamètre de forage	min. 4,0 in
Température de l'eau	max. 50 °C

Normes



2006/42/EC, 2004/108/EC, 2006/95/EC

IEC/EN 61702:1995

Les logos indiquent les autorisations obtenues pour cette gamme de produits. Les produits sont commandés et livrés selon les autorisations propres aux exigences du marché.

**Vmp: Tension MPP en condition de test standard (STC) : rayonnement solaire 1 000 W/m², température des cellules 25 °C



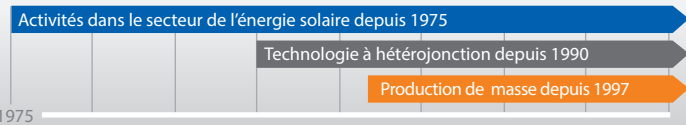
Rendement du module de 19,7 %

Permet d'atteindre un rendement plus élevé et de baisser les coûts spécifiques d'installation et les coûts BOS (coûts de tous les composants à l'exception des modules photovoltaïques) qu'avec le même nombre de modules à 60 cellules standards.



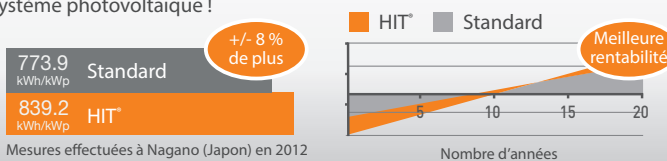
100% Panasonic, 100% HIT®

Ce module est le fruit d'une technologie unique de Panasonic : la cellule photovoltaïque à hétérojonction. Avec plus de 40 ans d'expérience dans le secteur de l'énergie solaire et avec plus d'un milliard de cellules produites et commercialisées en 20 ans, Panasonic vous offre une garantie en laquelle vous pouvez vraiment avoir confiance.



Plus d'énergie, plus de rentabilité !

Nous vous aidons à atteindre une rentabilité finale plus élevée avec votre système photovoltaïque !



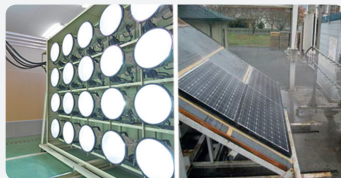
330 W/325 W

Rendement élevé + Performances élevées à hautes températures = Productible élevé

QUALITÉ PROUVÉE DE 4 MANIÈRES

1 Garanti par Panasonic

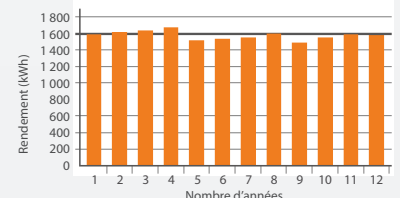
- Certification CEI et plus de 20 tests effectués en interne par Panasonic.
- Fabrication à intégration verticale (wafer, cellule et module)



3 Moins de dégradation sur le terrain

Des données réelles sur 12 ans qui prouvent la fiabilité et la stabilité des performances.

Installation : mars 2004
Site : Gloucestershire (Royaume-Uni)
Modèle : HIP-180BE
Taille du système : 1,80 kWc
Inclinaison : 40°
Orientation : Sud-Ouest



2 Pourcentage de réclamations le plus bas

Taux de défaillance inférieure à 0,0035 % après plus de 10 années d'expérience en Europe (janvier 2017)

4 Contrôles par des tiers

- Test du cycle de vie (essai séquentiel à long terme) par TÜV Rheinland (test sur le modèle VBHN240SE10)
- Aucune dégradation induite par le potentiel (PID) (test par l'Institut Fraunhofer)

HIT® est une marque déposée de Panasonic Group.

Code TBT10/5**Tank kit, Bladder 10m³**

Definition: Tank for temporary water storage
 Ready to ship: 2 days
 Local purchase: Recommended
 Made in: United Kingdom
 UNSPSC: 24.11.18.10
 Packaging: Wooden Crate
 Gross weight: 97kg
 Volume: 0.4800m³
 Dimensions: 120 x 100 x 40cm
 Cost: £673

**Description**

High quality PVC bladder tank for temporary water storage.

Item specification

10m³ bladder tank, 4 x 3.7m, manufactured from UV resistant, food grade PVC coated polyester fabric (minimum 1100 g/m²). All materials used should be suitable for chlorinated drinking water. All seams to be either heat or high frequency welded.

Tank fitted with the following items:

- 2" BSP(M) stub fitting with anti-chafe patch and flap
- 4" (internal measurement) screwed filler cap with captive cord

Components included

Item	Qty	Unit	Part no./Code	Description
1.	1	each		10m ³ Bladder tank
2.	1	each	G234	Valve, Gate, 2"
3.	1	each		Bush, Reducing, 2" BSP(M) to 1" BSP(F), GI
4.	1	each	G107	Adapter, Compression, 32mm
5.	1	each	G103	Tee, Compression, 32mm
6.	2	each	G220	Nipple, 2" BSP(M), GI
7.	2	roll(s)	GPT	Tape, PTFE
8.	1	each		Groundsheet
9.	1	each		Repair kit – no glue supplied
10.	1	each		Holdall bag

Resources included

Qty	Unit	Description
1	document(s)	Repair Instructions - Manufacturer's Information
1	document(s)	Handling Instructions - Manufacturer's Information
1	document(s)	Water Storage Equipment Manual - Oxfam

Resources available

Code	Description
	Water Storage Manual - Arabic 2014 - Oxfam

User notes

- Select 2" Hose, flexible reinforced (G215), or Distribution pipe 32 mm (DP32C) to connect to other equipment. Add additional fittings as required.
- This bladder tank is designed specifically for use on the ground, not for transporting water. It is essential that the ground is reasonably level, otherwise the tank will roll away when filled. A groundsheet is supplied to protect the tank
- The kit comes with the fittings to install 2 Oxfam tapstands, but the tapstand (Oxfam Code: DS) and pipe (Oxfam Code: DP32C) must be ordered separately.
- The tank should be elevated to 1.5m above the level of the tapstands to provide sufficient head for gravity feed.
- If water treatment (with the exception of simple chlorination) is required, use the Onion tank, Oxfam code: TRR30

NOTE: Glue, for the repair kit, is classed as Hazardous for airfreight and not shipped with this item. A solvent based, impact adhesive should be purchased locally.

Helpdesk contacts

logadvise@oxfam.org.uk

Item updated

08 October 2015

Water Distribution

4.	8	each	Hose clip, bolted (fitted to item 1)
5.	2	each	Adapter, Camlock, male, DN50 to 2" BSP(F), GRN
6.	2	each	Adapter, Camlock, female, DN50 to 2" BSP(F), GRN

Helpdesk contacts

logadvise@oxfam.org.uk

Item updated

08 October 2015

Code DP32C/2

Pipe, 32mm, PE 50m length

Definition:	MDPE pipe for water distribution systems - coil
Ready to ship:	2 days
Local purchase:	Recommended
Made in:	United Kingdom
UNSPSC:	40.14.21.15
Packaging:	Coiled
Gross weight:	14kg
Volume:	0.1900m ³
Dimensions:	100 x 100 x 19cm
Cost:	£40



Water Distribution

Item specification

- 32mm OD
- PE80 SDR11 to BS6572
- 12 bar pressure rating
- 50m length

Resources available

Code	Description
	Head loss in PE pipe, graph - Excel spreadsheet

User notes

This kit is normally used in conjunction with the Tapstand (Oxfam code:DS). Typically one 50m coil will be adequate for five tapstands.

Code G215**Hose, Flexible reinforced, 2"**

Definition: Hose, Flexible reinforced, 2", uPVC, 30m length

Ready to ship: 2 days

Local purchase: Recommended

Made in: Bulgaria

UNSPSC: 40.14.20.08

Packaging: Coiled and wrapped in plastic

Gross weight: 22kg

Volume: 0.2683m³

Dimensions: 108 x 108 x 23cm

Cost: £90

**Description**

30m coil of 2" flexible reinforced hose, for use in pumping, connecting of water tanks, and for temporary installations.

Item specification

- 50mm ID, 58mm OD
- max working pressure 5 bar, burst 10bar

User notes

- Ensure that a hose coupler and clip (Oxfam Codes: G216 or G217 and G218) is available for each connection made.
- Hose couplings are a tight fit. Use soap to lubricate them to aid installation. Flexible hose can also be softened in hot water or cooking oil to assist if necessary.

Helpdesk contacts

logadvise@oxfam.org.uk

Item updated

09 October 2015

Bibliografía

- [BEFO15] Be Forward. African Utility. A look at the most continent's best selling trucks. 2015. <https://blog.beforward.jp/car-comparison/best-selling-pickup-trucks-africa.html>
- [ARGA03] N. Argaw, R. Foster, and A. Ellis. Renewable energy for water pumping applications in rural villages. National Renewable Energy Laboratory. 2003. 117 p. NSN 7540-01-280-5500
- [BARL93] Roy Barlow, Bernard McNelis, Anthony Derrick. Solar Pumping. An Introduction and Update on the Technology, Performance, Costs and Economics. 1993. World Bank 168. pp.91-113.
- [CAMP12] Pietro Elia Campana, Hailong Li, Jinyue Yan. Dynamic modelling of a PV pumping system with special consideration on water demand. ScienceDirect. Elsevier. 2012. pp.635-645. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.073>
- [CHAN15] S.S. Chandel, M. Nagaraju Naik, Rahul Chandel. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. ScienceDirect. Elsevier. 2015. pp. 1085-1098. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>
- [CHAU13] Jacques Chaurette. Pump Fundamentals. <http://www.pumpfundamentals.com/index.htm>
- [GLOB18] Global Petrol Prices. Petrol Price in Nigeria. 2018. https://www.globalpetrolprices.com/Nigeria/gasoline_prices/
- [GRUN18] Grundfos. Grundfos Product Center. <https://www.grundfos.com/>
- [HAMI08] A. Hamidat, B. Benyoucef. Systematic procedures for sizing photovoltaic water systems, using water tank storage. ScienceDirect. Elsevier. 2008. pp.1489-1500. doi:10.1016/j.enpol.2008.12.014
- [KHAT10] Tamer Khatib. Design of Photovoltaic Water Pumping Systems at Minimum Cost for Palestine: A Review. Journal of Applied Sciences. 2010. pp. 2773-2777
- [LORE18] Lorentz. Produits et Technologie. <https://www.lorentz.de/fr/>
- [MATA03] Claudio Mataix. Turbomáquinas Hidráulicas. Editorial ICAI. 2003.
- [NASA18] NASA Atmospheric Science Data Center. NASA Surface meteorology and Solar Energy - Available Tables. 2018. <https://eosweb.larc.nasa.gov/>
- [OSHE14] Michael O'Shea. Backpack Weight and the Scaling of the Human Frame. The Physics Teacher. 2014. <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.4897584>
- [OSSI18] Ossila. Solar Cells Theory. <https://www.ossila.com/pages/solar-cells-theory>
- [OXFA15] Oxfam. Oxfam Supply Centre Equipment Catalogue. 2015.
- [PVED16] Average solar radiation. pv.education.org <https://www.pveducation.org/pvcdrom/average-solar-radiation>
Effect of Temperature <https://www.pveducation.org/pvcdrom/effect-of-temperature>

[SOLA18] Solaris Store. Information on Solar Panels. <https://www.solaris-store.com/>

[TOYO18] Toyota Store. Information on Toyota Hilux. <https://www.toyota.fr/new-cars/hilux/index.json>

[TROY15] Jean Yves Troy et al. Annual report Solidarités International 2015