



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**DESARROLLO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE
AGUA PARA LOS CULTIVOS Y DEL
ALMACENAMIENTO POST- COSECHA EN LA CIUDAD
DE DOGONDOUTCHI**

Autor: Patricia Gómez de Olea Ballester

Director: Franck Marle

Madrid

Junio de 2019

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. Patricia Gómez de Olea Ballester DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: *Desarrollo del sistema de recuperación de agua para los cultivos y del almacenamiento post-cosecha en la ciudad de Dogondoutchi (Níger)*, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

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

3º. Condiciones de la cesión y acceso

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

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

4º. Derechos del autor.

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

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

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

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

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

Madrid, a 16 de Junio de 2019

ACEPTA

PATRICIA GÓMEZ DE OLEA BALLESTER

Fdo.....

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

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
DESARROLLO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE AGUA PARA LOS.....
CULTIVOS Y DEL ALMACENAMIENTO POST-COSECHA EN LA CIUDAD DE TEGONZUTCHI..
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2018-2019..... es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.:

Fecha: 15 / 06 / 2019

Patricia Gómez de Olea Ballester

Patricia Gómez de Olea Ballester

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.:



Fecha: 11 / 06 / 2019



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**DESARROLLO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE
AGUA PARA LOS CULTIVOS Y DEL
ALMACENAMIENTO POST- COSECHA EN LA CIUDAD
DE DOGONDOUTCHI**

Autor: Patricia Gómez de Olea Ballester

Director: Franck Marle

Madrid

Junio de 2019

DESARROLLO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE AGUA PARA LOS CULTIVOS Y DEL ALMACENAMIENTO POST-COSECHA EN DOGONDOUTCHI

Autor: Gómez de Olea Ballester, Patricia.

Director: Marle, Franck.

Entidad Colaboradora: ICAI - Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción y Objetivos.

Este proyecto se realiza en colaboración con la asociación francesa del municipio de Orsay *Échanges avec Dogondoutchi*. Fundada en 1996, actúa en Níger, llevando a cabo proyectos para el desarrollo económico y humano de los 60 000 habitantes del departamento de Dogondoutchi, en Níger. El objetivo principal de este proyecto es garantizar la seguridad alimentaria de los habitantes.

Antes de nada, se efectúa una fase de análisis del contexto del proyecto, y más particularmente del terreno, sus recursos hídricos y solares y su potencial energético.

Se distinguen dos partes en este trabajo: la primera es previa al cultivo, la segunda trata la etapa posterior a la cosecha. Se pretende diseñar un sistema para un campo de 8 hectáreas que permita bombear el agua subterránea para regar los campos, y que alimente el local donde los productos cultivados son luego almacenados.

Estado del arte.

Antes de empezar el dimensionamiento de dicho sistema, se estudia el estado del arte de los distintos elementos necesarios para llevar a cabo un tal proyecto: paneles solares, motores, bombas de agua y sistemas de bombeo, materiales de construcción. También se hace un repaso de ciertos conceptos de térmica y de termodinámica esenciales para la comprensión de la descripción del proyecto.

Sistema de bombeo solar – Fases y resultados.

La primera parte consiste, pues, en el dimensionamiento de un sistema de bombeo solar que responda a las necesidades de los habitantes para el riego de los campos de cultivo. No se requiere un diseño de los componentes sino una selección de los elementos accesibles para los responsables del lado nigeriano de la asociación, es decir, los generadores fotovoltaicos y bombas de agua.

Se procede estimando las necesidades de agua, la energía hidráulica necesaria, la irradiación solar, los caudales de bombeo previstos y los volúmenes de precipitaciones. Se elige finalmente

un motor DC y una bomba centrífuga sumergible. Finalmente, se realiza un estudio de mercado, comparando las ventajas e inconvenientes de los distintos modelos de paneles y bombas existentes (según criterios de precio, peso, confianza en los proveedores, adaptación a los criterios técnicos requeridos...).

Se seleccionan finalmente paneles de la marca Solar World (modelo SW 250) y una bomba de Grundfos (SP30-9).

Local de almacenamiento de productos – Fases y resultados.

El objetivo del segundo eje en el que se centra este proyecto es la conservación de larga duración de productos perecederos. Se pretende diseñar un local de almacenamiento para los productos cultivados adecuado al clima y a las cantidades producidas. Nos centramos en un primer momento en la patata, producto comercializado desde 2005 en Dogondoutchi por sus cualidades nutricionales y su facilidad de venta.

En un principio, se estima la cantidad de producto que se desea almacenar, según las observaciones *in situ* y los intercambios con los directores agrícolas de las parcelas (interlocutores nigerianos de la asociación).

Se estudian los posibles materiales adaptados al caso, principalmente centrado en el aislamiento, así como de un modelo para el sistema de refrigeración (dos puntos de importancia especificados al principio del proyecto por el cliente de *Échanges avec Dogondoutchi*). Se evalúan dos posibilidades: implantar un sistema de refrigeración por evaporación, o recurrir a climatizadores clásicos, optando por la segunda opción tras el análisis.

La función del local es doble. Por una parte, se deben llevar a la temperatura adecuada para la conservación (15°C en las condiciones del proyecto) los nuevos productos recién llegados al local, lo cual requiere un gasto de energía del orden de los 12 kW. Por otra parte, se debe poder mantener a esa temperatura las patatas durante un periodo de hasta 4 meses, lo cual representa una necesidad energética cinco veces menor. Por ello, se elige utilizar la red eléctrica para el primer subobjetivo, e instalar paneles solares para el segundo.

De esta manera, el proyecto incluye también un estudio de las necesidades de potencia eléctrica del sistema, para poder implementar paneles solares para la alimentación eléctrica del local.

Se opta finalmente por un almacén donde se usará un aislante ecológico (la paja), en el cual los climatizadores serán de la marca NASCO (modelo MS12F-24CR, 3.4 CV) y los paneles solares serán del modelo GF 270 de Grundfos.

Otras consideraciones.

A la asociación le interesa tener un procedimiento general para el sistema de bombeo solar de agua y el almacenaje de alimentos, para poder extenderlo a diversos productos y a terrenos más grandes en un futuro y utilizarlo con diferentes condiciones de uso. Su propósito con este trabajo es, pues, disponer de una proposición de proyecto en un campo de 8 hectáreas con el fin de difundir las prácticas de horticultura a nivel departamental.

Para asegurar una cierta facilidad en el diseño y dimensionamiento de un sistema como éste, se ha elaborado y añadido un programa realizado a través del lenguaje de programación Python, que se puede consultar al final del informe.

Análisis de costes. Se demuestra la rentabilidad de basar el proyecto en la energía solar en lugar de recurrir a la principal compañía de red eléctrica de Níger (Nigelec). El precio de los costes de los componentes seleccionados para el proyecto se estima a un total del orden de 8000 €.

Producto	Marca	Cantidad	Coste ud. [€]	Coste total [€]	Peso total [kg]	Dimensiones [mm]
Panel solar	SW250	4	270	1080	84,8	1675x1001x31
Panel solar	GF270	9	240	2160	162	1640x992x35
Bomba	SP30-9	1	3644	3644	26	L = 1752, R = 142
Climatizador	NASCO	2	576	1152	24	1045x315x235

Cuadro: Características y coste de los elementos propuestos para el proyecto

Consideraciones medioambientales. Se resalta la voluntad de llevar a cabo este proyecto teniendo en cuenta el impacto sobre el medioambiente (a través del uso de materiales de base biológica y de la energía solar) con la óptica de mirar hacia el futuro participando en la transición hacia las energías renovables.

Referencias. A continuación se listan las fuentes principales de información que han sido esenciales para la realización de este proyecto.

[FAOS19] FAOSTAT. Datos sobre alimentación y agricultura. <http://www.fao.org/faostat/es/>

[NASA19] NASA, Power Data Access Viewer. Prediction of Worldwide Energy Ressources. 2019. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

[GRUN19.1] Grundfos. Grundfos Product Center. <https://www.grundfos.com/>

[BOYM15] Boy-Marcotte J.L., Échanges avec Dogondoutchi, Dossier AFD (Agence Française de Développement), Octubre 2015.

[TERM12] Çengel Y.A., Boles M. A., McGraw Hill, Séptima Edición, 2012.

[RABI08] Rabier F., Pekel S., “L’isolation des hangars de stockage”, Artículo para el proyecto “Edificios de almacenaje de patatas en la región valona. 2008.

[CORO14] Coronel Toro J.F., “Tablas y Diagramas de Tecnología Frigorífica”, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. 2014.

Agradecimientos. Este proyecto no hubiera sido posible sin el apoyo y el seguimiento constante de Jean-Louis Boy-Marcotte y Jean-Louis Prioul, fundadores de *Échanges avec Dogondoutchi*. Se agradece igualmente la ayuda de Hamza Alassane y Souley Soumana, dos de los actores nigerianos de la asociación.

DEVELOPMENT OF THE WATER RECOVERY SISTEM FOR THE IRRIGATION OF CROPS AND THE POST-HARVEST STORAGE IN DOGONDOUTCHI

Author: Gómez de Olea Ballester, Patricia.

Directors: Marle, Franck.

Collaborating Entity: ICAI - Universidad Pontificia Comillas.

SUMMARY OF THE PROJECT

Introduction and Objectives.

This project is done in collaboration with Orsay's French association *Échanges avec Dogondoutchi*. Founded in 1996, they carry out projects for the economic and human development of the 60 000 inhabitants of Dogondoutchi, one of Niger's departments. Their main objective is to ensure food safety for all the inhabitants.

To start off, there is an analysis phase, where the context of the project, and more particularly the land's characteristics, its water and solar resources as well as its energy potential, are studied.

This project is made of two different parts: the first one is previous to the harvest, the second one deals with the post-harvest phase.

It aims to design a system for an 8-hectare ground that shall allow to pump ground water in order to irrigate the fields, as well as give electrical power to the food storage building.

State of the art.

Before dimensioning the system as such, we study the state of the art of the different elements that are necessary for the project: solar panels, motors, water pumps and water pumping systems, construction materials. A review of some concepts about thermal transfers and thermodynamics is also carried out, so as to fully understand the description of the project in its whole.

Solar water pumping system – Phases and results.

The first part is the dimensioning of a solar water pumping system, which shall answer to the people's needs for the watering of the crop fields. What is required is a selection of components easily accessible for the Nigerians (that is, photovoltaic generators and water pumps), and not their design.

We first estimate the water needs, the necessary hydraulic energy, the solar radiation, the expected water pumping flow rates and the precipitations' volumes,

We eventually choose a DC motor combined with a centrifugal, submersible water pump. A market study is done to compare the advantages and disadvantages of the different existing models of solar panels and water pumps (carefully taking into account the price, weight, trust in the providers, and technical criteria of each element).

The chosen components are Solar World panels (SW 250 model) and a Grundfos water pump (SP30-9).

Product storage building – Phases and results.

The Project also focuses on the long term conservation of perishable products that are cultivated on the fields.

The idea is to design a building for its storage (focusing at first on the example of potatoes), adapted to the climate and the quantity produced. We choose to design it for potatoes, commercialized in Dogondoutchi since 2005 because of their nutritional value as well as their ease of sale.

First, the amount of product to be stored must be estimated, based on the *in situ* observations and the exchanges with the agricultural directors of the parcels of land (the Nigerian point of contact of the association).

The materials that can possibly be used are analyzed. We concentrate on the selection of materials adapted to the case, and of a model for the refrigeration system (two main aspects of the project, specified at the beginning of the project with *Échanges avec Dogondoutchi*). Two possibilities are studied: either to introduce an evaporative cooling system, or to use classic air conditioner devices. The latter is the one we select.

The storage building has two functions: on the one hand, the newly come products must be brought to the correct temperature for their conservation (15°C in the conditions of the project), which signifies an energy cost of about 12 kW. On the other hand, the potatoes must be kept at that same temperature for an estimated period of four months, which implies a much smaller energetical cost.

Therefore, the electricity network will be used for the first subobjective, and solar panels will be installed for the second one.

The work then includes a study of the electrical power that is needed for such a system, so as to choose solar panels that can provide enough energy for the system to work properly.

The final result is a storage building where an ecological thermal insulator will be used for construction (straw), NASCO air conditioner devices (MS12F-24CR model, 3.4 CV) and GF 270 (Grundfos) solar panels will be used.

Other considerations.

The association is interested in having a methodology for the solar water pumping and the food storage, so as to be able to extend it to a variety of products and larger grounds and with different use conditions in the future. Their purpose is therefore to come up with a proposition of a project for a field of 8 hectares and spread the practice of horticulture to a departmental level.

In order to facilitate this process and the dimensioning phases, a program has been elaborated with Python's programming language, which can be found at the end of the full report.

Cost Analysis. This part shows that making use of the solar energy is the most cost-effective solution, and not the use of Niger's common electricity grid (Nigelec).

The total price of all the selected components is estimated to be of around 8000 €.

Product	Model	Quantity	Unit cost [€]	Total cost [€]	Weight [kg]	Dimensions [mm]
Solar panel	SW250	4	270	1080	84,8	1675x1001x31
Solar panel	GF270	9	240	2160	162	1640x992x35
Pump	SP30-9	1	3644	3644	26	L = 1752, R = 142
Air conditioner device	NASCO	2	576	1152	24	1045x315x235

Table: Cost and characteristics of the selected elements

Environmental considerations. The will of thinking a project with a positive environmental impact (by using ecological materials and clean energies such as the solar energy) is highlighted. The project aims to be part of the transition towards renewable energies.

References. The main information sources used for this Project are listed below.

[FAOS19] FAOSTAT. Datos sobre alimentación y agricultura. <http://www.fao.org/faostat/es/>

[NASA19] NASA, Power Data Access Viewer. Prediction of Worldwide Energy Resources. 2019. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

[GRUN19.1] Grundfos. Grundfos Product Center. <https://www.grundfos.com/>

[BOYM15] Boy-Marcotte J.L., Échanges avec Dogondoutchi, Dossier AFD (Agence Française de Développement), Octobre 2015.

[TERM12] Çengel Y.A., Boles M. A., McGraw Hill, Séptima Edición, 2012.

[RABI08] Rabier F., Pekel S., “L'isolation des hangars de stockage”, Artículo para el proyecto “Edificios de almacenaje de patatas en la región valona. 2008.

[CORO14] Coronel Toro J.F., “Tablas y Diagramas de Tecnología Frigorífica”, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. 2014.

Acknowledgements. This Project wouldn't have been posible without the support and constant monitoring of Jean-Louis Boy-Marcotte and Jean-Louis Prioul, founders of *Échanges avec Dogondoutchi*. A big thanks also to Hamza Alassane and Souley Soumana, two of the association's nigerian actors, for their help.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Introducción general	1
1.2. Objetivos del proyecto	2
1.3. Fases y metodología	2
1.4. Recursos empleados	3
2. Casos de uso: contexto del proyecto y análisis del terreno	4
2.1. Características del terreno	4
2.2. Contexto del proyecto	5
3. Descripción de las tecnologías: estado de la técnica	6
3.1. Paneles solares fotovoltaicos	6
3.2. Motores	9
3.3. Bombas	9
3.4. Sistemas de bombeo solar existentes	11
3.5. Técnicas de almacenamiento clásicas	11
3.6. Térmica	12
3.6.1. Modos de transmisión de calor	12
3.6.2. Definiciones	12
3.7. Materiales	12
3.7.1. Propiedades	12
3.7.2. Materiales de construcción: el hormigón	13
3.7.3. Revestimientos	13
3.7.4. Importancia del aislamiento	13
3.8. Sistemas de refrigeración	13
3.8.1. Conceptos de termodinámica	13
3.8.2. Sistema de refrigeración por compresión de vapor	13
3.8.3. Refrigeración por evaporación	15
4. Dimensionamiento: modelo desarrollado para el bombeo solar	16
4.1. Análisis de los recursos solares y de agua	16
4.1.1. Necesidades de agua	16
4.1.2. Cálculo de la energía hidráulica necesaria	16
4.1.3. Irradiación solar	17
4.1.4. Análisis de los caudales de bombeo anuales y diarios	17
4.1.5. Precipitaciones	19
4.1.6. Bombeo fotovoltaico	22
4.2. Selección del sistema bomba - motor	23
4.2.1. Selección del tipo de motor	23
4.2.2. Selección de bombas	23
4.3. Selección de paneles para el sistema de bombeo fotovoltaico	27
4.3.1. Instalación de los paneles	28

5. Dimensionamiento del local de almacenamiento	29
5.1. Datos: Análisis del producto y funcionamiento del cultivo	29
5.2. Elección de materiales	32
5.2.1. Elección del aislante	32
5.2.2. Proposición para la construcción de los muros del local	33
5.3. Sistema de refrigeración	34
5.3.1. Evaluación de la refrigeración por evaporación	34
5.3.2. Cálculo de la potencia necesaria	36
5.3.3. Dimensionamiento del ciclo termodinámico	37
5.4. Selección de los paneles	40
5.4.1. Instalación de los paneles	41
5.5. Selección de climatizadores	41
6. Análisis de costes	42
6.1. Análisis de los costes de la instalación solar	42
6.2. Coste de los componentes seleccionados	43
7. Consideraciones medioambientales	44
8. Conclusión	45
8.1. Modelo final	45
8.2. Resumen general del procedimiento	46
8.3. Comentario final	46
9. Anexo I: Código Matlab	47
10. Anexo II: Programa en lenguaje Python	48
11. Anexo II: Fichas técnicas de los elementos escogidos	53
12. Anexo III: Diagramas y tablas termodinámicos del ciclo de refrigeración	60
13. Anexo IV: Ficha técnica de la paja	64

Índice de figuras

1.	Número de personas que padecen inseguridad alimentaria grave en Níger	1
2.	Localización de la comunidad de Dogondoutchi en el Níger	4
3.	Irradiación horizontal global en Níger	5
4.	Puntos de trabajo de la asociación	5
5.	Ilustración del efecto fotoeléctrico	6
6.	Efecto de la temperatura en los paneles solares	7
7.	Diferentes tipos de paneles solares fotovoltaicos	7
8.	Elementos constitutivos de una bomba centrífuga: rodete (1), corona directriz (2), caja espiral (3), tubo difusor (4)	10
9.	Sistema con motor y bomba de corriente continua	11
10.	Sistema con motor y bomba de corriente alterna, con y sin batería	11
11.	Esquema básico de un ciclo de refrigeración	14
12.	Esquema y diagrama T-s para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor	14
13.	Irradiación solar anual media	17
14.	Aproximaciones cúbica y cuadrática de la curva de irradiación solar anual media .	17
15.	Datos sobre la irradiación solar entre 2015 y 2018	18
16.	Volumen de agua bombeado a lo largo del año en una instalación de 13,5 kWc . . .	18
17.	Volumen de precipitaciones anuales sobre un campo de 8 hectáreas	19
18.	Caudal de agua bombeado en función de la hora del día	20
19.	Volumen de agua bombeado a lo largo del día	20
20.	Pérdidas previstas en los meses de Marzo y Noviembre	21
21.	Modelos de depósitos de agua	21
22.	Rangos de actuación de las bombas sumergibles de Grundfos	24
23.	Curvas características de los modelos SP30-9	25
24.	Curvas características de los modelos SP30-10	25
25.	Curvas características de los modelos SP30-11	26
26.	Número de paneles necesarios para cada modelo de panel	28
27.	Ángulo de inclinación recomendado según la latitud	28
28.	Modelo de caja-paleta comúnmente utilizado	31
29.	Comparación de la paja con aislantes de base biológica	32
30.	Esquema en corte del muro	33
31.	Diagrama psicrométrico del aire	34
32.	Número de paneles necesario según el modelo	40
33.	Clasificación por niveles según la concentración en COV	44
34.	Clasificación de la paja en la escala de C a A+	44
35.	Elementos seleccionados para el sistema	45
36.	Código utilizado para aproximar el área bajo la curva	47
37.	Declaración de variables	48
38.	Funciones calculoenergiahidraulica y calculopotenciacresta	49
39.	Extracción y lectura de datos	50
40.	Estimación del volumen de agua bombeado anualmente	51
41.	Funciones calculo caudal y calculo volt total y cálculo de pérdidas	52
42.	Función calculo potenciacresta	52

43. Características del climatizador NASCO 53

Índice de cuadros

1.	Datos sobre la producción en función de la superficie	8
2.	Registro de datos de TK2	22
3.	Características y ventajas de las bombas volumétricas y centrífugas	23
4.	Características de los paneles preseleccionados	27
5.	Características del producto almacenado	29
6.	Datos sobre la producción en función de la superficie	30
7.	Correspondencias entre la superficie cultivada y la producción total en toneladas	30
8.	Dimensiones del local	31
9.	Comparación de los aislantes analizados	32
10.	Temperaturas alcanzadas según el nivel de humedad relativa	35
11.	Cálculos de la resistencia por capa de material	36
12.	Cálculos de la pérdida de carga calorífica y potencia necesaria para alimentar los compresores	37
13.	Datos utilizados para evaluar el punto 3	39
14.	Interpolación de datos para el punto 2	39
15.	Energía necesaria para alimentar el sistema	40
16.	Estimación de los costes de la instalación fotovoltaica	42
17.	Balance de costes anual para un campo de 8 ha	42
18.	Costes de los elementos del sistema	43

1. Introducción

1.1. Introducción general

En 2012, en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible celebrada en Río de Janeiro, se elaboran 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) con el fin de hacer frente a los desafíos políticos, económicos, ambientales, sanitarios y relacionados con la pobreza. El segundo objetivo, también conocido como “Hambre cero”, consiste en erradicar el hambre en el mundo. A día de hoy, más de 815 millones de personas están subalimentadas, es decir, una de cada diez personas padece privación crónica de alimentos. En África, la subalimentación afecta al 21 % de la población (más de 256 millones de personas). La disponibilidad de alimentos se ve afectada por varios factores, entre otros, los efectos del clima en la agricultura, que producen pérdidas y disminuyen la producción de los cultivos. Efectos que se acumulan y conllevan un aumento de la inseguridad alimentaria [FAOS19].

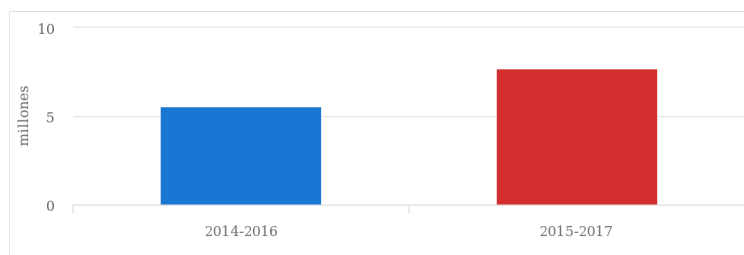


Figura 1: Número de personas que padecen inseguridad alimentaria grave en Níger

Fuente: FAO STAT

Dentro del proyecto PESA (Programa Especial para la Seguridad Alimentaria [MINI11]), se define la inseguridad alimentaria como “la probabilidad de una disminución drástica del acceso a los alimentos o de los niveles de consumo, debido a riesgos ambientales o sociales, o a una reducida capacidad de respuesta”. En Níger, más de siete millones de personas la sufren.

Por otra parte, la transición hacia las energías renovables se ha convertido en un tema central a nivel mundial. Muchas iniciativas se llevan a cabo en el continente africano, y particularmente en sitios aislados o donde la conexión a la red eléctrica es imposible, demasiado cara o poco fiable, se utilizan fuentes como la energía solar, con el fin de proporcionar el acceso a una energía suficiente adaptada a las necesidades de las comunidades.

Fundada en 1996, la asociación “Échanges avec Dogondoutchi”, del municipio francés de Orsay, lleva a cabo proyectos en el departamento de Dogondoutchi (Níger). Sus principales objetivos son precisamente la seguridad alimentaria, el acceso al agua potable, la lucha contra la erosión de los suelos, la mejora de las condiciones sanitarias y el desarrollo de la educación. Este proyecto trata el primer objetivo.

1.2. Objetivos del proyecto

El proyecto se puede dividir en dos partes. La primera está relacionada con un sistema de bombeo solar. La segunda trata la fase de post-cosecha y la conservación de alimentos. Se busca:

- Garantizar el acceso al agua para el riego de los campos cultivados. Se persigue el objetivo de diseñar un sistema de bombeo fotovoltaico para recuperar agua de la capa freática que respete ciertas condiciones exigidas por la asociación y responda a las necesidades de los habitantes. Se dimensionarán principalmente las bombas y los paneles.
- Asegurar de manera permanente el acceso a la energía necesaria para la producción y conservación de la patata.
- Diseño de un local de almacenamiento de patatas para su conservación durante un periodo de hasta 6 meses, minimizando las pérdidas de producto.
- Diseño del sistema de refrigeración de los productos hortícolas a su llegada al almacén.
- Concepción de un sistema de alimentación eléctrica del local a través de la energía solar.

La energía fotovoltaica se usará por tanto como recurso para ambos subobjetivos. El proyecto se limitará a una zona de 8 hectáreas en Dogondoutchi, dejando abierta la opción de considerar más tarde su ampliación a terrenos más extensos.

1.3. Fases y metodología

La primera fase del proyecto consiste en familiarizarse con la asociación y sus proyectos, en determinar las características del trabajo requerido y definir los objetivos. Se estudia el terreno y otras aplicaciones en proyectos similares.

En segundo lugar, se estudia el estado del arte del sistema. Se analizan los aspectos técnicos de los distintos elementos (paneles solares, bombas, motores...) y las posibilidades para el diseño del local de almacenamiento (recopilación de información sobre la conservación de alimentos, los materiales de construcción, las transferencias térmicas...).

Después, se dimensiona el sistema y se selecciona los componentes adecuados. Se modeliza el sistema de bombeo fotovoltaico a través de un código en lenguaje Python.

Finalmente, se termina con una fase de análisis de costes del proyecto y de reflexiones medioambientales.

En cuanto a la metodología, uno de los requisitos exigidos por el tutor del proyecto en el plan de estudios de Centrale Paris es la utilización de técnicas de gestión ágil de proyectos. Para ello, se ha utilizado la plataforma Trello para administrar las tareas a lo largo del proyecto.

1.4. Recursos empleados

Los recursos y herramientas utilizados a lo largo del proyecto se listan a continuación.

- Bibliografía sobre paneles solares, bombeo fotovoltaico, técnicas de conservación post-cosecha, transferencias térmicas y ciencia de materiales.
- Bases de datos: IEEE (Institute of electrical and Electronics Engineering), ScienceDirect, Biblioteca CentraleSupelec, OSS (Sahara and Sahel Observatory).
- Herramientas ofimáticas (Excel, Word, Powerpoint...).
- Herramientas de programación: Python, Matlab.
- Trello (software de administración de tareas) .

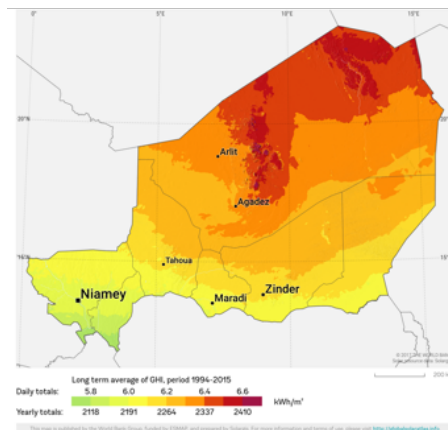


Figura 3: Irradiación horizontal global en Níger
Fuente: World Bank Group, Solargis

2.2. Contexto del proyecto

Hasta ahora, la asociación ha llevado a cabo proyectos en cinco puntos de la comunidad, mostrados a continuación [BOYM15].

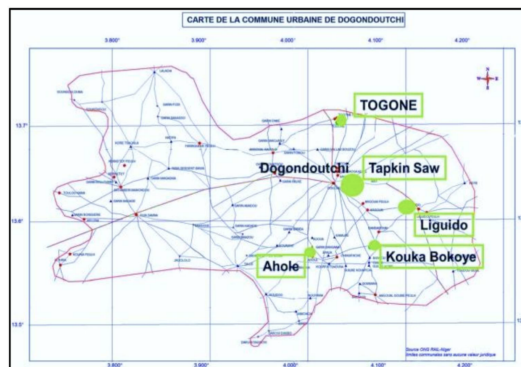


Figura 4: Puntos de trabajo de la asociación
Échanges avec Dogondoutchi

En Dogondoutchi, el equilibrio alimentario es precario. A la estación de lluvias (entre Junio y Septiembre) le sucede la estación seca. En un año normal, la totalidad de precipitaciones es correcta (450 a 650 mm), pero las lluvias son aleatorias y de carácter bastante violento, lo que provoca inundaciones en la ciudad. Además, episodios de sequía aparecen al menos una vez cada cinco años, generando crisis alimentarias. El último, que tuvo lugar en 2011, dio lugar al planteamiento del problema tratado en este proyecto, cuyo uso está destinado a mejorar y asegurar medios suficientes para la producción agrícola por horticultura durante todo el año, gracias a la irrigación proveniente de pozos de perforación profundos, y así, poder garantizar un cierto nivel de seguridad alimentaria incluso en caso de déficit de la agricultura de cereales.

En lo que concierne la conservación de los cultivos, la comunidad encuentra grandes dificultades debidas a los cortes de electricidad frecuentes de Nigelec (principal distribuidor de energía eléctrica de Níger). La asociación busca, por una parte, implantar un sistema de bombeo solar para recuperar agua suficiente para la irrigación de los campos, y, por otra, diseñar un local climatizado para el almacenamiento de los cultivos. El sistema de irrigación propiamente dicho no entra en los objetivos del proyecto. Con estos fines, se pretende utilizar la energía fotovoltaica, recurso cada vez más utilizado (es actualmente la principal tecnología en términos de inversión en energía a nivel global) y que permitirá bombear el agua suficiente para regar los campos, así como mantener un nivel de temperatura deseado y adecuado para el almacenamiento de los cultivos.

3. Descripción de las tecnologías: estado de la técnica

3.1. Paneles solares fotovoltaicos

La energía solar fotovoltaica consiste en transformar parte de los rayos de sol en electricidad gracias a células fotovoltaicas. Para entender el proceso, se estudian los paneles solares.

Las células fotovoltaicas se basan en el principio físico del efecto fotoeléctrico. [ACCI14] Cuando un fotón incide sobre un material, éste emite electrones libres y un hueco se crea. En vez de dejar que se recombinen, se les separa mediante un campo eléctrico creado por el dopado de semiconductores de tipo p y n. Se crea así una diferencia de potencial entre las caras superior e inferior de la célula (si se conectan ambos extremos, circulará una corriente continua). Muchos de los fotones incidentes se reflejan sin que se produzca el efecto fotoeléctrico. Esto, junto con las pérdidas por efecto Joule, reduce el rendimiento típico de un panel solar a valores alrededor de 10%-15% (este porcentaje varía dependiendo del tipo de panel).

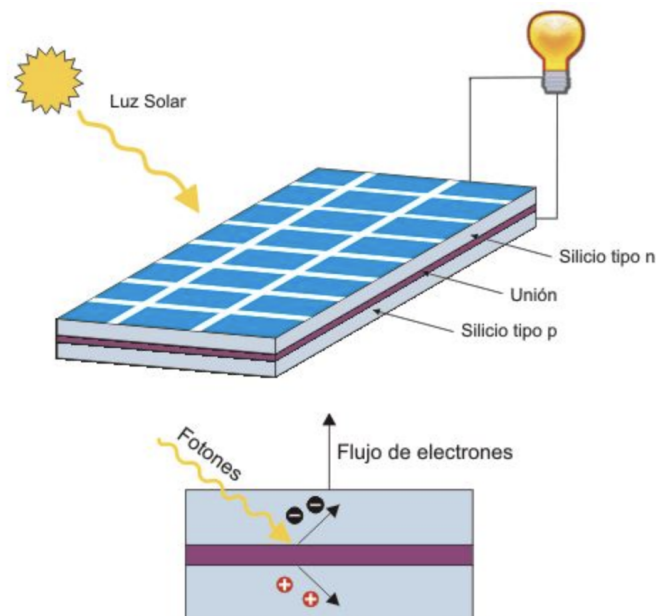


Figura 5: Ilustración del efecto fotoeléctrico

Fuente: Powen

La temperatura influye en el funcionamiento de los paneles. A mayor temperatura, menor tensión V_{oc} , que es la tensión en circuito abierto, y menor eficiencia del panel.

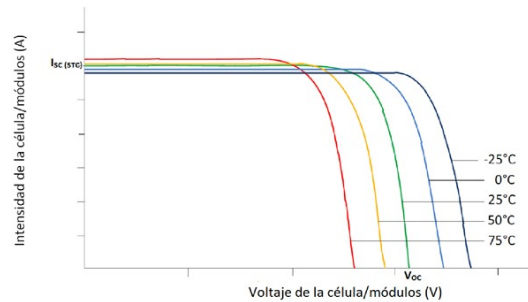


Figura 6: Efecto de la temperatura en los paneles solares

Fuente: *Energías Renovables Periodismo*

Cada módulo está formado por un conjunto de células conectadas entre ellas y montadas sobre un marco. Este conjunto proporciona en su salida de conexión una tensión V_c continua y se diseña para valores concretos de tensión que definen la tensión de trabajo del sistema. Se pueden utilizar para la alimentación eléctrica de bombas, capaces de propulsar el agua desde las profundidades hasta una cierta altura en la superficie. Se instalan junto con un motor incorporado, que le proporciona la energía mecánica necesaria. El motor recibe, por su parte, la energía eléctrica de los paneles solares, y la transforma en energía mecánica.

Los paneles solares van a ser utilizados tanto para el sistema de bombeo como para el almacén de cultivos. Existen fundamentalmente 3 tipos de paneles solares, según la tecnología empleada para fabricar las células:

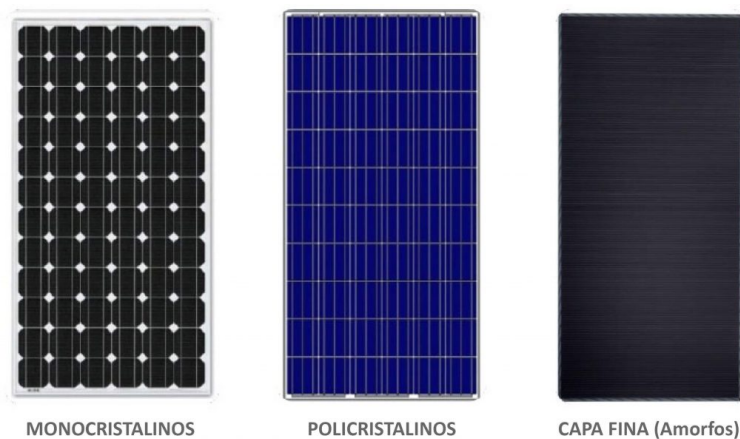


Figura 7: Diferentes tipos de paneles solares fotovoltaicos

Fuente: *Ecofener*

- Paneles monocristalinos: las células están hechas de silicio monocristalino. Tienen el rendimiento más elevado (entre 13 y 20%) pero su coste también lo es. Se suelen utilizar para potencias medias y altas (viviendas, telecomunicaciones...).
- Paneles policristalinos: Con un rendimiento de entre 11 y 16%, su tiempo de vida es inferior al de los monocristalinos pero su precio es menos elevado.

- De capa fina CIS: sus células están constituidas por capas finas de cobre, indio y selenio. Más flexibles que el resto, tienen varias desventajas (son menos eficientes y más caros).

A continuación se exponen las ventajas de los distintos tipos de paneles.

Tipo de panel	Rendimiento	Coste	Tiempo de vida	Coefficiente de temperatura
Monocristalino	13-20 % (Alto)	++	+++ (30 años aprox.)	+
Policristalino	12-16 % (Medio)	+	++ (25 años)	+++
De capa fina (CIS)	6-13 % (Bajo)	+++	+	++

Cuadro 1: Datos sobre la producción en función de la superficie

Fuente: Autor

Por último, es importante mencionar que el grado de inclinación de los paneles depende de la localización del terreno. Dogondoutchi se sitúa en el hemisferio Norte, donde la mayor eficiencia se obtiene orientando los paneles hacia el Sur. Como se verá más adelante, la inclinación dependerá de la latitud.

La tecnología fotovoltaica es de vital importancia para este proyecto ya que será utilizada tanto para el bombeo solar fotovoltaico como para la alimentación eléctrica del almacén para los cultivos. En lo que respecta al almacén, existen dos posibilidades: colocar el campo solar al lado o sobre el techo del edificio. Por cuestiones de facilidad de instalación y mantenimiento, se optará por la primera opción.

3.2. Motores

El motor es la máquina que transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Va a permitir accionar la bomba de agua. Se puede clasificar en dos categorías:

- Motor de corriente continua o corriente directa (DC): Sus componentes esenciales son el estator (parte fija de la máquina, donde están los polos) y un rotor (parte giratoria). Se crea un campo magnético entre los imanes que permite transformar la energía eléctrica en energía mecánica gracias al movimiento rotatorio. Tiene varias ventajas: su alto rendimiento, su funcionamiento sin inversor y su fácil acoplamiento al generador fotovoltaico en un sistema con bombas centrífugas. En esta categoría encontramos los motores de imán permanente (sencillos y para potencias pequeñas) y los de bobina (mayores potencias, menor mantenimiento ya que no necesitan de escobillas).
- Motor de corriente alterna (AC): Siguen el principio de la inducción electromagnética, según el cual una espira por la que circula una corriente eléctrica dentro de un campo magnético está sometida a una fuerza de desplazamiento. Se componen de dos bobinados, uno induce una corriente en el otro. Existen principalmente varios tipos: síncrono, asíncrono, jaula de ardilla. Su utilización implica una mayor eficiencia pero un aumento del coste ya que necesitan un inversor DC/AC para poder funcionar correctamente. En sistemas de bombeo solar, se suelen utilizar motores de inducción asíncronos. Pueden ser monofásicos, trifásicos, de inducción (que a su vez puede ser de rotor bobinado o de jaula de ardilla. Este último suele ser el más utilizado por su robustez).

3.3. Bombas

Las bombas son máquinas que absorben energía mecánica. Se usan para impulsar líquidos, en este caso el agua, a los que les proporciona esta energía en forma de energía hidráulica (es decir, en energía del fluido que mueve). Estas se clasifican según su principio de funcionamiento: pueden ser volumétricas o centrífugas. [MATA70]

- Bombas de desplazamiento positivo (o volumétricas): Hay una transferencia hidrostática de energía al fluido, es decir, un cuerpo de desplazamiento (pistón, cilindro, diafragma...) reduce el volumen de trabajo donde hay fluido y bombea parte de éste a la tubería. Al volver a aumentar el espacio, se vuelve a llenar con fluido de la tubería. Son adecuadas para altos incrementos de presión, bajos caudales (menos de 15 m³ diarios) y alturas manométricas elevadas (entre 30 y 150 m). En general, tienen un mejor rendimiento que las centrífugas, pero el caudal que son capaces de extraer es menor. Suelen estar accionadas por un motor DC. Pueden ser:
 - De cilindro o pistón: cada vez que el pistón baja, el agua entra en su cavidad, empujándolo al subir hacia la superficie. Necesitan estar conectadas a un regulador de corriente.
 - De diafragma: desplazan el agua mediante el diafragma (material flexible y resistente). Pueden ser sumergibles o de superficie y son económicas.
- Las bombas centrífugas – Su funcionamiento se basa en un rotor, rodete o impulsor, que transfiere energía al fluido. Los álabes del rotor empujan el fluido, aumentando de esta manera su velocidad y su energía cinética. Le imparte una fuerza centrífuga: la presión y la energía

interna del fluido aumentan. Son adecuadas para caudales elevados (entre 25 y 100 m³ diarios) y bajas alturas manométricas (entre 10 y 30 metros) y generalmente accionadas por motores asíncronos o de inducción. Son robustas y baratas.

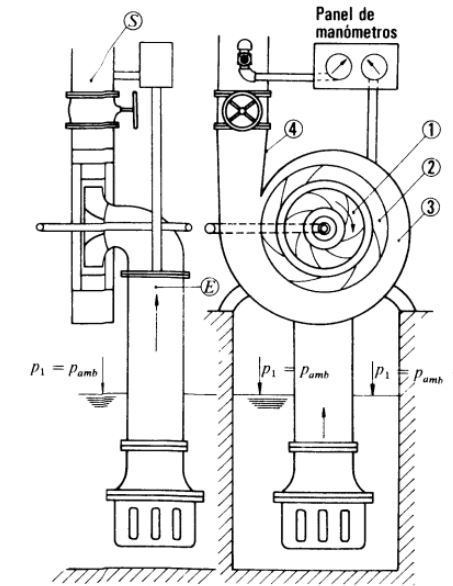


Figura 8: Elementos constitutivos de una bomba centrífuga: rodete (1), corona directriz (2), caja espiral (3), tubo difusor (4)

Fuente: Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas

Pueden ser:

- De superficie: pueden extraer un mayor caudal que las sumergibles, pero su carga dinámica total es menor.
- Sumergibles: se usan más que las de superficie. Aunque su coste inicial es mayor, tienen una mayor vida útil y bombean agua con una gran profundidad o carga dinámica total.

También se pueden clasificar según el posicionamiento de la bomba con respecto al agua bombeada: existen bombas de aspiración y de impulsión.

- De aspiración: la altura de aspiración se limita a 9,8 m (presión atmosférica en metros columna de agua), y, en la práctica, a 6 o 7 m.
- De impulsión: sumergidas en el agua, tienen o bien el motor sumergido con la bomba (se llama entonces bomba monobloque) o en la superficie. En ambos casos, el conducto de impulsión permite elevaciones de agua de varias decenas de metros según la potencia del motor.

3.4. Sistemas de bombeo solar existentes

Los sistemas de bombeo fotovoltaico siguen un mismo principio de funcionamiento, sin embargo, pueden trabajar con motores de corriente continua (DC), alterna (AC) o con motores AC y baterías. Los paneles captan la luz del sol y crean una corriente eléctrica continua. Si la instalación está aislada, se puede almacenar parte de la energía producida en baterías, si el sistema las incluye.

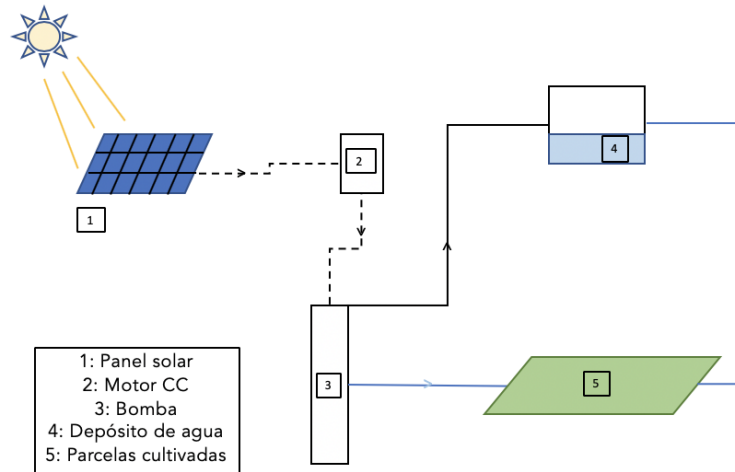


Figura 9: Sistema con motor y bomba de corriente continua

Fuente: Autor

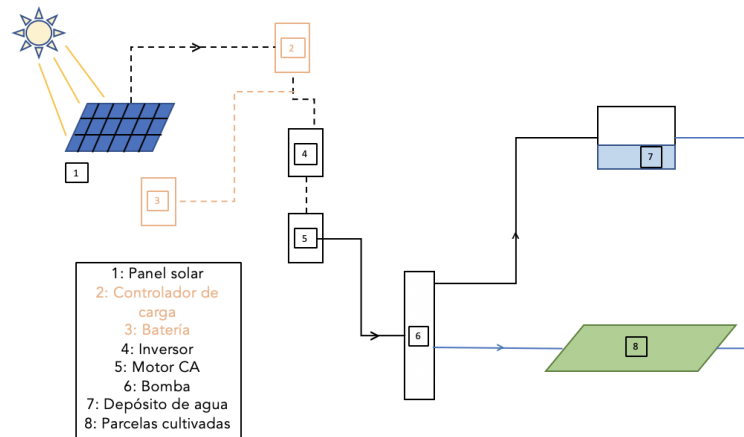


Figura 10: Sistema con motor y bomba de corriente alterna, con y sin batería

Fuente: Autor

3.5. Técnicas de almacenamiento clásicas

En África, existen múltiples modelos de almacenaje, bastante rústicos por lo general. Se puede almacenar al aire libre: generalmente, se utilizan estructuras de madera como soporte para el secado de granos (maíz, avena...). También se encuentran muchos silos (construcciones diseñadas principalmente para almacenar granos). No analizaremos en profundidad los métodos clásicos y

algo rústicos que se encuentran en muchas ciudades de África, sino que se tratará de buscar una solución simple pero más moderna.

3.6. Térmica

3.6.1. Modos de transmisión de calor

Las transferencias de calor se pueden presentar bajo tres formas distintas [TAIN11]:

- **Conducción:** se produce para alcanzar el equilibrio cuando en un mismo material (o entre sólidos en contacto) hay una diferencia de temperatura que provoca una transferencia de energía entre moléculas, sin intercambio de materia.
- **Convección:** se produce cuando hay una transferencia de materia a nivel macroscópico, un transporte de calor por el movimiento del fluido, entre zonas con distintas temperaturas.
- **Radiación:** Se produce entre dos superficies de distintas temperaturas. Los cuerpos emiten energía en forma de ondas electromagnéticas.

3.6.2. Definiciones

- **FLUJO DE CALOR O POTENCIA TÉRMICA:** es la cantidad de calor Q [J] que atraviesa una superficie isotérmica S [m^2] por unidad de tiempo t [s]. Siempre se coge positivo.
- **RESISTENCIA TÉRMICA:** cuando hay una transferencia térmica entre dos superficies, la resistencia térmica caracteriza la dificultad para realizar dicha transferencia. Para una misma diferencia de temperatura entre las dos superficies, cuanto mayor sea la resistencia, menor será la cantidad de calor transferido. En este contexto, aplicaremos este concepto a los muros del local de almacenamiento de patatas.
- **COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR K o U :** se define con respecto a una superficie entre S_1 y S_2 con temperaturas T_1 y T_2 respectivamente. El interés de este coeficiente es que se puede aplicar a distintos procesos de transferencia de calor (ya sea conducción, convección o radiación).
- **CONDUCTIVIDAD TÉRMICA:** Para los sólidos, depende tanto de la temperatura como del estado de la superficie. [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

3.7. Materiales

3.7.1. Propiedades

Se puede llevar a cabo una comparación de materiales a través del análisis de las sus propiedades: **la transmitancia térmica (U)**, que mide la cantidad de energía por unidad de tiempo y superficie que atraviesa el material, el **factor de resistencia a la difusión del vapor de agua μ** , ya que el material debe impedir que la superficie fría se humedezca, provocando una condensación y pérdidas, la **densidad ρ** , es decir, la masa por unidad de volumen, el **calor específico (C_p)** o la capacidad de un material para acumular energía, y por último, la **resistencia térmica**, que se calcula dividiendo el espesor por la conductividad térmica. Cuanto mayor es la resistencia, mejor es el aislamiento.

3.7.2. Materiales de construcción: el hormigón

El hormigón es un material compuesto por una mezcla de cemento, agua, aditivos y áridos en diferentes dosis. Se utiliza en la construcción de edificios de todo tipo, debido a su resistencia, su gran disponibilidad en el mercado y su bajo coste.

3.7.3. Revestimientos

Al finalizar la construcción de una superficie (ya sea un muro, un suelo...), se la reviste con una capa para asegurar la protección contra posibles desprendimientos, fisuras, grietas...

3.7.4. Importancia del aislamiento

La calidad del aislamiento es determinante para limitar las pérdidas de frío hacia el exterior. Un material aislante es aquel que limita los intercambios entre dos sistemas, pudiendo ser térmico, eléctrico, acústico o mecánico. Un aislante térmico es aquel que tiene una baja conductividad térmica, y por tanto una resistencia elevada al calor. Se usan a menudo la lana de vidrio o de roca (también el corcho, la fibra de madera, el cáñamo, la guata de celulosa, materiales sintéticos como el poliuretano, la paja). En este proyecto, se busca determinar la utilización de un aislante térmico que cumpla con ciertos requisitos técnicos, económicos y ecológicos [RABI08].

3.8. Sistemas de refrigeración

3.8.1. Conceptos de termodinámica

- **CALOR ESPECÍFICO** (o capacidad calorífica específica) a presión constante C_p : es la cantidad de calor necesaria para aumentar de 1°C un mol (unidad de masa) de un cuerpo, a presión constante. $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ o $[\text{kcal} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ ($1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$). Este dato depende de la temperatura y del estado físico del cuerpo puro.
- **ENTALPÍA DE UN CUERPO PURO**: La entalpía másica h de 1 kg de un cuerpo puro a la presión P y a la temperatura T es la cantidad de calor necesaria para llevar 1 kg de materia al estado (P, T) desde un estado de referencia caracterizado por una temperatura de referencia T_0 , una misma presión P y un estado físico dado.

3.8.2. Sistema de refrigeración por compresión de vapor

La refrigeración es una de las aplicaciones principales de la termodinámica. En el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, el fluido de trabajo sufre cambios (evaporación, condensación). El fluido circula sucesivamente en un **compresor**, que lo eleva de la presión P_1 en el estado 1 a la presión P_2 en el estado 2; un **condensador**, que enfría el vapor seco y lleva al fluido a un estado de líquido saturado (estado 3); una **válvula de expansión**, que lo vuelve a traer a la presión P_1 (estado 4); y finalmente un **evaporador**, que vaporiza totalmente el fluido para llevarlo al estado de vapor saturado (vuelta al estado 1, es decir, la entrada al compresor). Se supone que la compresión es isentrópica y adiabática, y que el rechazo de calor en el condensador y la absorción de calor en el evaporador se hacen a presión constante.

En el ciclo real existen irreversibilidades debidas a la fricción del fluido y a transferencias de calor desde o hacia los alrededores, que hacen variar la entropía. Tanto el evaporador como el condensador son intercambiadores de calor. Su función es transferir el calor entre un fluido como

el agua y otro, llamado refrigerante [TERM12].

Para evaluar el rendimiento de un ciclo de este tipo, se utiliza el COP, que se calcula:

$$COP = \frac{\text{Salida Deseada}}{\text{Entrada Requerida}} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_E} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

siendo \dot{Q}_L el calor rechazado, \dot{W}_E el trabajo neto de entrada, y h_i la entalpía del punto i ($i = 1,2,3,4$).

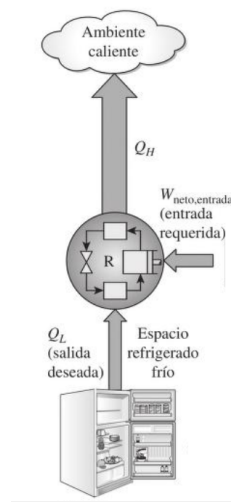


Figura 11: Esquema básico de un ciclo de refrigeración
Cengel y Boles, 2009

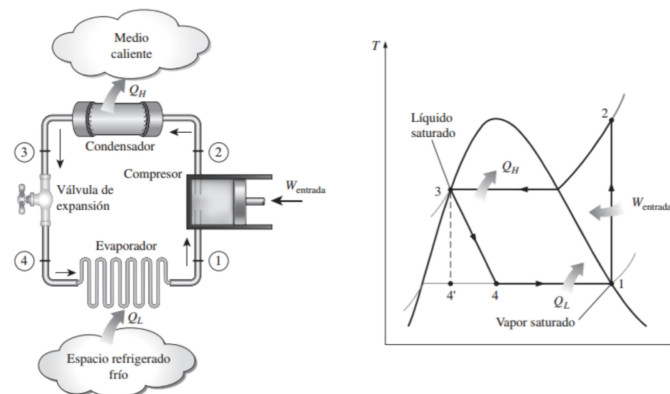


Figura 12: Esquema y diagrama T-s para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor
Cengel y Boles, 2009

3.8.3. Refrigeración por evaporación

La evaporación de un líquido (aquí, el agua) absorbe mucho más calor que la cantidad necesaria para hacer aumentar la temperatura de varios grados centígrados.

Para explicar este mecanismo, se deben tener en cuenta dos fenómenos. En primer lugar, a temperatura y presión normales, se necesita aproximadamente 60 veces más energía para evaporar una cierta cantidad de agua que para elevar su temperatura de 10 ° C.

En segundo lugar, el aire no saturado en humedad puede absorber una cierta cantidad de vapor de agua suplementaria: el calor contenido en el aire es absorbido por la evaporación. Existen dos técnicas distintas:

- Directa: Es la más simple. El aire exterior se introduce en una cámara, donde entra en contacto con agua. Ésta es proporcionada por un aspersor, bajo la forma de pequeñas gotas, o por un medio poroso saturado en agua. El agua se evapora en el aire, lo cual reduce la temperatura y aumenta el nivel de humedad del ambiente.
- Indirecta: El aire destinado a enfriar la habitación pasa por un intercambiador de calor que, a su vez, se sitúa en una cámara refrigerada por evaporación. Como la cantidad de vapor de agua en este aire no aumenta, la humedad relativa aumenta menos que en el caso de refrigeración directa para una misma variación de temperatura. Ésta es ligeramente menor en este caso, a causa de la presencia del intercambiador.

Esta técnica puede resultar interesante para el caso de Dogondoutchi, ya que implica utilizar menos energía y disminuir el consumo de agua. En efecto, el consumo de energía sería cuatro veces menor que en el caso de utilizar un aparato clásico de misma potencia frigorífica, y hasta diez veces menor si el clima es muy caluroso y seco.

$$1 \text{ m}^3 \text{ de agua} \approx 700 \text{ kWh}$$

Es decir, que proporcionaría el mismo efecto refrigerante que unos 230 kWh eléctricos utilizados por un sistema de acondicionamiento de aire clásico (con un COP igual a 3).

Además, tiene ventajas económicas: el coste de funcionamiento global sería aproximadamente veinte veces inferior al de un sistema clásico de refrigeración por compresión.

4. Dimensionamiento: modelo desarrollado para el bombeo solar

En esta sección, se hace referencia al código Python (cf. Anexo II).

4.1. Análisis de los recursos solares y de agua

Para poder dimensionar el sistema de bombeo fotovoltaico, procedemos por etapas [ARAB05]:

- Evaluación de las necesidades de agua
- Cálculo de la energía hidráulica necesaria
- Determinación de la energía solar disponible
- Elección de los componentes

4.1.1. Necesidades de agua

En este estudio consideramos que las necesidades diarias son de **200 m³** para un campo de 8 ha, este dato habiendo sido proporcionado por los miembros de la asociación y por el director del departamento de horticultura de Dogondoutchi. Este consumo de agua puede variar en función de la época del año.

4.1.2. Cálculo de la energía hidráulica necesaria

Evaluamos dicha energía a través de la fórmula siguiente:

$$E_h = g \times \rho_a \times V_a \times h / 3600 \quad (2)$$

E_h : energía hidráulica [Wh/día]
 V_a : volumen de agua [200 m³/día]
h: altura de bombeo [m]
g: aceleración de la gravedad [9,81 m/s²]
 ρ_a : densidad del agua [998,2 kg/m³]

Los requisitos para la bomba son:

- Superficie del campo: 8 ha
- Caudal deseado: 200 m³ diarios (25 m³/h)
- Altura: 80 m

Con estos datos, obtenemos el resultado $E_h = 43521$ Wh por día.

4.1.3. Irradiación solar

Se trazan las curvas relativas a la irradiación con los datos de la NASA y se obtienen las curvas siguientes. [NASA19]

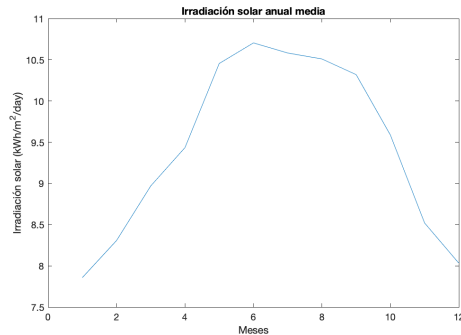


Figura 13: Irradiación solar anual media

Fuentes: NASA, Matlab

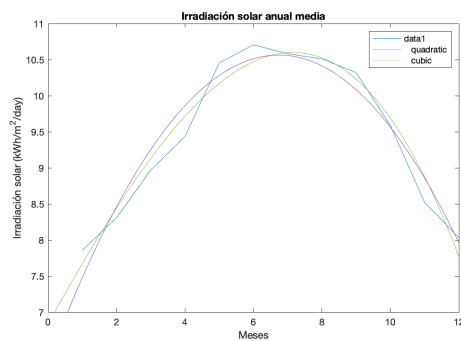


Figura 14: Aproximaciones cúbica y cuadrática de la curva de irradiación solar anual media

Fuentes: NASA, Matlab

Para obtener la energía E_{sol} , es decir, la energía solar sobre el terreno, hallamos el área bajo la curva con la función `trapz()` de Matlab (cf. Anexo I), y encontramos que:

$$E_{sol} = 105,3375 \text{ kWh/m}^2/\text{día} = 4,39 \text{ kW/m}^2$$

El sistema concebido no funcionará por las noches, sólo durante el día, por lo que consideramos que trabajará durante 8 horas para los cálculos.

4.1.4. Análisis de los caudales de bombeo anuales y diarios

Para poder analizar los caudales de bombeo, también se han usado los datos de la irradiación solar a lo largo del año (sabiendo que aunque la media de luz solar sea de 8 horas aproximadamente, este parámetro puede variar a lo largo de los meses).

Para tratar estos datos, se ha utilizado el código en lenguaje Python elaborado para el proyecto. Éste nos permite calcular el volumen de agua bombeado durante el año en función de la luz del sol. Obtenemos la siguiente curva.

Parameter(s):															
ALLSKY_SFC_SW_DWN	SRB/FLASHFlux	1/2x1/2 All Sky	Insolation Incident on a Horizontal Surface (kW-hr/m ² /day)												
PARAMETER	YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN	
-END HEADER-															
ALLSKY_SFC_SW_DWN	2015	5.42	5.97	6.05	6.83	6.48	6.57	6.32	5.46	5.95	6.21	5.78	5.37	6.03	
ALLSKY_SFC_SW_DWN	2016	5.19	6.06	6.03	6.63	6.39	6.13	5.89	5.69	5.94	6.31	5.66	5.31	5.93	
ALLSKY_SFC_SW_DWN	2017	5.40	5.98	6.36	6.66	6.25	6.05	6.37	5.59	6.27	6.35	5.68	4.95	6.00	
ALLSKY_SFC_SW_DWN	2018	5.55	5.88	6.41	6.74	6.54	6.08	6.11	5.69	6.25	6.24	5.76	5.42	6.01	

Figura 15: Datos sobre la irradiación solar entre 2015 y 2018

Fuentes: NASA

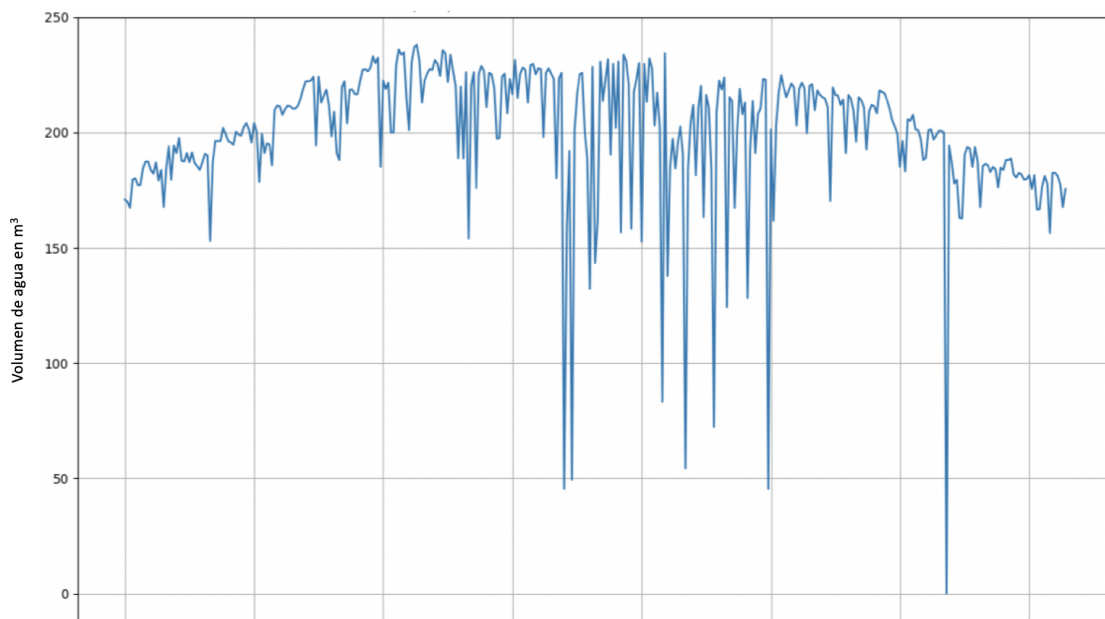


Figura 16: Volumen de agua bombeado a lo largo del año en una instalación de 13,5 kWc

Fuentes: NASA, Código Python

El volumen efectivamente bombeado oscila alrededor de los 200 m³. Notamos que puede ser inferior a los 200 m³ diarios, particularmente en los meses de Diciembre y Enero. Además, observamos que durante la temporada de lluvias, el volumen de agua bombeado puede disminuir hasta los 50 m³ por día. Esto podría parecer un problema para nuestro sistema, pero no lo supone puesto que estos momentos corresponden a los periodos de lluvia, en los que el volumen de las precipitaciones permite compensar el descenso observado.

4.1.5. Precipitaciones

En efecto, el siguiente gráfico nos muestra los datos relativos a las precipitaciones diarias a lo largo del año en el municipio de Dogondoutchi.

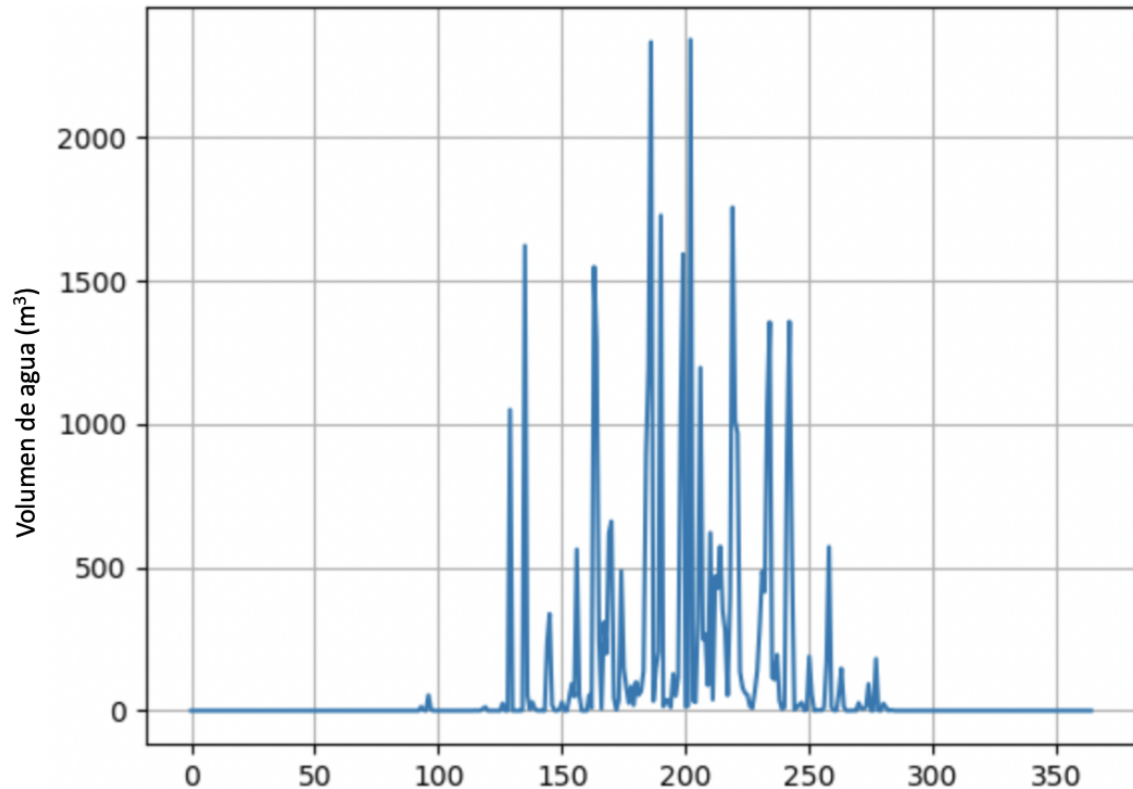


Figura 17: Volumen de precipitaciones anuales sobre un campo de 8 hectáreas

Fuentes: NASA, Código Python

Constatamos que el volumen de precipitaciones durante la época identificada como posiblemente problemática es considerablemente elevado, llegando hasta más de 1000 m³, lo cual permite responder a las necesidades de los habitantes para poder cultivar sus campos correctamente.

Analizamos también los caudales de bombeo a lo largo de un mismo día. La idea es estudiar la evolución de dicho caudal en función del mes del año. Para tratar los datos, se ha desarrollado un código en el lenguaje de programación de Python (cf. Anexo II) que permite trazar la evolución del caudal en función de la hora para diferentes meses del año.

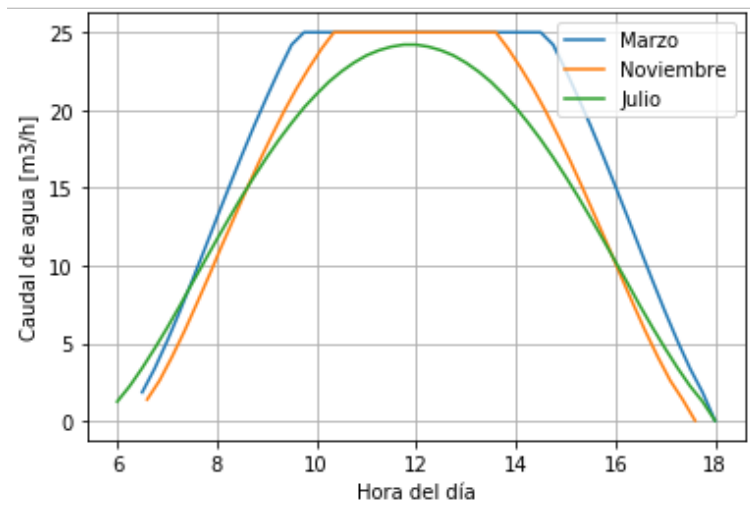


Figura 18: Caudal de agua bombeado en función de la hora del día

Fuentes: Código Python

Estas curvas nos muestran que el caudal está limitado por un valor de caudal máximo del pozo de perforación, de $25 \text{ m}^3/\text{h}$. Esto significa que la energía proporcionada por el panel podría, en realidad, permitir al utilizador del sistema bombear más agua durante el día, pero a causa de ese valor limitante, parte de la energía producida por los paneles no se utiliza. Se podría considerar el uso de este excedente de energía para alimentar los climatizadores del local de almacenamiento.

Finalmente, modelizamos la evolución del volumen de agua bombeado a lo largo de un día, que nos permitirá después dimensionar los depósitos de agua.

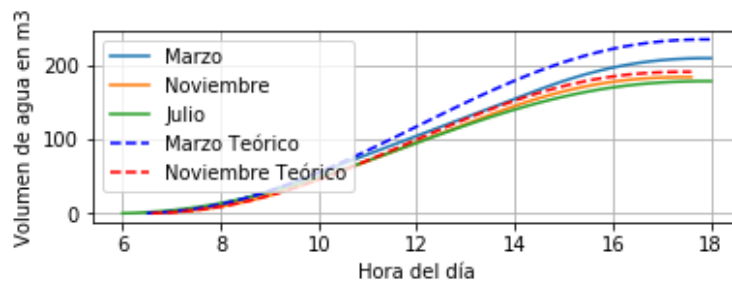


Figura 19: Volumen de agua bombeado a lo largo del día

Fuentes: Código Python

En este gráfico aparecen también las curvas correspondientes a un caudal más importante. En el mes de Julio, esto no tiene ninguna incidencia ya que el caudal diario nunca supera los $25 \text{ m}^3/\text{h}$. Para los meses de Marzo y Noviembre, sin embargo, la diferencia de volumen bombeado empieza a ser importante.

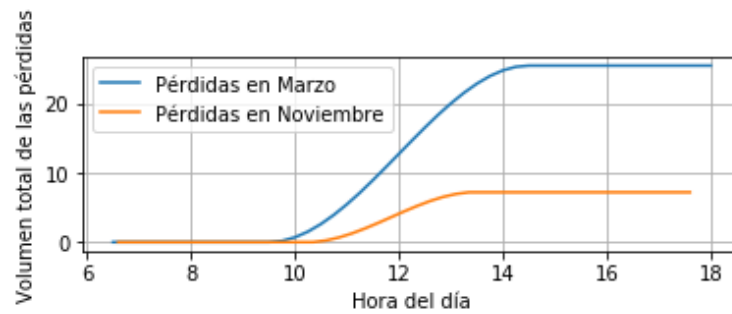


Figura 20: Pérdidas previstas en los meses de Marzo y Noviembre

Fuente: Código Python

Las pérdidas pueden ser importantes. En efecto, en el segundo gráfico constatamos que las pérdidas de volumen de agua bombeado pueden llegar a alcanzar los 25 m³ por día en los meses calurosos. Por tanto, se podría considerar almacenar estos volúmenes en depósitos conectados al sistema de bombeo.

Existen varias opciones para los tanques: tanques flexibles o bladders, tanques cebolla, o depósitos rígidos.



Figura 21: Modelos de depósitos de agua

Fuentes: Oxfam, Échanges avec Dogondoutchi

Para minimizar las pérdidas, se debería considerar también aumentar el caudal que debe ser capaz de admitir la instalación. Utilizamos la noción de caudal cresta, es decir, el caudal máximo que debería ser capaz de soportar la instalación.

Este caudal cresta se calcula con la fórmula:

$$Q = \frac{3.6 P_h}{g h}$$

Para nuestro sistema, obtenemos un caudal cresta de 38 m³/hora de media.

4.1.6. Bombeo fotovoltaico

La ecuación principal utilizada para el cálculo de la potencia cresta del panel solar es la siguiente.

$$P_p = \frac{E_h}{\eta_{MB}} \times \frac{G_{ce}}{F_m \times G_{db}(\beta)} \times \frac{1}{1 - \gamma \times (T_c - T_{c,ref})}$$

El rendimiento del sistema se fija a 73% ya que corresponde al rendimiento medio de las bombas de Grundfos con un caudal cercano a 25 m³/h. A la fórmula de base le añadimos un factor de corrección que permite tener en cuenta las pérdidas del sistema (entre ellas, las pérdidas por suciedad de los paneles, las pérdidas en los circuitos eléctricos, los convertidores, etc.). Para establecer este factor, nos basamos en los datos del pozo de perforación del punto TK2 , donde ya existe una instalación. La potencia instalada allí es de 7,2 kWc y tenemos los resultados expuestos en la tabla siguiente.

Día	Caudal [m ³ /día]	Observaciones
10-Mayo	86	Cubierto, Nubes
11-Mayo	112	
12-Mayo	110	
13-Mayo	106	
14-Mayo	108	
15-Mayo	108	
16-Mayo	107	
17-Mayo	109	
18-Mayo	51	Paro del sistema a las 12h30
19-Mayo	0	Paro del sistema
20-Mayo	0	Paro del sistema
21-Mayo	48	Paro del sistema a las 11h30
22-Mayo	109	
23-Mayo	108	
24-Mayo	108	
25-Mayo	78	

Cuadro 2: Registro de datos de TK2

Fuente: Échanges avec Dogondoutchi

Se observa que en un día normal, sin paros de sistema ni nubes, el volumen de agua bombeado es de aproximadamente 108,5 m³ diarios. Se elige, pues, un factor de corrección para que corresponda con las observaciones in situ.

4.2. Selección del sistema bomba - motor

4.2.1. Selección del tipo de motor

Por sus múltiples ventajas, se elegirá un motor DC (corriente continua). El principal criterio para esta decisión es el hecho de que con un motor DC, el sistema no necesitará contar con un inversor de corriente, lo cual reduce los costes y aumenta la facilidad en la instalación del sistema.

4.2.2. Selección de bombas

Recordamos las características y las ventajas de los distintos tipos de bombas (centrífugas y volumétricas).

Bomba	Volumétrica	Centrífuga
Caudal	Bajo (<15 m ³ diarios)	Elevado (25-10 m ³ diarios)
Altura de bombeo	Alta (30-150 m)	Baja (10-30 m)
Coste	Medio	Bajo
Rendimiento	Alto si la velocidad de bombeo es alta	Alto si la altura de bombeo es baja
Otras ventajas	Instalación de los paneles solares complicada	Fácil acoplamiento de los paneles
Mantenimiento	Regular	Bajo
Par de inicio	Alto	Bajo

Cuadro 3: Características y ventajas de las bombas volumétricas y centrífugas

Fuente: Autor

Las bombas volumétricas son más eficaces a altas velocidades. Las centrífugas son fiables y simples. En este caso buscamos una bomba sumergible, ya que queremos bombear aguas subterráneas. Se elige una bomba centrífuga. Necesitamos bombear a una altura elevada (que podría cubrir una bomba volumétrica) y un caudal elevado (para lo cual una bomba volumétrica no sería adecuada). Veremos que con los modelos de bombas estudiados, no habrá problema en lo que respecta a la altura con una bomba centrífuga.

Se buscan varias bombas adaptadas a los requisitos de este proyecto, de las marcas Grundfos y Lorentz. En efecto, son los principales productores y la asociación ya ha trabajado con estas empresas. Además de su fiabilidad, sus productos pueden ser transportados e instalados en Dogondoutchi, por lo que prefieren seguir confiando en ellos.

Teniendo en cuenta el caudal y la altura de bombeo deseados, se ha hecho una preselección de bombas. [GRUN19.1] [LORE19] [LELA19] Los modelos preseleccionados son:

- SP30-9
- SP30-10
- SP30-11
- LORENTZ PS2-4000 C-SJ5-25-D
- LORENTZ PS2-1800 HR-07H-D

En lo que respecta a las bombas de Lorentz, son el resultado de un programa de dimensionamiento llamado LeLab by SINES. Sin embargo, no son adecuadas para la situación. En efecto, el primer modelo puede bombear hasta 140 m, pero con un caudal máximo de 7 m³/h y el segundo también llega a una altura de bombeo elevada (hasta 160 m) pero con un caudal máximo aún menor.

Las bombas se caracterizan por sus curvas. Analizaremos por tanto las de los tres tipos de bombas de Grundfos preseleccionados. En cuanto a éstas, todas forman parte de la categoría SP, ya que son las más adaptadas al caudal de $Q = 25 \text{ m}^3/\text{h}$ (cf. figura xx). Pueden cubrir alturas de hasta casi 600 m (lo cual supera con creces las necesidades del proyecto).

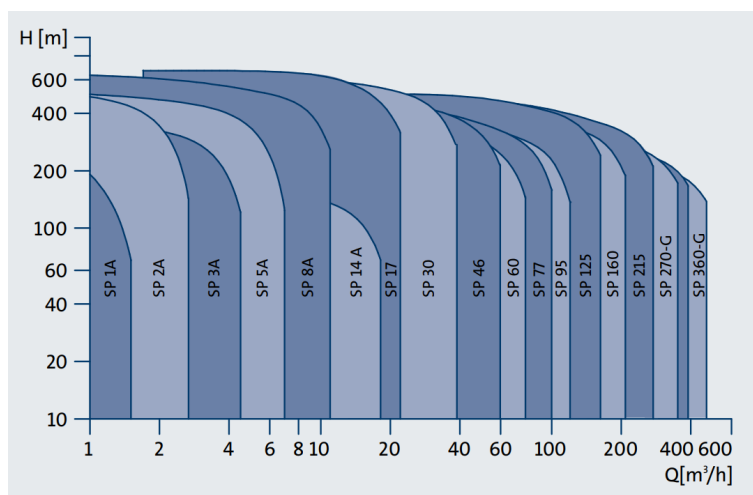


Figura 22: Rangos de actuación de las bombas sumergibles de Grundfos

Fuentes: Grundfos

Se presentan las curvas características de las bombas. Todas pueden trabajar en las condiciones correspondientes con los requisitos, pero el modelo SP30-9 es el que se acerca con más precisión. Su rendimiento es elevado (73,2 %). Además, es algo más ligera que los modelos SP30-10 y SP30-11. La bomba seleccionada tiene una potencia de 9,2 kW.

Modelo SP30-9

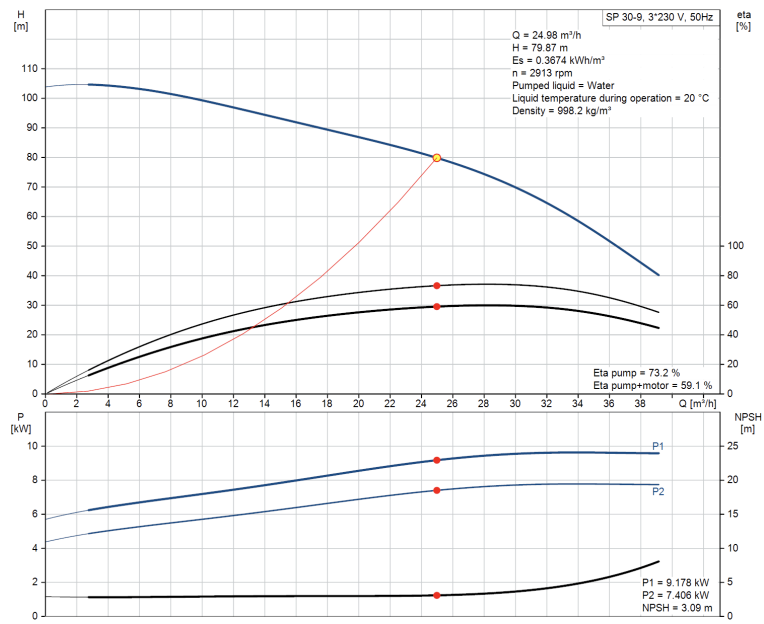


Figura 23: Curvas características de los modelos SP30-9
Fuentes: Grundfos

Modelo SP30-10

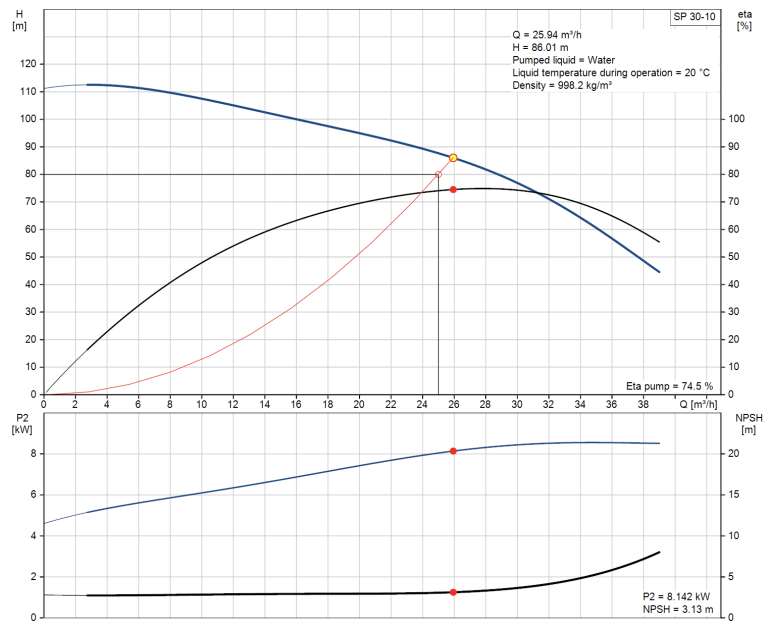


Figura 24: Curvas características de los modelos SP30-10
Fuentes: Grundfos

Modelo SP30-11

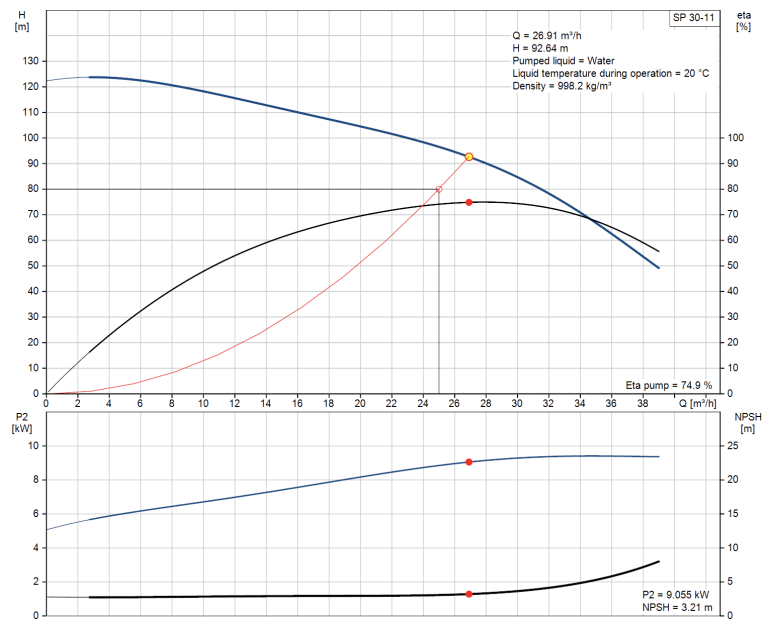


Figura 25: Curvas características de los modelos SP30-11

Fuentes: Grundfos

4.3. Selección de paneles para el sistema de bombeo fotovoltaico

Se ha realizado un estudio de las marcas con mayor presencia en el mercado de los paneles solares (Jinko, Panasonic, SolarWorld, Grundfos, Sharp...) y se ha hecho una preselección de paneles policristalinos. [SOLA19.1] [GRUN19.1] [JINK19]

Panel	MPPV [V]	OCV [V]	MPPC [A]	SCC [A]	MPO [V]	Peso [kg]
GF 270	31,6	38,4	8,76	9,11	270	18
GF 100 S	37,6	44,2	2,75	3,02	100	8
SW250	30,8	37,6	8,12	8,64	250	19
GF 80 S	17,9	21,9	4,49	4,78	80	7,6
JKM265P-60	31,4	38,6	8,44	9,03	265	26,5
JKM315P-72	37,2	46,2	8,48	9,01	315	19
JKM250M-72	34,8	43,4	7,18	7,84	250	14
NDRJ 260	30,79	37,45	8,52	8,98	260	18,2
NDAH 315	37,4	45,6	8,56	9,17	315	22,5

Cuadro 4: Características de los paneles preseleccionados

Fuente: Autor

Teniendo:

MPPV: Tensión en el punto de máxima potencia (Maximum Power Point Voltage)

OCV: Tensión de circuito abierto (Open circuit voltage)

MPPC: Corriente en el punto de máxima potencia (Maximum Power Point Current)

SCC: Corriente de cortocircuito (Short-circuit Current)

MP: Máxima potencia (Maximum Power Output)

Sabemos, por los cálculos realizados anteriormente, que $E_{sol} = 105,3375 \text{ kWh/m}^2/\text{día} = 4,39 \text{ kW/m}^2$.

Se tiene que:

$$P_{realbomba} = \frac{P_{idealbomba}}{\eta} = \frac{9,2}{0,732} = 12,56 \text{ kW}.$$

La relación entre esta potencia y los paneles viene dada por $P_{realbomba} = \frac{\eta \times n \times A \times E_{sol}}{t}$,

siendo n el número de paneles solares a instalar, A el área de los paneles, η su rendimiento y t el tiempo de funcionamiento (8 horas en este caso).

Se analizan los paneles de la lista preseleccionada para ver cuántos paneles de cada tipo serían necesarios en función de su área y su rendimiento, obteniendo los resultados expuestos a continuación.

PANEL	RENDIMIENTO	ÁREA [m ²]	n
GF 270	0,16	1,62688	1,63
GF 100 S	0,16	0,734734	3,62
GF 80 S	0,16	1,456521	1,83
SW 250	0,1591	1,676675	1,59
JKM265P-60	0,1619	1,6368	1,61
JKM315P-72	0,1623	1,940352	1,35
JKM250M-72	0,1645	1,93248	1,34
NDRJ 260	0,159	1,635806	1,64
NADH 315	0,162	1,940352	1,35

Figura 26: Número de paneles necesarios para cada modelo de panel

Fuente: Autor

Se intenta minimizar el coste del proyecto manteniendo un nivel de calidad. Por ello, se eligen los paneles con $n = 3$ ó 4 . Tras discusión con el cliente sobre no solo el precio sino también la calidad y el nivel de confianza con los proveedores de paneles, se seleccionan dos paneles posibles: los modelos GF 270 de Grundfos y SW 250 (de Grundfos y Solar World). Se podrán utilizar 4 paneles GF 270 o 4 paneles SW 250.

4.3.1. Instalación de los paneles

Según los manuales de instrucciones de Grundfos, el ángulo de inclinación de los paneles depende de la latitud del terreno donde se instalan. En este caso, la coordenada de latitud de Dogondoutchi es de $13^{\circ}64$ ($<15^{\circ}$), por lo que el ángulo de inclinación recomendado es de unos 15° . [SOLA19.2]

Latitud	Ángulo de inclinación fijo
$0^{\circ} - 15^{\circ}$	15°
$15^{\circ} - 25^{\circ}$	igual a la latitud
$25^{\circ} - 30^{\circ}$	Latitud + 5°
$30^{\circ} - 35^{\circ}$	Latitud + 10°
$35^{\circ} - 40^{\circ}$	Latitud + 15°
over 40°	Latitud + 20°

Figura 27: Ángulo de inclinación recomendado según la latitud

Fuente: Grundfos

Por otra parte, los paneles se pueden conectar en serie o en paralelo. En el primer caso, la intensidad se mantiene, y se suman las tensiones de los paneles. En el segundo caso, es la tensión la que se mantiene mientras que las intensidades se suman. Los paneles GF270 y SW250 tienen una corriente de cortocircuito y un voltaje en circuito abierto de 9,11A, 8,64A, 38,4 V y 37,6 V respectivamente. La bomba SP30-9 trabaja con voltajes superiores a 380 V e intensidades de hasta 21,8 A, por lo que sería mejor una conexión en serie para no sobrepasar el límite de intensidad.

5. Dimensionamiento del local de almacenamiento

5.1. Datos: Análisis del producto y funcionamiento del cultivo

Los habitantes ya cuentan con una cámara fría alimentada por la red eléctrica Nigelec. Sin embargo, no es lo suficientemente grande, y además, los cortes eléctricos son frecuentes (lo que provoca la elevación de la temperatura). El objetivo es diseñar una nueva cámara, de mayor tamaño y que sea alimentada por un método fiable: la energía solar.

En Dogondoutchi, se utiliza el concepto de la rotación de cultivos, es decir, que se alternan los productos en los campos, según las necesidades de los habitantes, el estado de los suelos... La agricultura en Níger es tradicional, donde los principales cultivos son el mijo, el sorgo, el niébé y el maíz. Este estudio se centra en un producto en particular: las patatas, comercializadas desde 2005 en Dogondoutchi y cultivadas a causa de sus grandes propiedades nutricionales y su facilidad de venta en la región. Podrá servir como base para ampliar los resultados a otros cultivos, simplemente teniendo en cuenta las variaciones en lo que concierne la cantidad de producto y las características de conservación (temperatura y humedad principalmente).

Las patatas contienen un 80% de agua, y por ello, son un producto muy sensible a los efectos nocivos durante la cosecha y el transporte (variaciones de temperatura, humedad, aireación, luz). Deben mantenerse en la oscuridad y secas. Para evitar el calentamiento del producto antes de la llegada del producto al almacén, la cosecha se realizará por la tarde y las patatas se depositarán la misma noche en el local. Las principales características de las patatas se resumen en la tabla siguiente.

Temperatura de conservación (°C)	15
Humedad relativa (%)	80-90
Capacidad calorífica(kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	3,51
Densidad (kg/m ³)	1100
Conductividad (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,5

Cuadro 5: Características del producto almacenado

La patata es un producto perecedero que puede sufrir diferentes transformaciones: la respiración, la actividad enzimática que puede conllevar la decoloración, el ablandamiento o la producción de olores desagradables, la transpiración (perdida de humedad y de peso), y otras alteraciones por insectos o microbios o por la temperatura (congelación, altas temperaturas). El mantenimiento a una temperatura adecuada permite regular todos estos procesos. Mantener una humedad relativa superior alrededor del 90% también es necesario para una conservación de larga duración.

Al contrario que en Europa (en Francia, por ejemplo), donde la conservación de las patatas en cámaras industriales se efectúa a 7° C, la temperatura deseada en este contexto es de 15 ° C. En efecto, la temperatura exterior alcanza los 35 ° C (e incluso llega a subir a los 40-45 ° C en épocas extremadamente calurosas), y enfriar más implicaría un coste energético enorme.

Se prevé un almacenaje que dure hasta cuatro meses. Durante este tiempo, las pérdidas de agua (que dependen, entre otros factores, del tiempo entre la cosecha y el almacenamiento) y por podredumbre son mínimas.

PÉRDIDAS DE AGUA : 0,5 kg/25 kg 2 %
PÉRDIDAS POR PODREDUMBRE : 3 kg/tonne 0,3 %

Para estimar la cantidad de patatas que deberán ser almacenadas, basamos los cálculos en los datos proporcionados por la asociación.

Símbolo	Definición	Unidad	Dato
m	Masas de patatas producida por ha cultivada	kg	Por determinar
S	Superficie del campo de cultivo	ha	0,25
P(S)	Producción observada en una superficie de cultivo S	kg	5000 (valor medio)

Cuadro 6: Datos sobre la producción en función de la superficie

Encontramos que:

$$m \approx \frac{P(S)}{S} = \frac{5000}{0,25} = 20000kg/ha$$

Sean δ la proporción de tierras cultivadas en el campo, y α la proporción de campo utilizada para las patatas. Sabiendo que la superficie total del campo para el cual se diseña este proyecto es de $STOT = 8$ ha, se calcula la producción total PT a través de la fórmula siguiente, donde α correspondería a la rotación de los cultivos (1/4 si se respetan las rotaciones cada cuatro años, 1/2 siendo lo que se practica actualmente).

$$PT(STOT) = m \times STOT \times \delta \times \alpha$$

α	1/4	1/2	3/4	1
PT	34	68	102	136

Cuadro 7: Correspondencias entre la superficie cultivada y la producción total en toneladas

Sin embargo, la cantidad de producto almacenado, en el caso de las patatas, no proviene únicamente de los campos de Dogondoutchi, sino también de los municipios de Matankari, Soukoukoutane, Tibiri y Kiéché, lo cual prácticamente dobla la cantidad de producto a almacenar. Por tanto, según lo concertado con el cliente, se estudia en este proyecto el diseño de un local con una capacidad de 120 toneladas de patatas.

A su vez, el local se dividirá en tres compartimentos idénticos, con una capacidad, por tanto de 40 toneladas para cada uno de ellos. Las dimensiones elegidas para el local son las siguientes.

Longitud l	10
Anchura L	9
Altura h	5

Cuadro 8: Dimensiones del local

En este trabajo no se incluyen informaciones sobre aparatos a tener en cuenta a la hora de implantar el almacén (como dispositivos anti gérmenes o medidores de CO₂), ya que no formaba parte de las exigencias del cliente. Una vez dentro del local, las patatas se almacenarán en cajas de madera o sacos. Existen cajas normalizadas con capacidades de 1, 1.5 o 2 toneladas, de dimensiones variables. Para almacenar 120 toneladas de patatas, se podrían utilizar 60 cajas (2400×1200 × 1350mm). [PGSG14]



Figura 28: Modelo de caja-paleta comúnmente utilizado
Fuentes: PGS Group

5.2. Elección de materiales

5.2.1. Elección del aislante

En esta sección se pretende únicamente comparar diferentes aislantes, con el fin de elegir aquel que responda mejor a los criterios del cliente. La calidad del aislamiento es de gran importancia para limitar las pérdidas hacia el exterior. El coeficiente de transmisión térmica (U), debe ser lo más bajo posible.

Se han comparado diferentes combinaciones de materiales. En lo que respecta al aislante, se ha hecho una preselección de dos materiales muy eficientes: la lana de vidrio y la paja. [RABI08]

Ambos tienen características muy ventajosas: bajas conductividades, índices ponderados de reducción sonora similares (45 dB para la paja y 50 dB en el caso de la lana de vidrio). Sin embargo, la paja se puede encontrar localmente, es fácil de instalar y ligera (no hace falta un muro de carga para soportar su peso) y tiene un coste menor. Por ello, se opta por utilizarla como aislante.

	Conductividad [W/m.K]	Espesor [m]	Coste por m ² para 1 cm de espesor €	Coste total €
Lana de vidrio	0,03	0,21	0,51	10,2
Paja	0,065	0,4	0,19	7,6

Cuadro 9: Comparación de los aislantes analizados

Para un mismo nivel de aislamiento, hace falta el doble de espesor de paja que de lana de vidrio, pero el coste total cuando se usa lana de vidrio es 1,34 veces mayor que cuando se opta por la paja.

Nótese además que es un aislante ecológico (cf. 7. Consideraciones medioambientales).

También es interesante comparar este material con otro aislante de base biológica: la lana mineral.

	Paja	Aislante de base biológica estándar	Lana mineral
Precio	*****	**	***
Disponibilidad	*****	***	****
Medioambiente	*****	**	--
Salud	*****	*****	**
Durabilidad	*****	*****	*
Humedad del aire	****	****	*
Media	4,5 😊	3,5 😊	2 ☹️

Figura 29: Comparación de la paja con aislantes de base biológica

Fuente: Autor

5.2.2. Proposición para la construcción de los muros del local

Se propone utilizar el hormigón armado como material de construcción principal, la paja como aislante y revestido con una capa de cal y cemento.

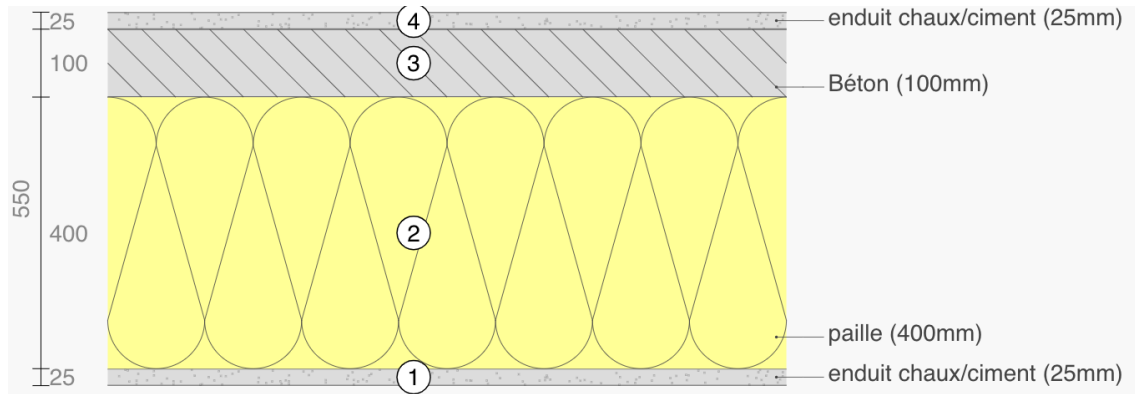


Figura 30: Esquema en corte del muro

Fuente: Ubakus

Leyenda:

- Enduit chaux/ciment: Revoque de cal y cemento
- Paille: Paja
- Béton: Hormigón

5.3. Sistema de refrigeración

5.3.1. Evaluación de la refrigeración por evaporación

Para evaluar la posibilidad de utilización de esta técnica, se analiza el diagrama del aire húmedo. Para el periodo de conservación que nos interesa, se necesita bajar a una temperatura de 15 ° C. Utilizamos una herramienta de Excel desarrollada por el COSTIC (*Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques*), que permite visualizar el diagrama psicrométrico del aire húmedo, determinar las principales características del aire, a partir del conocimiento de dos parámetros de su estado, y representar gráficamente este estado en dicho diagrama, que muestra la humedad absoluta en función de la temperatura seca. [COMI19]

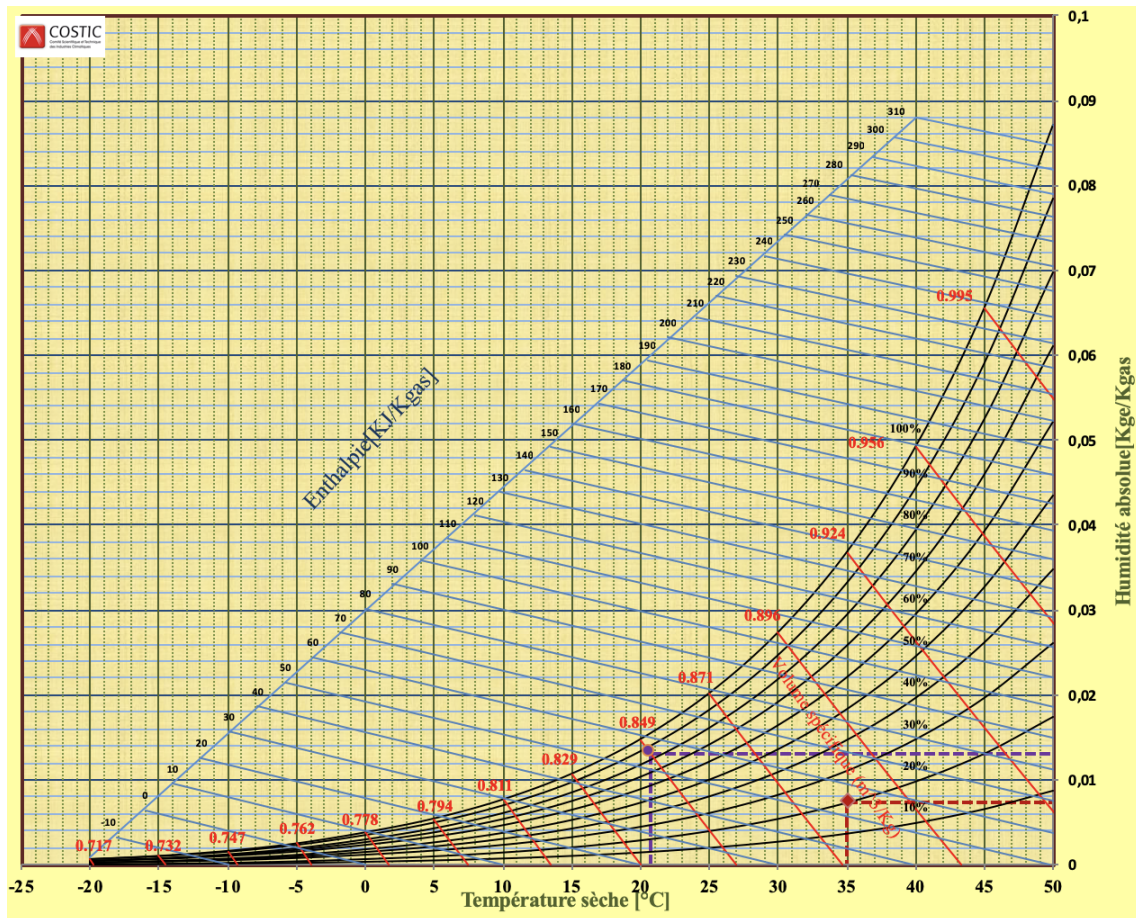


Figura 31: Diagrama psicrométrico del aire

Fuente: COSTIC

Elegimos la humedad relativa y la temperatura iniciales. En el diagrama, podemos visualizar las curvas de los distintos niveles de humedad relativa, así como las entalpías (rectas azules) y los volúmenes específicos (rectas rojas). Sin embargo, como se puede ver sobre el diagrama, no se puede enfriar el almacén a menos de 22 ° C a través de este procedimiento.

La temperatura inicial escogida es de 35 ° C, dato también utilizado para los cálculos de pérdidas térmicas e impuesto como la media de la temperatura exterior por el cliente para efectuar los cálculos. Este parámetro podría ser modificado si hiciese falta. Partimos de una humedad relativa inicial de $\phi = 20\%$, y el objetivo es alcanzar $\phi = 80-90\%$. Gracias a la herramienta de COSTIC, vamos aumentando ϕ y notando la temperatura a la cual se puede llegar, siguiendo un proceso isentrópico. Obtenemos los resultados expuestos en la siguiente tabla, teniendo en cuenta que la humedad relativa del aire exterior no baja del 20%.

Humedad relativa φ	Temperatura seca alcanzada (°C)
20 %	20,69
30 %	23,53
40 %	26,08
50 %	28,38
60 %	30,48
70 %	32,40

Cuadro 10: Temperaturas alcanzadas según el nivel de humedad relativa

A mayor humedad relativa, mayor temperatura alcanzada. Al no poder reducir la humedad relativa del medio exterior, no podremos bajar más allá de 20,69 \approx 21°C. No se podrá alcanzar la temperatura deseada (15 °C). Podemos, por tanto, concluir que para nuestro objetivo, es decir, el almacenamiento de patatas (y, de manera más amplia, de productos perecederos), la solución de refrigerar por evaporación no es válida: se tiene que recurrir a un ciclo clásico de refrigeración. En países cálidos como el Níger, el frío evaporativo no permite alcanzar las temperaturas recomendadas para los productos. Podría en todo caso ralentizar la degradación de frutas y verduras.

5.3.2. Cálculo de la potencia necesaria

El ciclo de refrigeración tiene que funcionar con una temperatura exterior $T_c = 35^\circ \text{ C}$ y mantener una temperatura $T_f = 15^\circ \text{ C}$ al interior del local. Tendremos:

$$\phi_0 = \frac{T_c - T_f}{R_{th}} \approx 3,1 \text{ W/m}^2.$$

con R_{th} : la resistencia térmica de los muros.

Para su cálculo, se tienen en cuenta los distintos materiales del muro y los espesores de cada uno de ellos.

Para una capa que suponemos homogénea de material de conductividad térmica λ y espesor e , la resistencia se calcula:

$$R_{th} = \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$$

Se tienen en cuenta además las resistencias de superficie de las paredes verticales exteriores e interiores ($\frac{1}{h_e}$ y $\frac{1}{h_i}$).

Son estimadas a $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ y $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ respectivamente. h_e y h_i son los coeficientes de intercambio convectivo al exterior y al interior.

Material	Espesor [m]	Conductividad λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	Resistencia
Bloque de cemento	0,1	1	0,1
Paja	0,40	0,065	6,15
Revestimiento de cemento	0,05	1	0,05

Cuadro 11: Cálculos de la resistencia por capa de material

De esta manera, con los materiales seleccionados, obtenemos un valor de la resistencia térmica para uno de los muros del local de $R_{th} \approx 6,4 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, y su valor inverso, que representa la transmitancia térmica $U = 0,16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

El área de los muros y el techo es de $S = 280 \text{ m}^2$, por lo que habrá una pérdida de potencia a través de los muros de $X = S \times \phi_0 = 875 \text{ W}$.

Por otra parte, existen pérdidas por la renovación del aire, aunque son mínimas. Si $V = 450 \text{ m}^3$ es el volumen de la habitación, sean dichas pérdidas $L = \frac{V \times \phi_0}{24 \times 3600} = 0,016 \text{ W}$.

Por tanto, $P_{tot} \approx 875,02 \text{ W}$.

Resistencia R_{th} [$m^2.K/W$]	6,4
Transmitancia U [$W/m^2.K$]	0,16
Pérdida calorífica a través de los muros y el techo [W]	875
Pérdida por renovación del aire [W]	0,016
Total pérdidas \dot{Q} [W]	$\approx 875,02$

Cuadro 12: Cálculos de la pérdida de carga calorífica y potencia necesaria para alimentar los compresores

5.3.3. Dimensionamiento del ciclo termodinámico

Se trata de un ciclo estándar de compresión de vapor. El refrigerante será el R-22, por razones que se especificarán más adelante.

En el sistema modelizado, se hacen las siguientes hipótesis:

- La expansión es isentálpica.
- La compresión es isentrópica.
- La evolución en los intercambiadores (condensador, evaporador) se hace sin pérdida de carga.

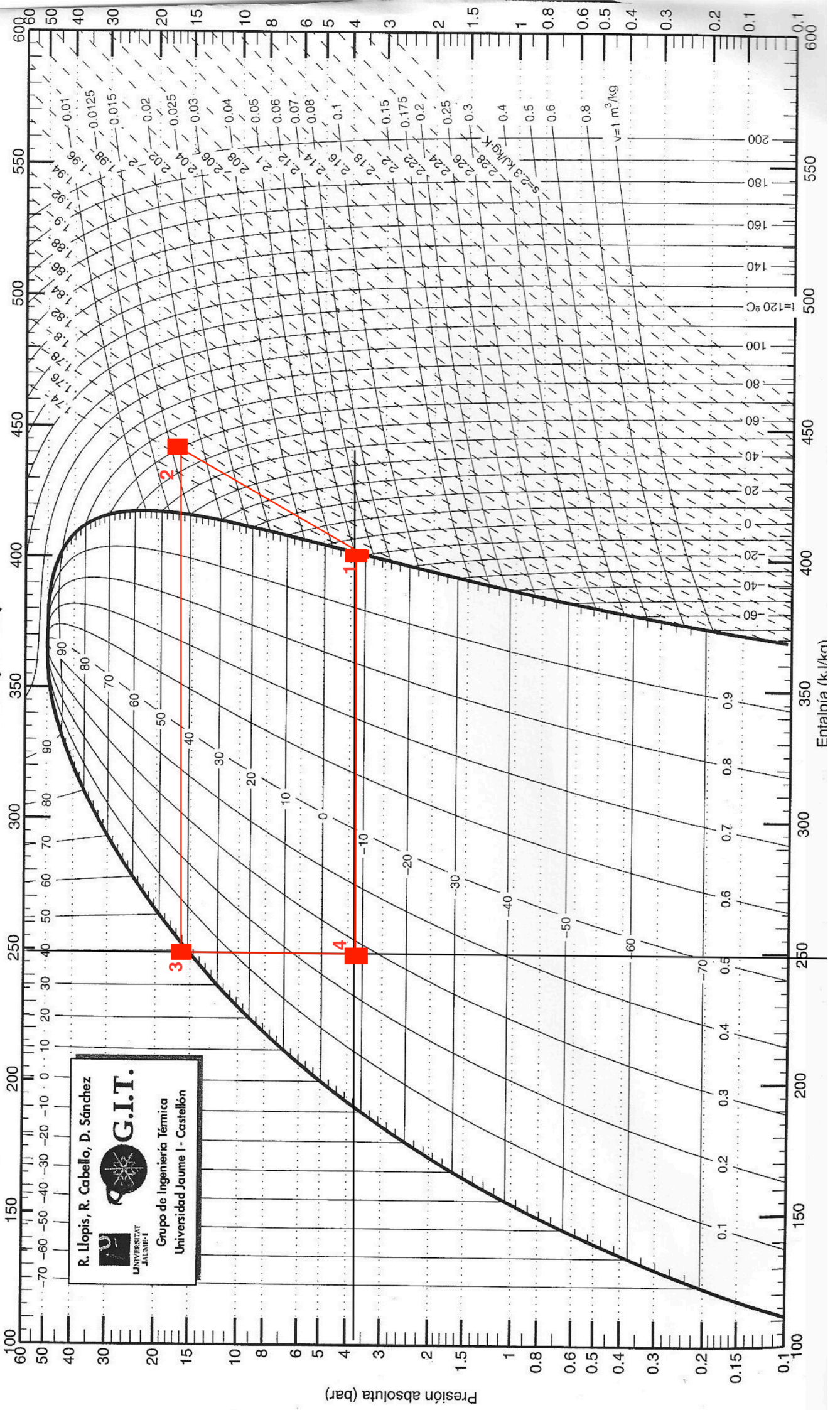
Para asegurar transferencias térmicas eficientes entre los intercambiadores y el medio exterior, se eligen unas temperaturas del fluido durante la evaporación y la condensación de:


$$T_{ev} = -10^{\circ}C$$

$$T_{cond} = 40^{\circ}C$$

Trazamos el ciclo sobre el diagrama P-h (siendo P la presión y h la entalpía) del R-22. [CORO14]

R22 (CHClF₂)



R. Llopis, R. Cabello, D. Sánchez
**G.I.T.**
Grupo de Ingeniería Térmica
Universitat Jaume I - Castellón

- El punto 1 corresponde a la entrada del compresor, donde el fluido es vapor saturado a la presión de evaporación. A $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, la presión es de $P_{evap} = 354,9\text{ kPa}$ y encontramos que $h_1 = 401,1\text{ kJ.kg}^{-1}$.
- El punto 3 corresponde a la salida del condensador como líquido saturado a $P_{cond} = 1534,1\text{ kPa}$. En estas condiciones, $h_3 = h_4 = 249,8\text{ kJ.kg}^{-1}$.

T [$^{\circ}\text{C}$]	P [kPa]	$h_l[\text{kJ/kg}]$	$h_g[\text{kJ/kg}]$	$s_l[\text{kJ/kgK}]$	$s_g[\text{kJ/kgK}]$
40	1534,1	249,8	416,3	1,167	1,699

Cuadro 13: Datos utilizados para evaluar el punto 3

- El punto 2 (salida del compresor) es aquel en el que $s_2 = s_1 = s_g[-10^{\circ}\text{C}] = 1,765\text{ kJ/kg}$ y $P = P_{cond} = 1534,1\text{ kPa}$. Utilizamos las tablas de vapor sobrecalentado y obtenemos los resultados siguientes, interpolando:

T [$^{\circ}\text{C}$]	s [kJ/kg]	h [kJ/kg]
60	1,756	434,9
63,5	1,765	437,9
70	1,782	443,6

Cuadro 14: Interpolación de datos para el punto 2

El caudal de refrigerante será:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times (h_1 - h_4)$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{h_1 - h_4} = 0,0057833\text{ kg.s}^{-1} \approx 5,78\text{ g/s}$$

Calculamos la potencia de compresión:

$$\dot{W} = \dot{m} \times (h_2 - h_1) \approx 0,2128\text{ kW} = 212,8\text{ W}$$

El coeficiente de eficiencia energética para esta máquina de producción del frío es:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{W}_c} = 4,11$$

Podemos comparar este valor al del rendimiento ideal o coeficiente de Carnot para ciclos de refrigeración.

$$\text{COP} = \frac{1}{\frac{T_{cond}}{T_{evap}} - 1} = \frac{1}{\frac{40 + 273}{-10 + 273} - 1} = 5,26$$

Es, lógicamente, superior al coeficiente del sistema calculado.

- El punto 4 queda caracterizado ya que la expansión se considera isentálpica ($h_3 = h_4$) y la evolución en el evaporador es a presión constante ($P_4 = P_1 = P_{evap} = 354,9kPa$).

5.4. Selección de los paneles

Electricidad necesaria para 24 h [W]	287,2
Energía solar necesitada por el compresor en 24h [Wh]	$\approx 6892,2$
Energía a proporcionar en 8h [Wh]	$\approx 2297,4$

Cuadro 15: Energía necesaria para alimentar el sistema

A pesar de haber calculado un COP en el ciclo teórico más cercano de 4 que de 3, utilizamos aquí $COP = 3$ para evaluar la electricidad necesaria para alimentar el local y mantener las patatas a la temperatura correcta, valor típico de un ciclo de refrigeración clásico, ya que no hemos tenido en cuenta las posibles reversibilidades de los procesos antes, a causa de las cuales la eficiencia sería menor.

A partir de esto, con el código Python elaborado, calculamos la potencia cresta que deberán proporcionar los paneles para responder a esta necesidad.

$$P_{cresta} \approx 2,34kWc$$

Para encontrar el número de paneles necesario según el modelo, se divide la potencia cresta por la potencia máxima correspondiente a cada modelo. Se encuentran los resultados siguientes.

PANEL	Potencia máxima	n
GF 270	270	8,65555556
GF 100 S	100	23,37
GF 80 S	80	29,2125
SW 250	250	9,348
JKM265P-60	265	8,81886792
JKM315P-72	315	7,41904762
JKM250M-72	250	9,348
NDRJ 260	260	8,98846154
NADH 315	315	7,41904762

Figura 32: Número de paneles necesario según el modelo

Fuente: Autor

Los paneles más adecuados son los de los modelos GF 270 y JKM315P-72. De la misma manera, tras discusión con el cliente, se decide utilizar 9 paneles GF 270.

5.4.1. Instalación de los paneles

Las consideraciones sobre el ángulo de inclinación son las mismas que para el campo solar instalado para el bombeo.

N.B. También existen dispositivos llamados "solar trackers", que permiten cambiar el ángulo a lo largo del día en función de la luz solar. No se considera su utilización, ya que su coste es muy elevado.

Es más conveniente conectar los 9 paneles GF 270 en serie, para no sobrepasar la corriente en los climatizadores de los que se habla a continuación.

5.5. Selección de climatizadores

El local de almacenamiento necesita la alimentación eléctrica para mantener el producto conservado a la temperatura adecuada, pero también para llevar el producto a dicha temperatura cuando un nuevo lote llega al almacén.

Esto último requiere una potencia mucho mayor, del orden de 12 kW, por lo que la intención es utilizar los paneles para el mantenimiento de la temperatura, y contar con la red eléctrica para el enfriamiento o puesta en temperatura.

Tras un estudio de los climatizadores presentes en el mercado y de fácil compra para los habitantes de Dogondoutchi, se han preseleccionado dos modelos de climatizadores posibles. [SHAR19] [AFRI19]. Ambos utilizan el R-22 como refrigerante, lo que justifica la utilización previa del P-h de dicha sustancia.

- Modelo SHARP de potencia 2 CV (lo que equivale a 1500 W como potencia máxima por climatizador) con refrigerante R22.
- Modelo NASCO MS12F-24CR de potencia 3,4 CV (es decir, 2500 W por climatizador) con refrigerante R22.

N.B. Recordamos que $1 \text{ CV} = 735 \text{ W}$.

Se necesitarían dos climatizadores del modelo SHARP y únicamente uno del modelo NASCO para alcanzar la potencia necesaria para el local de almacenamiento. Teniendo en cuenta que el modelo NASCO proporciona una potencia mayor y que además tiene un coste inferior, nos decantamos finalmente por este segundo modelo para nuestro sistema.

6. Análisis de costes

En esta sección no se pretende exponer un presupuesto del proyecto, sino únicamente presentar un orden de magnitud de sus costes en un campo de 8 hectáreas.

6.1. Análisis de los costes de la instalación solar

Elemento	Características	Coste unitario	Coste (FCFA)	Coste (euros)
Panel fotovoltaico	14 kWc instalados	1443200	20204800	30800
Soporte de panel	100 mm, galvanizado	1750000	1750000	2668
Convertidor	30 kW trifásico	14000000	14000000	21343
Cables, tuberías, accesorios		1500000	1500000	2287
Vallas y alambradas		2500000	2500000	3811
Almacén de accesorios		4500000	4500000	6860
Mano de obra		2600000	2600000	964
TOTAL			47056848	71733

Cuadro 16: Estimación de los costes de la instalación fotovoltaica

Las cantidades son unitarias para todo menos para los paneles. Se usarán 14 paneles de 1 kWc. Los precios aparecen en euros, para la comodidad de comprensión del lector, así como también en FCFA (Franco de la Comunidad Financiera Africana, utilizado en Níger). El coste de una instalación como esta es del orden de 50 millones de FCFA. Resulta interesante comparar esta cifra a los gastos anuales relacionados con el consumo de electricidad (pagados a la red eléctrica Nigelec), resumidos en la tabla siguiente.

Producción anual	128 000 000 FCFA	195 122 €
Cargas de explotación (semillas, productos fitosanitarios, fertilizantes,...)	19 000 000 FCFA	28 963 €
Energía eléctrica	500 000 FCFA	762 €
Costes de conexión a la red	32 142 668 FCFA	49 000 €
Reembolso anual de 20 años con un interés del 5%	11 000 000 FCFA	16 768 €
Beneficio neto para los 64 propietarios del terreno	96 900 000 FCFA	147 713 €
Beneficio neto por cada parcela de 25×50	1 514 063 FCFA	2 308 €

Cuadro 17: Balance de costes anual para un campo de 8 ha

Los dos valores más interesantes son el precio de la alimentación eléctrica proporcionada por Nigelec (500 000 FCFA), que corresponderían a los kWh consumidos anualmente para el bombeo del agua; y el beneficio neto de explotación (casi 100 millones de FCFA, diferencia entre la producción anual y los costes de producción).

El coste de conexión a la red eléctrica de Nigelec representa una enorme inversión en comparación con la instalación de paneles solares. Por tanto, la solución fotovoltaica, además de estar en línea con los objetivos de desarrollo de energías renovables, es más rentable a nivel económico. No hay que olvidar que la mejor solución es una combinación de las dos, ya que por ejemplo para el local de almacenamiento, se necesita la red eléctrica general para situaciones como la llegada de un nuevo lote de productos alimentarios, en las que se debe llevar los productos desde su temperatura inicial hasta la temperatura de conservación deseada al interior del almacén.

6.2. Coste de los componentes seleccionados

Producto	Marca	Cantidad	Coste ud. [€]	Coste total [€]	Peso total [kg]	Dimensiones [mm]
Panel solar	SW250	4	270	1080	84,8	1675x1001x31
Panel solar	GF270	9	240	2160	162	1640x992x35
Bomba	SP30-9	1	3644	3644	26	L = 1752, R = 142
Climatizador	NASCO	2	576	1152	24	1045x315x235

Cuadro 18: Costes de los elementos del sistema

Hay que tener en cuenta que no se consideran los costes de los elementos de control del sistema, de las tuberías ni del depósito de agua. Sin esto, se estima un precio cercano a los 8036 €.

Los costes suplementarios de instalación (instalación, mantenimiento...) no se tratan más en profundidad en este informe, sino entre la asociación y los proveedores (Grundfos, Solar World, Nasco...) directamente.

7. Consideraciones medioambientales

En este apartado únicamente se pretende resaltar el aspecto de impacto ambiental positivo de este proyecto.

Hoy en día, los agricultores afrontan desafíos importantes. En zonas aisladas o con más difícil acceso a la energía de forma permanente y duradera, como lo es Dogondoutchi, la solución del bombeo solar representa una alternativa económica, fiable y en acuerdo con los objetivos del desarrollo sostenible y las energías renovables.

Se debe hacer una mención especial al balance medioambiental positivo del material aislante seleccionado (la paja, cf. Anexo IV). En efecto, la etiqueta POV del producto muestra las informaciones representativas de las emisiones en el aire de sustancias volátiles que presentan un riesgo de toxicidad por inhalación, en una escala yendo de C (emisiones fuertes) a A+ (bajas emisiones). La paja está calificada como A+, lo que significa que respeta los valores límites de concentraciones en compuestos orgánicos volátiles (COV) indicados en la tabla (cf. Figura 32).

Etiquetage préconisé	C	B	A	A+
Formaldéhyde	>120	<120	<60	<10
Acétaldéhyde	>400	<400	<300	<200
Toluène	>600	<600	<450	<300
Tétrachloroéthylène	>500	<500	<350	<250
Xylènes	>400	<400	<300	<200
1,2,4-Triméthylbenzène	>2000	<2000	<1500	<1000
1,4-Dichlorobenzène	>120	<120	<90	<60
Éthylbenzène	>1500	<1500	<1000	<750
2-Butoxyéthanol	>2000	<2000	<1500	<1000
Styrène	>500	<500	<350	<250
COVT	>2000	<2000	<1500	<1000

Figura 33: Clasificación por niveles según la concentración en COV

Fuente: Accortpaille



Figura 34: Clasificación de la paja en la escala de C a A+

Fuente: Accortpaille

8. Conclusión

8.1. Modelo final

El sistema de bombeo constará de un conjunto de 4 placas solares del modelo GF 270 o SW 250 (la asociación elegirá el que le parezca más conveniente entre estos dos modelos), conectadas en serie, y de una bomba solar sumergible SP30-9 de Grundfos, líder mundial en soluciones de bombeo. Éste permitirá recuperar el agua subterránea, que una vez en la superficie será usada para el riego. El agua no utilizada en el momento se dirigirá hacia un depósito.

No se utilizan baterías ya que desde el principio el cliente no deseaba incluirlas en el sistema, a causa de su precio elevado. El sistema no trabajará por la noche, por lo que si se llegara a necesitar agua en las horas nocturnas, se utilizaría aquella almacenada en el depósito.

En cuanto al local de almacenamiento, la estructura será de hormigón armado y se usará la paja como material aislante. Se utilizarán 9 paneles SW 250 para la alimentación eléctrica de los compresores, y el modelo de climatizador utilizado será el NASCO MS12F-24CR de potencia 3,4 CV.



Figura 35: Elementos seleccionados para el sistema

Fuente: Autor

8.2. Resumen general del procedimiento

Si la asociación quiere generalizar este proceso a otros municipios y puntos de la región, se debe en primer lugar analizar cuáles son las necesidades de suministro de agua y determinar el caudal diario (m^3/h) que se quiere obtener. Después, se debe elegir la bomba adecuada que respete los criterios de altura de bombeo, caudal bombeado, presión, precio y tamaño. Aunque no se trata en este estudio, es importante poner en marcha un sistema de seguimiento de la bomba para poder controlar las horas de riego. Una vez elegida la bomba, se elige el número de paneles solares necesarios, y se verifica que las condiciones de funcionamiento de la bomba y de los paneles concuerdan.

En cuanto al local de almacenamiento, se deben tener en cuenta la cantidad de producto que se quiere almacenar, así como sus características de conservación. Una vez decidido esto, se procede a calcular la energía necesaria que deben recibir los compresores para poder climatizar la cámara en función de sus dimensiones y de lo que se pretende almacenar en su interior, para así poder seleccionar un modelo de climatizador de potencia adecuada. Los materiales se pueden cambiar siempre y cuando se evalúen las pérdidas térmicas del local correctamente.

8.3. Comentario final

Mientras que en Europa o Estados Unidos, se desarrollan nuevas tecnologías y robots inteligentes para todo tipo de usos, en muchos países como Níger asegurar una respuesta a las necesidades básicas de la población sigue siendo un gran problema. Todo el mundo debería tener acceso a la energía y a un nivel mínimo de seguridad alimentaria. Muchas asociaciones y organizaciones no gubernamentales proponen soluciones, poniendo en marcha proyectos como el de *Échanges avec Dogondoutchi*, con el fin de mejorar la vida de estas personas, y trabajan para, poco a poco, llevarles hacia una vida más cómoda y un futuro mejor.

Anexo I: Código Matlab

```
>> %Aproximación del área bajo la curva
% Autora: Patricia Gómez de Olea
x=[01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12]
y=[7.8575 8.3075 8.97 9.435 10.455 10.705 10.5825 10.51 10.32 9.5875 8.52 8.0325]
plot(x,y)
xlabel('Meses')
ylabel('Irradiación solar (kWh/m^2/day)')
title('Irradiación solar anual media')
X = ['El área bajo la curva es:']
A=trapez(x,y)
%Los datos y se hacen cogiendo una media de todos los años entre el 2015
%y el 2019.
```

Figura 36: Código utilizado para aproximar el área bajo la curva

Fuente: Autor

Este simple programa aproxima el área bajo la curva dibujada gracias a la función de Matlab `trapez()`, que se basa en el método de los trapecios. Para trazar la curva, se han utilizado los datos de la NASA sobre la irradiación solar entre los años 2015 y 2019.

Anexo II: Programa en lenguaje Python

A lo largo del proyecto, se ha desarrollado un código en Python que nos permite dimensionar el sistema de bombeo fotovoltaico, y particularmente los paneles. A continuación se explican los distintos bloques del código.

En primer lugar se declaran las variables, dentro de las cuales existen varias interesantes ya que se pueden modificar según el caso de trabajo. Éstas son el rendimiento del sistema motor/bomba, la altura dinámica, y el caudal máximo que permite bombear el conjunto del sistema. Estos datos se pueden modificar para observar el impacto sobre el volumen de agua bombeado, la dimensión de los paneles a instalar o la estructura del caudal. También es posible cambiar el factor de corrección para adaptarlo a lo observado en la práctica sobre el terreno.

```
1 #!/usr/bin/env python3
2 # -*- coding: utf-8 -*-
3 """
4 Created on Fri May 3 17:07:54 2019
5
6 @author: Patricia Gómez de Olea
7 """
8
9 import matplotlib.pyplot as plt
10 import numpy as np
11 import copy
12
13 %%Declaración de variables
14
15 g=9.81 #Aceleración de la gravedad m/s2
16 pho = 1000 #kg/m3 densidad del agua
17 h = 80 #altura dinámica teniendo en cuenta pérdidas de carga
18 Tcref= 25 #°C Temperatura de referencia
19 Tc= 29.1 #°C Temperatura media en Dogondoutchi
20 sol = 6040 #Wh/m2/día
21 r = 0.74 # Rendimiento del sistema motor-bomba
22 Kcorr = 0.8 #Factor de corrección
23 caudalmax = 25
24 Va = 200 #Volumen a bombear en m3
25 Gce = 1000 #Condición estándar de medida: iluminancia [W/m2]
```

Figura 37: Declaración de variables

Fuente: Código Python

El segundo bloque se usa para calcular la energía hidráulica necesaria al bombeo del agua (función **calculoenergiahidraulica**). Esta función tiene como argumento la variable V_a , es decir el volumen de agua total que se desea bombear en un día. En nuestro caso, se trata de los 200 m³. Al cambiar este valor en la declaración de variables, el valor de la energía será modificado automáticamente.

```
28 #%% Dimensionamiento de los paneles solares
29
30 #Cálculo de la energía hidráulica necesaria
31
32 def calculoenergiahidraulica(Va):
33     Eh=g*pho*Va*h/3600
34     return Eh
35
36 Eh = calculoenergiahidraulica(Va)
37
38 print("Eh=", Eh);
39 # Estimación de la potencia cresta del generador
40
41 def calculopotenciacresta(sol):
42     P = Gce*Eh/((1-0.04*(Tc-Tcref))*sol*Kcorr*r)
43     return P
44
45 potencia_cresta = calculopotenciacresta(sol)
46
47 Energiapanel = Eh/r #energía que debe proporcionar el panel en un día
48
49 print("La potencia cresta de los paneles instalados debe ser de", potencia_cresta, "Wc")
--
```

Figura 38: Funciones **calculoenergiahidraulica** y **calculopotenciacresta**

Fuente: Código Python

Por otra parte, la función **calculopotenciacresta** nos permite estimar la potencia cresta de los paneles solares que se deben instalar. Tiene como argumento el valor medio de la radiación solar en Dogondoutchi y nos devuelve la potencia cresta buscada. Es en esta parte donde se añade el factor de corrección para ajustar el modelo.

El siguiente bloque permite extraer todos los datos necesarios relacionados con la irradiación solar y las precipitaciones, datos almacenados como documentos en formato .txt para que puedan ser leídos con Python. Las tres primeras líneas abren el documento de texto, crean una lista con las distintas líneas del documento y lo vuelven a cerrar. Estos caracteres son convertidos después en números flotantes o float que son utilizados posteriormente en los cálculos.

```
51 #%%Recuperación de datos
52
53 mi_fichero = open("ensoleillement.txt", "r")
54 data= mi_fichero.readlines()
55 mi_fichero.close()
56
57 irradiacion = np.empty(len(data))
58
59 for k in range(len(data)):
60     a= data[k][:len(data[k])-1]
61     b=float(a)
62     irradiacion[k]=b*1000
63
64
65 mi_fichero = open("pluie.txt", "r")
66 data= mi_fichero.readlines()
67 mi_fichero.close()
68
69 lluvia = np.empty(len(data))
70
71 for k in range(len(data)-1):
72     a= data[k][:len(data[k])-1]
73     b=float(a)
74     lluvia[k]=b*80
75
76 lluvia[-1]=0
77
78 mi_fichero = open("ensjournalier.txt", "r")
79 data= mi_fichero.readlines()
80 mi_fichero.close()
81
82 ensdiario = np.empty(len(data))
83 hora = np.empty(len(data))
84 hora[0]= 6.22
85
86
87 for k in range(len(data)):
88     a= data[k][:len(data[k])-1]
89     b=float(a)
90     ensdiario[k]=b
91     hora[k]= 6.5 + 0.25*k
92
93
94 mi_fichero = open("ensjournaliernov.txt", "r")
95 datanov= mi_fichero.readlines()
96 mi_fichero.close()
97
98 ensdiarionov = np.empty(len(datanov))
99 horanov = np.empty(len(datanov))
100
101
102 for k in range(len(datanov)):
103     a= datanov[k][:len(datanov[k])-1]
104     b=float(a)
105     ensdiarionov[k]=b
106     horanov[k]= 6.6 + 0.25*k
107
108
109 mi_fichero = open("ensjournalierjuly.txt", "r")
110 datajuly= mi_fichero.readlines()
111 mi_fichero.close()
112
113 ensdiariojuly = np.empty(len(datajuly))
114 horajuly = np.empty(len(datajuly))
115
116
117 for k in range(len(datajuly)):
118     a= datajuly[k][:len(datajuly[k])-1]
119     b=float(a)
120     ensdiariojuly[k]=b
121     horajuly[k]= 6 + 0.25*k
122
```

Figura 39: Extracción y lectura de datos

Fuente: Código Python

El siguiente bloque sirve para trazar el volumen de agua que se puede bombear a lo largo del año según la potencia de nuestro sistema. La función mostrada recibe una lista con los valores diarios de la irradiación solar. La potencia cresta corresponde al valor calculado en la primera parte de dimensionamiento del sistema). Este valor puede ser modificado para modelizar el fenómeno con una cierta potencia deseada para los paneles (15000 para paneles de 15 kWc, por ejemplo).

```
123 ### Trazado del volumen de agua bombeado a lo largo de un año
124
125 dias = 365
126 V= np.empty(len(irradiacion))
127
128 for k in range(len(irradiacion)):
129     V[k] = 3600/(Gce*g*pho*h)*potencia_cresta*(1-0.04*(Tc-Tcref))*irradiacion[k]*r*Kcorr
130
131
132 plt.plot(V)
133 plt.title("Volumen de agua bombeada a lo largo del año ")
134 plt.ylabel("Volumen de agua en metros cúbicos")
135 plt.grid()
136 plt.show()
---
```

Figura 40: Estimación del volumen de agua bombeado anualmente

Fuente: Código Python

En esta parte, se modeliza la evolución del caudal a lo largo de un mismo día. La función **calculdebit** recibe una lista de datos sobre la evolución de la irradiación solar en función de la hora así como el parámetro **debitforagemax** definido al principio. Cuando se ejecuta la función, se verifica (gracias al segundo bucle for) que el caudal calculado es inferior al máximo soportable por el sistema. En el caso de ser superior, se sustituye por el valor máximo. Para poder efectuar comparaciones, conservamos el valor de caudal teórico que nos permitirá más tarde estimar las pérdidas debidas a las limitaciones del pozo de perforación. Se dibujan los caudales para 3 meses del año, pero es posible ampliar el modelo a todos los meses. Para ello únicamente se necesitan los datos diarios para el mes deseado y ejecutar el programa.

La función **calculvtotal** tiene en cuenta las listas calculadas en el bloque anterior y el parámetro **pas** (periodo entre las observaciones, en este caso, son 15 minutos). Devuelve al utilizador los volúmenes de agua bombeados en función de la hora del día. También se cuantifican las pérdidas anteriormente mencionadas.

```

157 def calculocaudal(ensdiario,caudalmax):
158     caudal = np.empty(len(ensdiario))
159     caudal1 = np.empty(len(ensdiario))
160     for k in range(len(ensdiario)):
161         caudal1[k] = 3600/(Gce*g*pho*h)*potencia_cresta*(1-0.04*(Tc-Tcref))*ensdiario[k]*r*Kcorr
162         teorico = copy.deepcopy(caudal1)
163         caudal = copy.deepcopy(caudal1)
164         for k in range(len(ensdiario)):
165             if caudal[k]>caudalmax: #caudal máximo limitante
166                 caudal[k]= caudalmax
167         return [caudal, teorico]
168
169 caudal = calculocaudal(ensdiario, caudalmax)[0]
170 caudalnov = calculocaudal(ensdiarionov, caudalmax)[0]
171 caudaljuly = calculocaudal(ensdiariojuly, caudalmax)[0]
172
173 teorico = calculocaudal(ensdiario, caudalmax)[1]
174 caudalnovteo = calculocaudal(ensdiarionov, caudalmax)[1]
175 caudaljulyteo = calculocaudal(ensdiariojuly, caudalmax)[1]
176
177 plt.plot(hora,caudal, horanov, caudalnov, horajuly,caudaljuly)
178 plt.legend(('Marzo', 'Noviembre','Julio'), loc = 'upper right')
179 plt.title("Caudal de agua bombeado en función de la hora del día")
180 plt.ylabel("Caudal de agua [m3/h]")
181 plt.xlabel("Hora del día")
182 plt.grid()
183 %% Estimación de los volúmenes de agua bombeada
184
185 def calculovoltotal(caudal, teorico, paso):
186     Vtotal=np.empty(len(caudal))
187     Vtotal[0]=caudal[0]*paso
188     Vteo = np.empty(len(caudal))
189     Vteo[0] = teorico[0]*paso
190     for k in range(len(caudal)-1):
191         Vtotal[k+1] = Vtotal[k]+ caudal[k+1]*paso
192         Vteo[k+1] = Vteo[k]+ teorico[k+1]*paso
193     return [Vtotal, Vteo]
194
195 Vmarzo = calculovoltotal(caudal, teorico, 0.25)
196 Vnov = calculovoltotal(caudalnov, caudalnovteo, 0.25)
197 Vjuly = calculovoltotal(caudaljuly,caudaljulyteo, 0.25)
198
199 plt.subplot(211)
200 plt.plot(hora, Vmarzo[0], horanov, Vnov[0], horajuly, Vjuly[0], hora, Vmarzo[1], 'b--', horanov, Vnov[1], 'r--')
201 plt.legend(('Marzo', 'Noviembre', 'Julio', 'Marzo Teórico', 'Noviembre Teórico', 'Julio Teórico'))
202 plt.grid()
203 plt.ylabel("Volumen de agua en m3")
204 plt.xlabel("Hora del día")
205 plt.title("Volumen de agua bombeado a lo largo del día")
206 %%
207 perdidamarzo = np.empty(len(Vmarzo))
208 perdidanov = np.empty(len(Vnov))
209 perdidanov= -(Vnov[0]-Vnov[1])
210 perdidamarzo = -(Vmarzo[0]-Vmarzo[1])
211 plt.subplot(212)
212 plt.plot(hora, perdidamarzo, horanov, perdidanov)
213 plt.legend(('Pérdidas en Marzo', 'Pérdidas en Noviembre'))
214 plt.ylabel("Volumen total de las pérdidas")
215 plt.xlabel("Hora del día")
216 plt.grid()

```

Figura 41: Funciones **calculocaudal** y **calculovoltotal** y cálculo de pérdidas

Fuente: Código Python

Por último, se utiliza la función **calculopotenciacresta** para obtener, a partir de la energía necesitada por los compresores y de la luz solar, la potencia cresta que deben tener los paneles para el local de almacenamiento.

```

%% Dimensionamiento de los paneles para el local de almacenamiento``
def calculopotenciacresta(Enec, sol):
    P = Gce*Enec/((1-0.04*(Tc-Tcref))*sol*Kcorr*r)
    return P

potencia_almacenaje = calculopotenciacresta(Enec, sol)
print("Se deberán instalar paneles con una potencia cresta de", potencia_almacenaje, "Wc")

```

Figura 42: Función **calculopotenciacresta**

Fuente: Código Python

Anexo II: Fichas técnicas de los elementos escogidos

- Características del climatizador
- Ficha técnica del panel SW250
- Ficha técnica del panel GF270
- Ficha técnica del modelo de bomba SP30-9

- Engine power: 3 HP
- Cooling capacity: 24000 BTU / h
- Refrigerant: R22
- Anti corrosion
- Charcoal filter
- Temperature Harmony Function
- Biological antibacterial filter
- Automatic restart
- Dimensions (W x H x D): 104.5 x 31.5 x 23.5 cm

Figura 43: Características del climatizador NASCO



¡NUEVA! GARANTÍA DE
POTENCIA LINEAL DE 25 AÑOS
Y EXTENSIÓN DE LA GARANTÍA
DE PRODUCTO A 10 AÑOS*

Longitud	1675 mm
Ancho	1001 mm
Altura	31 mm
Marco	Aluminio
Peso	21,2 kg



Sunmodule⁺ SW 250 poly

Calidad alemana

La fabricación completamente automatizada, la supervisión integral de los procesos de producción y la aplicación de los niveles más exigente de calidad garantizan la excelencia del producto en todas sus ubicaciones.

TÜV "Power controlled"

La nueva certificación "Power controlled" de TÜV Rheinland garantiza el mantenimiento de las potencias indicadas en Sunmodule Plus y su supervisión regular por proveedores de servicios de control independientes de TÜV Rheinland. De ello resulta un nivel de seguridad adicional para inversores y consumidores y constituye así una nueva e importante pieza angular de la elevada garantía de calidad propia de SolarWorld.

Clasificación "Plus" de SolarWorld

La clasificación "Plus" es garantía de la mayor eficacia de las instalaciones. Sólo se suministran módulos que han alcanzado o superado la potencia nominal indicada en las pruebas de rendimiento.

Garantía de servicio lineal de 25 años y una garantía de producto ampliada de 10 años

SolarWorld garantiza durante 25 años una reducción de potencia máxima de 0,7% p.a. (un claro valor añadido frente a las garantías habituales de dos etapas). Junto a ello, SolarWorld AG ofrece también una garantía de producto ampliada de diez años.*

*conforme al certificado de servicio de SolarWorld válido en el momento de la compra
www.solarworld.com/service-certificate



Convertimos el sol en energía.

Sunmodule⁺

SW 250 poly

COMPORTAMIENTO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR DE PRUEBA (STC*)

		SW 250
Potencia en el punto de máx. potencia	P_{max}	250 Wp
Tensión en vacío	U_{oc}	37,6 V
Tensión a potencia máxima	U_{mpp}	30,8 V
Corriente de cortocircuito	I_{sc}	8,64 A
Corriente a potencia máxima	I_{mpp}	8,12 A

*STC: 1000W/m², 25°C, AM 1.5

COMPORTAMIENTO A 800 W/m², NOCT, AM 1.5

		SW 250
Potencia en el punto de máx. potencia	P_{max}	180,4 Wp
Tensión en vacío	U_{oc}	33,9 V
Tensión a potencia máxima	U_{mpp}	27,8 V
Corriente de cortocircuito	I_{sc}	6,96 A
Corriente a potencia máxima	I_{mpp}	6,50 A

Ligera reducción de la eficiencia en el comportamiento con carga parcial a 25°C: A 200 W/m² se alcanza el 95 % (+/- 3 %) de la eficiencia bajo condiciones estándar de prueba (1000 W/m²).

MATERIALES EMPLEADOS

Células por módulo	60
Tipo de célula	policristalino
Medidas de la célula	156 mm x 156 mm
Parte anterior	vidrio reforzado (EN 12150)

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS PARA LA INTEGRACIÓN ÓPTIMA EN EL SISTEMA

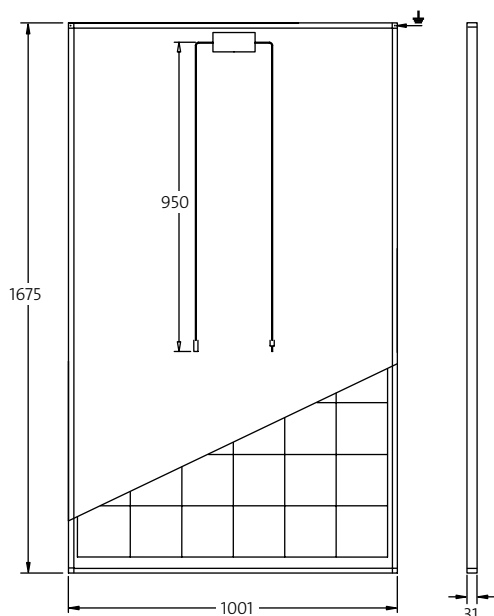
Tensión máxima del sistema clase II	1000 V
Carga máxima de corriente inversa	16 A
Resistencia a las cargas según IEC 61215	5,4 kN/m ²
Cantidad de diodos de bypass	3

PARÁMETROS TÉRMICOS CARACTERÍSTICOS

NOCT	46 °C
TC I_{sc}	0,034 %/K
TC U_{oc}	-0,34 %/K
TC P_{mpp}	-0,48 %/K

OTROS DATOS

Tolerancia de medida	+/- 3 %
Caja de conexión	IP65
Conector	MC4
Clasificación "Plus" de SolarWorld ¹⁾	$P_{Flash} \geq P_{max}$



- Qualified, IEC 61215
- Safety tested, IEC 61730
- Periodic Inspection
- Power Controlled



- 1) La potencia real del módulo (P_{Flash}) se encuentra siempre por encima de la potencia nominal (P_{max}) del módulo.
- 2) Según el mercado de comercialización. SolarWorld AG se reserva el derecho de cambiar las especificaciones. Esta hoja de datos satisface las exigencias de la norma EN 50380. Esta hoja de datos también está disponible en inglés.

GF 270

GF 270 solar modules are suitable for the RSI, SQFlex and CRFlex water supply system based on renewable energy sources.

GF 270 solar modules consist of 60 polycrystalline silicon solar cells in series with 3 bypass diodes. The solar cells are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and tempered glass.

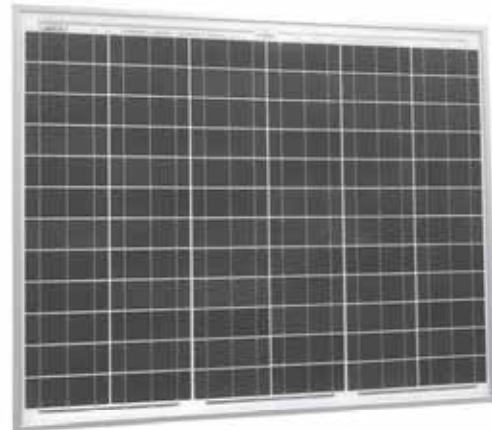
Each solar module is equipped with plugs and sockets for easy connection of several modules in parallel or series. The solar modules must be mounted on a support structure, tilted at an angle ensuring optimum utilisation of the solar energy.

Quality

- Manufactured in ISO 9001 and 14001-certified factories.
- Listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating).
- GF 270 is CE marked.
- Compliant with the requirements of IEC 61215 including:
 - thermal cycling between -40 °C and 85 °C (-40 °F and 185 °F) at 85 % relative humidity,
 - simulated impact of one inch hail at 84 km/h (52 mph) (terminal velocity),
 - a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85 °C (185 °F) and 85 % relative humidity,
 - a "hot spot" test determining a module's ability to tolerate localised shadowing (which can cause reverse-biased operation and localised heating),
 - static mechanical load, front and back, of 2400 Pa (0.35 psi / 50 psf) corresponding to a windspeed of 130 km/h (81 mph); front load (e.g. snow) of 5400 Pa (0.78 psi / 113 psf),
 - certified according to IEC 61730-1 and IEC 61730-2:2007-05.

Warranties

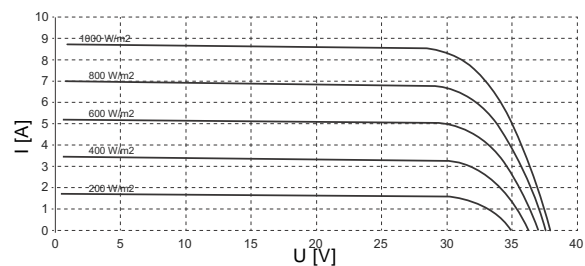
- Power output:
 - 25 years limited warranty of 80 % power output.
 - 12 years limited warranty of 90 % power output.
- Workmanship: 2 years.



TM06 8028 4616

Performance

The performance chart below shows the relationship between the current [A] and the voltage [V].

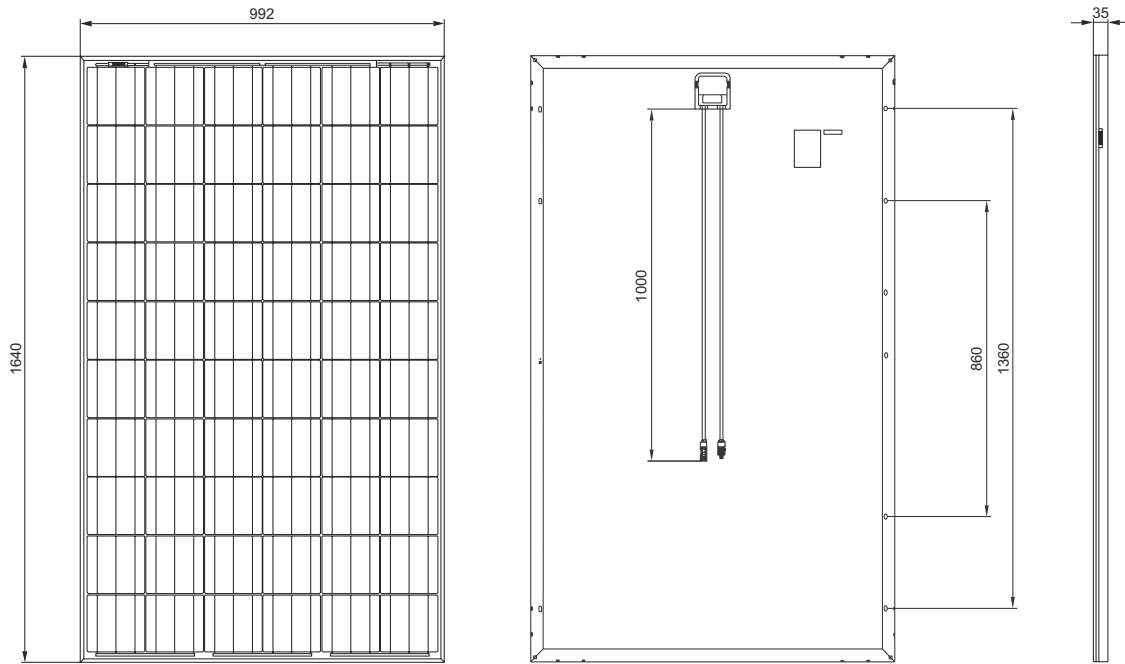


TM06 8028 4616

Characteristics

	GF 270
Peak power (P_{max})	270 W
Voltage (U_{mp})	31.6 V
Current (I_{mp})	8.76 A
Open circuit voltage (U_{oc})	38.4 V
Short circuit current (I_{sc})	9.11 A
Temperature coefficient (I_{sc})	0.05 %/K
Temperature coefficient (V_{oc})	-0.31 %/K
Number of solar cells	60 cells
Nominal operating temperature (NOCT)	46 °C
Connector	MC4
Net weight	18 kg
Dimensions	1640 x 992 x 35 mm

Construction and dimensions



TM07 1514 0418

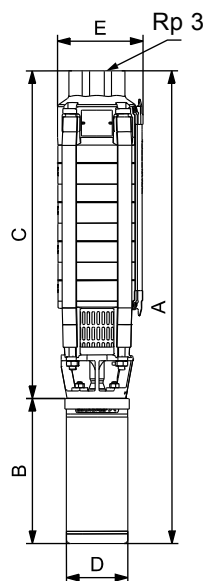
Dimensions [mm]

Product numbers		
Solar module GF 270		99299012
Array-to-controller wire kit	Cable length 10 m / 32.8 f	98257868
Array-to-array wire kit	Cable length 0.5 m / 1.64 f	98257892

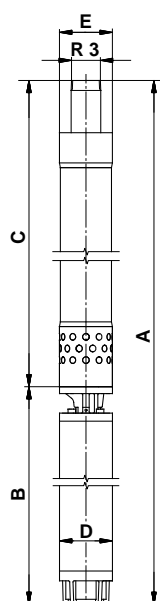
99445243 0518
ECM: 1231724

Subject to alterations.

Dimensions and weights



The pump types above are also available in N- and R-versions. See page 6. Other types of connection are possible by means of connecting pieces. See page 114.



³⁾ SP 30-39 to SP 30-54 are mounted in sleeve for R3 connection. Pumps mounted in sleeve are only available in standard and N-versions.


TM06 5398 0818

TM01 4197 4118

Pump type	Motor		Dimensions [mm]					Net weight [kg]	
	Type	Power [kW]	C	B	A	D	E ¹⁾		E ²⁾
Single-phase, 1 x 230 V									
SP 30-1	MS 402	1.1	358	346	704	95	134	16	
SP 30-1	MS 4000	2.2	358	577	935	95	134	27	
SP 30-2	MS 4000	2.2	454	577	1031	95	134	29	
Three-phase, 3 x 230 V / 3 x 400 V									
SP 30-1	MS 402	1.1	358	306	664	95	134	15	
SP 30-1	MS 4000	1.1	358	417	775	95	134	20	
SP 30-2	MS 402	2.2	454	346	800	95	134	19	
SP 30-2	MS 4000	2.2	454	457	911	95	134	24	
SP 30-3	MS 4000	3.0	550	497	1047	95	134	26	
SP 30-4	MS 4000	4.0	646	577	1223	95	134	32	
SP 30-5	MS 4000	5.5	742	677	1419	95	134	39	
SP 30-6	MS 4000	5.5	838	677	1515	95	134	41	
SP 30-7	MS 4000	7.5	934	777	1711	95	134	48	
SP 30-8	MS 4000	7.5	1030	777	1807	95	134	50	
SP 30-5	MS 6000	5.5	761	547	1308	139.5	142	144	47
SP 30-6	MS 6000	5.5	857	547	1404	139.5	142	144	49
SP 30-7	MS 6000	7.5	953	577	1530	139.5	142	144	55
SP 30-8	MS 6000	7.5	1049	577	1626	139.5	142	144	57
SP 30-9	MS 6000	9.2	1145	607	1752	139.5	142	144	64
SP 30-10	MS 6000	9.2	1241	607	1848	139.5	142	144	66
SP 30-11	MS 6000	9.2	1337	607	1944	139.5	142	144	68
SP 30-12	MS 6000	11	1433	637	2070	139.5	142	144	73
SP 30-13	MS 6000	11	1529	637	2166	139.5	142	144	75
SP 30-14	MS 6000	13	1625	667	2292	139.5	142	144	80
SP 30-15	MS 6000	13	1721	667	2388	139.5	142	144	82
SP 30-16	MS 6000	15	1817	702	2519	139.5	142	144	88
SP 30-17	MS 6000	15	1913	702	2615	139.5	142	144	90
SP 30-18	MS 6000	18.5	2009	757	2766	139.5	142	144	97
SP 30-19	MS 6000	18.5	2105	757	2862	139.5	142	144	99
SP 30-20	MS 6000	18.5	2201	757	2958	139.5	142	144	101
SP 30-21	MS 6000	18.5	2297	757	3054	139.5	142	144	103
SP 30-22	MS 6000	22	2393	817	3210	139.5	142	144	111
SP 30-23	MS 6000	22	2489	817	3306	139.5	142	144	113
SP 30-24	MS 6000	22	2585	817	3402	139.5	142	144	115
SP 30-25	MS 6000	22	2681	817	3498	139.5	142	144	117
SP 30-26	MS 6000	22	2777	817	3594	139.5	142	144	119
SP 30-27	MS 6000	26	2873	877	3750	139.5	142	144	126
SP 30-28	MS 6000	26	2969	877	3846	139.5	142	144	128
SP 30-29	MS 6000	26	3065	877	3942	139.5	142	144	130
SP 30-30	MS 6000	26	3161	877	4038	139.5	142	144	132
SP 30-31	MS 6000	26	3257	877	4134	139.5	142	144	134
SP 30-32	MS 6000	30	3353	947	4300	139.5	142	144	144
SP 30-33	MS 6000	30	3449	947	4396	139.5	142	144	146
SP 30-34	MS 6000	30	3545	947	4492	139.5	142	144	148
SP 30-35	MS 6000	30	3641	947	4588	139.5	142	144	150
SP 30-39 ³⁾	MMS 6	37	4377	1312	5689	144	175	181	248
SP 30-43 ³⁾	MMS 6	37	4761	1312	6073	144	175	181	259
SP 30-46 ³⁾	MMS 8000	45	4993	1270	6263	192	192	192	326
SP 30-49 ³⁾	MMS 8000	45	5281	1270	6551	192	192	192	334
SP 30-52 ³⁾	MMS 8000	55	5569	1350	6919	192	192	192	357
SP 30-54 ³⁾	MMS 8000	55	5761	1350	7111	192	192	192	362

¹⁾ Maximum diameter of pump with one motor cable.

²⁾ Maximum diameter of pump with two motor cables.

Contar	Descripción
1	<p>SP 30-9</p>  <p style="text-align: center;">Advierta! la foto puede diferir del actual producto</p> <p>Código: 13A10009</p> <p>Bomba de agotamiento sumergible, apta para el bombeo de agua limpia. Se puede instalar en vertical u horizontal. Todos los componentes de acero están fabricados en acero inoxidable (EN 1.4301; AISI 304) para garantizar la máxima resistencia a la corrosión. Esta bomba está homologada para el bombeo de agua caliente.</p> <p>Líquido: Líquido bombeado: Agua Temperatura máxima del líquido: 40 °C Temperatura del líquido durante el funcionamiento: 20 °C Densidad: 998.2 kg/m³</p> <p>Técnico: Velocidad de bomba en la que se basan los datos de bomba: 2900 rpm Caudal real calculado: 24.85 m³/h Altura resultante de la bomba: 79.04 m Tolerancia de curva: ISO9906:2012 3B</p> <p>Materiales: Bomba: Acero inoxidable EN 1.4301 AISI 304 Impulsor: Acero inoxidable EN 1.4301 AISI 304</p> <p>Instalación: Salida de bomba: RP3 Diámetro de motor: 6 inch</p> <p>Datos eléctricos: Potencia (P2) requerida por la bomba: 9.2 kW</p> <p>Otros: Índice eficiencia mínima, MEI : 0.50 Estado ErP: Prod. independiente (directiva EuP) Peso neto: 21.6 kg Peso bruto: 26 kg Volumen de transporte: 0.052 m³</p>

Anexo III: Diagramas y tablas termodinámicos del ciclo de refrigeración

- Tablas de propiedades del R-22
- Diagrama P-h del refrigerante R-22

Tabla 2.2: Propiedades R-22, líquido y vapor saturado

R-22, CHClF₂, Clorodifluorometano

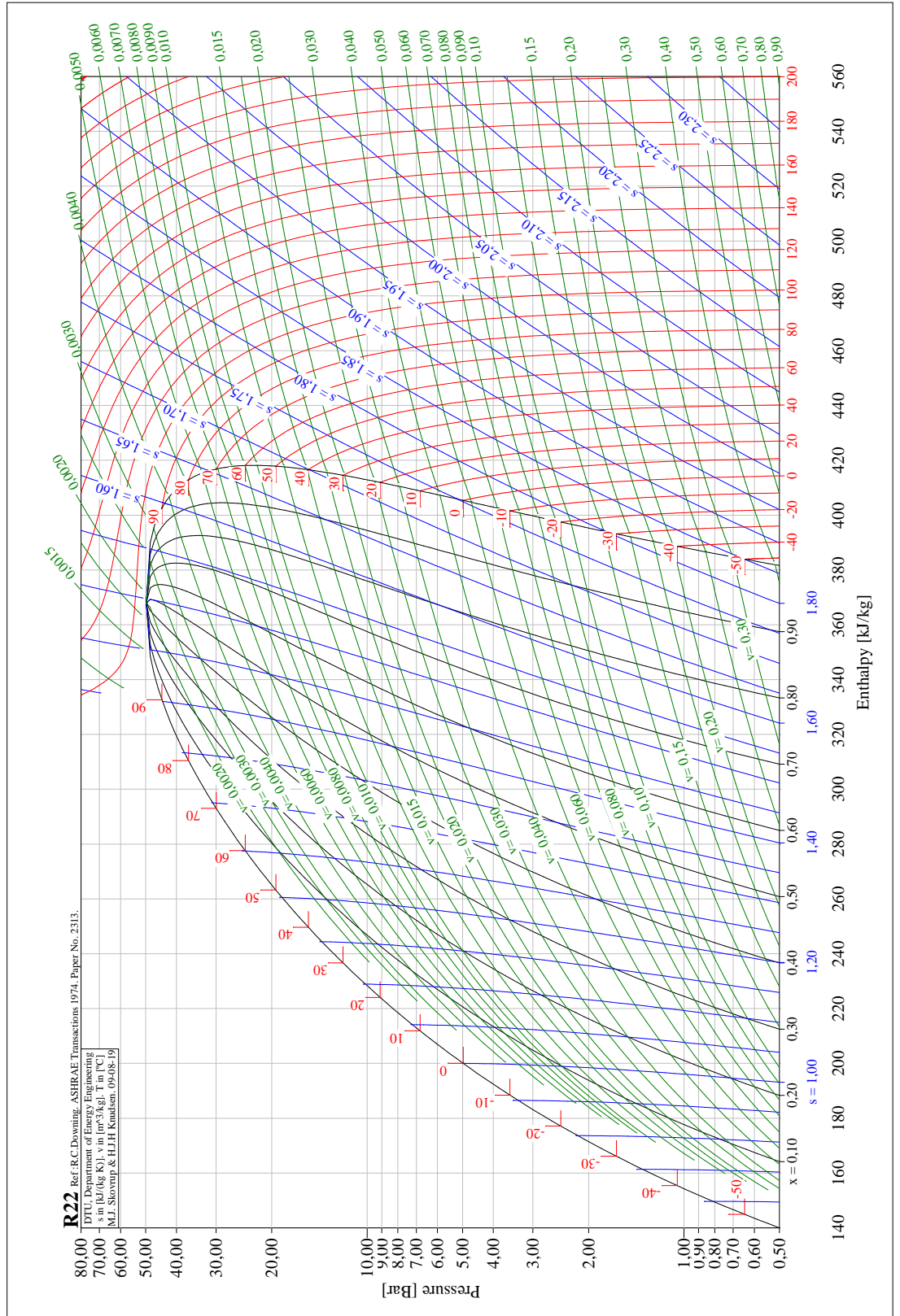
T (°C)	P (kPa)	ρ_l (kg/m ³)	v_g (m ³ /kg)	h_l (kJ/kg)	h_g (kJ/kg)	s_l (kJ/kg·K)	s_g (kJ/kg·K)
-50	64.5	1435.4	0.3236	143.6	383.2	0.773	1.847
-48	71.4	1429.7	0.2943	145.8	384.1	0.783	1.842
-46	78.9	1423.9	0.2682	147.9	385.1	0.793	1.837
-44	87.0	1418.2	0.2448	150.1	386.0	0.802	1.832
-42	95.8	1412.4	0.2239	152.3	387.0	0.812	1.827
-40	105.2	1406.5	0.2051	154.5	387.9	0.821	1.822
-38	115.4	1400.7	0.1882	156.7	388.9	0.831	1.818
-36	126.3	1394.8	0.1729	159.0	389.8	0.840	1.813
-34	138.0	1388.9	0.1592	161.2	390.7	0.849	1.809
-32	150.5	1382.9	0.1467	163.4	391.6	0.859	1.805
-30	163.9	1376.9	0.1354	165.6	392.5	0.868	1.801
-28	178.2	1370.9	0.1252	167.9	393.4	0.877	1.797
-26	193.5	1364.8	0.1159	170.1	394.3	0.886	1.793
-24	209.7	1358.7	0.1074	172.4	395.2	0.895	1.789
-22	227.0	1352.6	0.0997	174.6	396.1	0.904	1.786
-20	245.4	1346.4	0.0926	176.9	396.9	0.913	1.782
-18	264.8	1340.1	0.0862	179.2	397.8	0.922	1.779
-16	285.5	1333.8	0.0802	181.4	398.6	0.931	1.775
-14	307.4	1327.5	0.0748	183.7	399.5	0.939	1.772
-12	330.5	1321.1	0.0698	186.0	400.3	0.948	1.769
-10	354.9	1314.7	0.0652	188.3	401.1	0.957	1.765
-8	380.6	1308.2	0.0610	190.6	401.9	0.966	1.762
-6	407.8	1301.6	0.0571	193.0	402.7	0.974	1.759
-4	436.4	1295.0	0.0535	195.3	403.5	0.983	1.756
-2	466.5	1288.3	0.0502	197.6	404.2	0.991	1.753
0	498.1	1281.6	0.0471	200.0	405.0	1.000	1.750
2	531.4	1274.8	0.0442	202.4	405.7	1.009	1.748
4	566.2	1268.0	0.0416	204.7	406.4	1.017	1.745
6	602.8	1261.0	0.0391	207.1	407.2	1.025	1.742
8	641.1	1254.0	0.0368	209.5	407.8	1.034	1.739
10	681.2	1247.0	0.0347	211.9	408.5	1.042	1.737
12	723.1	1239.8	0.0327	214.3	409.2	1.051	1.734
14	766.9	1232.6	0.0308	216.8	409.8	1.059	1.731
16	812.7	1225.2	0.0291	219.2	410.5	1.067	1.729
18	860.5	1217.8	0.0275	221.7	411.1	1.076	1.726
20	910.3	1210.3	0.0260	224.2	411.7	1.084	1.724
22	962.3	1202.7	0.0246	226.6	412.2	1.092	1.721
24	1016.4	1195.0	0.0232	229.1	412.8	1.101	1.719
26	1072.7	1187.2	0.0220	231.7	413.3	1.109	1.716
28	1131.3	1179.3	0.0208	234.2	413.8	1.117	1.714
30	1192.3	1171.2	0.0197	236.8	414.3	1.126	1.711
32	1255.6	1163.1	0.0187	239.3	414.7	1.134	1.709
34	1321.4	1154.8	0.0177	241.9	415.2	1.142	1.706
36	1389.8	1146.3	0.0168	244.5	415.6	1.150	1.704
38	1460.6	1137.8	0.0159	247.2	415.9	1.159	1.701
40	1534.1	1129.0	0.0151	249.8	416.3	1.167	1.699
42	1610.3	1120.2	0.0143	252.5	416.6	1.175	1.696
44	1689.3	1111.1	0.0136	255.2	416.9	1.184	1.693
46	1771.1	1101.8	0.0129	257.9	417.1	1.192	1.691
48	1855.7	1092.4	0.0122	260.6	417.3	1.200	1.688
50	1943.3	1082.7	0.0116	263.4	417.5	1.209	1.685
52	2034.0	1072.9	0.0110	266.2	417.6	1.217	1.683
54	2127.7	1062.7	0.0105	269.1	417.7	1.225	1.680
56	2224.6	1052.3	0.0099	271.9	417.7	1.234	1.677
58	2324.7	1041.7	0.0094	274.8	417.7	1.242	1.674
60	2428.1	1030.7	0.0090	277.8	417.6	1.251	1.671
62	2534.9	1019.3	0.0085	280.8	417.5	1.260	1.667
64	2645.2	1007.6	0.0081	283.8	417.3	1.268	1.664
66	2759.0	995.5	0.0076	286.9	417.0	1.277	1.661
68	2876.4	982.9	0.0072	290.0	416.6	1.286	1.657
70	2997.7	969.8	0.0068	293.2	416.1	1.295	1.653

Fuente: Wagner W., Marx V. y Prob A., *A New Equation of State for Chlorodifluoromethane covering the entire fluid region from 116 K to 550 K at pressures up to 200 MPa*, Int. J. Refrig, 16:373, 1993.

Tabla 2.8: Entropía R-22, líquido y el vapor no saturado s (kJ/kg·K), R-22, CHClF₂, Clorodifluorometano

t _{sat} (°C)	P (kPa)	t (°C)																
		-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
70	2997.7	0.769	0.817	0.863	0.908	0.952	0.995	1.037	1.079	1.120	1.162	1.204	1.248	1.693	1.725	1.754		
65	2701.6	0.770	0.818	0.864	0.909	0.953	0.995	1.038	1.080	1.121	1.163	1.205	1.249	1.682	1.716	1.745	1.772	
60	2428.1	0.770	0.818	0.864	0.909	0.953	0.996	1.038	1.080	1.122	1.164	1.206	1.706	1.736	1.763	1.789		
55	2175.7	0.771	0.818	0.865	0.910	0.954	0.997	1.039	1.081	1.123	1.165	1.208	1.696	1.727	1.755	1.781	1.806	
50	1943.3	0.771	0.819	0.865	0.910	0.954	0.997	1.039	1.081	1.123	1.165	1.717	1.746	1.773	1.798	1.821		
45	1729.8	0.771	0.819	0.865	0.910	0.954	0.997	1.040	1.082	1.124	1.166	1.708	1.737	1.764	1.790	1.814	1.837	
40	1534.1	0.771	0.819	0.866	0.911	0.955	0.998	1.040	1.083	1.125	1.729	1.756	1.782	1.806	1.830	1.853		
35	1355.3	0.772	0.820	0.866	0.911	0.955	0.998	1.041	1.083	1.125	1.720	1.748	1.774	1.799	1.823	1.846	1.868	
30	1192.3	0.772	0.820	0.866	0.911	0.955	0.999	1.041	1.083	1.740	1.767	1.792	1.816	1.839	1.861	1.883		
25	1044.3	0.772	0.820	0.866	0.912	0.956	0.999	1.042	1.084	1.732	1.759	1.784	1.809	1.832	1.855	1.877	1.899	
20	910.3	0.772	0.820	0.867	0.912	0.956	0.999	1.042	1.751	1.777	1.802	1.826	1.849	1.871	1.893	1.914		
15	789.6	0.772	0.820	0.867	0.912	0.956	0.999	1.042	1.744	1.771	1.796	1.820	1.843	1.866	1.888	1.909	1.930	
10	681.2	0.773	0.820	0.867	0.912	0.956	1.000	1.764	1.789	1.814	1.837	1.860	1.882	1.904	1.925	1.946		
5	584.3	0.773	0.821	0.867	0.912	0.956	1.000	1.757	1.783	1.808	1.832	1.855	1.877	1.899	1.921	1.942	1.963	
0	498.1	0.773	0.821	0.867	0.912	0.957	1.777	1.802	1.826	1.850	1.873	1.895	1.917	1.938	1.959	1.979		
-5	421.9	0.773	0.821	0.867	0.913	0.957	1.771	1.797	1.821	1.845	1.868	1.891	1.913	1.934	1.955	1.976	1.997	
-10	354.9	0.773	0.821	0.867	0.913	1.787	1.792	1.817	1.841	1.864	1.887	1.909	1.931	1.952	1.973	1.994	2.014	
-15	296.3	0.773	0.821	0.868	0.913	1.808	1.812	1.837	1.861	1.884	1.906	1.928	1.950	1.971	1.992	2.012	2.033	
-20	245.4	0.773	0.821	0.868	1.808	1.808	1.833	1.857	1.881	1.903	1.926	1.948	1.969	1.990	2.011	2.031	2.052	
-25	201.5	0.773	0.821	0.868	1.804	1.830	1.854	1.878	1.901	1.924	1.946	1.968	1.989	2.010	2.031	2.051	2.071	
-30	163.9	0.773	0.821	1.824	1.827	1.852	1.876	1.900	1.922	1.945	1.967	1.989	2.010	2.031	2.051	2.072	2.092	
-35	132.0	0.773	0.821	1.848	1.850	1.875	1.898	1.922	1.944	1.967	1.989	2.010	2.031	2.052	2.073	2.093	2.113	
-40	105.2	0.773	1.847	1.848	1.874	1.898	1.922	1.945	1.967	1.989	2.011	2.033	2.054	2.075	2.095	2.115	2.135	
-45	82.9	0.773	1.873	1.873	1.898	1.922	1.946	1.968	1.991	2.013	2.035	2.056	2.077	2.098	2.118	2.139	2.159	
-50	64.5	1.873	1.873	1.899	1.923	1.947	1.970	1.993	2.016	2.038	2.059	2.081	2.102	2.122	2.143	2.163	2.183	

Fuente: Wagner W., Marx V. y Prob A., A New Equation of State for Chlorodifluoromethane covering the entire fluid region from 116 K to 550 K at pressures up to 200 MPa, Int. J. Refrig, 16:373, 1993.



Anexo IV: Ficha técnica de la paja



BLOQUES DE PAJA: AISLANTE ECOLÓGICO

PROPIEDADES

- Conductividad térmica:
 $\lambda = 0.065 \text{ W/mK}$
- Emisividad $\varepsilon = 0,9$
- Densidad: 80 - 120 kg/m³
- Capacidad térmica:
 $C = 1600 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Larga vida útil (60 años)	Sensible a la humedad
De base biológica	Sensible al fuego
Bajo precio (0,19 € por m ² /cm de espesor)	Menos eficaz que la lana de vidrio (para el mismo efecto, se debe doblar el espesor)
Buen aislamiento acústico	
Balance medioambiental positivo	

HUMEDAD

Material putrescible cuando está expuesto al agua. Siempre se debe controlar su grado de humedad durante su instalación: no debe superar el 20 %.

COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO

Clasificación: letra E. No propaga las llamas ni despeja gases tóxicos, pero siempre es necesario un revestimiento cortafuegos.

Bibliografía

[VANR18] Van Rossum, G., Python development team, "Python Tutorial Release 3.6.4", Febrero 2018.

[TAIN11] Taine J., Iacona Estelle, "A first course in heat transfer", DUNOD, pp. 6-25. 2011.

[TERM12] Çengel Y.A., Boles M. A., McGraw Hill, Séptima Edición, 2012.

[BOYM15] Boy-Marcotte J.L., Échanges avec Dogondoutchi, Dossier AFD (Agence Française de Développement), Octubre 2015.

[EDUS19] Ministère de l'éducation Nationale et de la Jeunesse, Portail national de ressources Éduscol, Sciences et Techniques Industrielles. <https://eduscol.education.fr/sti/>

[MINI11] Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación, Agencia Española de Cooperación Internacional, Programa PESA, Proyecto Food Facility Honduras, "Seguridad Alimentaria Nutricional, Conceptos Básicos" 3ª Edición, Febrero 2011.

[ORGA17] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), "El camino hacia el hambre cero 2030", Infografía, Agosto 2017.

[FAOS19] FAOSTAT. Datos sobre alimentación y agricultura. <http://www.fao.org/faostat/es/>

[NACI15] Naciones Unidas, "Memoria del Secretario General sobre la labor de la Organización", Informe ISSN 0252-0036 Nueva York, Septiembre 2015.

[ACCI14] Acciona, "Energía solar fotovoltaica", Noviembre 2014. <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/>

[NASA19] NASA, Power Data Access Viewer. Prediction of Worldwide Energy Ressources. 2019. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

[WORL19] World Bank Group, ESMAP, Solargis. "Global Solar Atlas". 2019. <https://globalsolaratlas.info/>

[PGSG14] PGS Group, "Solutions d'emballage", Catalogue, Noviembre 2014.

[AFRI19] Afrimarket. Climatiseurs et Ventilateurs. <https://afrimarket.fr/ml/>

[GRUN19.1] Grundfos. Grundfos Product Center. <https://www.grundfos.com/>

[GRUN19.2] Grundfos. Catálogo: Bombas sumergibles, motores y accesorios 50 Hz.

[SHAR19] Sharp. Sharp World Products. <http://www.sharp-world.com/products/>

[SOLA19.1] SolarWorld. <http://www.solarworld.co.za/>

[SOLA19.2] SolarWorld. Sunmodule : User Instructions.

[LORE19] Lorentz. Products and Technology. <https://www.lorentz.de/products-and-technology>

[JINK19] Jinko. Products, Solar Module. <https://www.jinkosolar.com/product.html>

[LELA19] LE LAB by Sines. <https://www.lelab-sines.fr/#sizing>

[MAHA96] Mahamadou I., Mahamane S., Attaou L., Magha M.I., "Niger : Rapport de pays pour la conférence technique internationale de la FAO sur les ressources phytogénétiques", Leipzig, 1996.

[NATU19] Naturgy, "Tecnologías eficientes", <https://www.empresaeiciente.com/>

[KITS19] Information on the inclination of solar panels. <https://www.kitsolaire-autoconsommation.fr/post/bien-exposer-son-kit-solaire.html>

[RABI08] Rabier F., Pekel S., "L'isolation des hangars de stockage", Artículo para el proyecto "Edificios de almacenaje de patatas en la región valona. 2008.

[MATA70] Mataix C., "Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas", Castillo, Madrid, 1970.

[ARAB05] Arab A.H., Benghanem M., Gharbi A., "Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque", Revista Énergies Renouvelables, vol. 8, 2005.

[CORO14] Coronel Toro J.F., "Tablas y Diagramas de Tecnología Frigorífica", Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. 2014.

[COMI19] Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques. Herramienta COSTIC. Diagrama del aire húmedo. Versión 2019.

[UBAK19] Ubakus, <https://www.ubakus.de/der-abakus-fuer-den-u-wert/>

