



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Sistema de captación y tratamiento de agua con autoconsumo energético en el municipio de Cedillo

Autor: Álvaro Rebollo Montesino-Espartero

Director: Carlos Fuertes Kronberg

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Sistema de captación y tratamiento de agua con autoconsumo energético en el municipio de Cedillo

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2023/2024 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, n/i total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Álvaro Rebollo Montesino-Espartero

Fecha: 27/ 08/ 2024

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Carlos Fuertes Kronberg

Fecha: 27/ 08/ 2024



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Sistema de captación y tratamiento de agua con autoconsumo energético en el municipio de Cedillo

Autor: Álvaro Rebollo Montesino-Espartero

Director: Carlos Fuertes Kronberg

Madrid

Sistema de captación y tratamiento de agua con autoconsumo energético en el municipio de Cedillo

Autor: Rebollo Montesino-Espartero, Álvaro

Director: Fuertes Kronberg, Carlos

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto se centra en el diseño y desarrollo de un sistema integral para la captación, tratamiento y distribución de agua en Cedillo (Cáceres) utilizando una instalación eléctrica de autoconsumo basada en energía fotovoltaica. Además de asegurar el suministro de agua potable, busca reducir la dependencia de la red eléctrica convencional mediante energías renovables.

Palabras clave: Captación de agua, tratamiento de agua, energía fotovoltaica, bombeo, LCOE, Cedillo, sostenibilidad, potabilización, desarenador, cloración, autoconsumo, energía renovable, PVSyst.

1. Introducción

Este proyecto tiene como objetivo diseñar y desarrollar un sistema integral para la captación, tratamiento y distribución de agua en el municipio de Cedillo, en la provincia de Cáceres, Extremadura. Este sistema es complementado con una instalación eléctrica de autoconsumo basada en energía fotovoltaica, aprovechando los recursos naturales de la zona para proporcionar una solución sostenible y eficiente.

El proyecto no solo busca asegurar el suministro de agua potable, sino también reducir la dependencia de la red eléctrica convencional, promoviendo el uso de energías renovables.

Las instalaciones clave incluyen una bocatoma de fondo para la captación de agua superficial del río Tajo, un sistema de bombeo que permite el transporte del agua a lo largo de las instalaciones, un desarenador para la eliminación de sólidos, un sistema de cloración para la potabilización del agua y un tanque de almacenamiento. La instalación fotovoltaica proporciona la energía necesaria para el funcionamiento continuo de estas instalaciones, especialmente las bombas, durante las horas de luz solar.

2. Definición del proyecto

El proyecto se divide en dos bloques: captación y tratamiento de agua, que incluye bocatoma, desarenador, bombeo, cloración y almacenamiento; y la instalación fotovoltaica, diseñada para suministrar energía durante el día y complementar la red eléctrica por la noche.

Sistema de captación y conducción del agua

Los sistemas de captación de aguas superficiales recogen agua de ríos, lagos y embalses, utilizando gravedad o bombeo según sea necesario. Incluyen elementos como rejillas para evitar sólidos y estructuras protectoras para garantizar su estabilidad. Es crucial ubicar las tomas de agua en lugares con flujo adecuado y bajo riesgo de contaminación, y realizar controles de calidad regulares. Las opciones de captación incluyen toma directa, sumergida, con filtro de malla y transversal al río, cada una adecuada para diferentes condiciones hidrológicas y orientadas a asegurar un suministro seguro de agua potable.¹

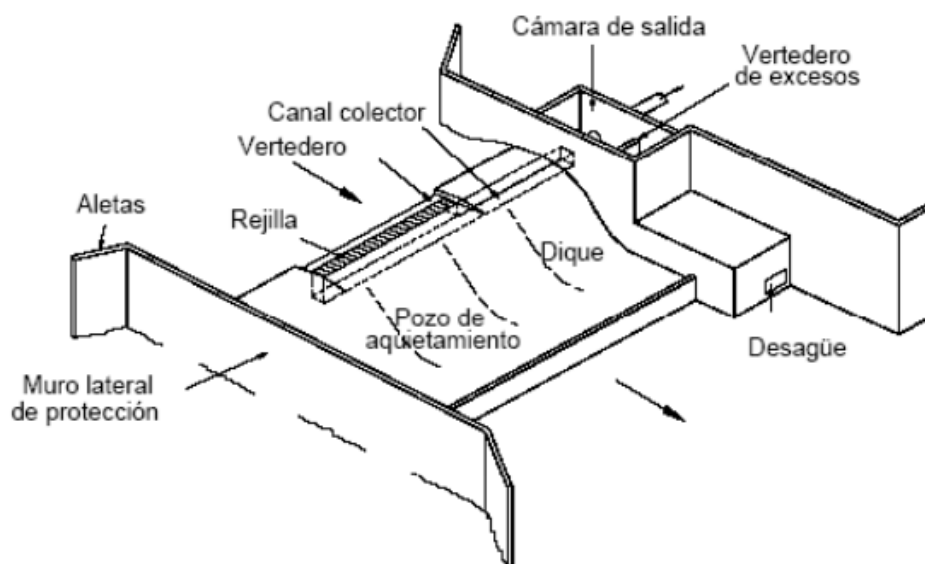


Imagen. Ejemplo de toma transversal al río. Fuente: Universidad Politécnica de Cartagena

Se ha seleccionado la bocatoma de fondo como sistema de captación debido a su capacidad para controlar el caudal de manera precisa, garantizando un suministro constante y flexible. Aunque tiene un coste elevado, el mantenimiento y monitoreo continuo pueden generar empleo en Cedillo, haciendo de esta opción la más adecuada.

El suministro de agua desde una fuente superficial requiere una cuidadosa planificación y la elección adecuada de bombas, considerando la distancia, elevación, caudal y calidad del agua.

¹ (Salazar, 2021)

Es crucial seleccionar bombas que aseguren un flujo continuo y eficiente, adaptándose a las condiciones del agua y las necesidades de la población. Las opciones evaluadas incluyen bombas centrífugas, helicoidales y de pistón, cada una adecuada para diferentes escenarios de bombeo.

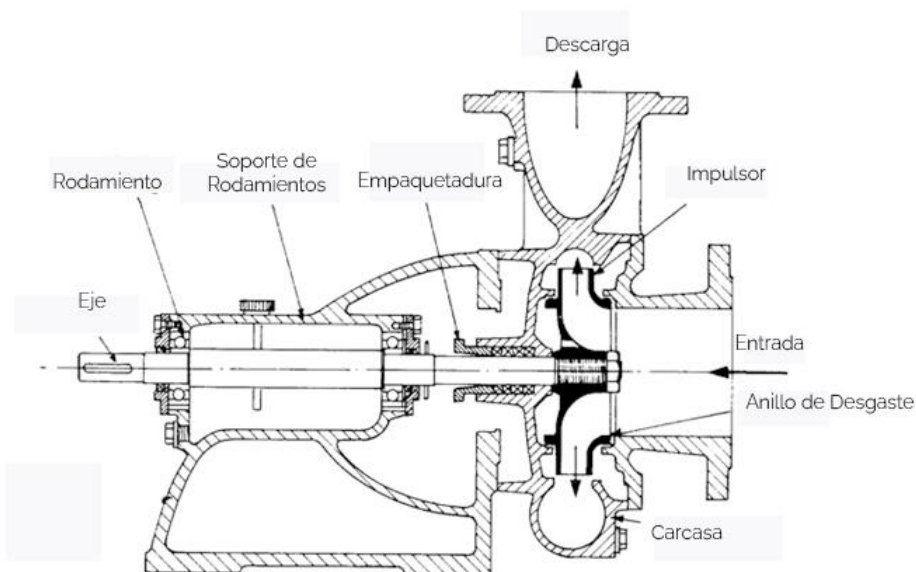


Imagen. Ejemplo de bomba centrífuga. Fuente: Boulton Pumps

Se ha elegido la bomba centrífuga por su simplicidad y uso frecuente en la industria para el transporte de agua. Al pasar el agua por la rejilla de la bocatoma y el desarenador, se eliminan los sólidos, permitiendo un bombeo eficiente. Para superar la elevación del agua, se han colocado dos bombas en serie.

Como método de filtrado, se ha optado por un desarenador en canal debido a la baja cantidad de sedimentos en el agua del Tajo, lo que permite un flujo continuo y rápido sin necesidad de una estructura grande.

Por último, se suministrará cloro líquido de forma continua en el tanque regulador desde un pequeño tanque cercano. El sistema de cloración está diseñado para que la disolución de cloro se renueve solo un par de veces al mes.²

Planta fotovoltaica

Un módulo fotovoltaico, o generador fotovoltaico, capta la radiación solar y la transforma en electricidad. Estos módulos pueden conectarse en serie, sumando los voltajes individuales mientras mantienen la corriente constante, o en paralelo, sumando las corrientes individuales mientras el voltaje se mantiene constante. La cantidad de módulos en serie define el voltaje

² (WHO , 2023)

total, y el número de módulos en paralelo determina la corriente disponible para la carga. Los módulos se agrupan en paneles solares, que pueden ser de tipo monocristalino, policristalino o amorfo, cada uno con diferentes características de eficiencia y durabilidad.³

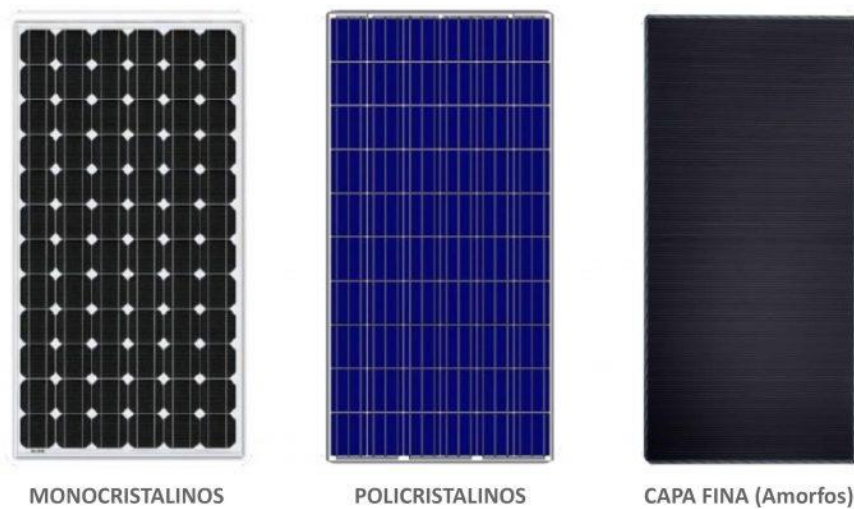


Imagen. Tipos de paneles solares según su tecnología. Fuente: (Tritec, 2017)

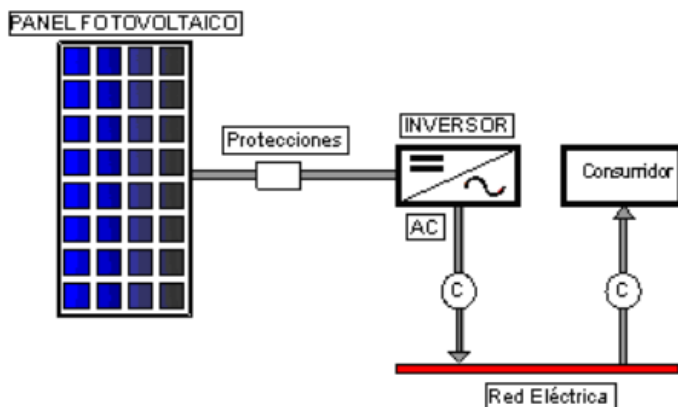


Imagen. Esquema de una instalación fotovoltaica conectada a red. Fuente: Google Imágenes

El esquema de la instalación muestra que se conectará directamente a las cargas de consumo y a la red, evitando el uso de baterías debido a su alto coste y baja eficiencia, dado que la demanda de potencia es baja. La energía solo se suministrará a las bombas durante las horas de sol. Además, se ha optado por paneles de silicio monocristalino por su alta eficiencia y durabilidad.

³ (Solarprofit, 2023)

3. Resultados

Los resultados más significativos son los que reflejan los parámetros de diseño: caudal de la población, potencia de las bombas, la producción de energía de la simulación en PVSyst y, por último, el LCOE (Coste Normalizado de la Energía).

Consumo	Item	Consumo (L/hab.d)
Doméstico	Aseo personal	45
	Descarga de sanitarios	40
	Lavado de ropa	20
	Cocina	15
	Riego de jardines	10
	Lavado de pisos	5
	Total consumo doméstico	135
Industrial y comercial	Lecherías	0,8
	Fábricas de bebidas	0,2
	Fábricas de hielo	1
	Curtiembres	0,5
	Edificios industriales	10
	Almacenes	3,5
	Total consumo ind. y com.	16
Público	Lavado de calles	8
	Mataderos	0,4
	Hospitales	0,6
	Riego de parques	9
	Lavado de alcantarillado	3
	Total público	21
Subtotal		172
Pérdidas y desperdicios	se adopta un 20%	35
Consumo total para el caudal de diseño		207

Tabla. Consumos típicos de los sectores doméstico, industrial, comercial, público y pérdidas. Fuente: Elaboración propia. Derivado de (Lóper Cualla, 1999)

Aplicando los resultados de la tabla a la siguiente expresión se obtiene el caudal de diseño para la instalación de captación de agua:

$$Q_{\text{máximo}} = 1,2 \cdot \frac{\text{Consumo} \left(\frac{L}{\text{hab}} \cdot d \right) \cdot \text{Población (hab)}}{86400} = 1,1244 \text{ L/s}$$

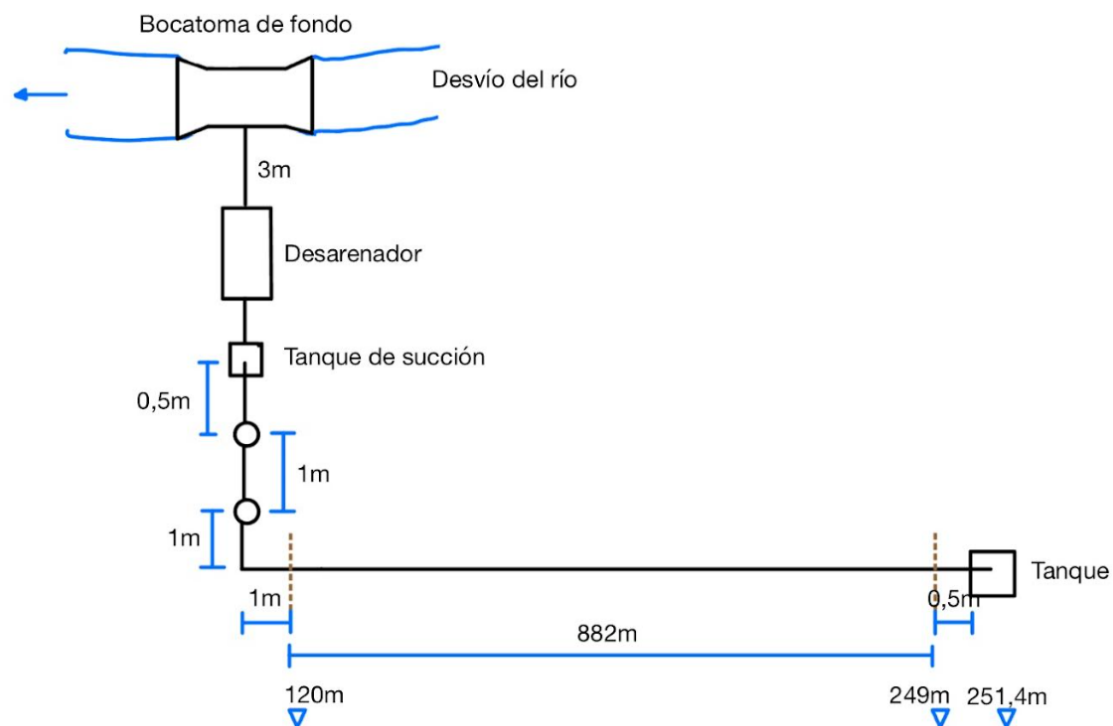


Imagen. Esquema no a escala de la captación e impulsión del agua. Fuente: Elaboración propia

La potencia total que deberá suministrar la instalación eléctrica a las bombas será la suma de ambas potencias aplicando la propiedad de las bombas ideales en serie $H_t = \sum_{i=1}^n h_i$ y un factor de seguridad del 20%:

$$P_T = 2 \cdot 1,2 \cdot \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_t}{e} = 6,4 \text{ kW}$$

Para la planta fotovoltaica se dispondrán un total de 24 módulos tal y como se indica en el siguiente esquema. Cubrirán un área total de 65 m².

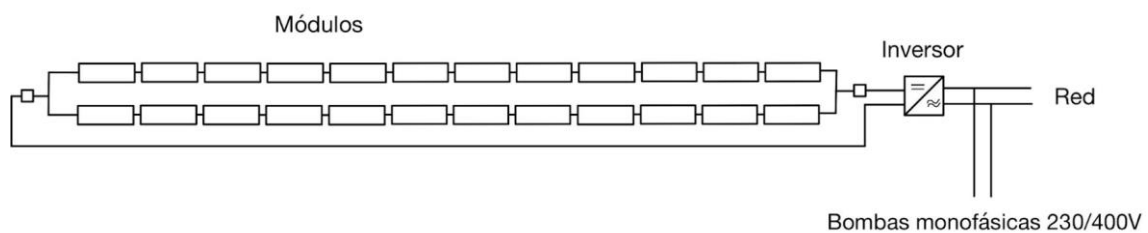


Imagen. Esquema de la instalación eléctrica. Fuente: Elaboración propia

Con la disposición representada y la selección de módulos e inversor especificados en el Capítulo 4, la simulación en PVSyst arroja el siguiente resultado de potencia anual.

	Energía volcada a la red (kWh)
Enero	647,4
Febrero	741,4
Marzo	867,9
Abril	831,3
Mayo	845,5
Junio	828,7
Julio	899,3
Agosto	938
Septiembre	859,9
Octubre	795,4
Noviembre	648,2
Diciembre	598,3
Total	9501,3

Tabla. Energía que la instalación eléctrica es capaz de volcar a la red en un año. Fuente: Elaboración propia, derivado de PVSyst

Se ha realizado una pequeña estimación del presupuesto para la determinar el coste de la inversión inicial de la planta fotovoltaica y así obtener el LCOE.

Concepto	Volumen
Paneles Fotovoltaicos	5.000,00 €
Inversor	2.000,00 €
Nº metros cable	45,00
Coste unitario cable (€/m)	20,00
Cableado y protecciones	2.900,00 €
Mano de obra y montaje	10.000,00 €
Estudios y permisos	2.000,00 €
Total Inversión Inicial	21.965,00 €

Tabla. Detalle del presupuesto de la planta fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia

Concepto	Volumen
Inversión Inicial	21.965,00 €
Coste de O&M Anual	439,30 €
Vida Útil (años)	20,00
Producción Anual (MWh)	9,50
Producción Total en 20 años (MWh)	190,00
LCOE (€ / MWh)	161,85

Tabla. Cálculo del LCOE de la planta fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia

El LCOE es una métrica comúnmente utilizada en el sector energético para analizar y comparar la rentabilidad y competitividad económica de diversas tecnologías de generación de energía, como las plantas solares, eólicas, de gas o nucleares.

$$LCOE = \frac{Inversión\ Inicial + \int (O\&M_{anual} \cdot Vida\ Útil)}{Producción\ Anual \cdot Vida\ Útil} = 161,85 \frac{€}{MWh}$$

4. Conclusiones

Este proyecto en Cedillo ha desarrollado un sistema integral para la captación, tratamiento y distribución de agua potable, complementado con energía fotovoltaica. El diseño incluye un sistema de captación con obra transversal al río, un desarenador en canal para el tratamiento del agua y un sistema de cloración continua. Además, se instalaron placas fotovoltaicas de silicio monocristalino, permitiendo que el sistema opere de manera autónoma durante el día.

En cuanto a la viabilidad económica, el análisis del LCOE muestra que la instalación eléctrica para autoconsumo de las bombas no es rentable en comparación al suministro de la red. Se sugiere ampliar la planta fotovoltaica para reducir el coste normalizado y mejorar la rentabilidad, aprovechando la economía de escala.

A pesar de las limitaciones, el impacto positivo para la población es claro, garantizando un suministro de agua sostenible y reduciendo la dependencia de energías no renovables, aunque es esencial gestionar el impacto ambiental y mantener las infraestructuras adecuadamente para asegurar la eficacia del sistema.

5. Bibliografía

- [1] Salazar, R. (2021). *Tipos de Captaciones Superficiales*. Universidad de Nariño. Obtenido de <https://1library.co/document/z3j0kdey-acueductos-ing-roberto-salazar-cano.html>
- [2] Solarprofit. (2023). Predicciones del sector fotovoltaico. Obtenido de <https://solarprofit.es/es/blog/predicciones-energia-solar-en-2024/>
- [3] WHO . (2023). Drinking-Water. *World Health Organization*.

Water capturing and treatment system with energy self-consumption in the municipality of Cedillo

Author: Rebollo Montesino-Espartero, Álvaro

Supervisor: Fuertes Kronberg, Carlos

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

PROJECT SUMMARY

This project focuses on the design and development of an integrated system for the capture, treatment, and distribution of water in Cedillo (Cáceres) using a photovoltaic-based self-consumption electrical installation. In addition to ensuring the supply of potable water, it aims to reduce dependence on the conventional electrical grid through renewable energy sources.

Keywords: Water capture, water treatment, photovoltaic energy, pumping, LCOE, Cedillo, sustainability, potabilization, desander, chlorination, self-consumption, renewable energy, PVSyst.

1. Introduction

The objective of this project is to design and develop an integrated system for the capture, treatment, and distribution of water in the municipality of Cedillo, located in the province of Cáceres, Extremadura. This system is complemented by a photovoltaic-based self-consumption electrical installation, leveraging the area's natural resources to provide a sustainable and efficient solution.

The project not only seeks to ensure a supply of potable water but also to reduce dependence on the conventional electrical grid by promoting the use of renewable energy.

The key installations include a bottom intake for capturing surface water from the Tajo River, a pumping system to transport water throughout the installations, a desander for solid removal, a chlorination system for water potabilization, and a storage tank. The photovoltaic installation provides the necessary energy for the continuous operation of these installations, especially the pumps, during daylight hours.

2. Project Definition

The project is divided into two main blocks: water capture and treatment, which includes the intake structure, desander, pumping, chlorination, and storage; and the photovoltaic installation, designed to supply energy during the day and complement the electrical grid at night.

Water Capture and Conveyance System

Surface water capture systems collect water from rivers, lakes, and reservoirs, using gravity or pumping as necessary. They include elements like screens to prevent solids and protective structures to ensure stability. It is crucial to locate water intakes in places with adequate flow and low risk of contamination, and to conduct regular quality checks. Capture options include direct intake, submerged intake, mesh filter intake, and transverse river intake, each suitable for different hydrological conditions and aimed at ensuring a safe supply of potable water.⁴

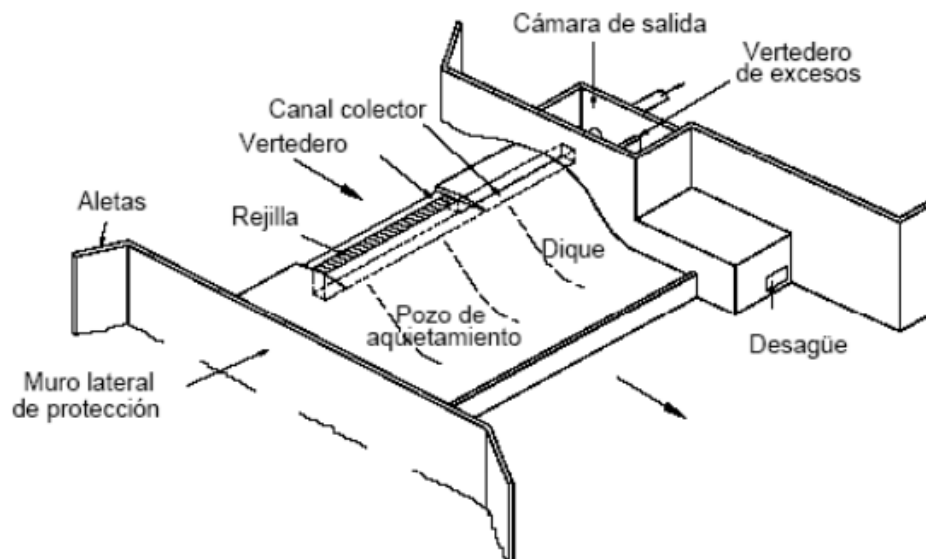


Image. Example of transverse river intake. Source: Universidad Politécnica de Cartagena

⁴ (Salazar, 2021)

The bottom intake has been selected as the capture system due to its ability to precisely control flow, ensuring a constant and flexible supply. Although it has a high cost, continuous maintenance and monitoring can create jobs in Cedillo, making this option the most suitable.

Supplying water from a surface source requires careful planning and the proper choice of pumps, considering distance, elevation, flow rate, and water quality. It is crucial to select pumps that ensure continuous and efficient flow, adapting to water conditions and population needs.

The evaluated options include centrifugal pumps, helical pumps, and piston pumps, each suitable for different pumping scenarios.

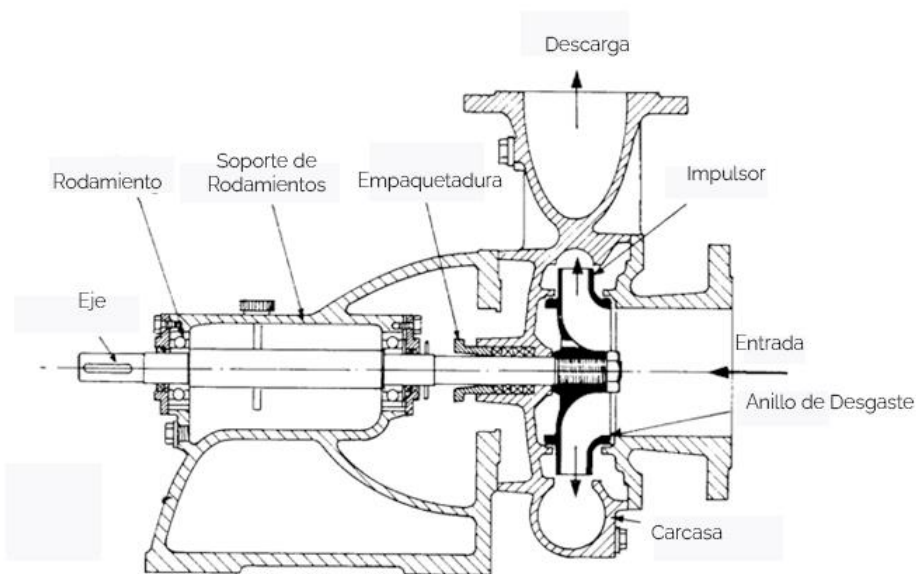


Imagen. Ejemplo de bomba centrífuga. Fuente: Boulton Pumps

The centrifugal pump was chosen for its simplicity and frequent use in the industry for water transport. After passing through the intake screen and desander, solids are removed, allowing for efficient pumping. To overcome the elevation of the water, two pumps have been placed in series.

As a filtration method, a canal desander was chosen due to the low sediment content in the Tajo River water, allowing for a continuous and rapid flow without the need for a large structure.

Finally, liquid chlorine will be continuously supplied to the regulating tank from a nearby small tank. The chlorination system is designed so that the chlorine solution needs to be renewed only a couple of times a month.⁵

⁵ (WHO , 2023)

Photovoltaic Plant

A photovoltaic module, or photovoltaic generator, captures solar radiation and converts it into electricity. These modules can be connected in series, adding the individual voltages while maintaining constant current, or in parallel, adding the individual currents while keeping the voltage constant. The number of modules in series defines the total voltage, and the number of modules in parallel determines the available current for the load. The modules are grouped into solar panels, which can be of monocrystalline, polycrystalline, or amorphous types, each with different efficiency and durability characteristics.⁶

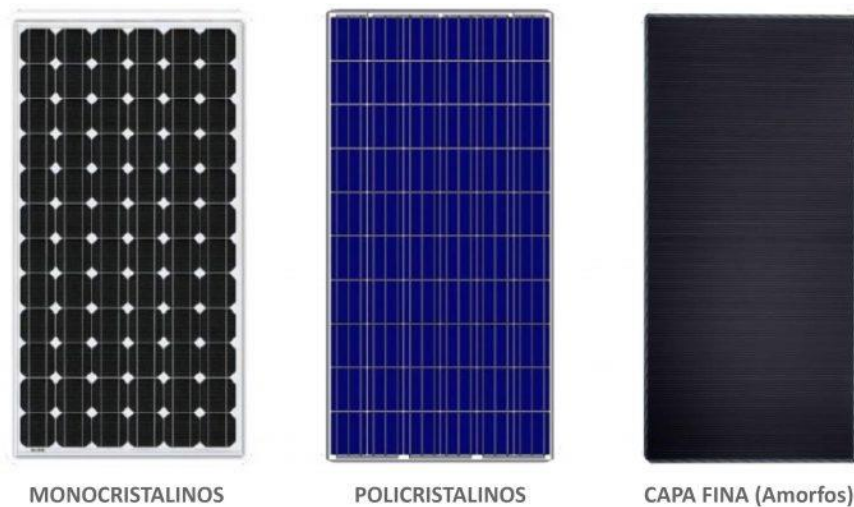


Image. Types of solar panels according to their technology. Source: (Tritec, 2017)

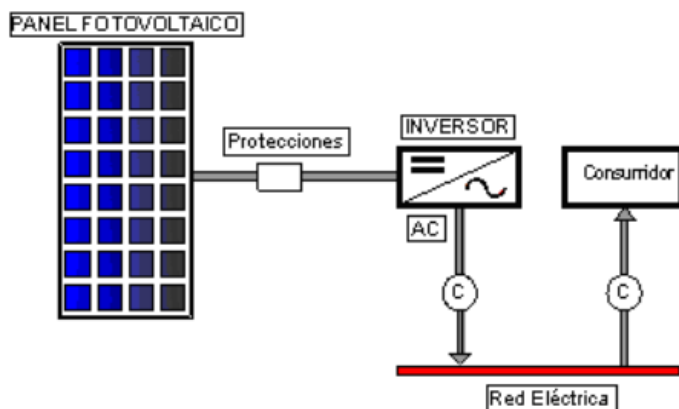


Image. Diagram of a photovoltaic installation connected to the grid. Source: Google Images

The installation diagram shows that it will be directly connected to the consumption loads and the grid, avoiding the use of batteries due to their high cost and low efficiency, given that the

⁶ (Solarprofit, 2023)

power demand is low. Energy will only be supplied to the pumps during daylight hours. Additionally, monocrystalline silicon panels were chosen for their high efficiency and durability.

3. Results

The most significant results are those reflecting the design parameters: population flow rate, pump power, energy production from the PVSyst simulation, and finally, the LCOE (Levelized Cost of Energy).

Consumo	Item	Consumo (L/hab.d)
Doméstico	Aseo personal	45
	Descarga de sanitarios	40
	Lavado de ropa	20
	Cocina	15
	Riego de jardines	10
	Lavado de pisos	5
Total consumo doméstico		135
Industrial y comercial	Lecherías	0,8
	Fábricas de bebidas	0,2
	Fábricas de hielo	1
	Curtiembres	0,5
	Edificios industriales	10
	Almacenes	3,5
Total consumo ind. y com.		16
Público	Lavado de calles	8
	Mataderos	0,4
	Hospitales	0,6
	Riego de parques	9
	Lavado de alcantarillado	3
Total público		21
Subtotal		172
Pérdidas y desperdicios	se adopta un 20%	35
Consumo total para el caudal de diseño		207

Table. Typical consumption by domestic, industrial, commercial, public sectors, and losses. Source: Own elaboration. Derived from (Lóper Cualla, 1999)

Applying the table's results to the following expression yields the design flow rate for the water capture installation:

$$Q_{max} = 1,2 \cdot \frac{\text{Consumption} \left(\frac{L}{hab} \cdot d \right) \cdot \text{Population (hab)}}{86400} = 1,1244 \text{ L/s}$$

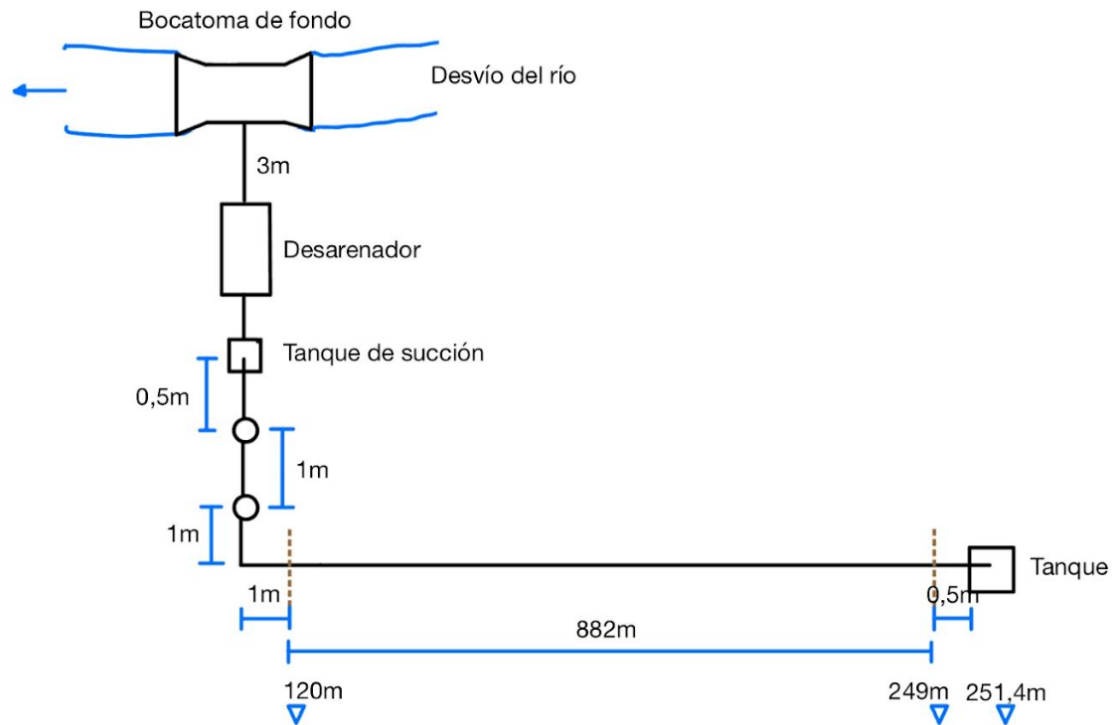


Image. Non-scale diagram of water capture and pumping. Source: Own elaboration

The total power that the electrical installation must supply to the pumps will be the sum of both powers applying the property of ideal pumps in series $H_t = \sum_{i=1}^n h_i$ and a 20% safety factor:

$$P_T = 2 \cdot 1,2 \cdot \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_t}{e} = 6,4 \text{ kW}$$

For the photovoltaic plant, a total of 24 modules will be arranged as indicated in the following diagram. They will cover a total area of 65 m².

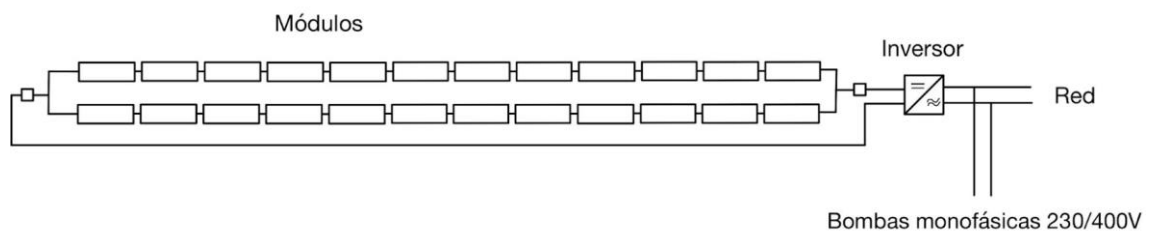


Image. Diagram of the electrical installation. Source: Own elaboration

With the represented layout and the selected modules and inverter specified in Chapter 4, the PVsyst simulation yields the following annual power result.

	Energía volcada a la red (kWh)
Enero	647,4
Febrero	741,4
Marzo	867,9
Abril	831,3
Mayo	845,5
Junio	828,7
Julio	899,3
Agosto	938
Septiembre	859,9
Octubre	795,4
Noviembre	648,2
Diciembre	598,3
Total	9501,3

Table. Energy that the electrical installation can feed into the grid in one year. Source: Own elaboration, derived from PVsyst

A small budget estimate was made to determine the initial investment cost of the photovoltaic plant and thus obtain the LCOE.

Concepto	Volumen
Paneles Fotovoltaicos	5.000,00 €
Inversor	2.000,00 €
Nº metros cable	45,00
Coste unitario cable (€/m)	20,00
Cableado y protecciones	2.900,00 €
Mano de obra y montaje	10.000,00 €
Estudios y permisos	2.000,00 €
Total Inversión Inicial	21.965,00 €

Table. Detailed budget of the photovoltaic plant. Source: Own elaboration

Concepto	Volumen
Inversión Inicial	21.965,00 €
Coste de O&M Anual	439,30 €
Vida Útil (años)	20,00
Producción Anual (MWh)	9,50
Producción Total en 20 años (MWh)	190,00
LCOE (€ / MWh)	161,85

Table. Calculation of the LCOE of the photovoltaic plant. Source: Own elaboration

The LCOE is a metric commonly used in the energy sector to analyze and compare the profitability and economic competitiveness of various energy generation technologies, such as solar, wind, gas, or nuclear plants.

$$LCOE = \frac{Initial\ Investment + \int (O\&M_{annual} \cdot Useful\ life)}{Annual\ Production \cdot Useful\ Life} = 161,85 \frac{\text{€}}{MWh}$$

4. Conclusions

This project in Cedillo has developed an integrated system for the capture, treatment, and distribution of drinking water, complemented by photovoltaic energy. The design includes a water capture system with a cross-river structure, a desander for water treatment, and a continuous chlorination system. Additionally, monocrystalline silicon photovoltaic panels were installed, allowing the system to operate autonomously during the day.

Regarding economic viability, the LCOE analysis shows that the electrical installation for the pumps' self-consumption is not profitable compared to grid supply. It is suggested to expand the photovoltaic plant to reduce the normalized cost and improve profitability by taking advantage of economies of scale.

Despite the limitations, the positive impact on the population is clear, ensuring a sustainable water supply and reducing dependency on non-renewable energy sources. However, it is essential to manage the environmental impact and adequately maintain the infrastructure to ensure the system's effectiveness.

5. References

- [1] Salazar, R. (2021). *Tipos de Captaciones Superficiales*. Universidad de Nariño. Obtenido de <https://1library.co/document/z3j0kdey-acueductos-ing-roberto-salazar-cano.html>
- [2] Solarprofit. (2023). Predicciones del sector fotovoltaico. Obtenido de <https://solarprofit.es/es/blog/predicciones-energia-solar-en-2024/>
- [3] WHO . (2023). Drinking-Water. *World Health Organization*.

ÍNDICE DE LA MEMORIA

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Motivación	2
1.2 Objetivos	2
Capítulo 2. Estado del Arte	2
2.1 Captación de aguas superficiales mediante bombeo	3
2.1.1 Obras de captación	3
a) Toma directa	4
b) Toma sumergida	5
c) Toma con filtro de malla	6
d) Toma con obras transversales al río	7
Conclusión	8
2.1.2 Sistemas de bombeo	9
a) Bombas centrífugas	10
b) Bombas helicoidales	11
c) Bombas de pistón	11
Conclusión	12
2.2 Tratamiento químico de potabilización	13
2.2.1 Filtración y desarenador	13
Conclusión	15
2.2.2 Cloración	15
Conclusión	16
2.3 Autoconsumo eléctrico por medio de placas fotovoltaicas	17
2.3.1 Energía fotovoltaica	17
2.3.2 Componentes de un sistema fotovoltaico	19
a) Paneles fotovoltaicos	19
b) Baterías	21
c) Regulador	22
d) Inversor	22
e) Protecciones eléctricas	22
Conclusión	22
Capítulo 3. Estudios previos al diseño de las instalaciones	23
3.1 Estudio demográfico	24
3.2 Estudio hidrológico	27
3.3 Estudio geológico y topográfico	31
3.4 Estudio del impacto medioambiental	34

3.4.1 Impacto en fase de construcción	35
3.4.2 Impacto en fase de explotación	37
3.4.3 Matriz de impactos.....	38
3.4.4 Conclusiones relativas al impacto medioambiental.....	42
3.4.5 Medidas preventivas y correctoras	44
3.5 Estudio climatológico previo a la instalación eléctrica.....	46
3.6 Normativa	50
Capítulo 4. Diseño de las instalaciones.....	52
4.1 Diseño de la instalación de captación de agua	52
4.1.1 Diseño de la bocatoma de fondo	54
4.1.2 Diseño de la conducción bocatoma-desarenador.....	66
4.1.3 Diseño del desarenador	69
4.1.4 Diseño del sistema de bombeo	76
4.1.5 Diseño del sistema de cloración.....	85
4.1.6 Diseño del tanque de almacenamiento	86
4.2 Diseño de la instalación eléctrica de autoconsumo	87
4.2.1 Selección de las placas fotovoltaicas.....	87
4.2.2 Selección del inversor.....	91
4.2.3 Diseño del cableado	92
4.2.4 Protecciones	96
4.2.5 Simulación en PVSyst.....	98
Conclusión	106
Capítulo 5. Viabilidad económica.....	106
Capítulo 6. Conclusiones	110
Capítulo 7. Objetivos de Desarrollo Sostenible	112
Bibliografía.....	113
Anexo I.....	115

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Tabla resumen de ventajas vs desventajas por tipo de tecnología de captación. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 2. Tabla resumen de ventajas vs desventajas por tipo de tecnología de bombeo. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 3. Clasificación del material en suspensión según su tamaño. Fuente: (Cualla, 2000).....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 4. Consumos típicos de los sectores doméstico, industrial, comercial, público y pérdidas. Fuente: Elaboración propia. Derivado de (Lóper Cualla, 1999).....</i>	<i>26</i>

Tabla 5. Caudal del río Tajo en Cedillo. Fuente: Elaboración propia, derivado de (Cedex, 2020-2021)	29
Tabla 6. Análisis de la composición química del agua. Nº 153 corresponde a Cedillo. Fuente: Red ICA, CHT.....	30
Tabla 7. Composición química del agua, valores permitidos. Fuente: Directiva (UE) 2020/218. 30	
Tabla 8. Caracterización de los impactos. Fuente: Elaboración propia, a partir de (ECO, 2020). 38	
Tabla 9. Valoración de los impactos en la fase de construcción. Fuente: Elaboración propia, a partir de (ECO, 2020)	40
Tabla 10. Valoración de los impactos en la fase de explotación. Fuente: Elaboración propia, a partir de (ECO, 2020)	41
Tabla 11. Matriz de importancia. Fuente: Elaboración propia, a partir de (ECO, 2020)	42
Tabla 12. Resultados de impacto de la actividad. Fuente: Elaboración propia, a partir de (ECO, 2020)	43
Tabla 13. Niveles de compatibilidad según la importancia. Fuente: Elaboración propia, a partir de (ECO, 2020).....	43
Tabla 14. Especificaciones técnicas de medida modelo B-NMD 25/190A de Calpeda Fuente: Catálogo Calpeda	81
Tabla 15. Especificaciones de potencia, caudal y altura del modelo B-NMD 25/190A de Calpeda Fuente: Catálogo Calpeda	82
Tabla 16. Especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico CS6P-270 de Canadian Solar. Fuente: Catálogo Canadian Solar	88
Tabla 17. Hoja de características del inversor Sunny Mini Central 7000HV. Fuente: Catálogo SMA	92
Tabla 18. Corriente admisible según el tipo de cableado. Fuente: Norma UNE-HD 60364-5-52 93	
Tabla 19. Corriente admisible según el tipo de cableado. Fuente: Norma UNE-HD 60364-5-52 95	
Tabla 20. Energía que la instalación eléctrica es capaz de volcar a la red en un año. Fuente: Elaboración propia, derivado de PVSyst.....	101
Tabla 21. Cálculo del ahorro total debido al suministro de la planta fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia, derivado de (OMIE, 2023).....	107
Tabla 22. Presupuesto general del proyecto. Fuente: Elaboración propia.	109
Tabla 23. Detalle del presupuesto de la planta fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia	109
Tabla 24. Cálculo del LCOE de la planta fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia	110

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Ejemplo de toma directa. Fuente: ResearchGate	5
Imagen 2. Ejemplo de toma sumergida. Fuente: Universidad Politécnica de Cartagena.....	6
Imagen 3. Ejemplo de toma con filtro de malla. Fuente: Universidad Politécnica de Cartagena . 7	
Imagen 4. Ejemplo de toma transversal al río. Fuente: Universidad Politécnica de Cartagena....	8
Imagen 5. Ejemplo de bomba centrífuga. Fuente: Boulton Pumps	10
Imagen 6. Ejemplo de bomba de helicoidal. Fuente: ResearchGate	11
Imagen 7. Ejemplo de bomba de pistón. Fuente: Hydبا.....	12
Imagen 8. Efecto fotovoltaico con elementos dopantes de Fósforo y Boro. Fuente: (Ecosistemas del sureste, 2015)	18
Imagen 9. Esquema de funcionamiento de una célula fotovoltaica. Fuente: (Bayona, 2012)	19
Imagen 10. Tipos de paneles solares según su tecnología. Fuente: (Tritec, 2017).....	21
Imagen 11. Esquema de una instalación fotovoltaica conectada a red.....	22

<i>Imagen 12. Localización del municipio de Cedillo en el mapa de la Península Ibérica. Fuente: Google Maps</i>	<i>24</i>
<i>Imagen 13. Red hidrográfica en el área de estudio. Fuente: ecoEnergías del Guadiana</i>	<i>28</i>
<i>Imagen 14. Masas de aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica del Tajo. Fuente: (CHT, 2011)</i>	<i>28</i>
<i>Imagen 15. Usos de suelo en el término municipal de Cedillo. Fuente: Corine Land Cover (2018)</i>	<i>31</i>
<i>Imagen 16. Esquema no a escala de cotas y medidas del recorrido de la tubería de conducción. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>33</i>
<i>Imagen 17. Factores ambientales afectados. Fuente: (ECO, 2020)</i>	<i>35</i>
<i>Imagen 18. Esquema no a escala de la captación e impulsión del agua. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>53</i>
<i>Imagen 19. Bocatoma de fondo (planta). Fuente: (Cualla, 2000)</i>	<i>55</i>
<i>Imagen 20. Bocatoma de fondo (corte longitudinal). Fuente: (Cualla, 2000)</i>	<i>56</i>
<i>Imagen 21. Bocatoma de fondo (corte transversal). Fuente: (Cualla, 2000).....</i>	<i>56</i>
<i>Imagen 22. Ilustración de una bocatoma de fondo. Fuente: Google imágenes.....</i>	<i>57</i>
<i>Imagen 23. Captación a través de la rejilla al canal de aducción. Fuente: (Cualla, 2000)</i>	<i>59</i>
<i>Imagen 24. Rejilla de captación. Fuente: (Cualla, 2000)</i>	<i>60</i>
<i>Imagen 25. Perfil del canal de aducción. Fuente: (Cualla, 2000).....</i>	<i>61</i>
<i>Imagen 26. Cortes transversales en el canal de aducción. Fuente: (Cualla, 2000).....</i>	<i>62</i>
<i>Imagen 27. Corte de la cámara de recolección. Fuente: (Cualla, 2000).....</i>	<i>63</i>
<i>Imagen 28. Detalle de las cotas principales en la bocatoma. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>66</i>
<i>Imagen 29. Planta del desarenador. Fuente: (Cualla, 2000)</i>	<i>69</i>
<i>Imagen 30. Alzado del desarenador. Fuente: (Cualla, 2000).....</i>	<i>69</i>
<i>Imagen 31. Detalle de las cotas principales en el desarenador. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>76</i>
<i>Imagen 32. Detalle de la tubería de succión. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>77</i>
<i>Imagen 33. Especificaciones del modelo B-NMD 25/190A de Calpeda. Fuente: Catálogo Calpeda</i>	<i>81</i>
<i>Imagen 34. Detalle de las medidas y las curvas I-V del módulo CS6P-270 de Canadian Solar. Fuente: Catálogo Canadian Solar</i>	<i>88</i>
<i>Imagen 35. Esquema de la instalación eléctrica. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>89</i>
<i>Imagen 36. Esquema detalle de la separación entre placas, visión de perfil. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>90</i>
<i>Imagen 37. Esquema detalla de la separación entre placas, visión perpendicular a la placa. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>90</i>
<i>Imagen 38. Cableado en bandeja perforada. Fuente: Norma UNE-HD 60364-5-52</i>	<i>93</i>
<i>Imagen 39. Cableado en bandeja perforada. Fuente: Norma UNE-HD 60364-5-52</i>	<i>94</i>
<i>Imagen 40. Diseño del cableado en corriente alterna. Fuente: Norma UNE-HD 60364-5-52.</i>	<i>96</i>
<i>Imagen 41. Datos climatológicos en el municipio de Cedillo proporcionados por MeteoNorm. Fuente: PVSyst</i>	<i>99</i>
<i>Imagen 42. Parámetros de diseño en la disposición de los módulos fotovoltaicos. Fuente: PVSyst</i>	<i>99</i>
<i>Imagen 43. Parámetros del sistema eléctrico. Fuente: PVSyst.....</i>	<i>100</i>
<i>Imagen 44. Parámetros de cableado en la instalación eléctrica. Fuente: PVSyst</i>	<i>101</i>

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Evolución demográfica Cedillo, Extremadura. Fuente: Elaboración propia. Derivado de Foro Ciudad..... 25

Gráfico 3. Entrada estacional de agua en el embalse de Cedillo. Fuente: (Embalses.net, 2024) 29

Gráfico 4. Gráfico multivariable del clima en Cedillo. Fuente: Weatherspark..... 47

Gráfico 5. Temperaturas máximas y mínimas promedio en Cedillo. Fuente: Weatherspark 47

Gráfico 6. Categorías de nubosidad en Cedillo. Fuente: Weatherspark 48

Gráfico 7. Promedio mensual de lluvia en Cedillo. Fuente: Weatherspark 48

Gráfico 8. Horas de luz natural y crepúsculo en Cedillo. Fuente: Weatherspark..... 49

Gráfico 9. Velocidad promedio del viento en Cedillo. Fuente: Weatherspark 49

Gráfico 10. Niveles de humedad en Cedillo. Fuente: Weatherspark..... 50

Gráfico 11. Curva característica según altura de impulsión del modelo B-NMD 25/190. Fuente: Catálogo Calpeda 82

Capítulo 1. Introducción

Este proyecto tiene como objetivo diseñar y desarrollar un sistema integral para la captación, tratamiento y distribución de agua, complementado con una instalación eléctrica de autoconsumo basada en energía fotovoltaica. Se abordarán de manera detallada todas las etapas necesarias para asegurar la eficiencia y sostenibilidad del sistema, comenzando con estudios previos que analizarán aspectos demográficos, hidrológicos, geológicos, medioambientales y climatológicos.

El diseño de las instalaciones se desarrollará en dos grandes bloques: la captación y tratamiento de agua y la instalación eléctrica fotovoltaica. En la primera parte, se profundizará en el diseño de componentes críticos como la bocatoma, el desarenador, los sistemas de bombeo y cloración, y el tanque de almacenamiento. La segunda parte se centrará en la selección y diseño de los componentes del sistema fotovoltaico, asegurando que este pueda suministrar la energía necesaria durante las horas de sol, complementando así el suministro de la red eléctrica durante la noche.

Para culminar el proyecto, se incluirá un apartado dedicado a la viabilidad económica, donde se analizará el ahorro que supone el uso de la planta fotovoltaica para cubrir las necesidades energéticas diurnas. Este análisis permitirá evaluar el impacto económico y la rentabilidad del proyecto, demostrando cómo la integración de energía renovable no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también optimiza los costes operativos a largo plazo.

El proyecto se llevará a cabo en el municipio de Cedillo, ubicado en la provincia de Cáceres, en Extremadura, una región conocida por su riqueza natural y biodiversidad. Cedillo se encuentra en una zona estratégicamente situada junto al río Tajo, lo que la convierte en un lugar idóneo para la captación de aguas superficiales. La orografía del terreno, caracterizada por colinas suaves y valles, ofrece condiciones favorables tanto para la construcción de infraestructuras hidráulicas como para la instalación de sistemas fotovoltaicos.

La elección de Cedillo para este proyecto no solo responde a sus condiciones naturales favorables, sino también a la necesidad de impulsar el desarrollo sostenible en la región, aprovechando los recursos locales de manera eficiente. Además, se prevé que la instalación tenga un impacto positivo en la comunidad local, mejorando el acceso a recursos hídricos tratados y reduciendo la dependencia energética de fuentes no renovables.

1.1 Motivación

A la vista del Estado del Arte se define la motivación principal de este proyecto cómo el reto de enfrentarse a un proyecto real de ingeniería en un lugar geográfico concreto. Detrás de esta motivación está el interés por aprender con más detalle en qué consisten las fases de planificación, documentación y diseño de un proyecto que mezcla conocimientos hidráulicos y eléctricos.

1.2 Objetivos

El proyecto tiene dos objetivos principales. El primero consiste en diseñar una instalación de toma y tratamiento de agua para que sea apto para el consumo humano. El segundo objetivo trata de conseguir que la alimentación eléctrica para el funcionamiento de la instalación hidráulica provenga de energía renovable por medio de placas fotovoltaicas.

Para llevar a cabo ambos diseños se realizarán una investigación previa acerca de las tecnologías que se emplean en la industria tanto para la instalación hidráulica como la eléctrica. Del mismo modo se llevarán a cabo estudios para concretar los parámetros de diseño acordes al terreno, el clima y la demanda de agua de la población en Cedillo.

Capítulo 2. Estado del Arte

A continuación, se presenta una visión general de los aspectos clave de este proyecto, relacionados con la captación de aguas superficiales mediante bombeo, el tratamiento químico para la potabilización, y el autoconsumo eléctrico a través de placas fotovoltaicas. Este apartado está dividido en tres grandes secciones que abordan los métodos y tecnologías esenciales para el manejo y tratamiento de recursos hídricos, así como la integración de energías renovables en el proceso.

En primera sección se examinan las distintas técnicas y obras necesarias para la captación de aguas superficiales. Esto incluye desde las obras de captación, como tomas directas y sumergidas, hasta sistemas específicos que utilizan filtros y estructuras transversales. También se abordarán los diferentes tipos de sistemas de bombeo que son fundamentales para el traslado eficiente del agua desde la fuente hasta su punto de tratamiento o uso.

El siguiente tema cubre los procesos químicos involucrados en la potabilización del agua captada. Se discutirán métodos de filtración y desarenado, así como la importancia de la cloración para eliminar patógenos y garantizar la seguridad del agua para el consumo humano.

Finalmente, se explora la integración de sistemas fotovoltaicos para el autoconsumo eléctrico, una solución sostenible y económica para la operación de instalaciones de bombeo y tratamiento de agua. En esta sección, se detallará el funcionamiento de la energía fotovoltaica y los componentes esenciales que conforman un sistema de este tipo.

2.1 Captación de aguas superficiales mediante bombeo

2.1.1 Obras de captación

Los sistemas de captación de aguas superficiales para consumo humano se basan en la recolección de agua de fuentes como ríos, lagos y embalses. Estos sistemas pueden funcionar por gravedad, cuando la fuente se encuentra a mayor altitud que el punto de uso, o mediante bombeo si se requiere elevar el agua. Las estructuras de captación deben estar diseñadas para evitar obstrucciones y asegurar estabilidad, incluso en condiciones de inundación.

Los principales elementos de un sistema de captación incluyen rejillas para evitar la entrada de sólidos, bombas para manejar fluctuaciones en el nivel del agua, y estructuras protectoras construidas con hormigón, piedras o ladrillos. La ubicación de la toma de agua es crucial, debiendo ser en puntos con flujo adecuado y mínimas posibilidades de contaminación. Las aguas superficiales requieren tratamiento antes de ser aptas para el consumo humano debido a su alta vulnerabilidad a la contaminación.

Es fundamental realizar controles periódicos de calidad, especialmente bacteriológicos, y garantizar el tratamiento de aguas residuales antes de su vertido en estos cuerpos de agua. Además, es necesario implementar medidas preventivas contra la proliferación de mosquitos en las zonas de captación.⁷

Para este estudio se van a considerar los siguientes sistemas de captación de aguas superficiales: toma directa, toma sumergida, toma con filtro de malla y toma transversal al río, debido a sus características de simplicidad, adaptabilidad y protección. La toma directa es económica y adecuada para cuerpos de agua con niveles estables, permitiendo una captación eficiente y

⁷ (Stauffer, s.f.)

sencilla.⁸ La toma sumergida es ideal para ríos con caudales variables, garantizando la continuidad del suministro mediante tuberías protegidas bajo el nivel del agua. La toma con filtro de malla proporciona una protección eficaz contra contaminantes y sólidos suspendidos, asegurando una captación continua y de alta calidad.⁹ Por último, las obras de captación transversales al río minimizan la entrada de materiales flotantes. Estas opciones se ajustan bien a diferentes condiciones hidrológicas, ofreciendo soluciones robustas para el suministro seguro de agua potable a comunidades rurales y pequeñas.

a) Toma directa

Una toma directa de aguas superficiales es un sistema sencillo y económico diseñado para captar agua directamente desde la superficie de un cuerpo de agua como un río, lago o embalse. Esta captación se realiza a través de una estructura de entrada que puede incluir rejillas o filtros para evitar la entrada de desechos grandes. El agua es luego transportada hacia una planta de tratamiento o directamente al punto de uso a través de tuberías o canales.

Entre las principales ventajas de este sistema se encuentran su simplicidad de diseño, bajo coste inicial, fácil mantenimiento y rápida instalación, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en áreas rurales o situaciones de emergencia. Sin embargo, también presenta desventajas como su vulnerabilidad a la contaminación, la variabilidad en la calidad del agua, la dependencia del caudal superficial y el potencial impacto ambiental en los ecosistemas acuáticos. Estos factores hacen que sea esencial un monitoreo constante y, en muchos casos, tratamientos adicionales para asegurar la potabilidad del agua captada.

⁸ (Ministerio de Educación y Formación Profesional)

⁹ (Salazar, 2021)

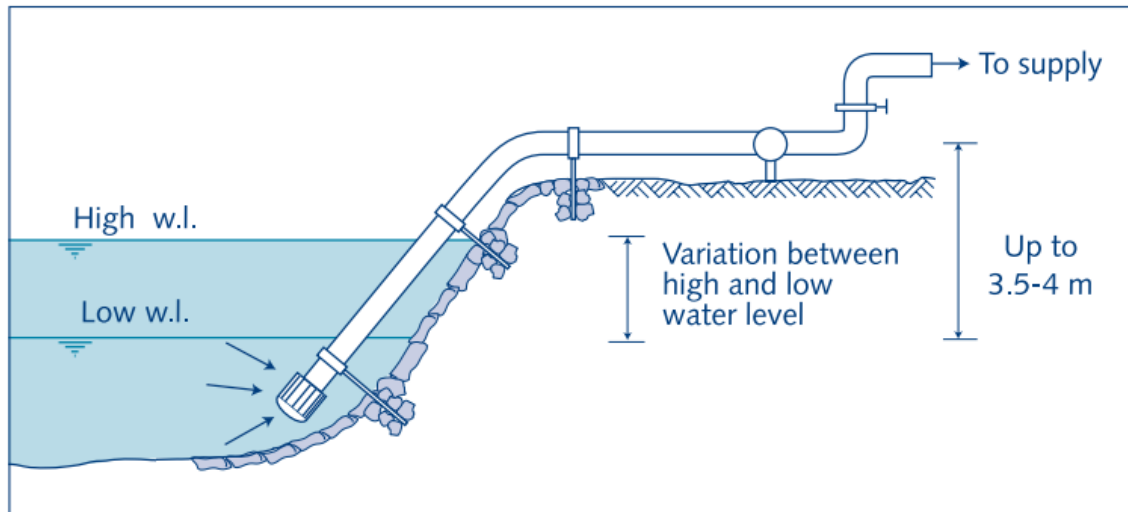


Imagen 1. Ejemplo de toma directa. Fuente: ResearchGate

b) Toma sumergida

Este tipo de toma se coloca completamente bajo el agua, generalmente a cierta profundidad, para evitar la captación de contaminantes flotantes como aceites y residuos. La estructura de captación suele estar equipada con rejillas o filtros para bloquear el paso de partículas grandes y sedimentos. El agua captada es luego conducida a través de tuberías sumergidas hacia una planta de tratamiento o directamente al punto de uso.

Entre las principales ventajas de una toma sumergida se encuentran su capacidad para proteger contra contaminantes superficiales y su estabilidad operativa, ya que es menos afectada por fluctuaciones en el nivel del agua. Además, este tipo de toma tiene un menor impacto visual y ambiental al estar completamente bajo el agua. Sin embargo, también presenta desventajas, como un mayor coste y complejidad de instalación, dificultades en el acceso para mantenimiento, y la posibilidad de acumulación de sedimentos en el fondo, lo que puede requerir limpiezas periódicas.

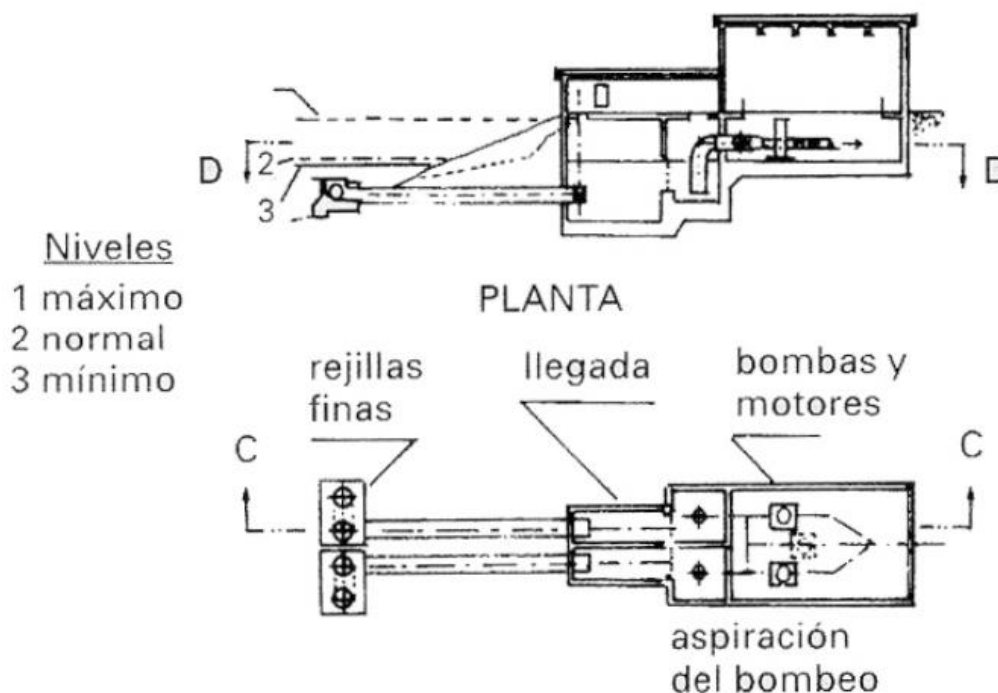


Imagen 2. Ejemplo de toma sumergida. Fuente: Universidad Politécnica de Cartagena

c) Toma con filtro de malla

Una toma con filtro de malla funciona captando el agua y filtrándola a través de una malla que bloquea las partículas grandes, como hojas y residuos. El agua filtrada se dirige luego hacia el sistema de tratamiento o directamente al uso final, dependiendo de la calidad del agua. El filtro de malla actúa como una barrera física que protege los equipos y mejora la calidad del agua captada.

Las principales ventajas de este sistema incluyen la protección de equipos, ya que evita que partículas grandes entren en el sistema, y la mejora inicial de la calidad del agua. Además, su instalación es relativamente sencilla y adaptable. Sin embargo, el filtro de malla puede obstruirse si no se limpia regularmente, lo que puede reducir el flujo de agua. También tiene limitaciones para filtrar partículas muy pequeñas, lo que puede requerir un tratamiento adicional del agua, y con el tiempo, la malla puede necesitar ser reemplazada debido al desgaste.

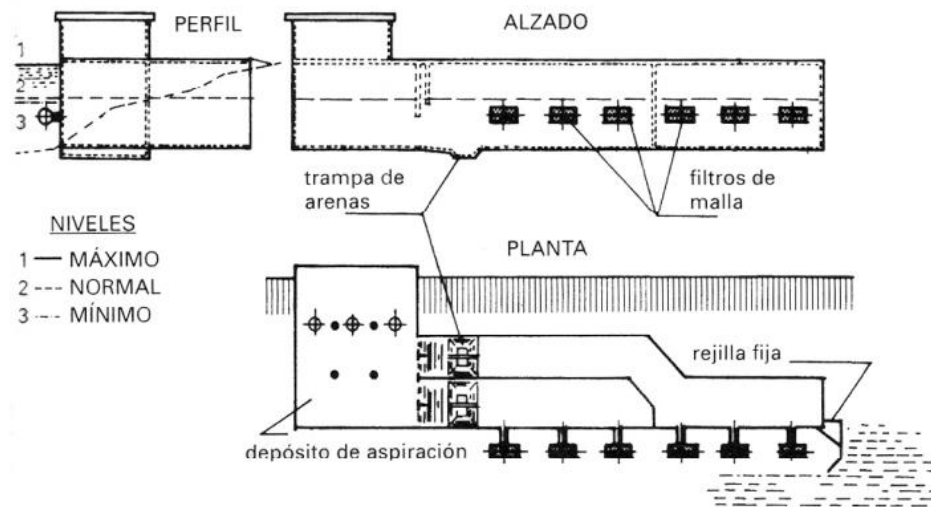


Imagen 3. Ejemplo de toma con filtro de malla. Fuente: Universidad Politécnica de Cartagena

d) Toma con obras transversales al río

Una toma de aguas superficiales con obras transversales al río funciona mediante la construcción de una estructura, como una presa o un dique, que atraviesa el cauce del río para desviar o retener el agua. Esta estructura permite regular el flujo de agua, asegurando un suministro constante y controlado, incluso en condiciones de caudal variable. El agua retenida o desviada es luego captada y conducida a través de canales o tuberías hacia el sistema de tratamiento o el punto de uso.

Las principales ventajas de este sistema incluyen el control preciso del caudal de agua, lo que garantiza un suministro constante y mejora la calidad del agua al evitar la captación durante periodos de alta turbidez. Además, ofrece flexibilidad para diferentes usos, como el riego o la generación de energía. Sin embargo, este tipo de toma también presenta desventajas, como un impacto ambiental significativo, costes elevados de construcción y mantenimiento, y el riesgo de acumulación de sedimentos, lo que puede requerir limpiezas periódicas para mantener su eficiencia.

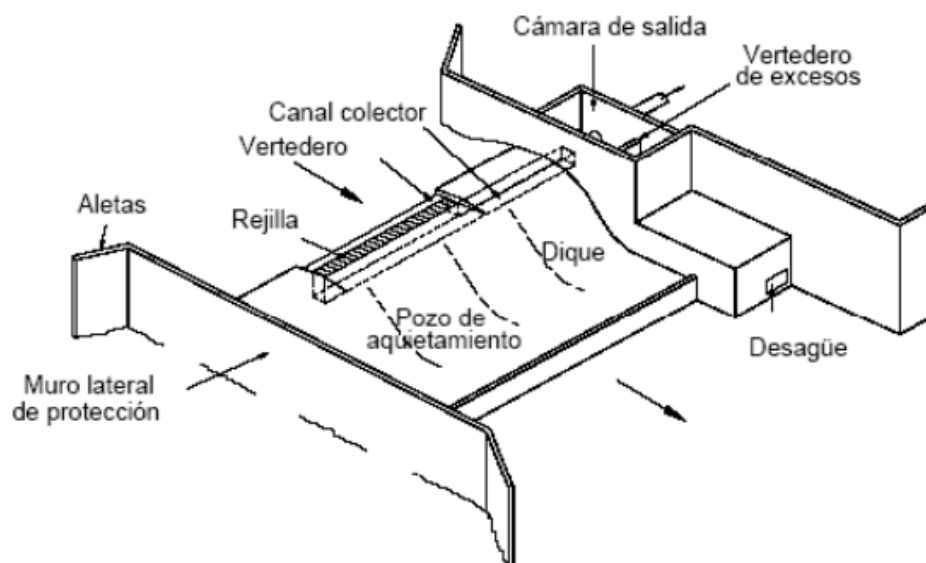


Imagen 4. Ejemplo de toma transversal al río. Fuente: Universidad Politécnica de Cartagena

Conclusión

Se ha escogido el sistema de captación con obra transversal al río, concretamente la bocatoma de fondo. La ventaja sobre los demás sistemas para controlar de forma precisa el caudal, asegurando el suministro constante y a la vez flexibilidad ante fluctuaciones de demanda, ha determinado que esta sea la mejor opción. A pesar de su elevado coste el factor de mantenimiento y monitoreo constante puede ser una ventaja para generar empleo en la población de Cedillo.

Tecnología de Captación	Ventajas	Desventajas
Toma directa	Simplicidad de diseño, bajo coste inicial, fácil mantenimiento, rápida instalación	Vulnerabilidad a la contaminación, variabilidad en la calidad del agua, dependencia del caudal superficial, impacto ambiental
Toma sumergida	Protege contra contaminantes superficiales, estabilidad operativa, menor impacto visual y ambiental	Mayor coste y complejidad de instalación, dificultades en el acceso para mantenimiento, acumulación de sedimentos
Toma con filtro de malla	Protección de equipos, mejora inicial de la calidad del agua, instalación sencilla y adaptable	Posibilidad de obstrucción del filtro, limitaciones en la filtración de partículas pequeñas, necesidad de reemplazo de la malla
Toma con obras transversales al río	Control preciso del caudal, suministro constante, mejora la calidad del agua, flexibilidad para diferentes usos	Impacto ambiental significativo, costes elevados de construcción y mantenimiento, riesgo de acumulación de sedimentos

Tabla 1. Tabla resumen de ventajas vs desventajas por tipo de tecnología de captación. Fuente: Elaboración propia

2.1.2 Sistemas de bombeo

El suministro de agua a una población desde una fuente de captación superficial ya sea río o embalse es un proceso crucial que requiere una planificación cuidadosa y el uso de tecnología adecuada para asegurar un flujo constante de agua potable. Uno de los aspectos fundamentales en este proceso es la selección del tipo de bomba que se utilizará para transportar el agua desde la captación hasta la planta de tratamiento o directamente a la red de distribución.

Para este propósito, se deben considerar varias condiciones clave, como la distancia desde la captación hasta la población, la elevación que debe superarse, el caudal necesario para satisfacer la demanda de la población y la calidad del agua a bombear. Estas consideraciones son esenciales para determinar el tipo de bomba más adecuado que garantice un suministro eficiente y continuo.

El caudal requerido también es un factor esencial, ya que la bomba seleccionada debe ser capaz de manejar el volumen de agua necesario para satisfacer las necesidades de la población. Finalmente, la calidad del agua juega un papel importante; si el agua contiene sólidos o es corrosiva, es necesario optar por bombas que puedan manejar estas condiciones sin sufrir daños o deterioro, asegurando así un funcionamiento duradero y eficiente.

En el estudio de las opciones disponibles, las bombas que se evaluarán incluyen las bombas centrífugas, bombas helicoidales y bombas de pistón, cada una con sus características específicas que las hacen adecuadas para diferentes escenarios de bombeo.

a) Bombas centrífugas

Una bomba centrífuga funciona utilizando la fuerza centrífuga para mover líquidos. El proceso comienza cuando el fluido entra en la bomba a través de una abertura central y se encuentra con un impulsor rotativo. Este impulsor, al girar a alta velocidad, impulsa el fluido hacia el exterior, aumentando su energía cinética. Luego, esta energía se convierte en presión en una cámara en forma de espiral o difusor, lo que permite que el fluido sea impulsado a través del sistema de tuberías hacia su destino.

Las bombas centrífugas ofrecen varias ventajas, como su alta eficiencia en el manejo de grandes volúmenes de agua, su diseño simple y robusto, y su bajo coste operativo. Son ideales para aplicaciones que requieren un flujo constante, como en sistemas de suministro de agua a poblaciones. Sin embargo, también presentan desventajas, como una menor eficiencia en altas elevaciones y problemas al manejar líquidos viscosos o con sólidos, lo que puede causar desgaste o bloqueo en el impulsor.

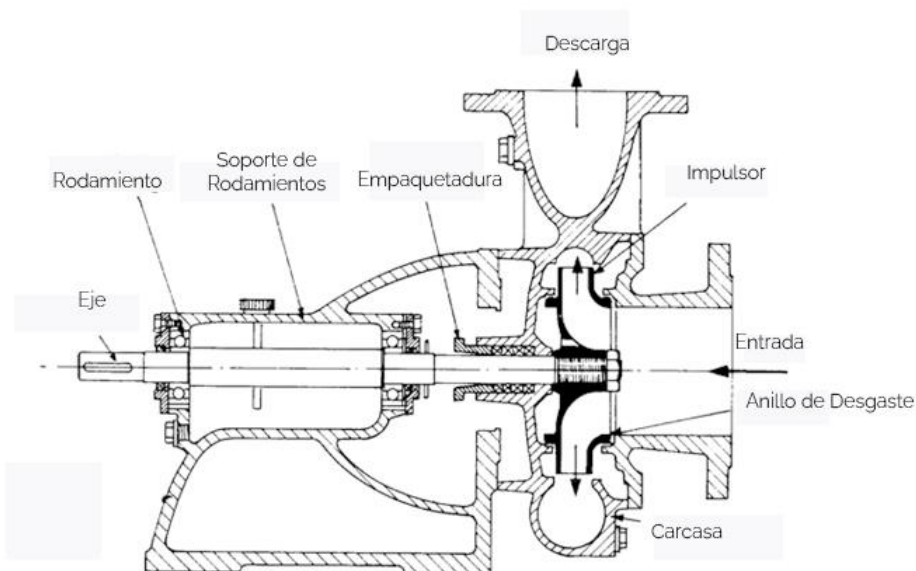


Imagen 5. Ejemplo de bomba centrífuga. Fuente: Boulton Pumps

b) Bombas helicoidales

Una bomba helicoidal, también conocida como bomba de tornillo, funciona utilizando un tornillo helicoidal que gira dentro de una carcasa cilíndrica, creando cavidades que mueven el fluido de manera continua y suave desde la entrada hasta la salida.

Las ventajas de las bombas helicoidales incluyen su capacidad para manejar fluidos con alta viscosidad y sólidos. También operan a bajas velocidades, lo que reduce el desgaste y prolonga la vida útil de la bomba. Sin embargo, presentan desventajas como un coste inicial elevado y la necesidad de un mantenimiento más complejo debido a las tolerancias precisas entre el tornillo y el estator, que pueden desgastarse con el tiempo, afectando la eficiencia de la bomba.

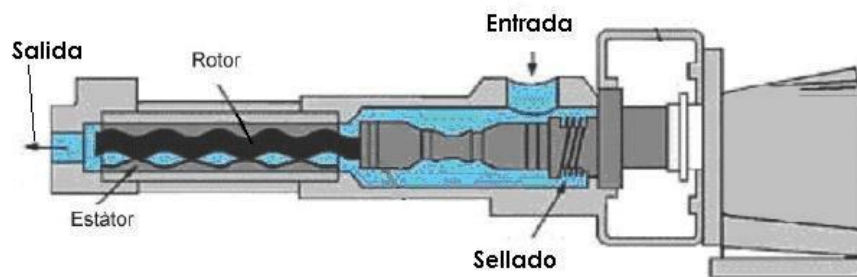


Imagen 6. Ejemplo de bomba de helicoidal. Fuente: ResearchGate

c) Bombas de pistón

Una bomba de pistón funciona mediante el movimiento alternativo de un pistón dentro de un cilindro, lo que permite aspirar y comprimir el fluido. Durante el ciclo de aspiración, el pistón se mueve hacia atrás, creando un vacío que succiona el fluido hacia la cámara de la bomba. Luego, en el ciclo de compresión, el pistón se mueve hacia adelante, cerrando la válvula de entrada y forzando el fluido a salir a alta presión a través de la válvula de salida. Este mecanismo permite un flujo continuo y controlado del fluido.

Las ventajas de las bombas de pistón incluyen su capacidad para generar altas presiones, lo que las hace ideales para aplicaciones que requieren mover fluidos a grandes alturas o con una presión constante. También son precisas y controlables, adecuadas para manejar líquidos viscosos o abrasivos. Sin embargo, tienen desventajas como la necesidad de mantenimiento frecuente debido al desgaste de las partes móviles, un coste elevado tanto en adquisición como en mantenimiento, y su funcionamiento a velocidades más bajas en comparación con otros tipos de bombas, lo que puede limitar su capacidad para mover grandes volúmenes rápidamente.

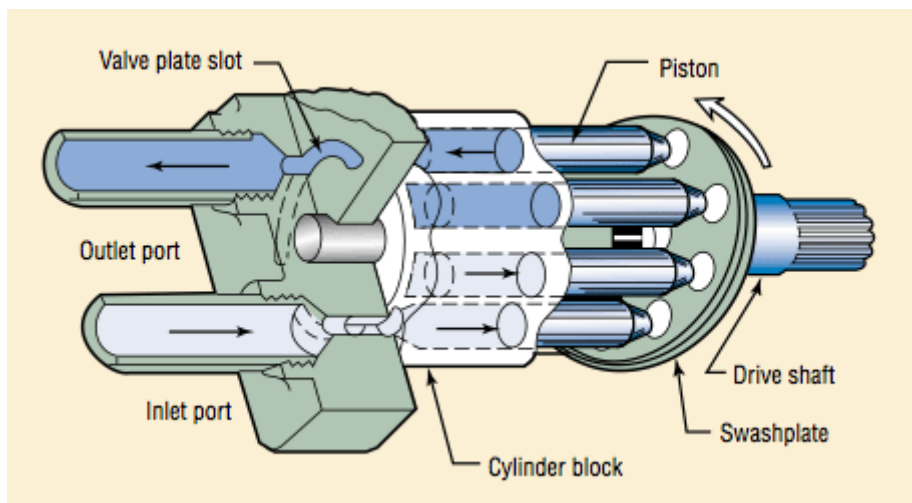


Imagen 7. Ejemplo de bomba de pistón. Fuente: Hydpa

Conclusión

Se ha escogido la bomba centrífuga por su diseño simple y de fácil manejo y debido a su empleo común en la industria para transportar agua a poblaciones. El agua habrá pasado ya por la rejilla de la bocatoma y el desarenador de modo que no hay riesgo de que exista presencia de sólidos ni de viscosidad. El problema que afronta para elevar agua a alturas elevadas se ha corregido con el emplazamiento de dos bombas en serie.

Tecnología de Bombeo	Ventajas	Desventajas
Bombas centrífugas	Alta eficiencia en grandes volúmenes, diseño simple y robusto, bajo coste operativo	Menor eficiencia en altas elevaciones, problemas con líquidos viscosos o con sólidos
Bombas helicoidales	Manejo de fluidos con alta viscosidad y sólidos, bajas velocidades reducen desgaste, larga vida útil	Coste inicial elevado, mantenimiento complejo, desgaste del tornillo y estator afecta eficiencia
Bombas de pistón	Generación de altas presiones, precisión y control, ideal para líquidos viscosos o abrasivos	Mantenimiento frecuente, coste elevado, velocidad de operación más baja, limitada capacidad para grandes volúmenes

Tabla 2. Tabla resumen de ventajas vs desventajas por tipo de tecnología de bombeo. Fuente: Elaboración propia

2.2 Tratamiento químico de potabilización

La potabilización del agua es un proceso esencial para garantizar que el agua captada de fuentes naturales, como ríos, sea segura para el consumo humano. En zonas de abastecimiento, donde el agua se toma directamente de un río, se requieren tratamientos específicos para eliminar las partículas y bacterias presentes. Los sistemas clásicos de potabilización incluyen etapas como el desarenado y la cloración.

Para que el agua se considere potable, debe cumplir con ciertos estándares de calidad, asegurando que sea segura y adecuada para el consumo humano.¹⁰ Las características clave del agua potable incluyen:

- Ausencia de patógenos: No debe contener microorganismos patógenos como bacterias, virus o parásitos que puedan causar enfermedades.
- Claridad: Debe estar libre de turbidez significativa y partículas suspendidas visibles.
- Química segura: Debe tener niveles aceptables de sustancias químicas disueltas, como nitratos, metales pesados, y otros contaminantes. Estos niveles están definidos por organismos reguladores como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y las normativas locales.
- Sabor, olor y color: Debe ser insípida, inodora y sin color para ser agradable al consumo.
- Niveles adecuados de minerales: Debe contener minerales esenciales en niveles que no sean perjudiciales para la salud. Por ejemplo, cantidades adecuadas de calcio y magnesio son deseables, mientras que altos niveles de hierro o manganeso pueden ser problemáticos.

La potabilización del agua captada de un río en zonas de abastecimiento donde el agua se considera en buen estado implica tratamientos cruciales como el desarenado y la cloración para eliminar partículas y microorganismos. El agua potable resultante debe cumplir con estrictos estándares de calidad para ser segura y saludable para el consumo humano.

2.2.1 Filtración y desarenador

El desarenador es un componente crucial en los sistemas de potabilización de agua, especialmente cuando se trata de captar agua de ríos.¹¹ Su principal función es eliminar las

¹⁰ (WHO, 2023)

¹¹ (FibrasyNormas, 2020)

partículas sólidas grandes, como arena y grava, que se encuentran en el agua bruta. Este proceso es fundamental por varias razones:

- Protección de equipos: La presencia de arena y partículas grandes puede causar abrasión y daños mecánicos en los equipos de bombeo y otras instalaciones del sistema de tratamiento. La eliminación de estas partículas prolonga la vida útil de los equipos y reduce los costes de mantenimiento. Es por ello por lo que la ubicación del desarenador debe ser próxima a la toma de agua de la fuente para no perjudicar los equipos de las siguientes etapas de potabilización y conducción.
- Mejora de la eficiencia: Al remover las partículas grandes al inicio del proceso, se facilita el funcionamiento de las etapas posteriores del tratamiento del agua, como la filtración y la desinfección. Esto mejora la eficiencia general del sistema de potabilización.
- Reducción de turbidez: Al eliminar las partículas suspendidas, se reduce la turbidez del agua, mejorando su claridad y facilitando los procesos de tratamiento posteriores.

Material	Diámetro (mm)	Material	Diámetro (mm)
Gravilla:		Fango:	
Gruesa	>2.0	Grueso	
Fina	2.00-1.00	y Medio	0.05-0.01
Arena:		Fino	0.01-0.005
Gruesa	1.00-0.50	Arcilla:	
Media	0.50-0.25	Gruesa	
Fina	0.25-0.10	y Media	0.005-0.001
Muy fina	0.10-0.05	Fina	0.001-0.0001
		Coloidal	<0.0001

Tabla 3. Clasificación del material en suspensión según su tamaño. Fuente: (Cualla, 2000)

El desarenador funciona generalmente mediante sedimentación, un proceso físico donde el agua fluye a través de un tanque o canal donde las partículas más pesadas se asientan en el fondo debido a la gravedad.¹² Existen varios tipos de desarenadores, incluyendo:

- Desarenadores de canal: Donde el agua fluye a través de un canal largo y estrecho. Las partículas pesadas se asientan en el fondo del canal y el agua más limpia se extrae desde la superficie. Es el más típico para agua con poca presencia de lodos.
- Desarenadores de tanque: Consisten en tanques grandes donde el agua se mantiene en reposo el tiempo suficiente para permitir que las partículas se asienten.
- Desarenadores hidrociclónicos: Utilizan fuerzas centrífugas para separar las partículas del agua. Estos sistemas son más compactos y eficientes para ciertos tipos de aplicaciones. Su aplicación en la industria suele centrarse en el tratamiento de aguas residuales.

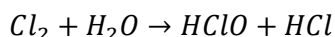
Conclusión

Debido a la naturaleza ya favorable del agua del Tajo para el abastecimiento se ha decidido optar por el tipo de desarenador en canal. El agua tiene pocos sedimentos y de este modo se permite el flujo continuo y rápido, ya que las partículas de agua no tienen que quedar mucho tiempo retenidas debido al diseño de la estructura. Además, no tiene por qué tratarse de una estructura grande.

2.2.2 Cloración

La cloración es uno de los métodos más comunes y efectivos para la desinfección del agua potable. Este proceso implica la adición de cloro o compuestos clorados al agua con el objetivo de eliminar bacterias, virus y otros microorganismos patógenos que pueden ser perjudiciales para la salud humana.¹³

Cuando el cloro se añade al agua, se producen varias reacciones químicas. La más relevante es la formación de ácido hipocloroso (HClO) y ácido clorhídrico (HCl):



¹² (Boss Tech)

¹³ (Tecpa, 2024)

El ácido hipocloroso es el agente desinfectante más efectivo, capaz de penetrar las paredes celulares de los microorganismos, interrumpiendo sus funciones vitales y causando su inactivación y muerte.¹⁴

Existen dos principales tipos de tecnologías de cloración:

- Cloración de choque: Se utiliza una alta dosis de cloro durante un corto período para una desinfección rápida. Este método es efectivo para eliminar rápidamente contaminantes en situaciones de emergencia o brotes de contaminación.
- Cloración continua: Implica la adición constante de cloro en pequeñas cantidades, manteniendo un nivel residual de cloro en el sistema de distribución para asegurar la desinfección continua y prevenir la recontaminación.

El cloro puede ser aplicado en diferentes formas, dependiendo del sistema de tratamiento:

- Cloro líquido: Usualmente en forma de hipoclorito de sodio (NaClO), que se disuelve fácilmente en agua y libera iones de cloro e hipoclorito.
- Cloro sólido: En forma de pastillas o tabletas de hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$), que se disuelven lentamente, liberando cloro gradualmente.
- Cloro gaseoso: El cloro gas (Cl_2) se introduce directamente en el agua en su forma gaseosa, aunque requiere un manejo cuidadoso debido a su toxicidad y necesidad de equipos especializados.¹⁵

Conclusión

Para simplificar el proceso de cloración se suministrará una disolución de cloro líquido de forma continua directamente en el tanque regulador. El caudal necesario será pequeño y podrá provenir de un pequeño tanque de cloro desde una caseta cercana al tanque de agua. Se pretende diseñar el método de cloración de modo que haya que renovar la disolución clorosa un par de veces al mes.

¹⁴ (Carbotecnia, 2018)

¹⁵ (SSWM)

2.3 Autoconsumo eléctrico por medio de placas fotovoltaicas

El autoconsumo eléctrico que utiliza placas fotovoltaicas ha ganado popularidad en aplicaciones industriales, especialmente en sistemas de captación de agua mediante bombas. Esta tecnología permite la operación autónoma y sostenible de motores eléctricos, proporcionando una fuente de energía renovable y confiable para actividades como el riego agrícola, el suministro de agua potable y la gestión de aguas residuales.

2.3.1 Energía fotovoltaica

Las placas fotovoltaicas, también conocidas como paneles solares, son dispositivos que convierten la energía solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Este fenómeno fue descrito por primera vez por Albert Einstein en 1905 y ha evolucionado significativamente desde entonces, especialmente desde la fabricación del primer panel de silicio en 1954. Hoy en día, los paneles solares son fabricados con materiales avanzados y son mucho más eficientes, constituyendo una alternativa energética viable y rentable.¹⁶

España ha experimentado un crecimiento notable en la instalación de energía fotovoltaica en los últimos años, impulsada tanto por políticas gubernamentales favorables como por la viabilidad económica del autoconsumo. En 2023, las energías renovables generaron el 50,8% de la electricidad en España, con la energía solar fotovoltaica representando el 28% de esta generación.¹⁷ Además, la capacidad de autoconsumo fotovoltaico ha crecido exponencialmente, con más de 298,000 viviendas y 54,000 empresas que ya generan su propia energía eléctrica.

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) establece un objetivo ambicioso de instalar 50,000 MW de potencia fotovoltaica para 2030, lo que supondría triplicar la capacidad actual y cubrir un 40% del consumo eléctrico del país. Este auge está respaldado por diversas políticas y ayudas, incluyendo la eliminación del "impuesto al sol" y la concesión de subvenciones para fomentar el autoconsumo.¹⁸

El funcionamiento de las placas fotovoltaicas se basa en el efecto fotoeléctrico. En la industria fotovoltaica, el material semiconductor más comúnmente utilizado es el silicio. Este elemento tiene una estructura cristalina debido a la disposición espacial de sus electrones. Cada átomo de silicio cuenta con cuatro electrones en su capa de valencia, que no está completa. Estos

¹⁶ (Otovo, 2020)

¹⁷ (Solarprofit, 2023)

¹⁸ (Endesa, 2023)

electrones forman enlaces covalentes con átomos de silicio vecinos, alcanzando así el equilibrio químico.

Cuando una fuente de energía ya sea calor o luz, interactúa con los átomos de este semiconductor, los electrones en las capas más externas se excitan. Si los electrones reciben suficiente energía, pueden liberarse de los enlaces covalentes y desplazarse a través de la red cristalina, dejando detrás de sí un vacío conocido como hueco, que actúa como una carga positiva.

La energía requerida para romper el enlace covalente y crear un par electrón-hueco se llama energía de enlace o umbral. Esta energía es específica para cada material semiconductor y es constante. En el caso del silicio, esta energía de enlace es de 1,12 V. Para evitar que los electrones y los huecos se recombinen y así mantener esta caída de potencial, se utilizan semiconductores tipo P y N.¹⁹

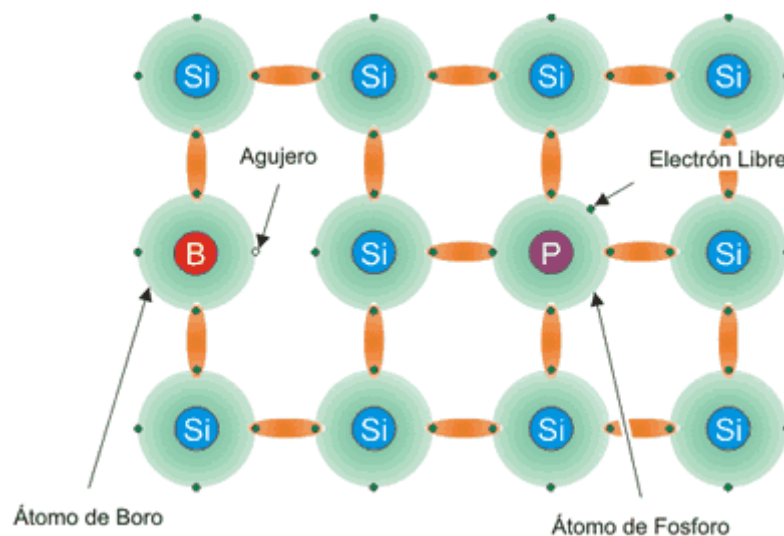


Imagen 8. Efecto fotovoltaico con elementos dopantes de Fósforo y Boro. Fuente: (Ecosistemas del sureste, 2015)

Cuando se añaden impurezas P y N a los semiconductores, se crea una unión PN con dos regiones distintas. Esta unión ocurre porque los electrones de la región N se desplazan hacia la región P, donde se recombinan con los huecos, creando una barrera que evita el paso de más electrones hacia los huecos. Esto resulta en la acumulación de cargas positivas en el lado P y negativas en el lado N, generando una diferencia de potencial.

¹⁹ (Torres, 2013)

Cuando la luz incide sobre una célula fotovoltaica, supera la barrera de potencial de la unión PN, produciendo una corriente de electrones que puede ser utilizada por una carga. Los paneles solares fotovoltaicos, que son una agrupación de estas células, aprovechan este efecto fotoeléctrico. En estos paneles, la interacción de la luz con los semiconductores positivo y negativo genera cargas positivas y negativas, creando un campo eléctrico. Este campo permite la circulación de corriente cuando los paneles están conectados a una carga que requiere energía.²⁰

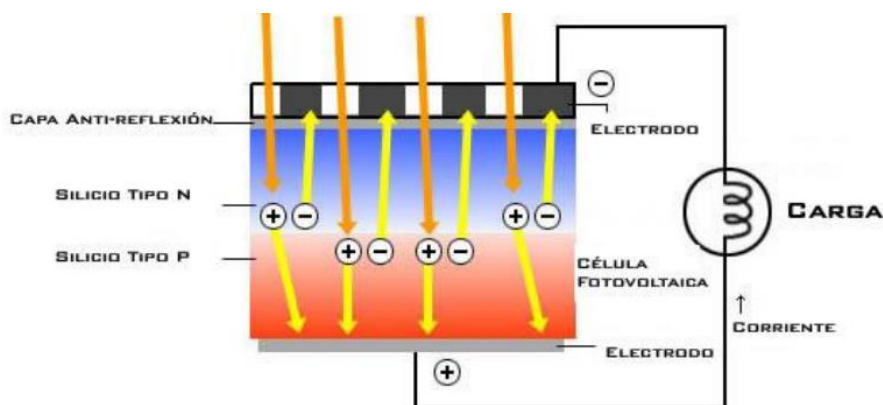


Imagen 9. Esquema de funcionamiento de una célula fotovoltaica. Fuente: (Bayona, 2012)

2.3.2 Componentes de un sistema fotovoltaico

a) Paneles fotovoltaicos

Un módulo fotovoltaico, también conocido como generador fotovoltaico, se encarga de captar la radiación solar y transformarla en electricidad. Estos módulos pueden conectarse de dos formas: en serie o en paralelo.

Cuando se conectan en serie, el voltaje total es la suma de los voltajes de cada módulo individual, mientras que la corriente de salida es igual a la de un solo módulo. Por otro lado, al conectarse en paralelo, la corriente total es la suma de las corrientes de cada módulo individual, y el voltaje se mantiene igual al de uno solo de los módulos. De este modo, la cantidad de módulos conectados en serie determina el voltaje final, y el número de módulos en paralelo establece la corriente que se puede suministrar a una carga.

Las células fotovoltaicas se agrupan en módulos o paneles solares que pueden ser de diferentes tipos: monocristalinos, policristalinos y amorfos.²¹

²⁰ (Torres, 2013)

²¹ (Solarprofit, 2023)

Células solares de silicio monocristalino

Las placas solares monocristalinas destacan por su alta eficiencia de conversión de energía, que oscila entre el 15% y el 22%, gracias a la alta pureza del silicio utilizado en su fabricación. Esta eficiencia superior permite que requieran menos espacio para generar la misma cantidad de energía en comparación con otros tipos de paneles. Además, tienen una vida útil más larga y mayor durabilidad en condiciones adversas. Sin embargo, estas ventajas vienen con un coste elevado debido al proceso de fabricación más complejo y al uso de materiales de alta pureza. Adicionalmente, el proceso de producción genera más desperdicio de silicio, lo que contribuye a su precio más alto.²²

Células solares de silicio policristalino

Las placas solares policristalinas son más económicas de fabricar en comparación con las monocristalinas, debido a un proceso de producción más sencillo y menos costoso, que además produce menos desperdicio de silicio. A pesar de ser más asequibles, tienen una eficiencia de conversión menor, generalmente entre un 13% y un 16%, lo que significa que requieren más espacio para generar la misma cantidad de energía.

Paneles solares amorfos

Las placas solares amorfos son las más económicas debido a su sencillo proceso de fabricación que no requiere silicio de alta pureza. Además, su flexibilidad permite su uso en aplicaciones donde los paneles rígidos no son viables. Sin embargo, estas ventajas se contrarrestan con una eficiencia de conversión muy baja, que generalmente varía entre un 6% y un 10%, y una tendencia a la rápida degradación del rendimiento en los primeros meses de uso. Asimismo, tienen una vida útil más corta y menor durabilidad en comparación con los paneles monocristalinos y policristalinos.

²² (Otoño, 2020)

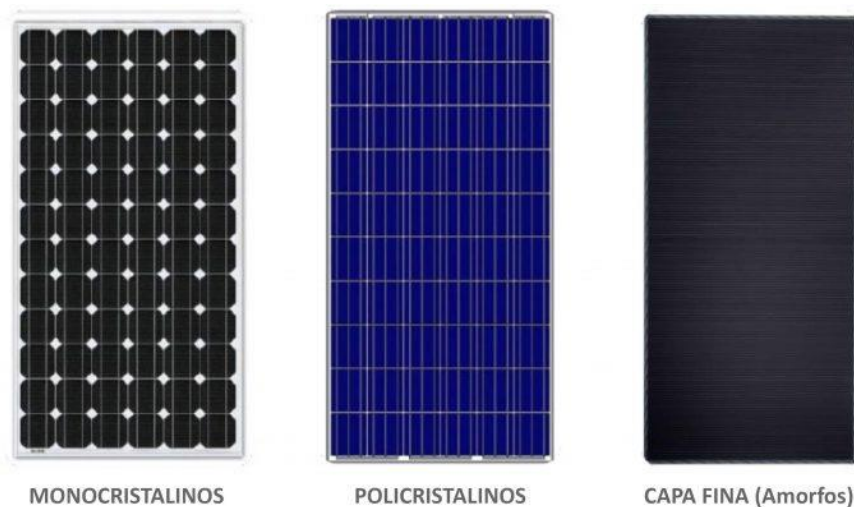


Imagen 10. Tipos de paneles solares según su tecnología. Fuente: (Tritec, 2017)

b) Baterías

Las baterías, también conocidas como acumuladores, son esenciales en sistemas fotovoltaicos independientes de la red eléctrica debido a la variabilidad de la radiación solar y la consecuente fluctuación de la energía generada. Este almacenamiento de energía es crucial para asegurar el suministro durante periodos en los que no hay generación solar.

La elección de la batería adecuada influye significativamente en el diseño de varios componentes del sistema fotovoltaico. Es fundamental considerar las características de la batería que se adapten mejor a las necesidades del sistema, como los tipos de cargas previstas, la potencia total requerida y los ciclos de consumo esperados. Así, las propiedades de la batería seleccionada afectan directamente el rendimiento y la eficiencia del sistema fotovoltaico en su conjunto.

El uso de baterías en sistemas de autoconsumo no está ampliamente extendido principalmente debido a su elevado coste, lo que aumenta considerablemente la inversión inicial necesaria para instalar estos sistemas.

Además, las baterías tienen una vida útil limitada, generalmente de 5 a 15 años, y requieren mantenimiento regular, lo cual puede añadir costes y complicaciones adicionales a largo plazo. La eficiencia de estos sistemas también se ve afectada por las pérdidas energéticas durante los procesos de carga y descarga, reduciendo la eficiencia global del sistema.²³

²³ (IMMOD, 2023)

c) Regulador

El regulador de carga es el dispositivo encargado de gestionar los procesos de carga y descarga de la batería en un sistema fotovoltaico. Su función principal es prevenir la sobrecarga de la batería cuando ya ha alcanzado su capacidad máxima, lo que consigue reduciendo o deteniendo el flujo de corriente desde los paneles fotovoltaicos.

Además, el regulador evita que la batería se descargue demasiado cuando se está utilizando la energía almacenada, desconectándola de los circuitos de consumo cuando el nivel de carga es muy bajo. Este dispositivo también proporciona información valiosa sobre los parámetros eléctricos del sistema, incluyendo la tensión, la corriente y el estado de carga de las baterías.

d) Inversor

Se encarga de convertir la corriente continua generada por el sistema fotovoltaico en la corriente alterna necesaria para alimentar las cargas eléctricas.

e) Protecciones eléctricas

Los elementos de protección del circuito incluyen diodos de bloqueo, interruptores de desconexión, conexiones a tierra, entre otros. Estos componentes se colocan estratégicamente entre distintas partes del sistema para proteger contra descargas y desvíos en caso de fallas o sobrecargas. Su función principal es asegurar la integridad y seguridad del sistema fotovoltaico, evitando daños a los componentes y garantizando un funcionamiento seguro y eficiente.

Conclusión

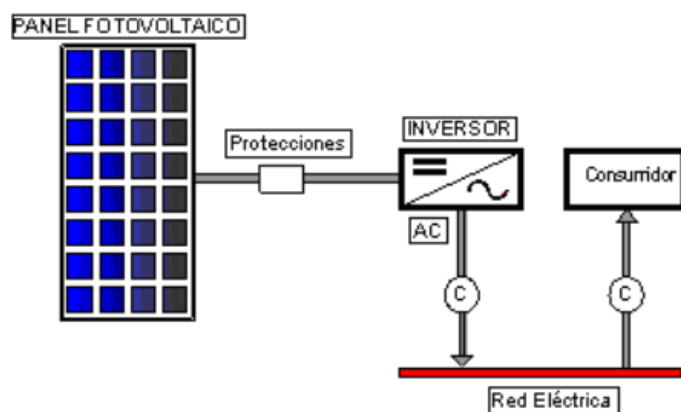


Imagen 11. Esquema de una instalación fotovoltaica conectada a red. Fuente: Google Imágenes

El esquema muestra el tipo de conexión que se llevará a cabo en nuestra instalación. Se ha decidido no emplear baterías debido a su coste elevado y por su baja eficiencia, frente a la pequeña demanda de potencia que supondrá la instalación. De este modo la instalación se

conectará directamente a las cargas de consumo y a la red. La instalación eléctrica tan solo podrá suministrar energía a las bombas cuando aproveche las horas de sol.

Por otro lado, se ha escogido la tecnología de silicio monocristalino por ser la que tiene una eficiencia más elevada y una vida útil larga.

Capítulo 3. Estudios previos al diseño de las instalaciones

En este capítulo, se abordarán los estudios preliminares para el diseño de instalaciones, fundamentales para garantizar su viabilidad técnica, económica y ambiental. Se realizarán análisis detallados de diversos aspectos críticos, comenzando por un estudio demográfico que proporcionará información sobre la población y su evolución, indispensable para dimensionar adecuadamente las instalaciones.

A continuación, el estudio hidrológico permitirá entender las características de los recursos hídricos disponibles, mientras que el estudio geológico y topográfico ofrecerá un panorama de las condiciones del terreno, aspectos cruciales para la planificación y construcción segura de las instalaciones.

El estudio del impacto medioambiental será desglosado en diferentes fases, evaluando los posibles efectos durante la construcción y explotación de las instalaciones, y proponiendo medidas preventivas y correctoras para minimizar dichos impactos.

Posteriormente, se presentará un estudio climatológico específico para la instalación eléctrica, complementado con un análisis exhaustivo de la normativa vigente, que guiará el cumplimiento de los requisitos legales y técnicos en el diseño de las instalaciones. Este enfoque integral garantizará que las instalaciones propuestas sean sostenibles, seguras y eficientes, respetando tanto las necesidades humanas como el entorno natural.

Por último, se recopilará la normativa vigente que tenga rigor en el diseño de las instalaciones, principalmente la instalación eléctrica.

3.1 Estudio demográfico

Mediante este estudio demográfico obtendremos el caudal necesario para determinar los cálculos de diseño de la acometida.

A continuación, se muestra en una captura de Google Maps la localización del municipio de Cedillo dentro de la provincia de Cáceres, Extremadura. En el Anexo I se muestra sobre un plano catastral con más detalle el lugar donde se quiere realizar la captación y la instalación eléctrica.

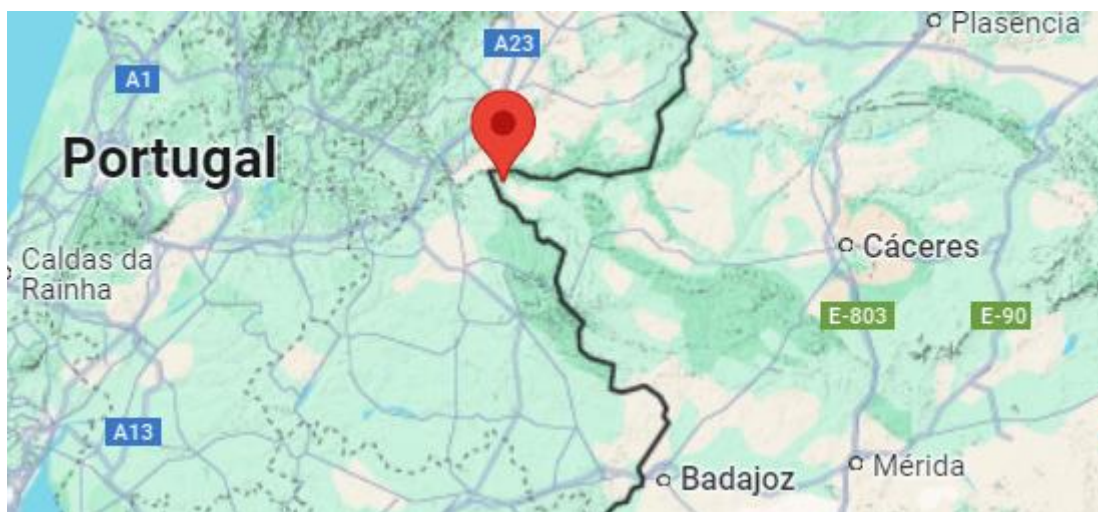


Imagen 12. Localización del municipio de Cedillo en el mapa de la Península Ibérica. Fuente: Google Maps

Según el censo de población de 2023, Cedillo cuenta con 433 habitantes. La población se distribuye en 221 hombres y 212 mujeres.²⁴ La población de Cedillo se divide en varios grupos de edad:

- 0-17 años: 38 personas
- 18-64 años: 249 personas
- 65 años y más: 146 personas

La mayor concentración de población se encuentra en el grupo de 50-59 años con 81 personas, seguido por el grupo de 70-79 años con 59 personas. A su vez, la mayoría de los habitantes de Cedillo son de nacionalidad española (426 personas), con una pequeña cantidad proveniente de la Unión Europea (7 personas). En términos de lugar de nacimiento, 420 residentes nacieron en España, 12 en la Unión Europea, y 1 en América.

²⁴ (INE, 2023)

Históricamente, Cedillo ha experimentado una disminución en su población desde 1981, cuando contaba con 705 habitantes, a 426 en 2021, aunque ha mostrado una leve recuperación hasta los 433 en 2023. Esta última cifra será nuestro parámetro de cálculo para el caudal de diseño.

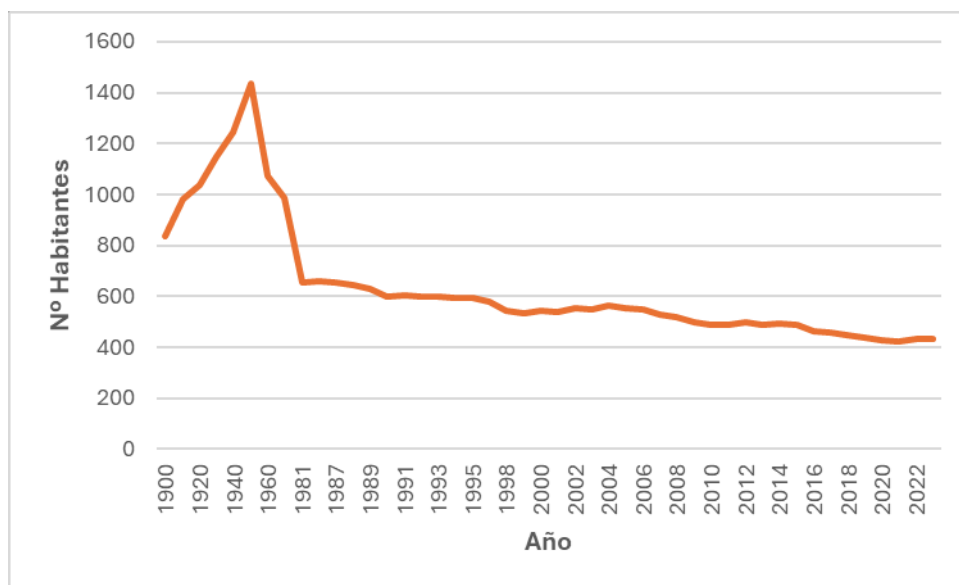


Gráfico 1. Evolución demográfica Cedillo, Extremadura. Fuente: Elaboración propia. Derivado de Foro Ciudad

A continuación, se llevará a cabo una estimación del caudal de agua demandado por la población, factor crucial que determinará el dimensionamiento de las instalaciones.

Consumo	Item	Consumo (L/hab.d)
Doméstico	Aseo personal	45
	Descarga de sanitarios	40
	Lavado de ropa	20
	Cocina	15
	Riego de jardines	10
	Lavado de pisos	5
	Total consumo doméstico	135
Industrial y comercial	Lecherías	0,8
	Fábricas de bebidas	0,2
	Fábricas de hielo	1
	Curtiembres	0,5
	Edificios industriales	10
	Almacenes	3,5
	Total consumo ind. y com.	16
Público	Lavado de calles	8
	Mataderos	0,4
	Hospitales	0,6
	Riego de parques	9
	Lavado de alcantarillado	3
	Total público	21
Subtotal		172
Pérdidas y desperdicios	se adopta un 20%	35
Consumo total para el caudal de diseño		207

Tabla 4. Consumos típicos de los sectores doméstico, industrial, comercial, público y pérdidas. Fuente: Elaboración propia. Derivado de (Lóper Cualla, 1999)

Caudal Promedio

A partir de un año de registros podemos obtener el caudal promedio con la siguiente expresión:

$$Q_{promedio} = \frac{\text{Consumo} \left(\frac{L}{hab} \cdot d \right) \cdot \text{Población (hab)}}{86400} = \frac{207 \cdot 433}{86400} = 1,037 \text{ L/s} \quad (1)$$

Caudal máximo diario

Representa la demanda máxima que hay en un día del año. Este será nuestro caudal de diseño en las instalaciones de captación.

$$Q_{máximo\ diario} = 1.2 \cdot Q_{promedio} = 1,244 \text{ L/s} \quad (2)$$

Este caudal será el que se tome como partida para los cálculos de las instalaciones.

Caudal máximo horario

Este caudal corresponde al caudal máximo que puede presentar una hora en un año completo.

$$Q_{\text{máximo horario}} = 1.5 \cdot Q_{\text{máximo diario}} = 1,866 \text{ L/s} \quad (3)$$

3.2 Estudio hidrológico

Mediante este estudio se determinarán los factores claves de la cuenca hidrográfica del Tajo en la localidad de Cedillo, así como la composición química del agua.

Cedillo se encuentra en la parte occidental de la cuenca hidrográfica del Tajo, cerca de la frontera con Portugal. Este tramo del Tajo se denomina Tajo Internacional. Este tramo del río es significativo debido a la presa de Cedillo, que regula el caudal del Tajo y contribuye a la generación de energía hidroeléctrica. La confluencia del río Sever con el Tajo en esta región incrementa el caudal y el volumen de agua manejado por la presa.

La presa de Cedillo es una estructura de arco gravedad con 66 metros de altura, y tiene una capacidad máxima de descarga de 504 m³/s a través del desagüe y 16,200 m³/s a través del aliviadero. El embalse tiene una capacidad a Nivel Máximo Normal (NMN) de 260 hm³. Su principal uso es la generación hidroeléctrica, con una capacidad instalada de entre 440 y 500 MW, lo que la convierte en una fuente importante de energía para la región.²⁵

La región alrededor de Cedillo es predominantemente agrícola, con cultivos que dependen del agua regulada por el embalse. Además, parte del área está protegida dentro del Parque Natural del Tajo Internacional, que promueve la conservación de la biodiversidad y el ecoturismo.

La calidad del agua en esta parte de la cuenca es un desafío constante debido a la contaminación agrícola y los desechos urbanos. La gestión del agua en Cedillo requiere cooperación entre España y Portugal, especialmente en lo referente a la regulación de caudales y la gestión de recursos hídricos transfronterizos, bajo la Convención de Albufeira.

La cuenca del Tajo abarca una superficie total de 80,600 km², distribuyéndose un 69,2 % (55,750 km²) en territorio español y el 30,8 % restante (24,850 km²) en tierras portuguesas. Es la tercera

²⁵ (Wikipedia, 2024)

cuenca más extensa de la península ibérica, superada por la del Duero, con 97,290 km², y la del Ebro, con 83,093 km².²⁶

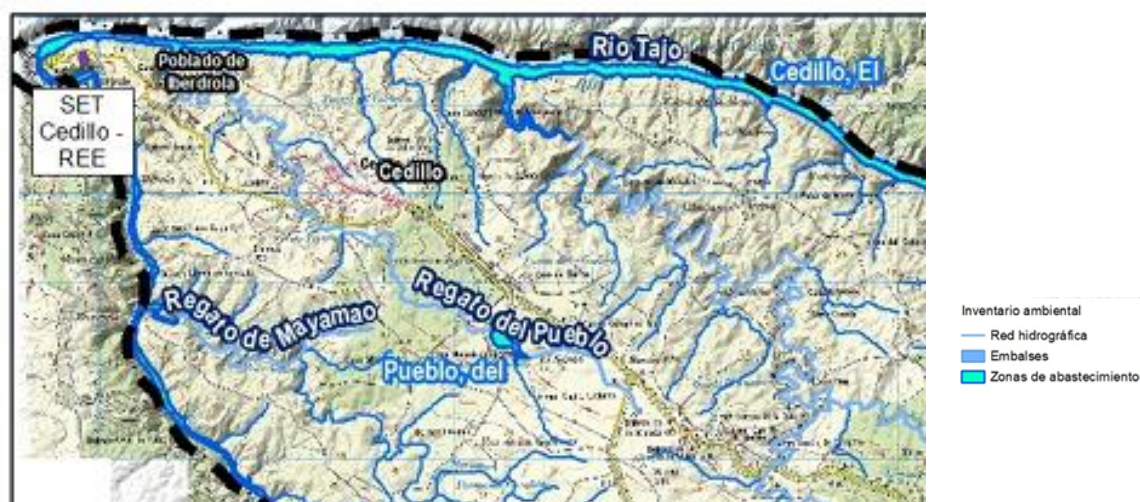


Imagen 13. Red hidrográfica en el área de estudio. Fuente: ecoEnergías del Guadiana

Se puede observar en esta imagen que el tramo del Tajo donde se quiere hacer la captación del agua pertenece a una de las zonas de abastecimiento. Esto quiere decir que el agua se encuentra en su lecho en un estado químico considerablemente bueno.

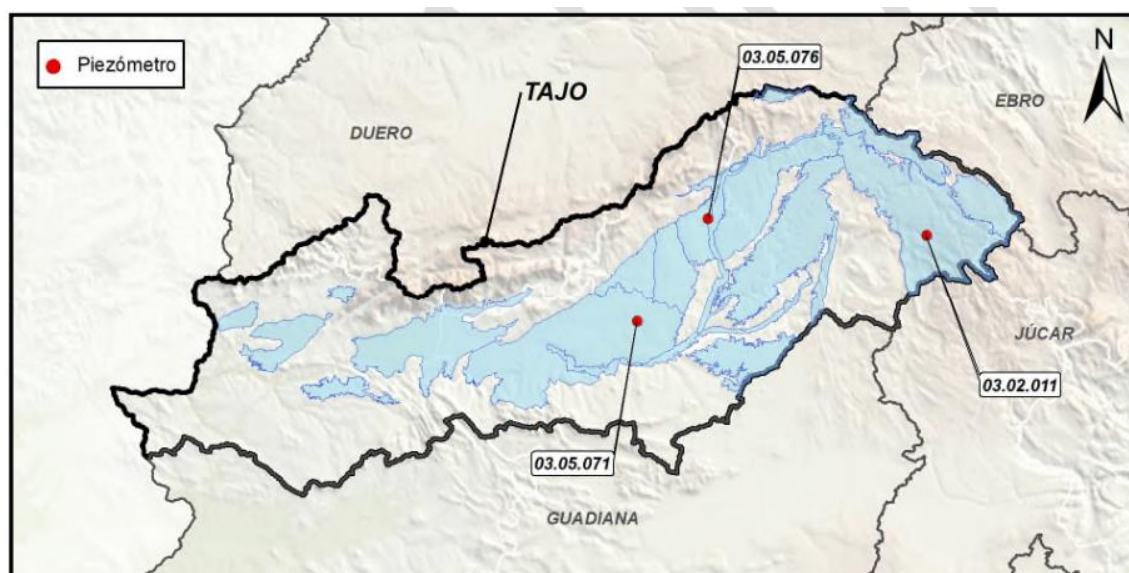


Imagen 14. Masas de aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica del Tajo. Fuente: (CHT, 2011)

²⁶ (Wikipedia, 2023)

En esta imagen se observa que la zona de estudio no tiene masas de agua subterráneas destacables lo cual nos facilitará los cálculos de diseño.

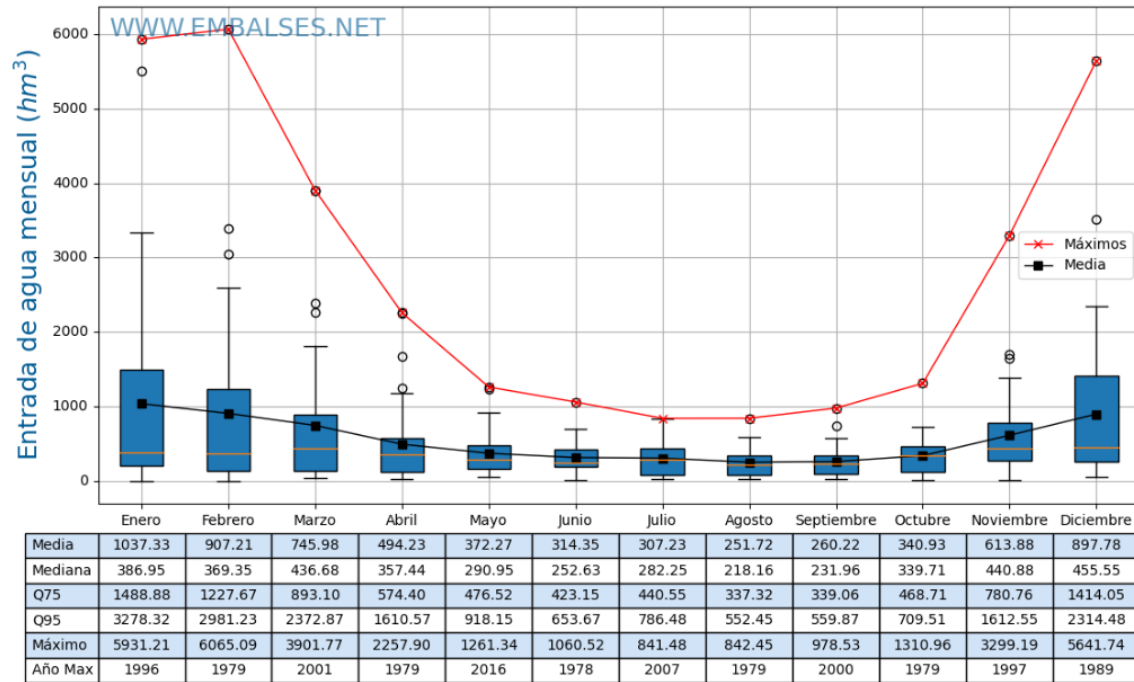


Gráfico 2. Entrada estacional de agua en el embalse de Cedillo. Fuente: (Embalses.net, 2024)

En el gráfico superior se aprecia el efecto de las precipitaciones en la disponibilidad de agua en el embalse de Cedillo. Se ha decidido estudiar el efecto de las precipitaciones en el embalse debido a su cercanía con el punto de captación ya que no hay datos suficientes en el punto elegido, más cercano al municipio.

Caudal (m3/s)	Anual
Mínimo	53,08
Máximo	630,48

Tabla 5. Caudal del río Tajo en Cedillo. Fuente: Elaboración propia, derivado de (Cedex, 2020-2021)

Composición química del agua

	121	140	141	153
nitritos	<0,01-0,09	<0,01-0,05	<0,01-0,11	<0,01-0,03
detergentes	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05-0,08
amonio	<0,02-0,7	<0,02-0,9	<0,02-0,3	<0,02-0,52
fenoles	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
cianuros	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
cromo total	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
manganeso	<0,05-0,1	<0,05-0,03	0,05	<0,05-0,04
hierro	<0,05-0,6	<0,05-0,5	0,09	<0,05-0,56
cobre	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
zinc	<0,05	<0,05-0,01	<0,05	<0,05
cadmio	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
mercurio	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
plomo	<0,01-0,1	<0,05	<0,05	<0,05-0,02
arsénico	<0,01	<0,01-0,01	<0,005	<0,01
sodio	4-17	11-22	29	10-40
potasio	<0,5-3	<0,5-4	4	<0,5-4
calcio	4,5-11	10-20	37	10-33
magnesio	2-3	4-7	14	4,5-14
fosfatos	<0,002-0,7	<0,02-0,33	0,3-0,9	<0,02-0,42
nitrógeno	<0,5-0,8	<0,5-1,4	<0,5-0,6	<0,5-1,6
sulfatos	2-17	20-123	15-100	30-123
bicarbonatos	20-40	30-60	79	38-75
nitratos	0,6-9	<0,05-3,5	2-11	<0,5-4,6
cloruros	5-21	6-32	28-35	14-35
fluoruros	0,06-0,2	0,09-0,2	0,2	0,1-0,2

	pH	Conductividad (μS/cm)	Oxígeno disuelto (%Sat)	DBO5 (mg / l l O2)	DQO (mg / l l O2)
121	6,4-8,9	60-100	70-120	<1-14	<10-50
140	7-9	100-140	70-sat	<1-6	<8-9
141	7-8	300-440	40-00	2-6	<10-17
153	7-9,4	100-140	63-sat	1,4-6	<8-21

	coliformes totales (u/100 ml)	coliformes fecales (u/100 ml)	estreptococ. fecales (u/100 ml)	salmonelas (u/1 l)
121	18-5.000	2-600	2-260	ausencia
140	3-1.500	0-150	0-160	ausencia
141	180-8.400	-	-	ausencia
153	0-560	0-125	0-110	ausencia

Tabla 6. Análisis de la composición química del agua. Nº 153 corresponde a Cedillo. Fuente: Red ICA, CHT

Los valores máximos permitidos según la Directiva (UE) 2020/2184 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO se recogen en la siguiente tabla:

Valores máximos permitidos	
Nitrato	50 mg/l
Amonio	1 mg/l
DBO5	5 mg/l
DQO	500mg/l
pH	6,5-9,5
Conductividad	2500 μS/cm
Bacterias Coliformes	0/100ml

Tabla 7. Composición química del agua, valores permitidos. Fuente: Directiva (UE) 2020/218

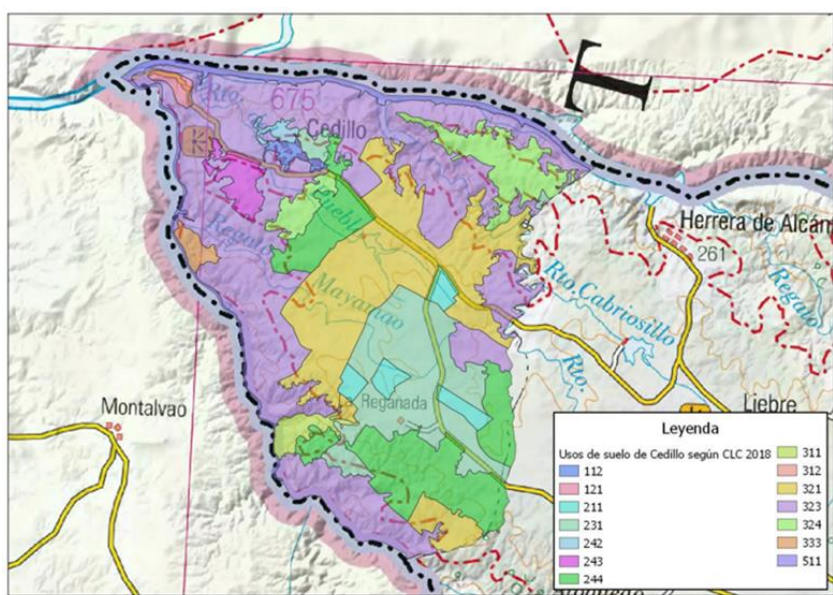
Se incumple la composición química de Bacterias Coliformes (0-560) cuando debería ser 0. A su vez, el DBO5 también puede tomar valores superiores al permitido ya que tal como se indica en la tabla puede tomar un máximo de 6mg/l.

Se considerará que el sometimiento del agua al proceso de desarenado y posterior cloración serán medios de purificación suficientes.

3.3 Estudio geológico y topográfico

El objeto de este estudio es esencial para una gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos, así como para la prevención de riesgos naturales. Estos estudios proporcionan información crítica sobre la distribución y comportamiento del agua subterránea y superficial, ayudando a planificar infraestructuras hidráulicas adecuadas para el consumo humano, riego y generación de energía.²⁷

Asimismo, estos estudios son fundamentales para la conservación del medio ambiente y el desarrollo sostenible de la región. Al identificar áreas de alto valor ecológico, se pueden implementar medidas de protección adecuadas.



Código	Descripción	Superficie (has)
323	Vegetación esclerófila	2.348,45
231	Praderas	725,98
324	Matorral boscoso de transición	335,39
211	Tierras de labor en secano	134,23
242	Mosaico de cultivos	25,10
511	Cursos de agua	171,36
121	Zonas industriales o comerciales	32,67
243	Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural	99,67
112	Tejido urbano discontinuo	36,04
244	Sistemas agroforestales	756,76
312	Bosques de coníferas	0,43
311	Bosques de frondosas	69,30
333	Espacios con vegetación escasa	44,07
321	Pastizales naturales	1.137,63

Imagen 15. Usos de suelo en el término municipal de Cedillo. Fuente: Corine Land Cover (2018)

²⁷ (IGME, 2000)

En esta imagen se puede observar que la zona 323, la más extensa, está formada por vegetación esclerófila que cumple importantes acciones en el ecosistema del Tajo. Algunas de ellas incluyen la prevención de erosión en el suelo debido a sus raíces profundas y la proporción de hábitat y alimento para aves, mamíferos y reptiles. Entre las especies de este tipo de vegetación se encuentran árboles como las encinas y alcornoques, y matorrales como las jaras, brezo y lentiscos. Esta zona será nuestra zona de estudio para el impacto medioambiental dado que es donde se quiere diseñar el sistema de captación y la instalación eléctrica.

Desde una perspectiva geológica, el área de estudio pertenece al Macizo Hespérico. La mayor parte de esta área está compuesta por sedimentos del Complejo Esquisto Grauváquico, caracterizados por la presencia de grauvacas, esquistos y pizarras dispuestas en niveles alternos que varían en grosor desde milimétrico hasta métrico.

La característica tectónica predominante es la primera fase de deformación hercínica, que forma pliegues orientados en direcciones NO-SE u O-NO-ESE, con planos axiales casi verticales y fallas asociadas paralelas a estos pliegues. Geomorfológicamente, este tramo del Tajo se caracteriza por valles fluviales profundos y homogéneos.

El río Tajo, dentro del Espacio Natural del Tajo Internacional, atraviesa un valle profundamente encajado, con pendientes que pueden alcanzar el 100%, desniveles de hasta 100 metros y un ancho de 200 metros. Entre la presa de Cedillo y su confluencia con la Rivera de Aurela, el río presenta un perfil muy simétrico.

En la zona del Tajo de donde se quiere hacer la captación hay dos tramos de desnivel desde la cota máxima del río 120m a la del pueblo 249m. El desnivel se ilustra en la siguiente imagen:

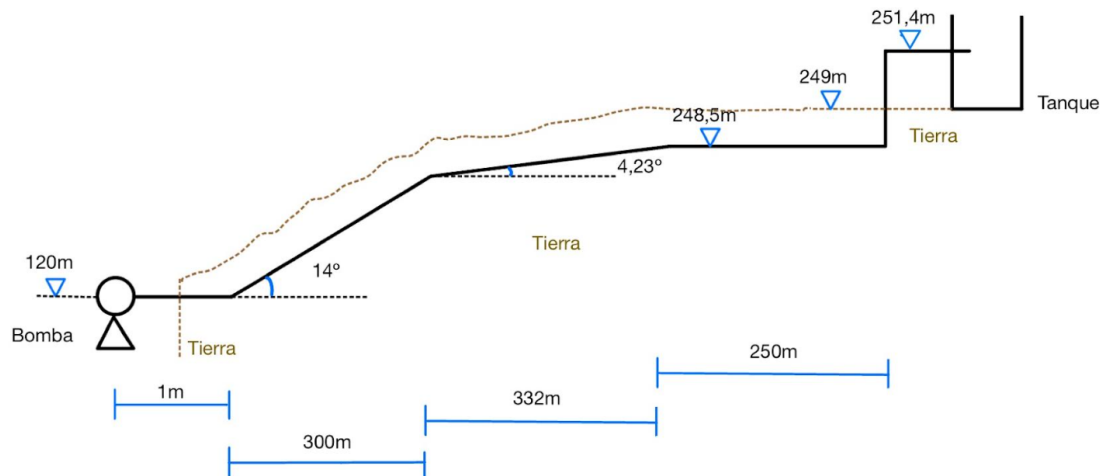


Imagen 16. Esquema no a escala de cotas y medidas del recorrido de la tubería de conducción. Fuente: Elaboración propia

La ilustración muestra el recorrido de la tubería desde la bomba de impulsión que debido a la geografía del terreno deben diseñarse en distintos tramos. Las distancias y las cotas se han tomado con la ayuda de Google Maps y serán necesarias para los cálculos de diseño de la tubería y las bombas.

Cabe destacar que la profundidad del río por su cercanía a un embalse en el punto de la toma oscila entre 10 y 20 metros, mientras que si la toma de agua fuera en un tramo de flujo libre oscilaría entre 2 y 5 metros.²⁸

Aclaraciones

Para llevar a cabo un diseño adecuado de las cimentaciones y estructuras que conformarán el sistema de captación se deberían tener en cuenta las consideraciones que se detallan a continuación. Sin embargo, no se hará hincapié en este análisis puesto que no el diseño de las cimentaciones no está dentro de los objetivos de este proyecto.

Para construir en terrenos del Macizo Hespérico, especialmente en áreas dominadas por el Complejo Esquisto Grauváquico, es crucial realizar estudios geotécnicos detallados. Estos estudios deben evaluar la estabilidad de los suelos y rocas, identificando fallas y zonas de debilidad. Además, es importante analizar cómo los materiales geológicos, como grauvacas,

²⁸ (Álvarez, 2023)

esquistos y pizarras, se comportan bajo carga. Estos materiales pueden presentar variaciones significativas en su grosor y resistencia, afectando la estabilidad de las estructuras.²⁹

El diseño de las fundaciones debería adaptarse a las características del terreno. En zonas con materiales blandos o altamente fracturados, puede ser necesario utilizar cimentaciones profundas, como pilotes o micropilotes, para alcanzar capas más estables. En áreas con roca sólida cerca de la superficie, las cimentaciones superficiales bien diseñadas pueden ser suficientes. Un diseño detallado de las cimentaciones debería considerar la variabilidad de los niveles sedimentarios y las características tectónicas del terreno.

La estabilización de taludes es esencial en terrenos con pendientes pronunciadas, como los valles fluviales encajados del Tajo. Es necesario implementar medidas de refuerzo, como anclajes, mallas y muros de contención, para prevenir deslizamientos de tierra. Además, se deben establecer sistemas de drenaje adecuados para reducir la presión del agua en los taludes y evitar la saturación del suelo, lo cual puede comprometer la estabilidad.

3.4 Estudio del impacto medioambiental

Un estudio medioambiental ayuda a identificar y evaluar los posibles impactos negativos que una actividad o proyecto puede tener sobre el entorno natural. Esto incluye la flora, fauna, calidad del agua, aire y suelo. La mitigación de estos impactos es fundamental para preservar la biodiversidad y mantener los ecosistemas saludables.

Este estudio se compone de dos fases principales: fase de construcción y fase de explotación. Inicialmente, se identificarán los factores ambientales afectados y se realizará un cálculo estimado del impacto por el desarrollo de las dos fases principales. En función del resultado del impacto se evaluará la compatibilidad de la actividad y, por último, se proporcionarán unas medidas preventivas y correctoras.

²⁹ (Gobierno de Extremadura, 2014)

Medio físico	Medio inerte	Atmósfera	Contaminación sonora Contaminación ambiental
		Agua	Calidad agua superficial Calidad agua subterránea
		Tierra y suelo	Morfología y pérdida de suelo Calidad/Capacidad
	Medio biótico	Flora	Interés Densidad
		Fauna	Destrucción de hábitats Molestias fauna
	Medio perceptual	Paisaje	Calidad intrínseca Modificación paisajística
Medio socio-económico y cultural	Medio rural	Conservación	Espacios protegidos
	Económico	Economía	Percepción de ingresos Empleo
		Infraestructuras	Dotación de infraestructuras

Imagen 17. Factores ambientales afectados. Fuente: (ECO, 2020)

A continuación, se describirá como las fases de construcción y explotación afectan a estos factores.

3.4.1 Impacto en fase de construcción

Impactos sobre la atmósfera

La realización de las obras generará ruido debido a la presencia de trabajadores y maquinaria. Los niveles de ruido dependerán del tipo y cantidad de maquinaria utilizada, que deberá cumplir con las normativas vigentes en materia de ruido y vibraciones, según el Real Decreto 212/2002 y su modificación en el Real Decreto 524/2006. Dado que el impacto sonoro se limita a la maquinaria y que esta cumplirá con la legislación, es improbable que se superen los límites de ruido establecidos por la normativa vigente.

Durante esta fase, se emitirán gases de escape debido al uso de vehículos y maquinaria, incluyendo partículas en suspensión, monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SOx) y nitrógeno (NOx), así como compuestos orgánicos volátiles (COV). No obstante, todos los vehículos y maquinaria deberán pasar la Inspección Técnica de Vehículos (ITV) garantizando que no superen los límites legales.

Impactos sobre el agua

El efecto de esta fase sobre la calidad del agua superficial viene principalmente por el riesgo de dejar elementos en suspensión sobre el río. Las obras no atravesarán ningún recurso hídrico.

Además, según el estudio hidrológico anterior no existen aguas subterráneas en la zona de estudio que puedan estar en riesgo.

Impacto sobre la vegetación

Las acciones de construcción de las instalaciones de captación y tratamiento del agua y las de autoconsumo eléctrico conllevan una eliminación de la flora. En la zona de inmediación al río se produciría un impacto importante debido a la necesaria tala de algunos árboles (encinas en su mayoría) para ampliar las zonas de movimiento de maquinaria y despejar las zonas donde se construirán las instalaciones. Sin embargo, la presencia de árboles en la zona de construcción es escasa a pesar de una alta densidad de vegetación esclerófila (jaras, brezo, lentiscos y coscojas). Por encima de la cota de 244m no se trata de una zona con árboles o especies protegidas sino de arbustos y herbáceas de poco valor ecológico.

Impacto sobre la fauna

El territorio en las inmediaciones del río es un área protegida y puede ser utilizado por diferentes especies como zona de cría y alimentación. Sin embargo, por la propia alteración del medio biofísico del embalse de Cedillo es una zona donde principalmente ya solo quedan especies de aves, pequeños mamíferos y algunos reptiles que tendrían que desplazarse a cazar en otras zonas.

Impacto sobre el paisaje

La operación de maquinaria, los movimientos de tierra y la construcción de varios elementos del sistema de captación, depuración y almacenamiento impactarán negativamente en la calidad del paisaje. La eliminación de la vegetación y la introducción de elementos artificiales alterarán la percepción visual del entorno.

Impacto económico

En la fase de construcción se puede generar un número importante de empleos de carácter temporal.

3.4.2 Impacto en fase de explotación

Impactos sobre la atmósfera

El mantenimiento de la instalación generará ruido debido a la presencia de personal y el uso de maquinaria. Toda la maquinaria utilizada cumplirá con las normativas vigentes sobre ruido y vibraciones. Las bombas pueden generar un ruido de baja frecuencia, sin embargo, se situarán suficientemente lejos de la población de forma que no supondrá un problema.

Los vertidos que provoque la instalación de potabilización del agua pueden provocar la acumulación de desechos derivados de la explotación cerca de las instalaciones, sin embargo, al tratarse de un agua considerada apta para el abastecimiento debido a su composición física y química no serán vertidos dañinos para el medio ambiente, principalmente coliformes.

Impacto sobre el agua

Debido a que las instalaciones de captación y tratamiento del agua no atraviesan ningún recurso hídrico no debería impactar a su deterioro, es más, el objetivo de la instalación es purificarla para hacerla apta para el consumo humano.

Impacto sobre la vegetación

En el caso de que se produjera un problema de ruptura del conducto de transporte del agua podría causar pequeñas inundaciones afectando a la flora de la zona y por tanto también a la dependiente de esa vegetación. Sin embargo, tanto las especies herbáceas como los pequeños mamíferos no son especies protegidas y la vegetación tiene poco valor ecológico.

Impacto sobre la fauna

El desplazamiento provocado a las especies de aves o pequeños mamíferos durante la fase de construcción podría revertirse en cuanto disminuya el ruido y movimiento de personal finalizada la construcción. El impacto más crítico será en la inmediación del río donde se construirá la bocatoma. Esta instalación puede afectar el desplazamiento de peces y otros alimentos a otras zonas del río, afectando a la fauna de aves y pequeños mamíferos en la zona.

Impacto sobre el paisaje

El impacto sería principalmente visual al contar con instalaciones de toma de agua (bocatoma), bombeo, potabilización, almacenamiento del agua y la instalación eléctrica de placas

fotovoltaicas. Sin embargo, al tratarse de una población pequeña de tan solo 433 habitantes se espera que las instalaciones ocupen poco espacio. La conducción del agua será en su mayor parte bajo tierra de forma que la conducción apenas alterará el paisaje facilitando el desarrollo de la fauna.

Impacto económico

La nueva fuente de abastecimiento de agua apta para el consumo generará un gran beneficio para el municipio de Cedillo pudiendo generar ingresos adicionales por crear empleo de mantenimiento de las instalaciones.

Además, se garantizará un suministro de energía limpia a través de las placas fotovoltaicas.

3.4.3 Matriz de impactos

Se implementará el modelo siguiente para obtener el impacto total recogido en distintas tablas de impactos y posteriormente poder determinar la matriz de importancia de los impactos.³⁰

Naturaleza	Impacto beneficioso +		Persistencia (Pe)	Fugaz	1
	Impacto perjudicial -			Temporal	2
				Permanente	4
Intensidad (I)	Baja	1	Sinergia (Si)	Simple	1
	Media	2		Sinérgico	2
	Alta	4		Muy sinérgico	4
Extensión (Ex)	Puntual	1	Rerversibilidad (Rv)	Corto plazo	1
	Parcial	2		Medio plazo	2
	Extenso	4		Irreversible	4
Momento (Mo)	Largo plazo	1	Acumulación (Ac)	Simple	1
	Medio plazo	2		Acumulativo	4
	Inmediato	4			
Efecto (Ef)	Indirecto	1	Periodicidad (Pr)	Irregular	1
	Directo	4		Periódico	2
Recuperabilidad (Mc)	Inmediata	1		Continuo	4
	Medio plazo	2	Importancia (I)	$I = (3I + 2Ex + Mo + Pe + Rv + Si + Ac + Ef + Pr + Mc)$	
	Mitigable	4			
	Irrecuperable	8			

Tabla 8. Caracterización de los impactos. Fuente: Elaboración propia, a partir de (ECO, 2020)

En esta lista se describen los factores que aparecen en la Tabla 5:

- Naturaleza: Se considera positivo si el impacto es favorable, y negativo si es perjudicial.
- Intensidad (I): Se refiere al grado de destrucción causado por la acción.

³⁰ (ECO, 2020)

-
- Extensión (Ex): Indica el área afectada por el impacto.
 - Momento (Mo): Depende de si el impacto se manifiesta a corto o largo plazo.
 - Persistencia (P): Es permanente si la alteración es indefinida, o fugaz si dura un tiempo determinado.
 - Reversibilidad (Rv): Un impacto es reversible si puede ser asimilado por el entorno a medio plazo, e irreversible si es difícil o imposible retornar a la situación anterior.
 - Sinergia (Si): Es sinérgico cuando la presencia simultánea de varios agentes amplifica el impacto, y no sinérgico si no potencia la acción de otros efectos.
 - Acumulación (A): Se considera simple si afecta a un solo componente ambiental sin inducir nuevos efectos, y acumulativo si incrementa su gravedad con el tiempo.
 - Efecto (Ef): Es directo si la incidencia es inmediata, e indirecto si el impacto deriva de un efecto primario.
 - Periodicidad (Pr): Es periódico si ocurre de manera intermitente y continua, y de aparición irregular si es imprevisible en el tiempo.
 - Recuperabilidad (Mc): Se refiere a si su reconstrucción es posible mediante medios humanos.

En las siguientes tablas se recoge la valoración de los impactos medioambientales en función de las distintas actividades de las fases de construcción y explotación.

Acondicionamiento del terreno

FACTOR	Signo	I	Ex	Mo	Pe	Rv	Si	Ac	Ef	Pr	Mc	Total (I)
Calidad del aire	-	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	-16
Vegetación interés	-	4	1	4	2	2	1	1	4	1	4	-33
Densidad vegetación	-	4	1	4	2	2	1	1	4	1	2	-31
Calidad paisaje	-	1	1	4	1	1	1	1	1	1	2	-17
Modificación paisaje	-	1	1	4	1	1	1	1	1	1	2	-17

Movimientos de tierras

FACTOR	Signo	I	Ex	Mo	Pe	Rv	Si	Ac	Ef	Pr	Mc	Total (I)
Calidad del aire	-	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	-16
Agua superficial	-	1	1	4	2	1	1	1	1	1	4	-20
Agua subterránea	-	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	-16
Morfología y pérdida suelo	-	2	1	4	2	2	1	1	4	1	2	-25
Calidad/Capacidad suelo	-	2	1	4	2	2	1	1	4	1	2	-25
Modificación paisaje	-	1	1	4	1	1	2	1	1	1	1	-17

Cimentaciones

FACTOR	Signo	I	Ex	Mo	Pe	Rv	Si	Ac	Ef	Pr	Mc	Total (I)
Morfología y pérdida suelo	-	2	1	4	2	2	1	1	4	1	2	-25
Calidad/Capacidad suelo	-	2	1	4	2	2	1	1	4	1	2	-25

Montaje

FACTOR	Signo	I	Ex	Mo	Pe	Rv	Si	Ac	Ef	Pr	Mc	Total (I)
Molestias fauna	-	2	1	4	2	2	1	1	4	1	2	-25
Calidad paisaje	-	1	1	4	2	1	1	1	4	1	2	-21

Movimientos de maquinaria

FACTOR	Signo	I	Ex	Mo	Pe	Rv	Si	Ac	Ef	Pr	Mc	Total (I)
Contam. sonora	-	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	-16
Contam. ambiental	-	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	-16
Agua superficial	-	1	1	4	2	1	1	1	1	1	2	-18
Agua subterránea	-	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	-16
Calidad/Capacidad suelo	-	2	1	4	2	2	1	1	4	1	2	-25
Modificación paisaje	-	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	-16

Cerramiento

FACTOR	Signo	I	Ex	Mo	Pe	Rv	Si	Ac	Ef	Pr	Mc	Total (I)
Densidad vegetación	-	1	1	4	1	1	2	1	1	1	1	-17
Destrucción hábitat	-	1	1	4	1	1	2	1	1	1	1	-17

Tabla 9. Valoración de los impactos en la fase de construcción. Fuente: Elaboración propia, a partir de (ECO, 2020)

Presencia elementos planta

FACTOR	Signo	I	Ex	Mo	Pe	Rv	Si	Ac	Ef	Pr	Mc	Total (I)
Molestias fauna	-	2	1	4	2	2	1	1	4	1	2	-25
Calidad paisaje	-	1	1	4	2	1	1	1	4	1	2	-21

Movimientos de maquinaria

FACTOR	Signo	I	Ex	Mo	Pe	Rv	Si	Ac	Ef	Pr	Mc	Total (I)
Contam. sonora	-	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	-16
Contam. ambiental	-	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	-16
Agua superficial	-	1	1	4	2	1	1	1	1	1	2	-18
Agua subterránea	-	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	-16
Molestias fauna	-	1	1	4	1	1	1	1	4	1	1	-19

Tabla 10. Valoración de los impactos en la fase de explotación. Fuente: Elaboración propia, a partir de (ECO, 2020)

MATRIZ DE IMPORTANCIA			Fase de construcción							Fase de explotación			
			Acondicionamiento del terreno	Movimiento tierras	Cimentaciones	Montaje	Movimiento maquinaria	Cerramiento	Empleo	Presencia elementos	Movimientos maquinaria	Cerramiento	Empleo
Medio Inerte	Atmósfera	Contaminación sonora					-16				-16		
		Contaminación ambiental	-16	-16			-16				-16		
	Agua	Calidad agua superficial		-20			-18				-18		
		Calidad agua subterránea		-16			-16				-16		
	Tierra y suelo	Morfología y pérdida de suelo		-25	-25								
		Calidad/ Capacidad		-25	-25		-25						
Medio biótico	Vegetación	Interés	-33									+	
		Densidad	-31					-17				+	
	Fauna	Destrucción hábitat						-17				+	
		Molestias fauna				-25				-25	-19	+	
Medio perceptual	Paisaje	Calidad intrínseca	-17			-21				-21			
		Modificación paisaje	-17	-17									

Tabla 11. Matriz de importancia. Fuente: Elaboración propia, a partir de (ECO, 2020)

En la matriz no se recogen los impactos en el medio rural y medio socioeconómico ya que solo aportan impactos positivos y para el análisis del impacto y los riesgos del proyecto es necesario tener en cuenta los negativos por separado para tomar las medidas apropiadas.

3.4.4 Conclusiones relativas al impacto medioambiental

Para obtener una evaluación final de los impactos se ha decidió emplear un método de valoración relativa ponderando cada impacto según su importancia con un valor sobre 100. A su vez, se calculará el valor del impacto promedio según las actividades de construcción y

explotación que incrementen ese impacto. Finalmente, el valor final se obtendrá multiplicando el valor porcentual asignado a cada impacto por su valor promedio.

FACTOR	Valor porcentual	Valor Impacto Promedio	Valor Final
Contam. sonora	8%	-16,00	-1,28
Contam. ambiental	10%	-16,00	-1,60
Calidad agua superficial	8%	-18,67	-1,49
Calidad agua subterránea	8%	-16,00	-1,28
Morfología y pérdida de suelo	10%	-25,00	-2,50
Calidad/Capacidad	10%	-25,00	-2,50
Vegetación interés	8%	-33,00	-2,64
Vegetación densidad	6%	-24,00	-1,44
Destrucción hábitat	8%	-17,00	-1,36
Molestias fauna	10%	-23,00	-2,30
Calidad intrínseca	7%	-19,67	-1,38
Modificación paisaje	7%	-17,00	-1,19
Total	100%		-20,96

Tabla 12. Resultados de impacto de la actividad. Fuente: Elaboración propia, a partir de (ECO, 2020)

$I \leq 25$ Compatible
$25 < I < 50$ Moderado
$50 < I < 75$ Severo
$75 < I < 100$ Crítico

Tabla 13. Niveles de compatibilidad según la importancia. Fuente: Elaboración propia, a partir de (ECO, 2020)

Se puede observar en la Tabla 10 que la actividad es completamente compatible. El medio más afectado es la vegetación de interés debido al impacto de la construcción en las inmediaciones del río donde abunda la vegetación de especies esclerófilas y de algunas encinas que desaparecerían de forma permanente para dar lugar a las instalaciones de captación y bombeo.

El segundo medio más afectado es el suelo principalmente debido a los movimientos de tierras para dar lugar a las instalaciones, así como el riesgo de vertidos por parte de los equipos eléctricos.

La fauna también se verá considerablemente afectada por el impacto de las instalaciones que se construyen con carácter permanente y de los efectos de construcción y montaje. Tal y como se explicaba anteriormente algunas especies de aves y pequeños mamíferos tendrán que buscar otros lugares donde buscar alimento. El impacto principal sobre la fauna tal y como ocurre con la vegetación también se produce en las inmediaciones del río.

3.4.5 Medidas preventivas y correctoras

Se ha diseñado un conjunto de medidas específicas para cada medio afectado, con el objetivo de evitar, reducir y compensar cualquier efecto negativo causado por el proyecto. Estas medidas, en su mayoría preventivas, incluyen acciones correctoras para minimizar los aspectos negativos y compensar las deficiencias inducidas por las acciones del proyecto. El propósito es reducir las consecuencias adversas, disminuir los costes operativos y, principalmente, los costes de restauración. Las medidas se diferencian según los elementos del medio ambiente a los que se aplican.³¹

Calidad del aire

La maquinaria utilizada en las obras debe ser puesta a punto por un servicio autorizado o contar con documentos que acrediten la inspección técnica, cumpliendo con la legislación vigente. Además, se garantizará el buen mantenimiento de la maquinaria durante el desarrollo y ejecución de las obras.

Se deberán controlar los movimientos de tierra, seleccionando adecuadamente las zonas de depósito para optimizar el transporte. Es necesario regar las superficies expuestas al viento, especialmente en caminos de tránsito de vehículos, para reducir la emisión de polvo y partículas.

Contaminación sonora

Para reducir el ruido en el entorno de trabajo, se recomienda la adquisición de maquinaria y equipos nuevos que emitan menos ruido. Es necesario diseñar un plan de control que incluya la elaboración de mapas de ruido para evaluar la exposición de los trabajadores y los posibles efectos en la fauna.

Se deben instalar materiales como gomas o amortiguadores en los soportes de los equipos y realizar controles periódicos de las emisiones de ruido durante la fase de construcción. Además,

³¹ (ECO, 2020)

los trabajadores deben usar protectores auditivos siempre que sea necesario, siguiendo la Normativa de Seguridad e Higiene en el trabajo.

Conservación del suelo

Será necesario elaborar un plan de rutas que utilice las vías existentes para acceder a las zonas de obra, acopio de materiales, instalaciones auxiliares y vertederos. Antes de iniciar las obras, se debe gestionar adecuadamente la tierra vegetal mediante su retirada, acopio, mantenimiento y extendido, almacenándola en áreas designadas libres de vegetación.

Las zanjas deben estar señalizadas y protegidas para evitar accidentes y proteger los espacios colindantes. Es crucial evitar movimientos de tierra durante las épocas de mayor pluviosidad para prevenir la erosión. Además, se debe minimizar la afectación a zonas pobladas de árboles para prevenir la erosión en áreas donde la vegetación juega un papel protector.

Implementar canales de control para gestionar el agua de escorrentía es fundamental para evitar la erosión en áreas vulnerables.

Calidad del agua

Es necesario disponer de un sistema de recogida de aguas residuales independiente del sistema general en las zonas de almacenamiento. Además, es esencial utilizar equipos de fácil limpieza y colocar rejillas en los sumideros para impedir que los restos de descarga contaminen las aguas.

También se debe establecer un sistema de recogida de lixiviados para evitar vertidos incontrolados y suelos desprotegidos. Es crucial tener procedimientos escritos que indiquen las acciones a seguir en caso de derrames, incluyendo el orden de las acciones y los materiales a utilizar.

Finalmente, es importante no modificar el régimen hidrológico actual de la zona. Por lo tanto, las vías de acceso deben contar con suficientes estructuras de drenaje transversal, adecuadamente dimensionadas para evitar acumulaciones de agua durante periodos de máxima precipitación.

Conservación de la vegetación

Para proteger la vegetación circundante durante la construcción se delimitarán las áreas a ocupar, como plataformas y caminos, para evitar la destrucción innecesaria de vegetación. Esto

implica un correcto balizamiento de las zonas utilizadas para tareas de construcción y áreas de ocupación definitiva, como zonas de tránsito de camiones y acopio de tierras.

La maquinaria y el material se mantendrán siempre dentro de las áreas delimitadas. Como medida correctora, una vez finalizadas las obras, se realizarán trabajos de restauración ambiental. También se estudiará la posibilidad de recolocar los apoyos para preservar la vegetación autóctona. En lugar de talar, se procederá a podar los árboles cuando sea necesario. Solo se eliminará la vegetación estrictamente necesaria mediante desbroce, sin utilizar fuego o herbicidas.

Conservación de la fauna

Para proteger la fauna local y minimizar el impacto de las obras se evitarán ruidos y vibraciones intensas, especialmente durante las épocas de cría y reproducción. La fauna puede verse afectada tanto por el ruido como por la alteración de su hábitat.

Las obras y movimientos de tierra se ajustarán a la fenología de la fauna autóctona y no se realizarán trabajos nocturnos. Además, se restringirá la circulación de personas y vehículos a las áreas estrictamente necesarias dentro del sitio de la obra. Asimismo, el vallado deberá seguir las especificaciones del Decreto 226/2013, que regula las condiciones para la instalación, modificación y reposición de cerramientos cinegéticos y no cinegéticos en Extremadura.

Medidas de apoyo socioeconómico

Para promover el desarrollo local, se recomienda utilizar la mayor cantidad posible de mano de obra local y emplear materiales y servicios de los municipios cercanos. Se reforzará la señalización en las infraestructuras viales afectadas, y los transportes por carretera se realizarán en horas de menor tráfico para minimizar el impacto, cumpliendo con las normas establecidas para transportes especiales. Además, la instalación contará con un cerramiento en todo su perímetro para prevenir la entrada de personas y evitar accidentes.

3.5 Estudio climatológico previo a la instalación eléctrica

Realizar un estudio climatológico es esencial para la instalación de una planta fotovoltaica debido a la influencia directa de la radiación solar en su rendimiento. Este estudio proporciona información crucial sobre la cantidad promedio de radiación solar en la zona, permitiendo

calcular la producción de energía esperada y planificar el suministro durante diferentes épocas del año.

Además, con este estudio climatológico se analizará la variabilidad estacional y las condiciones meteorológicas como nubosidad, lluvia, nieve y polvo, que pueden afectar la eficiencia de los paneles solares. También considera las temperaturas extremas, las cuales pueden influir negativamente en el rendimiento de los paneles y otros componentes del sistema.

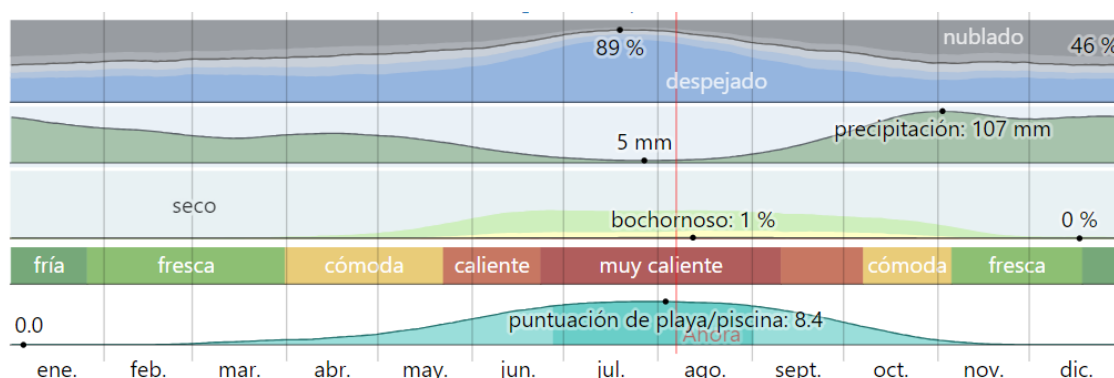


Gráfico 3. Gráfico multivariable del clima en Cedillo. Fuente: Weatherspark

En este gráfico se pueden observar las épocas del año en las que la temperatura es más cálida y la cantidad de nubosidad y precipitaciones. En los gráficos siguientes se estudiará cada variable en más detalle.

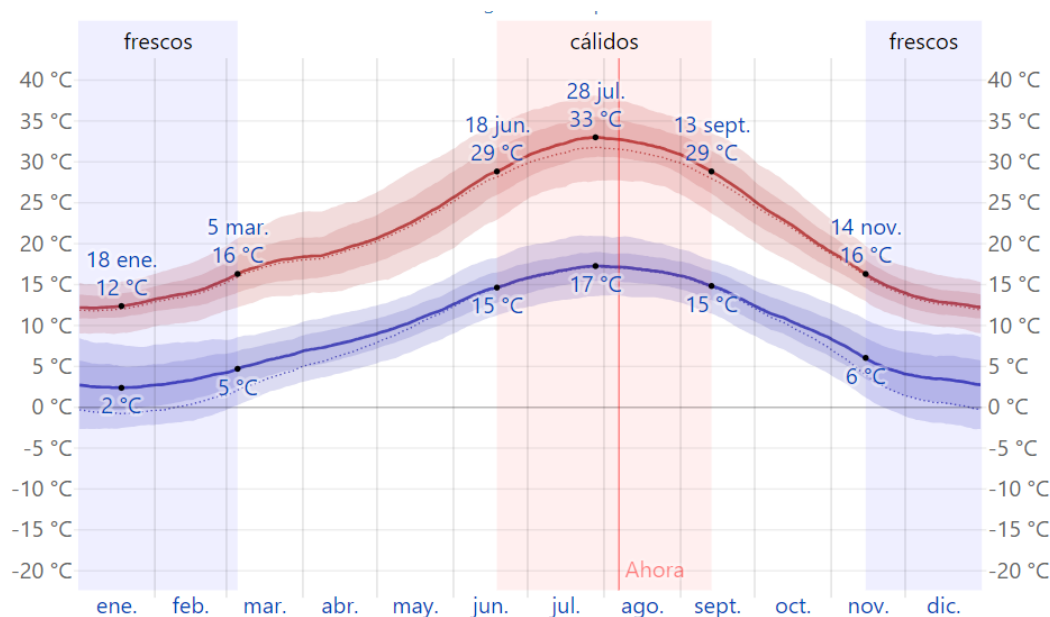


Gráfico 4. Temperaturas máximas y mínimas promedio en Cedillo. Fuente: Weatherspark

Por medio de este gráfico se obtienen las temperaturas máxima y mínima que nos permitirán obtener las tensiones y corrientes límite de entrada al inversor, corregidas por el factor de temperatura (3°C – 38°C).

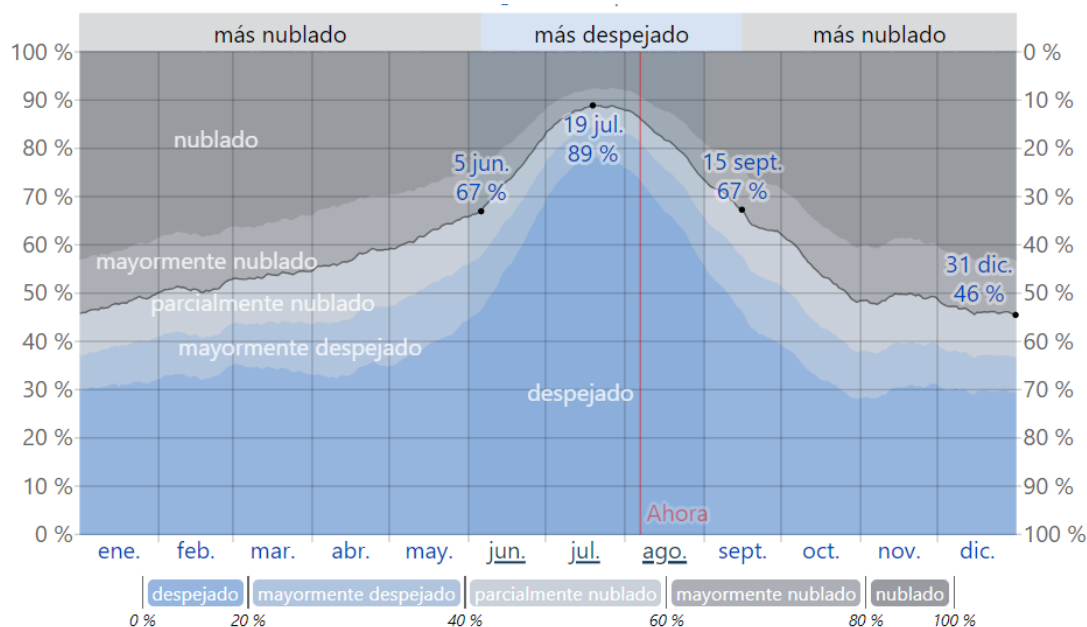


Gráfico 5. Categorías de nubosidad en Cedillo. Fuente: Weatherspark

Este gráfico indica que en invierno la eficiencia de la instalación fotovoltaica se verá considerablemente reducido por el aumento de nubosidad.

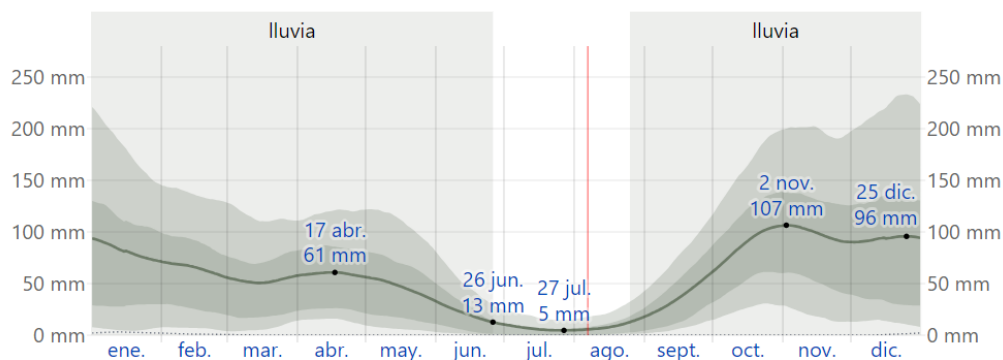


Gráfico 6. Promedio mensual de lluvia en Cedillo. Fuente: Weatherspark

Las cantidades de lluvia muestran una gran variabilidad entre estaciones.

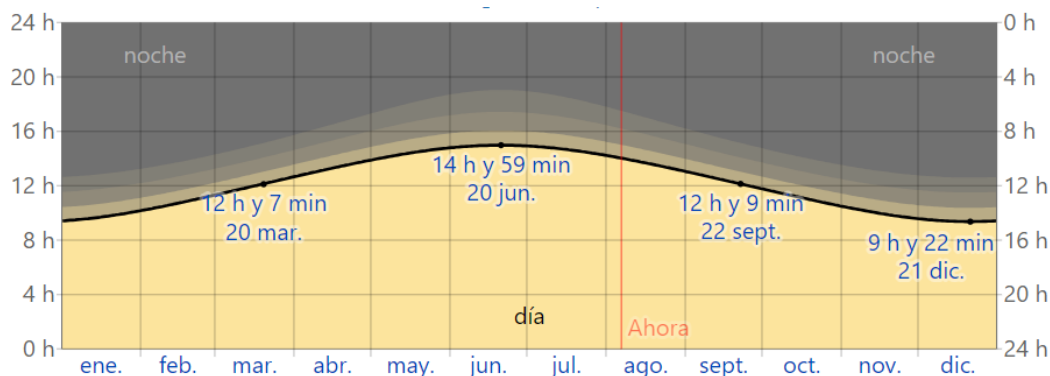


Gráfico 7. Horas de luz natural y crepúsculo en Cedillo. Fuente: Weatherspark

Este gráfico es fundamental para entender las horas disponibles de producción de energía que tendrá la instalación fotovoltaica. Por la noche será necesario conectarse a la red para obtener agua del río.

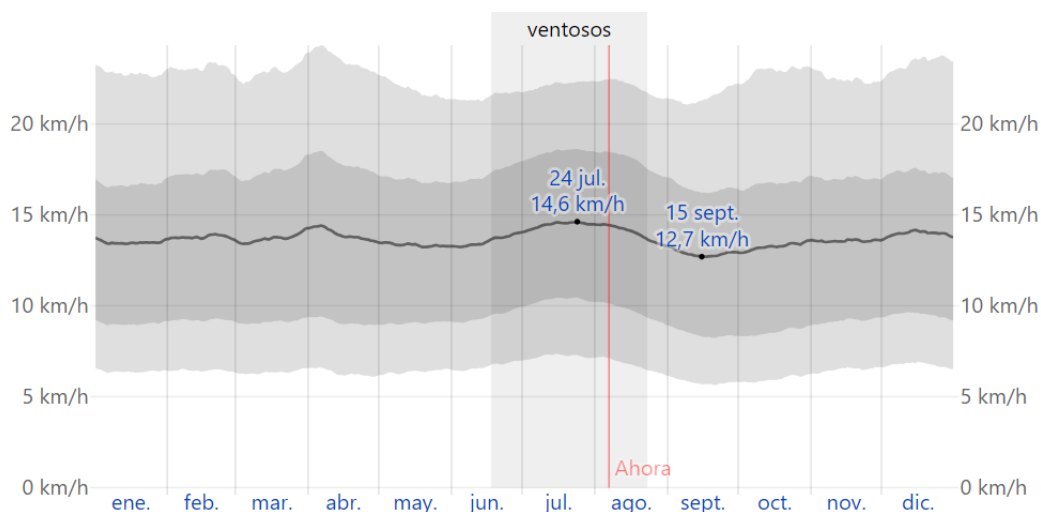


Gráfico 8. Velocidad promedio del viento en Cedillo. Fuente: Weatherspark

La velocidad máxima a la que sopla el viento no se considerará un factor importante a tener en cuenta por ser ligeramente superior a niveles normales (9 km/h). Con los soportes de las placas, el diseño de tanques cerrados y casetas para el inversor y otros aparatos de medida se considera medida de suficiente para prevenir incidentes debido al viento.

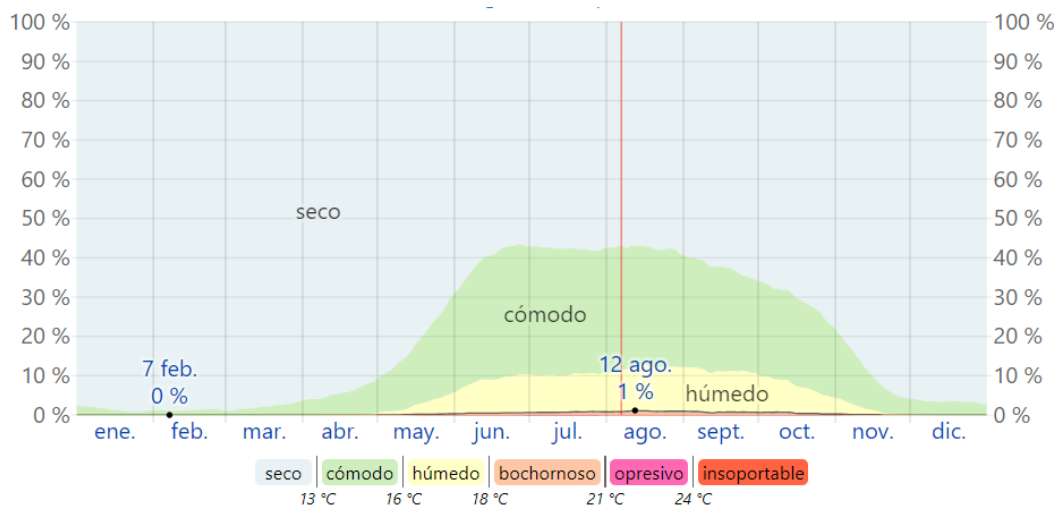


Gráfico 9. Niveles de humedad en Cedillo. Fuente: Weathespark

Debido a que la humedad es muy baja en todo el año en la localidad de Cedillo las placas no se limpiarán de forma natural y habrá que hacer revisiones periódicas para quitar polvo y suciedad. Este proceso debería ser sencillo debido a que el tamaño de la instalación será pequeño. Además, el mantenimiento periódico de la instalación es una buena oportunidad para generar puestos de empleo estables en la población local.

3.6 Normativa

A continuación, se proporciona una lista de la normativa eléctrica y civil que debería seguir el proyecto en líneas generales.

Normativa eléctrica

1. **Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT)** - Real Decreto 842/2002:
 - Establece las condiciones técnicas y garantías que deben cumplir las instalaciones eléctricas en baja tensión.
2. **Código Técnico de la Edificación (CTE)** - Documento Básico HE Ahorro de Energía:
 - Regula las condiciones mínimas de eficiencia energética que deben cumplir las instalaciones de suministro de energía.
3. **Reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión (RLAT)** - Real Decreto 223/2008:
 - Abarca las especificaciones técnicas y condiciones de seguridad para las líneas eléctricas de alta tensión.

4. Norma UNE 206007 IN sobre instalación de sistemas fotovoltaicos:

- Especificaciones para el diseño y montaje de instalaciones fotovoltaicas conectadas a red y aisladas.

5. Real Decreto 244/2019:

- Regula las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica.

Normativa civil y de construcción

1. Código Técnico de la Edificación (CTE):

- Incluye los Documentos Básicos DB-SI (Seguridad en caso de Incendio), DB-SUA (Seguridad de Utilización y Accesibilidad), DB-HS (Salubridad), y DB-SE (Seguridad Estructural).

2. Ley 38/1999, de Ordenación de la Edificación (LOE):

- Establece las obligaciones y responsabilidades en materia de edificación, incluyendo la calidad de la construcción y el diseño arquitectónico.

3. Reglamento de Infraestructuras Comunes de Telecomunicaciones (ICT):

- Requisitos para las infraestructuras de telecomunicaciones en los edificios y su adecuación a nuevas tecnologías.

4. Real Decreto 1627/1997 sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción:

- Define las obligaciones en materia de seguridad y salud durante la fase de ejecución de las obras.

5. Normativa Medioambiental (Ley 21/2013, de Evaluación Ambiental):

- Establece la necesidad de realizar estudios de impacto ambiental para proyectos de cierta envergadura, que afecten al medio ambiente, como en el caso de captación de agua.

Capítulo 4. Diseño de las instalaciones

En este capítulo, se abordará el diseño detallado de las instalaciones clave para la captación, tratamiento y distribución de agua, así como la infraestructura eléctrica necesaria para garantizar el autoconsumo eficiente de energía. El proceso de diseño comienza con la instalación de captación de agua, donde se desarrollarán los aspectos técnicos de la bocatoma de fondo, la conducción bocatoma-desarenador, y el desarenador mismo, fundamentales para asegurar una captación efectiva y segura del recurso hídrico.

Además, se detallará el diseño del sistema de bombeo y el sistema de cloración, que son críticos para garantizar el suministro continuo y la calidad del agua. El diseño del tanque de almacenamiento cerrará esta sección, enfocándose en la capacidad y estructura óptimas para asegurar una reserva adecuada.

La segunda parte del capítulo se centrará en el diseño de la instalación eléctrica de autoconsumo, comenzando con la selección de las placas fotovoltaicas y el inversor, componentes esenciales para la generación y conversión de energía. Se explorará el diseño del cableado y las protecciones necesarias para garantizar la seguridad y eficiencia del sistema. Finalmente, se considerará el uso de PVsyst, una herramienta de simulación y diseño que optimiza el rendimiento de la instalación fotovoltaica.

4.1 Diseño de la instalación de captación de agua

En este capítulo se llevarán a cabo los diseños de las instalaciones necesarias para la captación, tratamiento y almacenamiento del agua. Tal y como se define en los objetivos del proyecto el diseño se centra en cálculos hidráulicos para dimensionar la bocatoma, el bombeo, la conducción del agua desde la bocatoma hasta el tanque de almacenamiento, la instalación de cloración, el desarenador y por último el tanque de almacenamiento. Se realizarán esquemas básicos para determinar el emplazamiento de estas instalaciones, sin embargo, no se llevará a cabo un diseño o estudio de las cimentaciones y obras civiles necesarias.

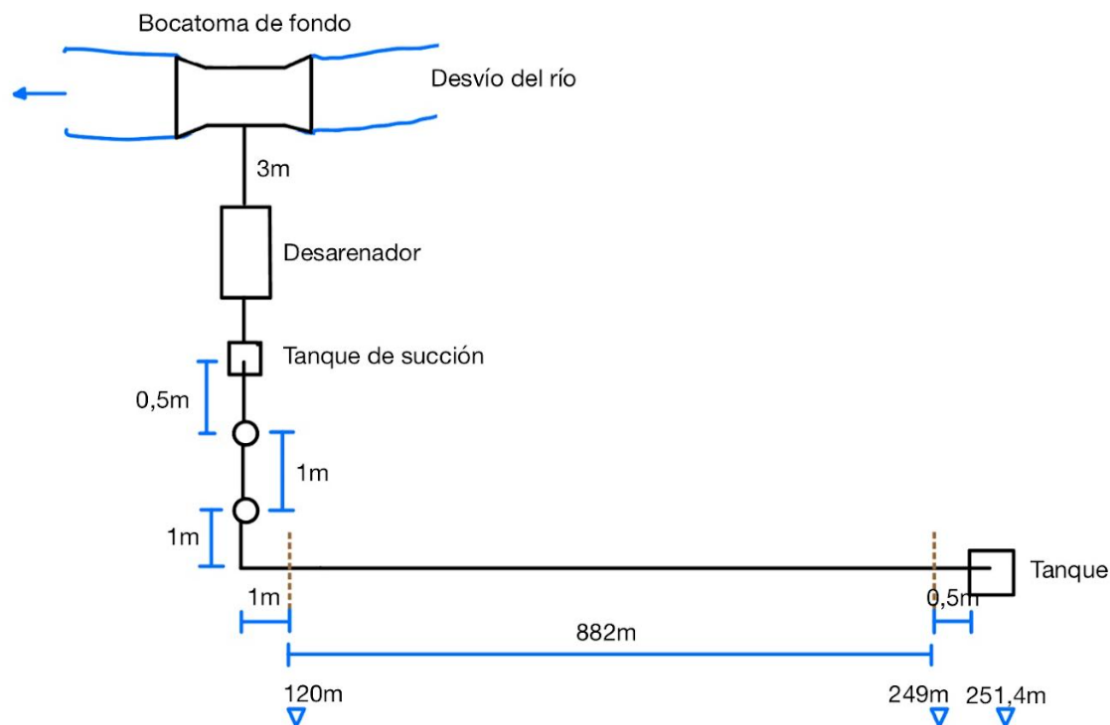


Imagen 18. Esquema no a escala de la captación e impulsión del agua. Fuente: Elaboración propia

El diseño de la instalación en el Anexo I muestra una imagen aérea sobre el plano catastral de Cedillo que aporta más información acerca de la localización de las instalaciones. Las ilustraciones sobre el plano se ajustan a la escala, pero no de forma exacta. Del mismo modo, tan solo se muestran los elementos principales de la instalación de modo esquemático.

Hipótesis de partida

El estudio hidrológico previo sobre la cuenca del Tajo en el municipio de Cedillo indica que el caudal puede llegar a oscilar entre $53,08 \text{ m}^3/\text{s}$ y $630,48 \text{ m}^3/\text{s}$ en su mínimo y máximo.

Tras realizar algunas iteraciones en el cálculo de la estructura de captación se obtuvieron unas medidas muy poco razonables. Estos valores de caudal requerirían muros de contención similares a los de una presa de considerable tamaño (30 m).

De este modo se ha decidido simular que en el lugar donde se quiere realizar la captación de agua hay una desviación del río donde la anchura es tan solo de 1,5 m.

A su vez, el caudal que transcurre por esta hipotética desviación del Tajo tendrá un valor máximo de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ y un valor promedio de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$, de esta manera se simplificarán los cálculos y serán razonables. Estos cálculos afectarán a la estructura de la bocatoma, sin embargo, la potencia final

requerida para elevar el agua hasta el pueblo no se verá afectada porque se mantendrá el valor del caudal de diseño calculado en el estudio demográfico.

4.1.1 Diseño de la bocatoma de fondo

Inicialmente debemos comprobar que el caudal de diseño (caudal máximo diario) se inferior al caudal mínimo del río en el lugar donde se quiere hacer la captación.

Los parámetros de diseño recogidos mediante los estudios previos son los siguientes:

- Población de diseño: En el año 2023 se estima una población del municipio de Cedillo de 433 habitantes y será esta nuestra población de trabajo.
- Caudal de diseño: El caudal máximo diario para la misma fecha es de 1,244 L/s.
- Aforo del río: El caudal máximo es de 1,0 m³/s y el caudal promedio de 0,2 m³/s. Además, se supondrá un caudal mínimo de 50 L/s (en régimen de tiempo seco).
- Ancho del río: El ancho del río en el lugar de captación es de 1,5 m.

El caudal de diseño es muy inferior al caudal mínimo del río de 50 L/s y por tanto se puede dar por válido la factibilidad del proyecto.

Partiendo de estas hipótesis iniciales a continuación se dimensionarán los distintos elementos que componen la bocatoma. La bocatoma de fondo en cuestión tiene el diseño que se muestra en las vistas siguientes:

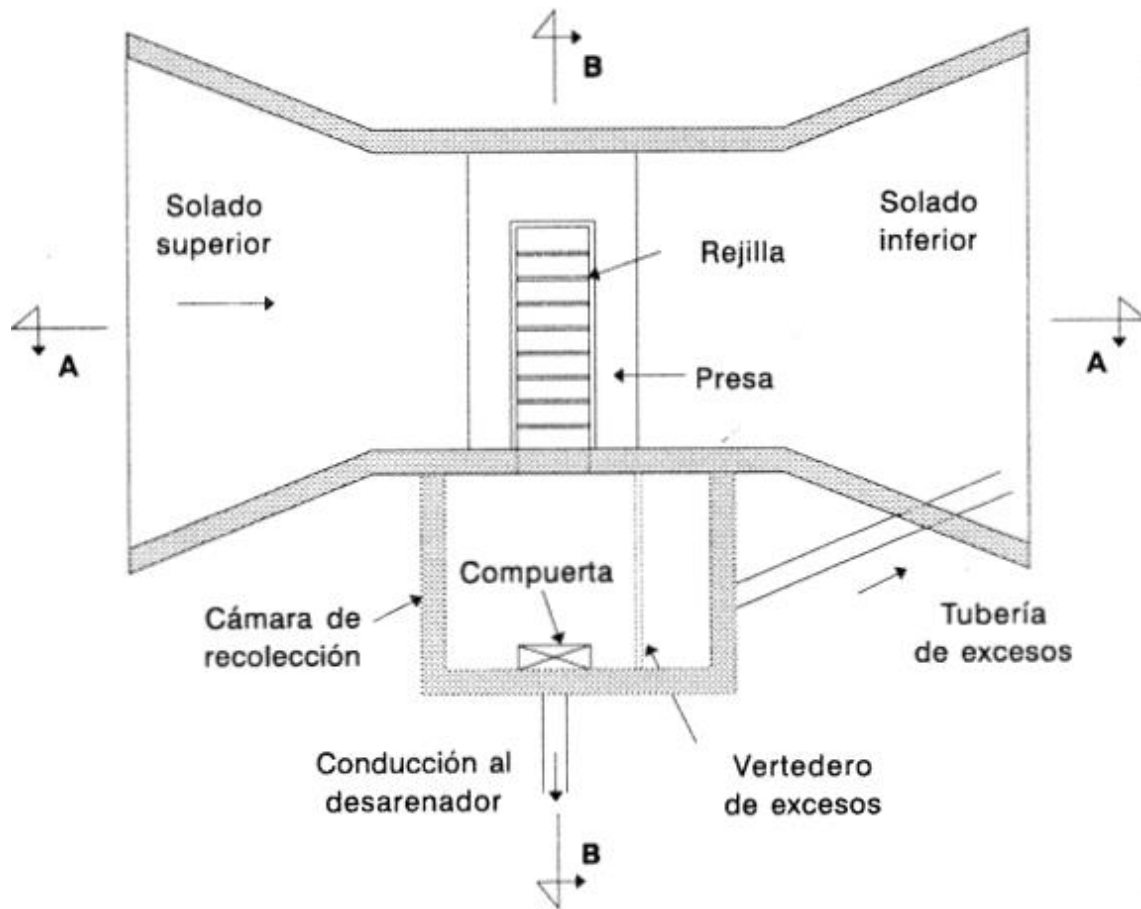


Imagen 19. Bocatoma de fondo (planta). Fuente: (Cualla, 2000)

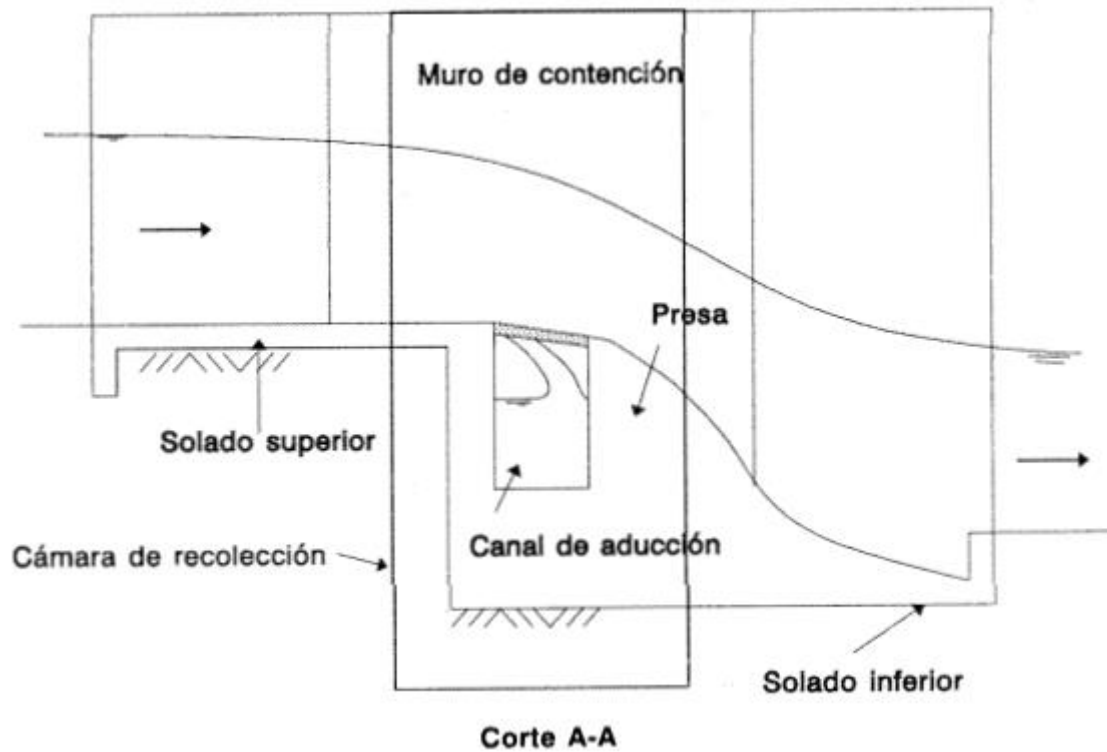


Imagen 20. Bocatoma de fondo (corte longitudinal). Fuente: (Cualla, 2000)

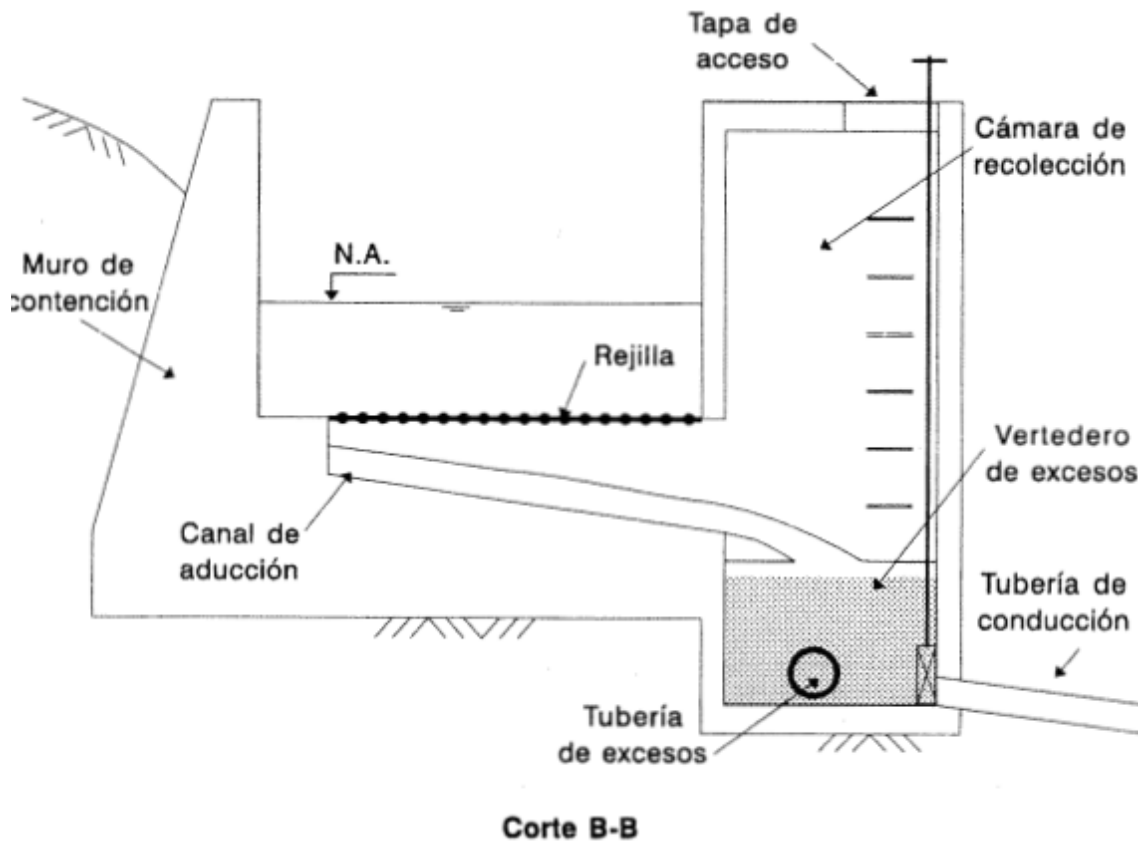


Imagen 21. Bocatoma de fondo (corte transversal). Fuente: (Cualla, 2000)

La bocatoma se construirá de forma que cubra todo el ancho del río tal y como se muestra en la siguiente imagen de ejemplo.



Imagen 22. Ilustración de una bocatoma de fondo. Fuente: Google imágenes.

Diseño de la presa

La cota superior de la presa estará al mismo nivel de la cota del fondo del río y en su interior se encuentra el canal de aducción.

Inicialmente se debe obtener el valor de la lámina de agua para las condiciones de diseño (caudal máximo diario). Se emplea la siguiente expresión:

$$H = \left(\frac{Q}{1,84 \cdot L} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{0,001244}{1,84 \cdot 1,0} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,0077 \text{ m} \quad (4)$$

Se supone el ancho de la presa L de 1,0 m.

La existencia de contracciones laterales obliga a realizar una corrección de la longitud de vertimiento, según indica esta expresión:

$$L' = L - 0,1 \cdot n \cdot H = 1,0 - 0,1 \cdot 2 \cdot 0,0077 = 0,99 \text{ m} \quad (5)$$

En esta expresión n corresponde al número de contracciones laterales, en este caso existen dos.

La velocidad del agua sobre la rejilla se obtiene de la siguiente expresión:

$$V_r = \frac{Q}{L' \cdot H} = \frac{0,001244}{0,99 \cdot 0,0077} = 0,16 \text{ m/s} \quad (6)$$

Diseño de la rejilla y el canal de aducción

Para determinar el ancho del canal de aducción se emplean las siguientes expresiones de alcance de un chorro de agua:

$$X_s = 0,36 \cdot V_r^{\frac{2}{3}} + 0,60 \cdot H^{\frac{4}{7}} = 0,14 \text{ m} \quad (7)$$

$$X_i = 0,18 \cdot V_r^{\frac{4}{7}} + 0,74 \cdot H^{\frac{3}{4}} = 0,08 \text{ m} \quad (8)$$

$$B = X_s + 0,10 = 0,24 \text{ m} \quad (9)$$

Se empleará un valor de B de 0,4 m debido a que es el mínimo indicado para el ancho de la rejilla.

En estas expresiones los parámetros indican lo siguiente:

$$X_s = \text{alcance filo superior (m)}$$

$$X_i = \text{alcance filo inferior (m)}$$

$$V_r = \text{velocidad del río (m/s)}$$

$$H = \text{profundidad de la lámina de agua sobre la presa (m)}$$

$$B = \text{ancho del canal de aducción (m)}$$

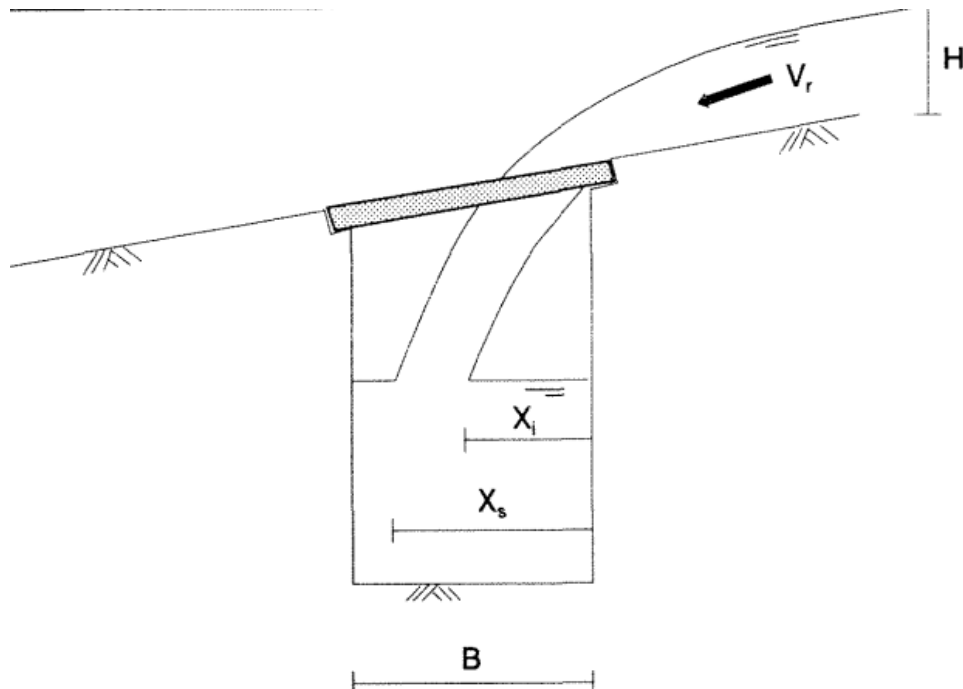


Imagen 23, Captación a través de la rejilla al canal de aducción. Fuente: (Cualia, 2000)

La longitud de la rejilla y el número de orificios

Se adoptarán barrotes de media pulgada (0,0127m) típicamente utilizados en instalaciones de este tipo. Además, la separación entre los barrotes deberá de tener 5 cm. Por otra parte, se asumirá una velocidad entre barrotes de 0,10 m/s (V_b), ligeramente inferior a la velocidad del agua que llega sobre la rejilla.

Para calcular el área neta (A_n) que debería tener la rejilla se emplea la siguiente expresión:

$$A_n = \frac{Q}{0,9 \cdot V_b} = 0,014 \text{ m}^2 \quad (10)$$

A su vez, la longitud de la rejilla se calcula con la siguiente expresión:

$$L_r = A_n \cdot \frac{a + b}{a \cdot B} = 0,014 \cdot \frac{0,05 + 0,0127}{0,05 \cdot 0,4} = 0,043 \text{ m} \quad (10)$$

En esta expresión los parámetros indican:

A_n = área neta de la rejilla (m^2)

a = separación entre barrotes (m)

b = diámetro de los barrotes (m)

Este valor de longitud de la rejilla es muy pequeño debido a la baja demanda de caudal por parte de la población de Cedillo. Este tipo de tomas de agua se suele emplear para abastecer demandas de caudales mayores. Sin embargo, se ha escogido este tipo de bocatoma debido a su sólida estructura y funcionalidad para la hipótesis de diseño de la desviación del Tajo.

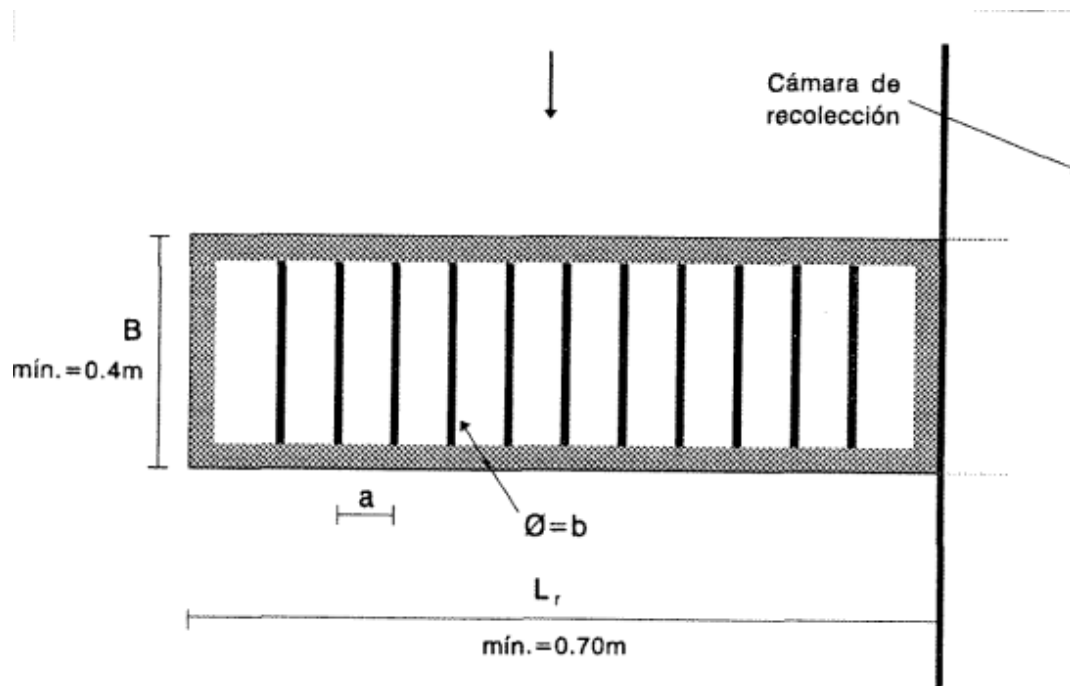


Imagen 24. Rejilla de captación. Fuente: (Cualla, 2000)

Finalmente debido a las condiciones mínimas de tamaño de la rejilla se ha decidido dimensionar la longitud a 0,70 m. Por tanto, el área de la rejilla:

$$A_n = \frac{0,05}{0,05 + 0,0127} \cdot 0,40 \cdot 0,70 = 0,223 \text{ m}^2 \quad (11)$$

El número de orificios se obtiene con la siguiente expresión:

$$N = \frac{A_n}{a \cdot B} = \frac{0,223}{0,05 \cdot 0,40} = 11,16 \text{ orificios} \quad (12)$$

Las condiciones finales ajustadas para 12 orificios:

$$A_n = a \cdot B \cdot N = 0,24 \text{ m}^2 \quad (13)$$

Finalmente, la velocidad entre barrotes se obtiene de nuevo con el área actualizada mediante la siguiente expresión:

$$V_b = \frac{Q}{K \cdot A_n} = \frac{0,001244}{0,9 \cdot 0,24} = 0,0057 \text{ m/s} \quad (14)$$

$K = 0,9$ para flujo paralelo a la sección

$$L_r = A_n \cdot \frac{a + b}{a \cdot B} = 0,24 \cdot \frac{0,05 + 0,0127}{0,05 \cdot 0,4} = 0,75 \text{ m} \quad (15)$$

Niveles de agua en el canal de aducción

En las siguientes imágenes se muestran las vistas del canal de aducción. Se supondrá que todo el volumen de agua será captado por este canal.

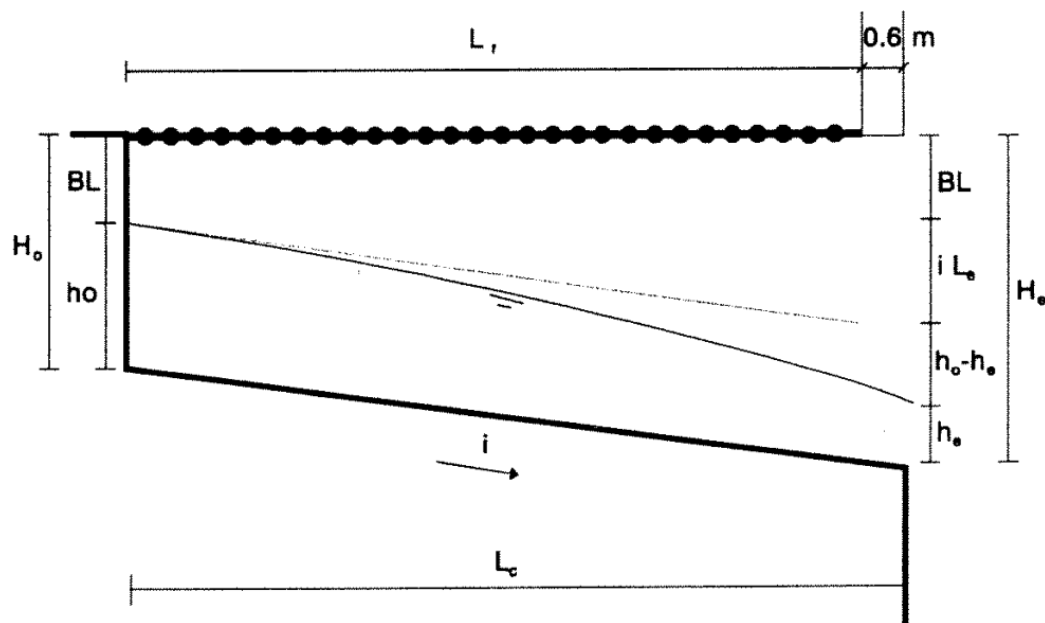
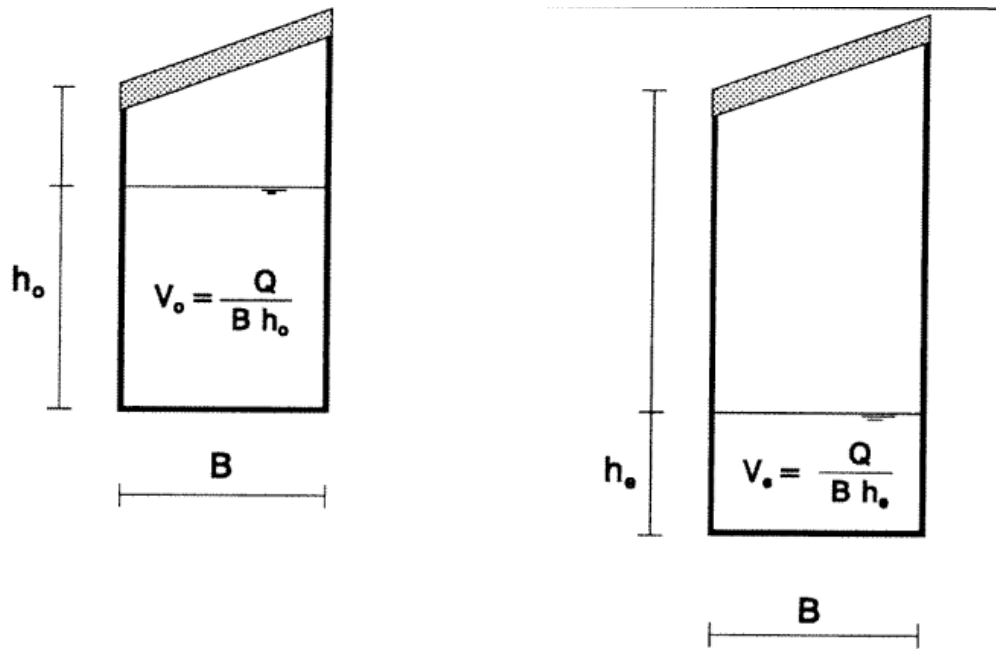


Imagen 25. Perfil del canal de aducción. Fuente: (Cualla, 2000)

Se puede apreciar en la imagen que existe un borde libre (BL) que se establecerá en 15 cm.



CORTE AGUAS ARRIBA

CORTE AGUAS ABAJO

Imagen 26. Cortes transversales en el canal de aducción. Fuente: (Cualla, 2000)

El nivel de la lámina de aguas abajo se obtiene mediante la siguiente expresión que analiza la cantidad de movimiento en el canal:

$$h_c = h_e = \left(\frac{Q^2}{g \cdot B^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{0,001244}{9,81 \cdot 0,40^2} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,09 \text{ m} \quad (16)$$

$$L_c = L_r + \text{espesor del muro} = 0,75 + 0,3 = 1,05 \text{ m} \quad (17)$$

Se supondrá un espesor del muro de la cámara de recolección de 0,3 m.

El nivel de la lámina de aguas arriba:

$$h_o = \left[2 \cdot h_e^2 + \left(h_e - \frac{i \cdot L_r}{3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{2}{3} \cdot i \cdot L_r = 0,13 \text{ m} \quad (18)$$

h_o = profundidad aguas arriba (m)

h_e = profundidad aguas abajo (m)

h_c = profundidad crítica (m)

i = pendiente del fondo del canal, se asume un 3%

$$g = \text{acción de la gravedad } (9,81 \text{ m/s}^2)$$

Finalmente, los niveles de las láminas tienen los siguientes valores:

$$H_o = h_o + BL = 0,13 + 0,15 = 0,28 \text{ m} \quad (19)$$

$$H_e = h_e + (h_o - h_e) + i \cdot L_c + BL = 0,31 \text{ m} \quad (20)$$

De este modo la velocidad al final del canal corresponde:

$$V_e = \frac{Q}{B \cdot h_e} = \frac{0,001244}{0,4 \cdot 0,09} = 0,035 \text{ m/s} \quad (21)$$

Diseño de la cámara de recolección

En la siguiente imagen se muestra como el agua abandona el canal de conducción para llegar a la cámara de recolección:

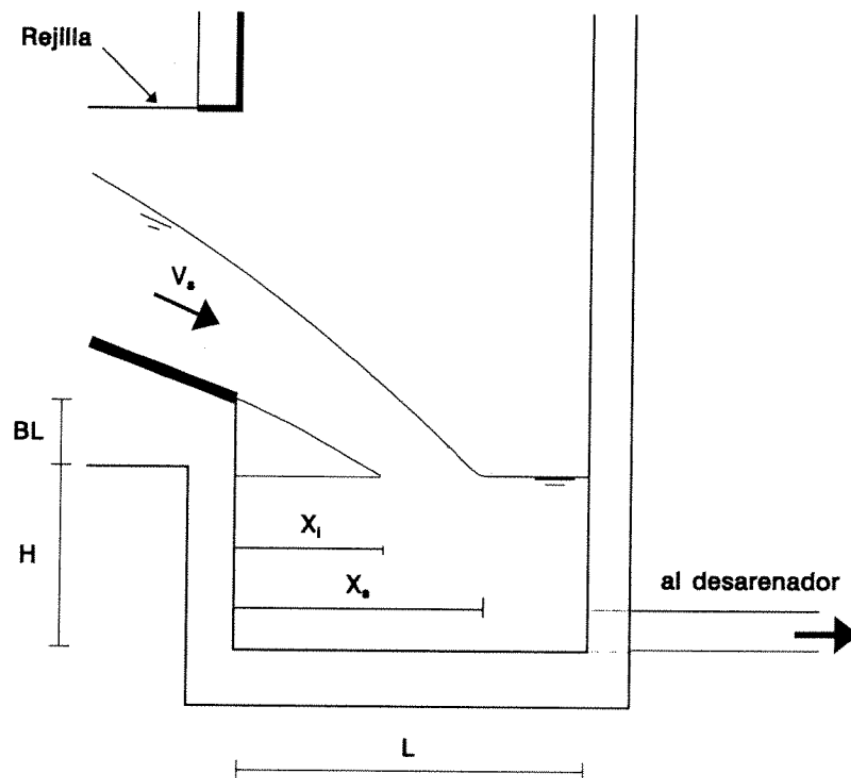


Imagen 27. Corte de la cámara de recolección. Fuente: (Cualla, 2000)

Para dimensionar la cámara es necesario emplear de nuevo las expresiones de alcance de un chorro de agua.

$$X_s = 0,36 \cdot V_e^{\frac{2}{3}} + 0,60 \cdot h_e^{\frac{4}{7}} = 0,19 \text{ m} \quad (22)$$

$$X_i = 0,18 \cdot V_e^{\frac{4}{7}} + 0,74 \cdot h_e^{\frac{3}{4}} = 0,15 \text{ m} \quad (23)$$

Finalmente, la dimensión del lado de la cámara de recolección cuadrada:

$$L_{\text{cámara}} = X_s + 0,3 = 0,19 + 0,3 = 0,49 \text{ m} \quad (24)$$

Interesa que las dimensiones de la cámara sean óptimas para su adecuado mantenimiento. De este modo se ha decidido ampliar la cámara a 1,5 m de lado para que resulte más sencillo acceder a ella en caso de que hubiera algún problema.

Cálculo de la altura de los muros de contención'

Se dimensionará a partir del máximo caudal establecido en las hipótesis iniciales:

$$H = \left(\frac{Q}{1,84 \cdot L} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{1,00}{1,84 \cdot 1,0} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,67 \text{ m} \quad (25)$$

El muro se dimensionará para que tenga 1,00 m de altura y así que un borde libre de 33 cm.

Cálculo del caudal de excesos

Se dimensionará con el caudal promedio del río de 0,2 m³/s. Se emplea el caudal promedio del río para dimensionar el caudal de excesos ya que se supone que el caudal que entra en la bocatoma por la rejilla deberá ser mayor al caudal de diseño teniendo en cuenta que habrá pérdidas por el caudal de excesos.

$$H = \left(\frac{Q}{1,84 \cdot L} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{0,2}{1,84 \cdot 1,0} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,23 \text{ m} \quad (26)$$

Para obtener el caudal captado por el conducto de excesos se emplea la siguiente expresión:

$$Q_{\text{captado}} = C_d \cdot A_n \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,152 \text{ m}^3/\text{s} \quad (27)$$

$$Q_{\text{captado}} = \text{Caudal a través de la rejilla (m}^3/\text{s)}$$

$$C_d = \text{Coeficiente de descarga} = 0,3$$

$$A_n = \text{Area neta de la rejilla (m}^2\text{)}$$

$H = \text{altura de la lámina de agua sobre la rejilla (m)}$

Se asume una cota de la cresta del vertedero de 60 cm. Este valor deberá verificarse cuando se calcule la conducción de la bocatoma al desarenador. Esta cota coincide con el nivel de agua que conduce al desarenador ya que ambos conductos, el del desarenador y el de excesos, salen de la cámara de recolección.

El caudal de excesos corresponderá a la diferencia entre el caudal captado y el caudal de diseño:

$$Q_{\text{excesos}} = Q_{\text{captado}} - Q_{\text{diseño}} = 0,152 - 0,001244 = 0,1507 \text{ m}^3/\text{s} \quad (28)$$

$$H_{\text{excesos}} = \left(\frac{Q}{1,84 \cdot L} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{0,1507}{1,84 \cdot 1,0} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,18 \text{ m} \quad (29)$$

$$V_{\text{excesos}} = \frac{Q_{\text{excesos}}}{L_{\text{cámara}} \cdot H_{\text{excesos}}} = \frac{0,1507}{1,5 \cdot 0,18} = 0,55 \text{ m}^3/\text{s} \quad (30)$$

Cálculo de las cotas

El fondo del río en el punto de captación es de 120 m.

Lámina de agua sobre la presa:

- Lámina para el caudal de diseño = $120 + 0,0077 \cong 120,01 \text{ m}$
- Lámina para el caudal máximo = $120 + 0,67 = 120,67 \text{ m}$
- Lámina para el caudal promedio = $120 + 0,23 = 120,23 \text{ m}$

Corona de los muros de contención = $120 + 1,00 = 121 \text{ m}$

Canal de aducción:

- Fondo de aguas abajo = $120 - 0,31 = 119,69 \text{ m}$
- Fondo de aguas arriba = $120 - 0,28 = 119,72 \text{ m}$
- Lámina aguas abajo = $119,69 + 0,09 = 119,78 \text{ m}$
- Lámina aguas arriba = $119,72 + 0,13 = 119,85 \text{ m}$

Cámara de recolección

- Cresta del vertedero = $119,69 - 0,15 = 119,54 \text{ m}$
- Fondo = $119,54 - 0,60 = 118,94 \text{ m}$

Se supondrá una altura de 60 cm para cubrir las pérdidas en la conducción de la bocatoma al desarenador. Sin embargo, este valor es tentativo y deberá corregirse en el cálculo de la conducción de la bocatoma-desarenador. A su vez, el borde libre de la cámara es de 15 cm como en el canal de aducción.

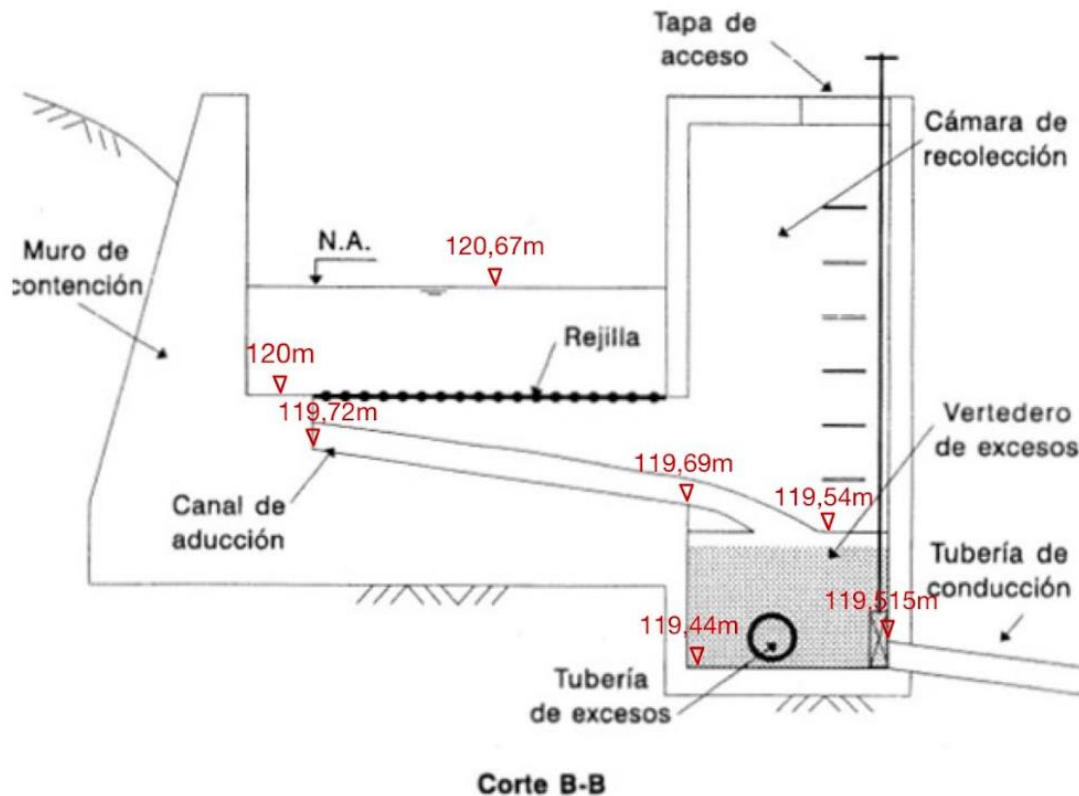


Imagen 28. Detalle de las cotas principales en la bocatoma. Fuente: Elaboración propia.

En la imagen se ha actualizado la cota de la cámara de recolección según la verificación calculada en el apartado siguiente. De este modo las cotas en la cámara de recolección son:

- Cresta del vertedero = $119,69 - 0,15 = 119,54 \text{ m}$
- Fondo = $119,54 - 0,10 = 119,44 \text{ m}$

4.1.2 Diseño de la conducción bocatoma-desarenador

Se desea evitar la conducción de agua no tratada por los conductos ya que podría provocar obstrucciones, de este modo se ha decidido que el desarenador este situado a tan solo 3 m con una cota de fondo de 118,91 m, tan solo 3 cm menor que la del fondo de la cámara de recolección.

Se empleará asbesto-cemento para la tubería de conducción entre ambos por su facilidad para permitir el paso del agua, tener gran resistencia al deterioro y mantener la temperatura constante.

Inicialmente se calculará la pendiente de la tubería y seguidamente, el diámetro siguiendo la expresión de Manning:

$$S = \frac{118,94 - 118,91}{3} \cdot 100 = 1\% \quad (31)$$

$$D = 1,548 \cdot \left(\frac{n \cdot Q}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{8}} = 0,051 \text{ m} \quad (32)$$

$n = \text{coeficiente de rugosidad de Manning} = 0,009 \text{ para el asbesto cemento}$

$$Q = 1,244 \frac{L}{s} \text{ caudal de diseño}$$

El diámetro comercial de tubos de asbesto-cemento más próximo al obtenido en los resultados es de 0,075 m.

Para las condiciones de flujo donde el tubo esté lleno se emplean las siguientes expresiones:

$$Q_{lleno} = 0,312 \cdot \frac{D^{\frac{8}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}}{n} = 0,0034 \text{ m}^3/\text{s} \quad (33)$$

$$V_{lleno} = \frac{Q_{lleno}}{A_{lleno}} = \frac{0,0034 \cdot 4}{\pi \cdot 0,075^2} = 0,77 \text{ m/s} \quad (34)$$

$$\frac{Q}{Q_{lleno}} = 0,37 \quad (35)$$

Con la relación de caudales se obtiene la relación hidráulica para conductos circulares de:

$$\frac{V_r}{V_{lleno}} = 0,822 \text{ y } \frac{d}{D} = 0,536 \quad (36)$$

$$V_r = 0,63 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ y } d = 0,0402 \text{ m}$$

Verificación de la cota a la salida de la bocatoma

Se tomó el valor de profundidad en la cámara de recolección de 60 cm como medida tentativa. Sin embargo, en los siguientes cálculos se podrá comprobar cómo debería ser esa medida:

$$d + 1,5 \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = 0,0402 + 1,5 \cdot \frac{0,63^2}{2 \cdot 9,81} = 0,0705 \text{ m} \quad (37)$$

Esta profundidad se aleja en gran medida de los 60 cm escogidos para tantear. Manteniendo constante la cota de entrega al desarenador de 118,91 m se decide subir la cota de fondo de la cámara de recolección 40 cm de forma que la profundidad sea más semejante a 10 cm.

Se repite el proceso anterior con el objetivo de encontrar una distancia que se asemeje a la nueva profundidad de diseño de la cámara de recolección de 10 cm.

$$S = \frac{119,44 - 118,91}{3} \cdot 100 = 17,66\% \quad (38)$$

$$D = 1,548 \cdot \left(\frac{n \cdot Q}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{8}} = 0,0448 \text{ m} \quad (39)$$

El diámetro comercial de tubos de asbesto-cemento más próximo al obtenido en los resultados es de 0,075 m.

$$Q_{lleno} = 0,312 \cdot \frac{D^{\frac{8}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}}{n} = 0,0049 \text{ m}^3/\text{s} \quad (40)$$

$$V_{lleno} = \frac{Q_{lleno}}{A_{lleno}} = \frac{0,0034 \cdot 4}{\pi \cdot 0,075^2} = 1,11 \text{ m/s} \quad (41)$$

$$\frac{Q}{Q_{lleno}} = 0,25 \quad (42)$$

Con la relación de caudales se obtiene la relación hidráulica para conductos circulares de:

$$\frac{V_r}{V_{lleno}} = 0,695 \text{ y } \frac{d}{D} = 0,393 \quad (43)$$

$$V_r = 0,77 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ y } d = 0,066 \text{ m} \quad (44)$$

$$d + 1,5 \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = 0,066 + 1,5 \cdot \frac{0,63^2}{2 \cdot 9,81} = 0,097 \text{ m} \quad (45)$$

La profundidad calculada es muy semejante a la estimada de forma que damos por bueno el proceso de iteración.

Las cotas definitivas serán las siguientes:

- *Cota de la lámina de agua a la salida de la bocatoma* = 119,54 m

- Cota de batea a la salida de la bocatoma = $119,54 - 0,1 = 119,44 \text{ m}$
- Cota de batea a la llegada del desarenador = $118,91 \text{ m}$
- Cota de la lámina de entrada al desarenador = $118,91 + 0,066 = 118,98 \text{ m}$

4.1.3 Diseño del desarenador

El objetivo del desarenador es la remoción de partículas hasta que tengan el grosor deseado. En las siguientes vistas se pueden apreciar las distintas zonas que separan el desarenador.

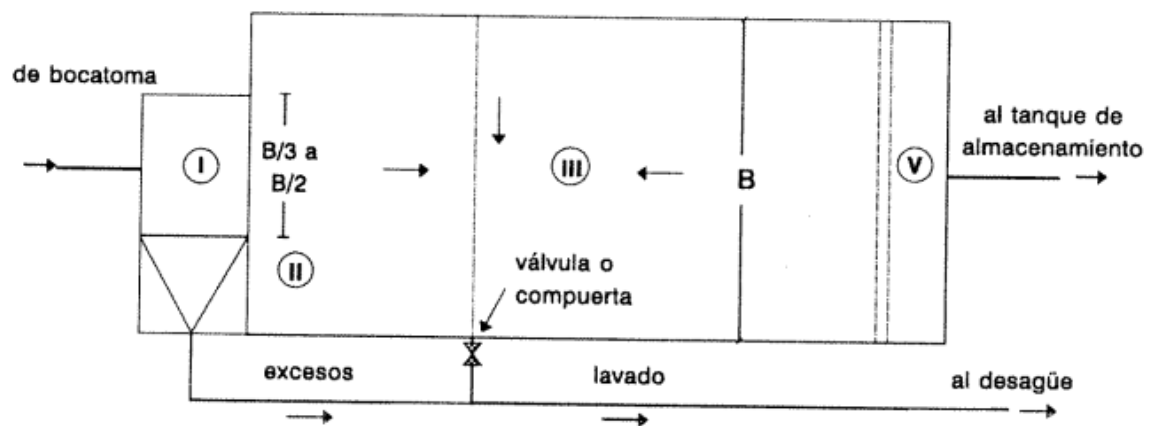


Imagen 29. Planta del desarenador. Fuente: (Cualla, 2000)

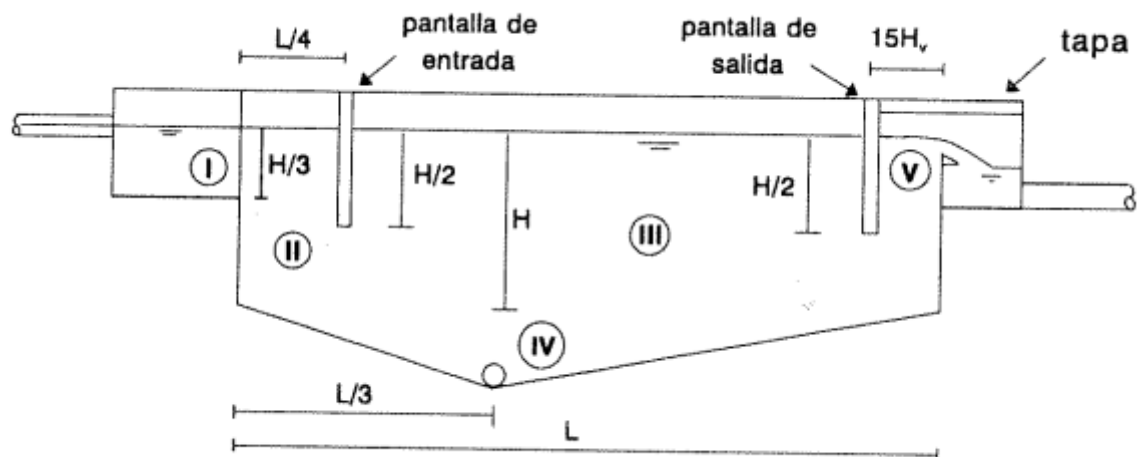


Imagen 30. Alzado del desarenador. Fuente: (Cualla, 2000)

Se distinguen las siguientes funciones:

- Zona I: Cámara de aquietamiento: se encarga de disipar el exceso de energía del agua en la tubería de llegada. En su lateral se encuentra un vertedero para devolver al río el agua sobrante.
- Zona II: Entrada al desarenador: el agua accede a una nueva cámara y choca contra una cortina que obliga al flujo a descender y sedimentar los materiales más gruesos.
- Zona III: Zona de sedimentación: donde se produce la sedimentación de las partículas que no hayan sedimentado en la Zona II.
- Zona IV: Salida del desarenador: se trata de una compuerta que recoge el vertedero de salida y el canal de recolección.
- Zona V: Almacenamiento de lodos: cota entre la zona III y la zona IV.

Las condiciones de la tubería de entrada al desarenador son las calculadas en el apartado anterior:

$$Q_{lleno} = 0,0049 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_{lleno} = 1,11 \text{ m/s}$$

$$V_r = 0,77 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ y } d = 0,066 \text{ m}$$

$$D = 0,075 \text{ m}$$

$$Q = 0,001244 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se diseñará un desarenador que consiga un grado de remoción del 75% y consiga romper partículas hasta un diámetro de 0,5 mm.

Condiciones del desarenador:

- Temperatura = 15°C
- Viscosidad cinemática del agua a 15°C = 0,01059 cm²/s
- Grado del desarenador (n) = 1 significa que no tendrá deflectores
- Relación largo:ancho = 3:1
- Cota de la lámina de entrada al desarenador = 118,98 m

Diseño de los parámetros de sedimentación

El estudio de la sedimentación propuesto por Hazen y Stokes asume las siguientes suposiciones:

- El flujo a través de la sección transversal tiene un comportamiento uniforme
- El desplazamiento del agua es con velocidad uniforme
- Las partículas que tocan el fondo antes de llegar a la salida son eliminadas

La velocidad de sedimentación de las partículas se calcula con la siguiente expresión postulada por Hazen y Stokes:

$$V_s = \frac{g}{18} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\mu} \cdot d^2 = \frac{981}{18} \cdot \frac{2,65 - 1}{0,01059} \cdot 0,005^2 = 0,212 \text{ cm/s} \quad (46)$$

V_s = velocidad de sedimentación de la partícula cm/s

g = aceleración de la gravedad 981 cm/s²

ρ_s = peso específico de arenas = 2,65

ρ = peso específico del agua = 1,00

μ = viscosidad cinemática (cm²/s)

Para los parámetros de $n=1$ y una remoción del 75% el número de Hazen = $V_s/V_o = 3,00 = \theta/t$.

Del mismo modo se deduce t de la siguiente expresión:

$$t = \frac{H}{V_s} = \frac{150}{0,212} = 707 \text{ s} \quad (47)$$

El parámetro H corresponde a la profundidad útil de sedimentación y se supondrá un valor de 1,5 m.

Despejando θ del número de Hazen se obtiene el tiempo de retención hidráulico:

$$\theta = 3,0 \cdot t = 2120 \text{ s} = 0,59 \text{ h} \quad (48)$$

Este tiempo cumple con el criterio de diseño en el que una partícula de agua debe atravesar el tanque entre 0,5h y 4h.

El volumen del tanque se calcula con la siguiente expresión:

$$V = \theta \cdot Q = 2120 \cdot 0,001244 = 2,64 \text{ m}^3 \quad (49)$$

En cuanto al área superficial:

$$A_s = \frac{V}{H} = \frac{2,64}{1,50} = 1,75 \text{ m}^2 \quad (50)$$

Se desea que las dimensiones del tanque sean L:B = 3:1

$$B = \sqrt{\frac{A_s}{3}} = 0,76 \text{ m} \quad (51)$$

$$L = 3 \cdot B = 2,3 \text{ m} \quad (52)$$

La carga hidráulica superficial para el tanque será la siguiente:

$$q = \frac{Q}{A_s} = \frac{0,001244}{1,75} = 0,000710 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s} = 61,41 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot d \quad (53)$$

En condiciones teóricas la velocidad de sedimentación de la partícula crítica es igual a la carga hidráulica superficial:

$$V_o = q = 0,071 \text{ cm/s} \quad (54)$$

$$d_o = \sqrt{\frac{V_o \cdot 18 \cdot \mu}{g \cdot (\rho_s - \rho)}} = 0,00289 \text{ cm} = 0,03 \text{ mm} \quad (55)$$

De este modo se demuestra que el grosor de las partículas se ha conseguido disminuir por debajo de 0,05mm. Sin embargo, teniendo en cuenta las condiciones reales de flujo no uniforme, velocidad variable y zonas muertas se ha decidido mantener el valor de 0,05mm.

La velocidad horizontal del fluido se obtiene con la siguiente expresión:

$$V_h = \frac{Q}{B \cdot H} = \frac{0,001244}{0,76 \cdot 1,5} \cdot 100 = 0,11 \text{ cm/s} \quad (56)$$

$$V_{h_{\text{máx}}} = 20 \cdot V_s = 2,18 \text{ cm/s} \quad (57)$$

La velocidad de suspensión máxima:

$$V_r = \sqrt{8 \cdot \frac{k}{f} \cdot g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d} = \sqrt{8 \cdot \frac{0,04}{0,03} \cdot g \cdot 1,65 \cdot 0,005} = 9,3 \text{ cm/s} \quad (58)$$

Se demuestra que la velocidad horizontal (2,18 cm/s) es menor que la velocidad de arrastre de partículas (9,3 cm/s) y así evitándose la resuspensión de los sedimentos. El valor de k es de 0,04 por tratarse de sedimentación de arenas y el valor de f es de 0,03 por emplear únicamente la acción de la gravedad.

Cálculo de los elementos del desarenador

Vertedero de salida

$$H_v = \left(\frac{Q}{1,84 \cdot B} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{0,001244}{1,84 \cdot 0,76} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,0092 \text{ m} \quad (59)$$

$$V_v = \frac{Q}{B \cdot H_v} = 0,18 \text{ m/s} \quad (60)$$

Con las expresiones de alcance de chorro de agua:

$$X_s = 0,36 \cdot V_v^{\frac{2}{3}} + 0,60 \cdot H_v^{\frac{4}{7}} = 0,16 \text{ m} \quad (61)$$

A continuación, se dimensionarán las cámaras del desarenador con los parámetros calculados.

Pantalla de salida:

- Profundidad = $H/2 = 0,75 \text{ m}$
- Distancia al vertedero de salida = $15 H_v = 0,14 \text{ m}$

Pantalla de entrada:

- Profundidad = $H/2 = 0,75 \text{ m}$
- Distancia a la cámara de quietamiento = $L/4 = 2,3/4 = 0,575 \text{ m}$

Almacenamiento de lodos:

- Profundidad = 0,15 m (establecida por convenio)

Distancias longitudinales:

- Distancia del punto de salida a la cámara de aquietamiento = $L/3 = 0,77 \text{ m}$

- Distancia del punto de salida al vertedero de salida = $2L/3 = 1,53 \text{ m}$

Pendientes:

- Pendiente transversal = $0,15/B = 19,7\%$

- Pendiente longitudinal ($L/3$) = $0,15/0,77 = 19,5\%$

- Pendiente longitudinal ($2L/3$) = $0,15/1,53 = 9,8\%$

Cámara de aquietamiento:

- Profundidad = $H/3 = 0,5 \text{ m}$

- Ancho = $B/3 = 0,25 \text{ m}$

- Largo = se adopta $1,0 \text{ m}$

Rebose de la cámara de aquietamiento

$$Q_{excesos} = Q_{lleno} - Q = 0,0049 - 0,001244 = 0,0037 \text{ m}^3/\text{s} \quad (62)$$

$$H_{excesos} = \left(\frac{Q}{1,84 \cdot L} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{0,0037}{1,84 \cdot 1} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,016 \text{ m} \quad (63)$$

$$V_{excesos} = \frac{Q_{excesos}}{H_e \cdot L} = 0,23 \text{ m/s} \quad (64)$$

$$X_s = 0,36 \cdot V_e^{\frac{2}{3}} + 0,60 \cdot H_e^{\frac{4}{7}} = 0,19 \text{ m} \quad (65)$$

Cálculos en la tubería de excesos y lavado

a) Tubería de excesos

Se empleará el mismo diámetro de entrada al desarenador de $0,075 \text{ m}$.

b) Tubería de lavado

- Cota de entrega del desagüe de lavado = $118,94 \text{ m}$ (por conveniencia se determina a 4 cm menos que la entrada al desarenador)

- Cota de la lámina de agua sobre la tubería = 118,98 m se desprecian las pérdidas debido a los cambios de sección del agua a través del desarenador.
- Longitud de conducción = 1,5 m. Termina en el tanque de succión.
- Diámetro de 0,075 m.
- Altura disponible = 118,98 – 118,94 = 0,04 m
- $J = H/L = 0,09/1,5 = 0,06 \text{ m/m}$

Se desprecian las pérdidas en longitud equivalente (valores normalizados en función del diámetro de la tubería) debida a la conducción ya que la tubería tiene una longitud muy corta y el caudal es muy pequeño.

Con estos parámetros se calculará el tiempo de vaciado de una partícula de agua entre que entra y sale del desarenador:

$$Q_{inicial} = 0,2785 \cdot C \cdot D^{2,63} \cdot J^{0,54} = 0,2785 \cdot 100 \cdot 0,075^{2,63} \cdot 0,0037^{0,54} = 0,0067 \text{ m}^3/\text{s} \quad (66)$$

Se toma el coeficiente C del concreto, 100. Con este caudal se obtiene el coeficiente de descarga del tanque a partir de la ecuación de descarga de un orificio:

$$C_d = \frac{Q}{A_o \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}} = \frac{0,0067 \cdot 4}{\pi \cdot 0,075^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}} = 1,14 \quad (67)$$

Finalmente, el tiempo de descarga se obtiene con la siguiente ecuación:

$$t = \frac{2 \cdot A_s}{C_d \cdot A_o \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \cdot H^{\frac{1}{2}} = 47 \text{ s} \quad (68)$$

Debido a que el caudal de entrada es muy pequeño el dimensionamiento del desarenador también ha resultado ser pequeño y por tanto el tiempo de vaciado es muy rápido. Sin embargo, en las condiciones de diseño anteriores el tiempo que debía permanecer una partícula en el desarenador debía ser al menos de 30 minutos. Una solución para aumentar el tiempo de vaciado sería aumentar la cota entre el desarenador y la cota desagüe al tanque de succión de donde la bomba se encargará de ascender el agua hasta el tanque de almacenamiento. Otra medida podría ser aumentar el diámetro de las tuberías para así incrementar el caudal inicial.

Determinación de las cotas finales

- Cota de batea de la tubería de entrada = 118,91 m
- Cota de la lámina de agua de entrada = 118,98 m
- Cota de la lámina de agua de salida = 118,94 m
- Cota de batea de la tubería de salida = 118,87 m (el ancho de la lámina de agua es tan solo de 0,066 m)
- Cota de la tubería de lavado a la salida = $118,91 - 0,5 - 0,5 - 0,15 = 117,76$ m

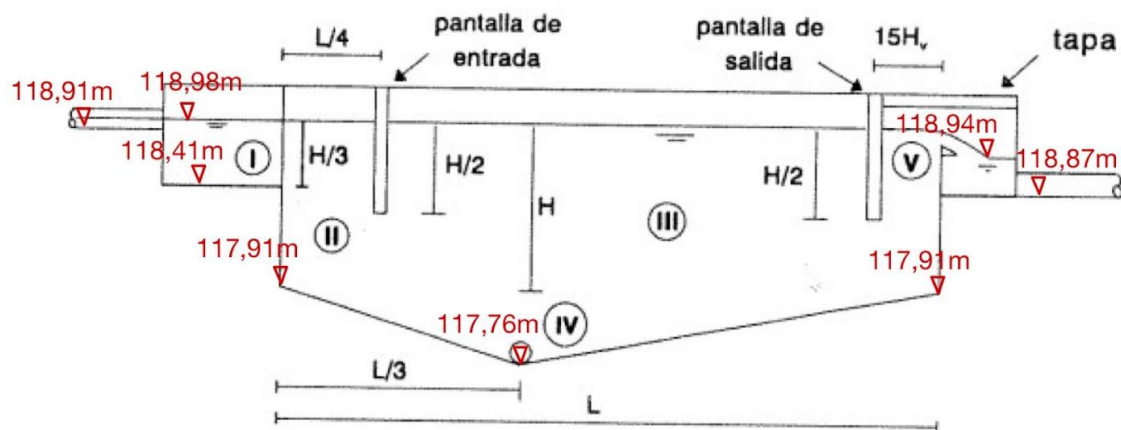


Imagen 31. Detalle de las cotas principales en el desarenador. Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Diseño del sistema de bombeo

El diseño de la bomba parte de algunas consideraciones iniciales:

- La bomba presentará succión negativa debido a que el eje de la bomba estará por encima del nivel del agua del pozo húmedo del que se succiona.
- El caudal de diseño seguirá siendo 1,1244 L/s.
- La altura sobre el nivel del mar es de 120 m en el lugar de estacionamiento de la bomba. Se sitúa 2 m por encima del nivel de agua máximo en el tanque de succión.
- Se dimensionará el tanque de succión con una cota de agua máxima de 118 m y mínima de 116 m. Se dimensiona con un margen grande de profundidad para poder operar con tranquilidad sin temor a que se llene o quede vacío y así simplificar los cálculos.

- La cota final a la que se quiere elevar el agua es de 251,25 m (obtenida en el dimensionamiento del tanque de almacenamiento).
- Se supondrá una temperatura del agua de 15°C
- Coeficiente C del PVC es de 150

En el siguiente esquema se recogen las distintas cotas y el tipo de conducción que influyen en el dimensionamiento de la bomba de succión:

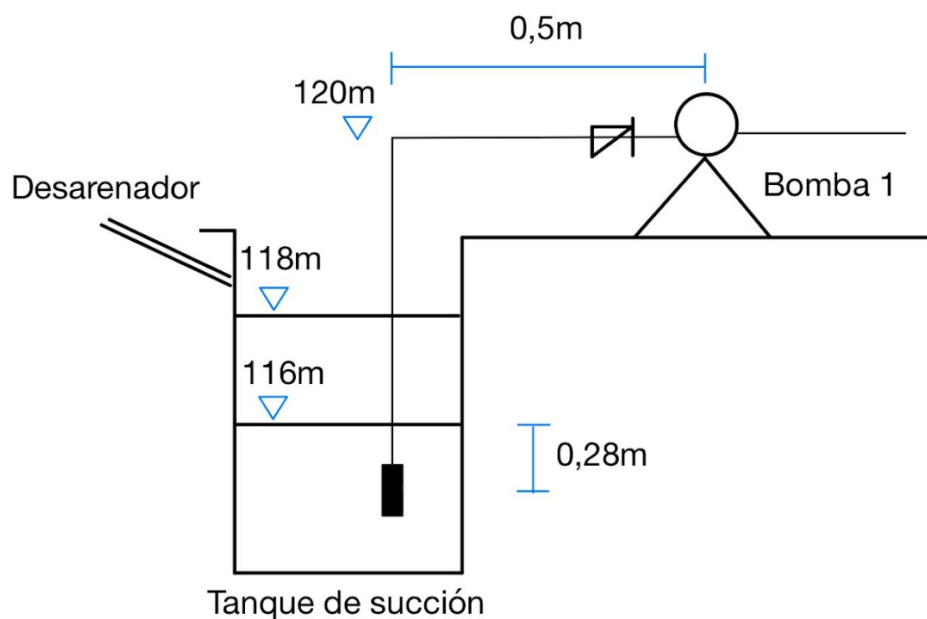


Imagen 32. Detalle de la tubería de succión. Fuente: Elaboración propia

Cálculo de los diámetros

a) Tubería de impulsión

Se emplea la expresión de Bresse:

$$D_i = k \cdot \sqrt{Q} = 0,04 \text{ m} \quad (69)$$

Se tomará el diámetro de 0,05 m correspondiente a 2" para facilitar los cálculos de las pérdidas de carga. Para los dos circuitos de tuberías de impulsión se empleará este diámetro. El valor de la constante $k = 1,2$ para instalaciones que operan de manera continua.

La velocidad en la tubería será la siguiente:

$$V_i = \frac{Q}{A} = \frac{0,001244 \cdot 4}{\pi \cdot 0,05^2} = 0,63 \text{ m/s} \quad (70)$$

b) Tubería de succión

Se recomienda en la tubería de succión dimensionarla con un diámetro inmediatamente superior al de la tubería de impulsión, de forma que se escoge el diámetro de 0,063 m correspondiente a 2 ½ ″. Esto provoca que se tenga que realizar una reducción excéntrica en el canal de succión antes de llegar a la bomba y una ampliación concéntrica a la salida de esta, añadiendo pérdidas de carga.

$$V_s = \frac{Q}{A} = \frac{0,001244 \cdot 4}{\pi \cdot 0,063^2} = 0,4 \text{ m/s} \quad (71)$$

Para evitar la entrada de aire en la tubería de succión, esta debe tener una sumergencia adecuado por debajo de la cota mínima del tanque de succión. Esta sumergencia se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$S = 2,5 \cdot D_s + 0,1 = 0,28 \text{ m} \quad (72)$$

Cálculo de la altura dinámica de elevación

- Altura de succión = 120 - 116 = 4 m. Se dimensiona desde la cota mínima del tanque de succión.
- Altura de impulsión = 251,40 – 120 = 131,4 m. Se dimensiona hasta la cota de la lámina de agua del tanque regulador. Su diseño se detalla más adelante.
- Altura estática total = 135,40 m

A esta altura es necesario añadirle las correcciones debido a la pérdida de carga de válvulas, codos y otros elementos en función de los diámetros de succión y de impulsión:

Perdidas de succión (D = 0,063 m)

- Válvula de pie con coladera = 17 m
- Codo de radio largo a 90º = 1,3 m
- Reducción excéntrica = 6D = 0,38 m. El diámetro de entrada a la bomba es de 1 ½ ″.
- Longitud tubería recta = 4 + 0,5 + 0,28 = 4,78 m

Longitud total = 23,46

De la ecuación de Hanzen-Williams se despeja J:

$$Q = 0,2785 \cdot C \cdot D_s^{2,63} \cdot J^{0,54} \rightarrow J = 0,00292 \text{ m/m} \quad (73)$$

De este modo las pérdidas de succión son de $= J \cdot 23,46 = 0,074 \text{ m}$

Pérdidas de impulsión fase 1 (D = 0,05 m). Entre la bomba 1 y la bomba 2.

- Expansión concéntrica = 12D = 0,6 m. El diámetro de salida de la bomba es de 1''.
- Válvula de retención horizontal = 4,2 m
- Válvula de cortina = 0,4 m
- Reducción excéntrica = 6D = 0,3 m
- Longitud tubería recta = 1 m

Longitud total = 6,5 m.

De la ecuación de Hanzen-Williams se despeja J:

$$Q = 0,2785 \cdot C \cdot D_s^{2,63} \cdot J^{0,54} \rightarrow J = 0,00901 \text{ m/m} \quad (74)$$

De este modo las pérdidas de succión son de $= J \cdot 23,46 = 0,05 \text{ m}$

Pérdidas de impulsión fase 2 (D = 0,05 m). Entre la bomba 2 y el tanque regulador.

- Expansión concéntrica = 12D = 0,6 m
- Válvula de retención horizontal = 4,2 m
- Válvula de cortina = 0,4 m
- Reducción excéntrica = 6D = 0,3 m
- Codo radio largo a 90° = 1,1 m

Codos que siguen la siguiente expresión $= h_f = 0,25 \cdot \frac{v_i^2}{2 \cdot g} \cdot \sqrt{\frac{\theta}{90}}$

- Codo 1 de radio largo a 166° = 0,0068 m

- Codo 2 de radio largo a $175,61^\circ = 0,007 \text{ m}$

- Codo 3 de radio largo a $170,39^\circ = 0,0069 \text{ m}$

Las pérdidas de carga de los codos son despreciables.

- Longitud tubería recta = $1 + 1 + 309 + 336 + 250 + 2,9 + 0,5 = 900,4 \text{ m}$

Longitud total = 907 m

De la ecuación de Hazen-Williams se despeja J:

$$Q = 0,2785 \cdot C \cdot D_i^{2,63} \cdot J^{0,54} \rightarrow J = 0,00901 \text{ m/m} \quad (75)$$

De este modo las pérdidas de succión son de $J \cdot 901,2 = 8,17 \text{ m}$

Altura en la velocidad de descarga

$$\frac{V_i^2}{2 \cdot g} = 0,02 \text{ m} \quad (76)$$

Altura dinámica total = $135,40 + 0,074 + 8,17 + 0,02 = 143,6 \text{ m}$

Cálculo de la potencia necesaria

Con la potencia que necesiten las bombas se dimensionará la potencia requerida en la instalación eléctrica. Se emplearán dos bombas en serie con las mismas características. Se considerarán ideales y siguiendo la siguiente propiedad de bombas en serie:

$$H_t = \sum_{i=1}^n h_i \quad (77)$$

De este modo al haber solo dos bombas la altura dinámica que aporta cada bomba será: $h_i = \frac{143,6}{2} = 71,8 \text{ m}$. Con la siguiente expresión se obtiene la potencia requerida por una bomba:

$$P_b = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_t}{e} = \frac{9,81 \cdot 0,001244 \cdot 71,8}{0,33} = 2,65 \text{ kW} \quad (78)$$

$$\gamma = 9,81 \text{ kN/m}^3$$

$e = \text{eficiencia de la bomba} = 33\% \text{ de la curva característica}$

Se recomienda diseñar la potencia requerida con un factor de seguridad de 1,20 de manera que no se sobrecaliente el motor de la bomba y cubrir las pérdidas mecánicas de transmisión de energía:

$$P_m = 1,2 \cdot 2,65 \text{ kW} = 3,20 \text{ kW} \quad (79)$$

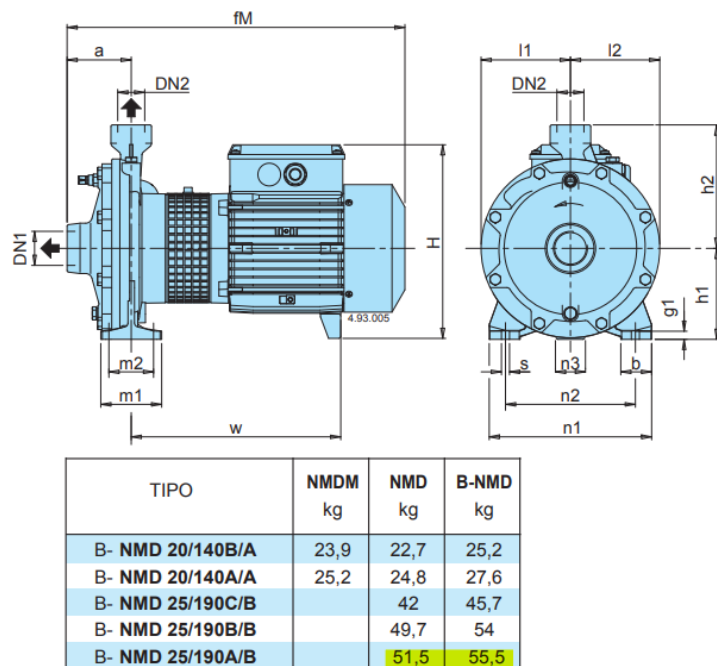


Imagen 33. Especificaciones del modelo B-NMD 25/190A de Calpeda. Fuente: Catálogo Calpeda

B-NMD	NMD	DN1 ISO 228	DN2	mm																
				a	fM	h1	h2	H	m1	m2	n1	n2	n3	b	s	l1	l2	w	g1	
B-NMD 20/140A/A-B/A	NMD 20/140A/A-B/A	G 1 1/4	G 1	80	417	112	152	243	75	55	200	160	37	38	9,5	110	110	256	10	
B-NMD 25/190C/B	NMD 25/190C/B	G 1 1/2	G 1	97	487	140	180	268	100	70	240	190	50	50	14	133	133	314	13	
B-NMD 25/190A/B-B/B	NMD 25/190A/B-B/B			500	278			49					306							

Tabla 14. Especificaciones técnicas de medida modelo B-NMD 25/190A de Calpeda Fuente: Catálogo Calpeda

B-NM B-NMD		NM NMD		P ₂		Q																		
						m³/h	2,4	3	3,6	4,8	6	6,6	7,5	8,4	9,6	10,8	12	13,2	15	16,8	18			
				kW	HP	l/min	40	50	60	80	100	110	125	140	160	180	200	220	250	280	300			
B-NM	25/12B/A●	NM	25/12B/A●	0,55	0,75	H m	20	19,9	19,8	19,3	18,5	18	17,3	16,3	15	13,2	11							
B-NM	25/12A/B●	NM	25/12A/B●	0,75	1		23,5	23,4	23,3	22,9	22,1	21,7	20,9	20	18,7	17,1	15,2							
B-NM	25/160B/A●	NM	25/160B/A●	1,1	1,5			31	30,7	30	28,5	28	27	26	23									
B-NM	25/160A/A●	NM	25/160A/A●	1,5	2			36,5	36,2	35,5	34,5	34	33,5	32,5	31	28,5	26							
B-NM	25/200B/C	NM	25/20B-M/B	2,2	3			49,9	49,5	48,8	48,2	47,8	47,4	46,8	45,9	45,1	44,1	42,8	40,6	37,3				
B-NM	25/200A/C	NM	25/20A-M/B	3	4			57	56,7	56,3	56	55,8	55,4	55,1	54,4	53,8	52,8	51,8	49,6	46,6	43,9			
B-NM	25/200S/C	NM	25/20S/C	4	5,5			57,8	57,7	57,4	57,2	57	56,7	56,4	55,8	55,2	54,3	53,3	51,2	48,2	45,6			
B-NMD	25/190C/B	NMD	25/190C/B	2,2	3			62	60,5	59	55,5	51	48,5	44	38									
B-NMD	25/190B/B	NMD	25/190B/B	3	4			76	75	74	70	66	64	60	54	46								
B-NMD	25/190A/B	NMD	25/190A/B	4	5,5			98	97	96	93,5	90	88	84	79	70								

Tabla 15. Especificaciones de potencia, caudal y altura del modelo B-NMD 25/190A de Calpeda Fuente: Catálogo Calpeda

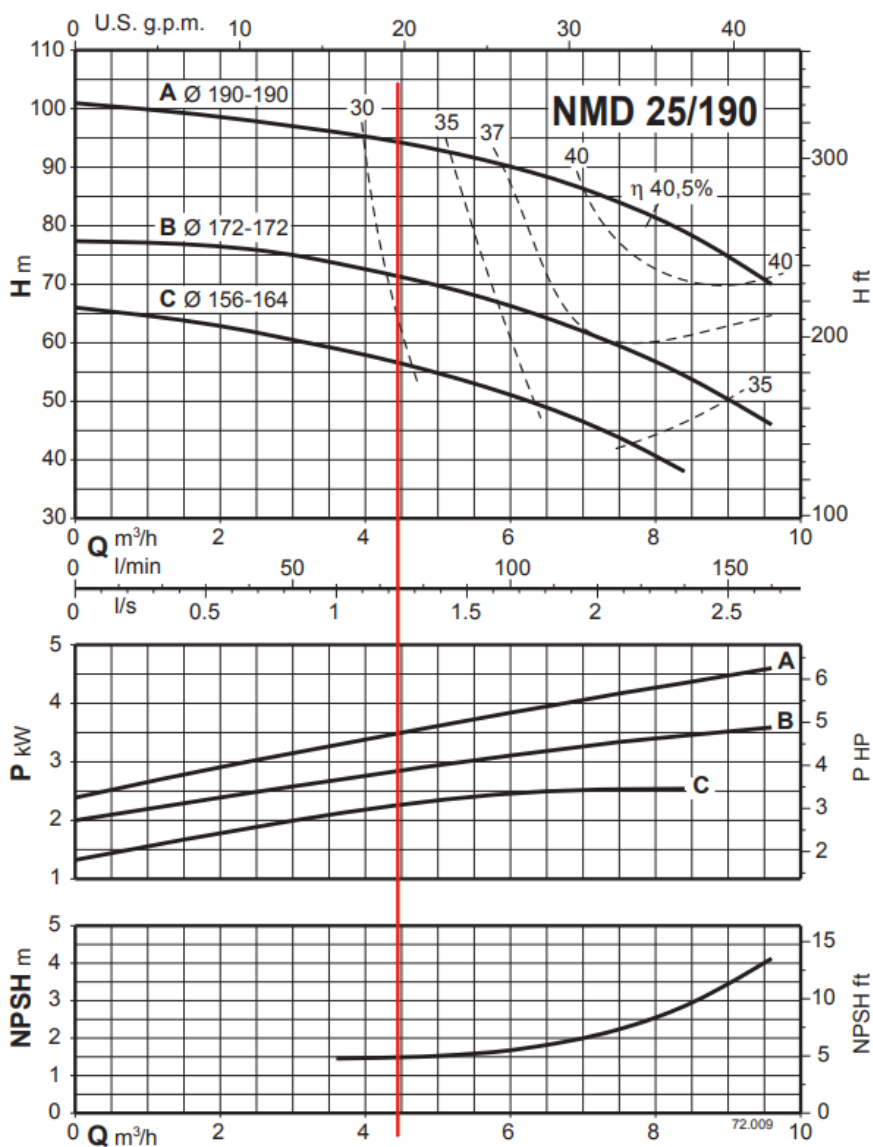


Gráfico 10. Curva característica según altura de impulsión del modelo B-NMD 25/190. Fuente: Catálogo Calpeda

Con el resultado de potencia de 3,2 kW se ha decidido optar por el modelo A ya que dispone de un motor con un rodete de 190 mm que puede suministrar hasta 3,5 kW para nuestro caudal de diseño. El fabricante de las bombas escogidas es Calpeda y en las figuras superiores se muestran las especificaciones técnicas. El rendimiento para nuestros parámetros de diseño se estima de un 33% según su curva característica. El modelo B no hubiera funcionado ya que los cálculos arrojaban una potencia requerida de 3,4 kW y tan solo es capaz de suministrar hasta 3 kW para el caudal de diseño. Por este motivo, el modelo A resulta más conveniente.

$$Q_{diseño} = 0,001244 \frac{m^3}{s} \cdot 3600 \frac{s}{h} = 4,47 m^3/h$$

La potencia total que deberá suministrar la instalación eléctrica a las bombas será la suma de ambas potencias:

$$P_T = 2 \cdot P_m = 6,4 kW \quad (80)$$

Las características del motor acoplado a la bomba se indican en el catálogo como: motor monofásico, 230/400V, 4kW, 50 Hz. Tiene un aislamiento clase F y protección IP 54.

Altura barométrica

Es necesario hacer una corrección de la altura barométrica por encontrarnos a una altura distinta del nivel del mar. Al nivel del mar la altura máxima de succión es de 760 mm Hg (10,33 m de agua). Se debe corregir el valor a razón de 1,2 m por cada 1000 m de nivel respecto al mar. Se emplea la siguiente expresión:

$$Altura\ barométrica = 10,33 - \frac{1,2 \cdot 120}{1000} = 10,186 m \quad (81)$$

La altura estática de succión es la comprendida entre la cota mínima del tanque de succión y la cota donde está situada la bomba, $H_s = 4 m$.

Cavitación

Para determinar si existe cavitación en la tubería de succión se completará la siguiente ecuación de presión:

$$CNPS_d = \left[\text{Altura barométrica} - \left(\text{Altura estática} + \text{Pérdidas en fricción} + \frac{V_s^2}{2 \cdot g} \right) \right] - P_{vapor} \quad (82)$$

$$= 5,92 \text{ m}$$

$$\text{Altura barométrica} = 10,186 \text{ m}$$

$$\text{Pérdidas de carga} = 0,074 \text{ m calculadas anteriormente}$$

$$\frac{V_s^2}{2 \cdot g} = 0,008 \text{ m}$$

$$P_{vapor} = 0,18 \text{ m a } 15^\circ\text{C}$$

El fabricante indica que la bomba NMD 25/190 tiene un valor de $CNPS_r$ de 1,5 m. Debido al cumplimiento de que $CNPS_d > CNPS_r$ no existe cavitación debido a la succión.

Cálculo del volumen del pozo de succión

El área mínima del pozo debe cumplir $5Ds = 0,315 \text{ m}^2$

La altura del pozo se puede determinar = $(Cota_{m\acute{a}x} - Cota_{m\acute{i}n}) + \text{sumergencia} + \text{altura coladera} + \text{distancia m\acute{i}n. recomendada fondo}_{coladera} + BL = (118 - 116) + 0,28 + 0,35 + 0,5 + 0,3 = 3,43 \text{ m}$

Se escoge una relación B:L de 2:1 de modo que se decide tomar $B = 0,40 \text{ m}$ y $L = 0,80 \text{ m}$, resultando en un área final $0,32 \text{ m}^2$.

Con el motivo de minimizar el impacto medioambiental a largo plazo y proteger el suministro de agua a la población de Cedillo se ha decidido construir una pequeña zanja para soterrar la tubería de PVC.

4.1.5 Diseño del sistema de cloración

Se diseñará una pequeña instalación de cloración que disponga de un tanque de cloración que suministre una solución clorada directamente en el tanque de almacenamiento (regulador). Esta es una solución económica ya que otras alternativas supondrían construir una estructura de cloración previa al tanque regulador donde el suministro de cloro se implementaría desde una tubería sumergida y en forma gaseosa.

Se empleará una solución de hipoclorito de sodio, concretamente penclorito con una concentración típica de 130 g/L.

Condiciones de la dosificación

- El caudal de diseño a potabilizar es el de 1,244 L/s
- La dosificación de se realizará con cloro líquido, penclorito de 130 g/L. Se quiere tener una concentración inicial del 1% en peso, por tanto, la concentración de penclorito será de 1,3 g/L.
- Se quiere suministrar una dosis de cloro con una concentración de 1,5 mg/L (dosis normal).

Con la siguiente expresión se obtiene el caudal de dosificación de hipoclorito de sodio que se suministrará mediante un grifo en el tanque regulador o de almacenamiento.

$$q = \frac{Q \cdot D}{C} = \frac{1,244 \cdot 1,5}{1300} \cdot 1000 = 1,28 \text{ mL/s} \quad (83)$$

Siendo el caudal de dosificación necesario tan pequeño se prescindirá del cálculo de potencia necesario por la bomba ya que no influiría en el consumo de potencia total necesario.

Volumen del tanque de cloración

El tanque de cloración se irá vaciando conforme se suministre la solución clorosa. Se diseñará de modo que haya que rellenarlo cada 15 días.

$$V = 1,28 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{(3600 \cdot 24)\text{s}}{1 \text{ d}} \cdot 15 \text{ d} = 1,66 \text{ m}^3 \quad (84)$$

Se dimensionará para que tenga 1,8 m³ de modo que en el día 15 exista todavía una película suficiente de disolución para que pueda ser succionada por la bomba. Asumiendo una base cuadrada y una altura de 1 m se obtiene un lado de 1,28 m.

4.1.6 Diseño del tanque de almacenamiento

Para poder dimensionar el volumen del tanque de almacenamiento es necesario conocer los datos de consumo de la población bajo estudio y su distribución horaria. Sin embargo, se desconocen los datos de la demanda de agua horaria en el municipio de Cedillo. Por este motivo se tomará un valor promedio típico en poblaciones pequeñas de 24%.³²

Se debe ajustar el caudal de diseño del tanque regulador ya que al mismo tiempo que se introduce el agua elevada desde el río también se introduce la solución clorada necesaria para potabilizar. De este modo se sobredimensionará ligeramente el tanque regulador de modo que el suministro al municipio de Cedillo esté garantizado para el caudal de diseño de 1,244 L/s.

Sumando ambos caudales se obtiene = 1,244 L/s + 0,00128 L/s = 1,245 L/s. Apenas se produce un cambio significativo.

De este modo se puede obtener el volumen del consumo diario:

$$\text{Consumo diario} = 0,001245 \cdot \frac{24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s}}{1 \text{ día}} = 97,148 \text{ m}^3 \quad (85)$$

Conociendo el valor promedio del consumo diario se puede obtener:

$$V_1 = 97,148 \cdot 24\% = 23,31 \text{ m}^3 \quad (86)$$

A su vez, se debe prever un volumen adicional para incendios. Al tratarse de una población pequeña solo sería necesario un hidratante capaz de suministrar 5 L/s durante 2 h.

$$V_2 = 0,005 \cdot 2 \cdot 3600 = 36 \text{ m}^3 \quad (87)$$

Por último, se establece un volumen de emergencia de al menos el 25% de la suma de los anteriores:

$$V_3 = 0,25 \cdot (36 + 23,31) = 14,82 \text{ m}^3 \quad (88)$$

El volumen total del tanque corresponde a la suma de los tres:

$$V_T = 74,13 \text{ m}^3 \quad (89)$$

³² (Cualla, 2000)

La constante de capacidad del tanque de almacenamiento para volúmenes inferiores a 300 m³ es de $k = 2$.

La profundidad se puede calcular con la siguiente relación empírica:

$$h = \frac{V}{3} + k = \frac{0,7413}{3} + 2 = 2,25 \text{ m} \quad (90)$$

La V expresa el volumen en capacidad de cientos de m³.

Dimensionando el tanque con base cuadrada se obtiene que el lado debe medir:

$$A = \frac{74,13}{h} = 32,95 \quad y \quad L = \sqrt{32,95} = 5,74 \text{ m} \quad (91)$$

El tanque se dimensionará con las siguientes medidas $V = 2,55 \cdot 5,74 \cdot 5,74 = 84 \text{ m}^3$

Se ha decidió dejar un borde libre de 30 cm. La cota de la lámina de agua del tanque esta a una altura de 251,25 m.

4.2 Diseño de la instalación eléctrica de autoconsumo

La instalación de placas fotovoltaicas se realizará en las proximidades del tanque de almacenamiento. La potencia de diseño es la calculada anteriormente, 6,4 kW.

Se ha tomado a la potencia activa que necesitan las bombas como criterio de cálculo. Esta condición de operación es ideal, ya que en la práctica habría pérdidas de potencia en la recepción de energía de los paneles y pérdidas en la transformación de continua a alterna en el inversor.

En el Anexo I se muestra esquemáticamente cómo quedaría el emplazamiento de la instalación eléctrica sobre el plano catastral de Cedillo.

4.2.1 Selección de las placas fotovoltaicas

Número y tipo de módulos

Para determinar el número de placas necesarias primero debemos seleccionar el módulo que se quiere implementar en la instalación. Se ha decidido escoger entre la variedad de módulos de silicio monocristalino debido a su mayor rendimiento con respecto a las otras tecnologías. El criterio de búsqueda ha sido para paneles de unos 300 W de forma que no haya que el número de módulos a instalar no sea muy elevado.

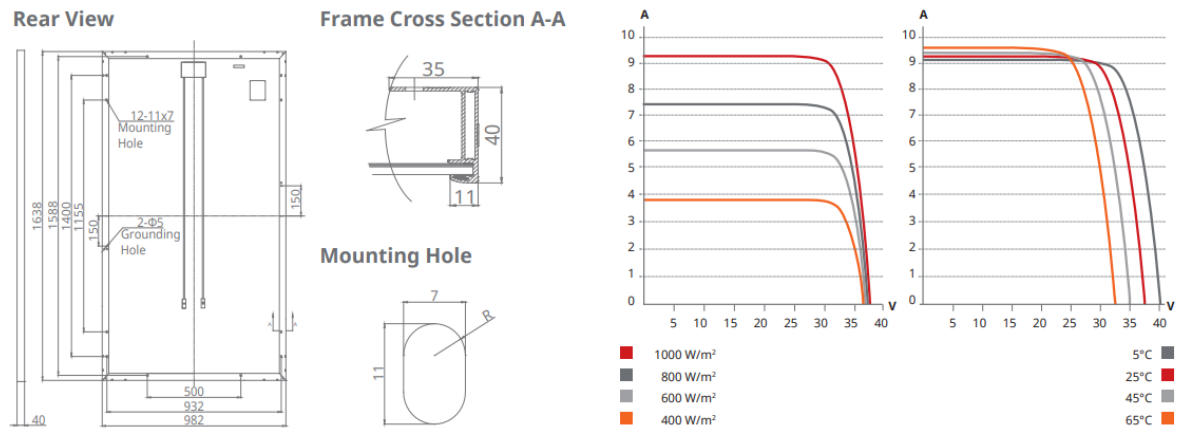


Imagen 34. Detalle de las medidas y las curvas I-V del módulo CS6P-270 de Canadian Solar. Fuente: Catálogo Canadian Solar

ELECTRICAL DATA | STC*

CS6P	260P	265P	270P
Nominal Max. Power (Pmax)	260 W	265 W	270 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	30.4 V	30.6 V	30.8 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.56 A	8.66 A	8.75 A
Open Circuit Voltage (Voc)	37.5 V	37.7 V	37.9 V
Short Circuit Current (Isc)	9.12 A	9.23 A	9.32 A
Module Efficiency	16.16 %	16.47 %	16.79 %
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C		
Max. System Voltage	1000 V (IEC) or 1000 V (UL)		
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)		
Max. Series Fuse Rating	15 A		
Application Classification	Class A		
Power Tolerance	0 ~ + 5 W		

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

Tabla 16. Especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico CS6P-270 de Canadian Solar. Fuente: Catálogo Canadian Solar

Se ha escogido el módulo de 270 W de modo que el número de módulos necesarios será:

$$N^{\circ}\text{módulos} = \frac{6400 \text{ W}}{270 \text{ W}} = 23,7 \cong 24 \text{ módulos}$$

Disposición de los módulos

El ángulo óptimo de inclinación se puede determinar con la latitud del lugar donde queremos instalar las placas. De modo que para una latitud de 39° hay que sumarle 15° resultando en una inclinación total de 54°.

La distancia entre los módulos se determina con por medio de la siguiente expresión:

$$k = \frac{1}{\tan(61^\circ - \text{latitud})} = \frac{1}{\tan(61^\circ - 39^\circ)} = 2,47 \quad (92)$$

$$d_{\min} = k \cdot h = 2,47 \cdot 0,794 = 1,96 \text{ m} \quad (93)$$

Esta fórmula asegura que el día en el que hay menos horas de sol, el solsticio de invierno, se dispongan al menos de 4h de sol.

Finalmente, los paneles solares quedarán orientados en la dirección norte-sur, separados una distancia de 1,96 m y con una inclinación de 54° sobre el suelo plano.

Los módulos se dispondrán en 2 vectores en paralelo de 12 módulos en serie en cada uno. Cubrirán un área total de 65 m².

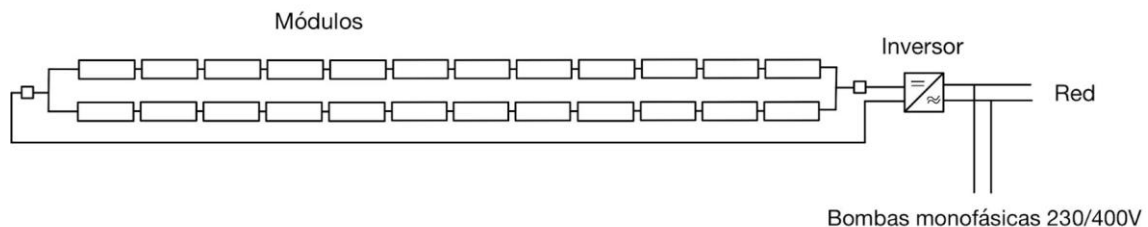


Imagen 35. Esquema de la instalación eléctrica. Fuente: Elaboración propia

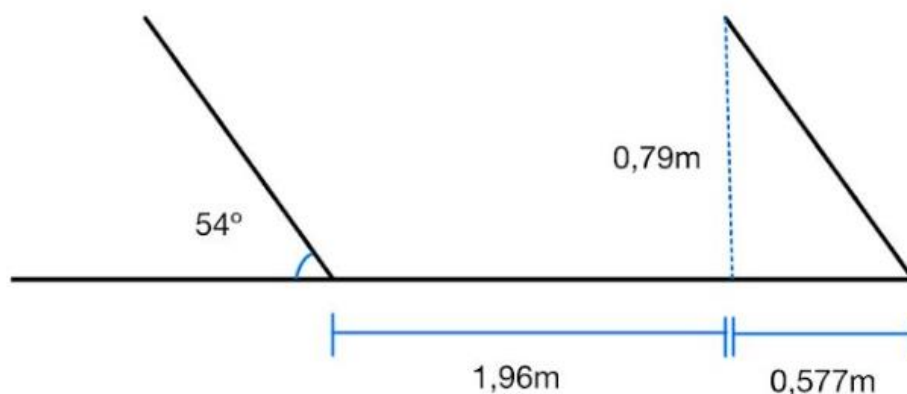


Imagen 36. Esquema detalle de la separación entre placas, visión de perfil. Fuente: Elaboración propia

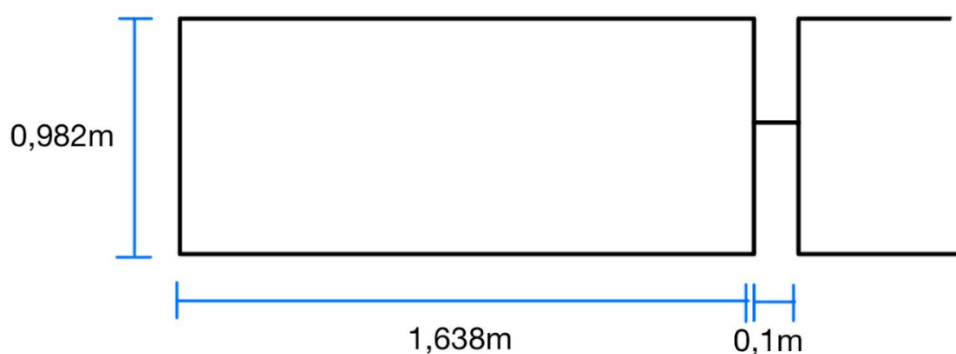


Imagen 37. Esquema detalla de la separación entre placas, visión perpendicular a la placa. Fuente: Elaboración propia

Correcciones térmicas

Es necesario hacer las correcciones térmicas debidas para que la tensión no quede por debajo de la de entrada al inversor. La temperatura máxima que se da en el municipio de Cedillo es de 40°C según las características meteorológicas descritas anteriormente.

Siguiendo las propiedades de sumatorio de las tensiones en serie (12 módulos serie) y las corrientes en paralelo (2 módulos paralelo) se calcularán las tensiones y corrientes totales.

Para corregir la tensión mínima se emplea la tensión en el punto de máxima potencia y temperatura máxima siguiendo la siguiente ecuación:

$$U_{min} = U_{mpp}(25^{\circ}C) - \beta \cdot \left[\frac{V}{K} \right] \cdot \Delta T[K] = 30,8 - 0,115 \cdot (40 - 20) = 28,5 \text{ V} \quad (94)$$

$$U_{\min T} = 12 \cdot 28,5 = 342 \text{ V}$$

Para corregir la tensión máxima se emplea la tensión de vacío y la temperatura mínima según el estudio meteorológico anterior de 3°C.

$$U_{\max} = U_{oc}(25^{\circ}\text{C}) - \beta \cdot \left[\frac{V}{K} \right] \cdot \Delta T[K] = 37,9 - 0,115 \cdot (3 - 20) = 39,85 \text{ V} \quad (95)$$

$$U_{\max T} = 12 \cdot 39,85 = 478,26 \text{ V}$$

Del mismo modo se realizarán las correcciones oportunas de corriente:

$$I_{\min} = I_{mpp}(25^{\circ}\text{C}) - \beta \cdot \left[\frac{V}{K} \right] \cdot \Delta T[K] = 8,75 - 0,053 \cdot (40 - 20) = 7,69 \text{ A} \quad (96)$$

$$I_{\max} = I_{sc}(25^{\circ}\text{C}) - \beta \cdot \left[\frac{V}{K} \right] \cdot \Delta T[K] = 9,32 - 0,053 \cdot (3 - 20) = 10,2 \text{ A} \quad (97)$$

Las corrientes mínima y máxima ya corregidas:

$$I_{\min T} = 2 \cdot 7,8 = 15,6 \text{ A}$$

$$I_{\max T} = 2 \cdot 10,2 = 20,4 \text{ A}$$

4.2.2 Selección del inversor

Se escoge un solo inversor del tipo Sunny Mini Central 7000HV debido a que cumple con las características de entrada calculadas anteriormente. Su rango de tensiones de entrada es de 335 a 560 V y su corriente máxima de entrada es de 23 A. A su vez, es capaz de suministrar en su salida hasta 6,7kW y 230V en tensión monofásica a 50Hz necesarios para alimentar las bombas.

	SMC 7000HV
Entrada (CC)	
Potencia máxima de CC	7500 W
Tensión máx. de CC	800 V
Rango de tensión fotovoltaica, MPPT	335 V - 560 V
Corriente máx. de entrada	23 A
Número de seguidores de MPP	1
Número máximo de Strings (en paralelo)	4
Salida (CA)	
Potencia nominal de CA	6650 W
Potencia máxima de CA	7000 W
Corriente máx. de salida	31 A
Tensión nominal de CA / rango	220 V - 240 V / 180 V - 260 V
Frecuencia de red de CA (de ajuste automático) / rango	50 Hz / 60 Hz / $\pm 4,5$ Hz
Factor de potencia ($\cos \phi$)	1
Conexión de CA / Power Balancing	monofásica / ●
Rendimiento	
Rendimiento máx.	96,1 %
Rendimiento europeo	95,3 %
Dispositivos de protección	
Protección contra polarización inversa (CC)	●
Seccionador de carga de CC ESS	●
Resistencia al cortocircuito (CA)	●
Monitorización de toma a tierra	●
Monitorización de red (SMA grid guard)	●
Con separación galvánica	●
Datos generales	
Dimensiones (ancho x alto x fondo) en mm	468 / 613 / 242
Peso	65 kg
Rango de temperatura de servicio	-25 °C ... +60 °C
Emisiones de ruido (típicas)	≤ 41 dB(A)
Consumo característico: funcionamiento (stand-by) / nocturno	< 7 W / 0,25 W
Topología	transformador de baja frecuencia
Sistema de refrigeración	OptiCool
Lugar de montaje: interior / en intemperie (IP65)	● / ●

Tabla 17. Hoja de características del inversor Sunny Mini Central 7000HV. Fuente: Catálogo SMA

4.2.3 Diseño del cableado

Para el diseño del cableado se simplificarán los cálculos en tres tramos, los dos primeros de continua (entre módulos y de los módulos al inversor) y el tercero, de alterna desde el inversor a las bombas.

Del mismo modo se emplearán dos métodos de cálculo: por intensidad máxima admisible y por caída de tensión.

Tramo de continua placas-inversor

El criterio de intensidad máxima admisible indicado en el ITC-BT-19 indica que hay que corregir la intensidad. El tramo de corriente continua que une las placas con el inversor lleva la corriente

total de todos los generadores. Para calcular esta corriente con los factores de corrección se emplea la siguiente fórmula:

$$I_T' = \frac{I_T}{f_{sol} \cdot f_{agrup} \cdot f_{temp}} = \frac{20,4}{0,9 \cdot 0,89 \cdot 1} = 25,46 \text{ A} \quad (98)$$

Se emplearán conductores de cobre con aislamiento XLPE 2 sobre bandeja perforada.

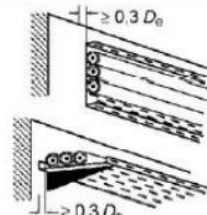
31		Cables unipolares o multipolares: Sobre bandejas perforadas en recorrido horizontal o vertical^{c, h} NOTA Refiérase al apartado B.52.6.2 para su descripción	E o F
----	---	--	-------

Imagen 38. Cableado en bandeja perforada. Fuente: Norma UNE-HD 60364-5-52

B2			PVC3	PVC2						XLPE 3		XLPE 2							
C						PVC3				PVC2				XLPE 3			XLPE 2		
E								PVC3					PVC2			XLPE 3		XLPE 2	
F										PVC3				PVC2			XLPE 3		XLPE 2
1	2	3	4	5a	5b	6a	6b	7a	7b	8a	8b	9a	9b	10a	10b	11	12	13	
Sección mm² Cobre																			
1,5	11	11,5	12,5	13,5	14	14,5	15,5	16	16,5	17	17,5	19	20	20	20	21	23	—	
2,5	15	15,5	17	18	19	20	20	21	22	23	24	26	27	26	28	30	32	—	
4	20	20	22	24	25	26	28	29	30	31	32	34	36	36	38	40	44	—	
6	25	26	29	31	32	34	36	37	39	40	41	44	46	46	49	52	57	—	

Tabla 18. Corriente admisible según el tipo de cableado. Fuente: Norma UNE-HD 60364-5-52

Para la corriente calculada se escoge una sección de 2,5 mm².

Para el cálculo de la sección con el criterio de caída de tensión se determinará que el inversor se encuentra a 5 m del conjunto de módulos fotovoltaicos.

Se debe cumplir la siguiente expresión:

$$S \geq \frac{2 \cdot l \cdot I_T}{\gamma \cdot U_r \cdot V_{mpp}} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 25,46}{45 \cdot 1,5\% \cdot 342} = 1,1 \text{ mm}^2 \quad (99)$$

S = sección mín. conductor

l = longitud del conductor

$I_T = \text{corriente máxima}$

$\gamma = \text{conductividad del cobre a } 70^\circ\text{C}$

$U_r = \text{caída de tensión máxima recomendada}$

$V_{mpp} = \text{tensión mínima en punto de máxima potencia}$

Se escoge la siguiente sección disponible de 1,5 mm². Se calcula de nuevo la caída de tensión y se comprueba que sea menor que la máxima recomendada:

$$U_r = \frac{2 \cdot l \cdot I_T}{\gamma \cdot S \cdot V_{mpp}} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 25,46}{45 \cdot 1,5 \cdot 342} = 1,1\%$$

En la simulación de PVSyst se empleará la sección más restrictiva, de 2,5 mm².

Tramo de continua entre placas

Para calcular esta corriente con los factores de corrección se emplea la fórmula anterior con la corriente de un solo vector de módulos (12 en serie):

$$I_T' = \frac{I_T}{f_{sol} \cdot f_{agrup} \cdot f_{temp}} = \frac{10,2}{0,9 \cdot 0,89 \cdot 1} = 12,73 \text{ A} \quad (100)$$

Se emplearán los mismos conductores de cobre con aislamiento XLPE 2 sobre bandeja perforada.

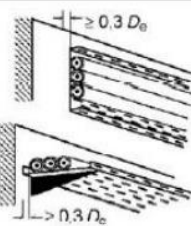
31		Cables unipolares o multipolares: Sobre bandejas perforadas en recorrido horizontal o vertical ^{e, h} NOTA Refiérase al apartado B.52.6.2 para su descripción	E o F
----	---	---	-------

Imagen 39. Cableado en bandeja perforada. Fuente: Norma UNE-HD 60364-5-52

B2				PVC3	PVC2							XLPE 3	XLPE 2						
C						PVC3					PVC2			XLPE 3			XLPE 2		
E								PVC3					PVC2			XLPE 3		XLPE 2	
F										PVC3				PVC2			XLPE 3		XLPE 2
1	2	3	4	5a	5b	6a	6b	7a	7b	8a	8b	9a	9b	10a	10b	11	12	13	
Sección mm ² Cobre																			
1,5	11	11,5	12,5	13,5	14	14,5	15,5	16	16,5	17	17,5	19	20	20	20	21	23	-	
2,5	15	15,5	17	18	19	20	20	21	22	23	24	26	27	26	28	30	32	-	
4	20	20	22	24	25	26	28	29	30	31	32	34	36	36	38	40	44	-	
6	25	26	29	31	32	34	36	37	39	40	41	44	46	46	49	52	57	-	

Tabla 19. Corriente admisible según el tipo de cableado. Fuente: Norma UNE-HD 60364-5-52

Para la corriente calculada se escoge una sección de 1,5 mm². Para el cálculo de la sección con el criterio de caída de tensión se calcula la distancia total de cableado con la longitud de las placas de 1,638 m y una distancia de separación entre ellas de 10 cm. Por tanto, el cableado necesario para un solo vector de módulos es de 21 m.

Se debe cumplir la siguiente expresión:

$$S \geq \frac{2 \cdot l \cdot I_T}{\gamma \cdot U_r \cdot V_{mpp}} = \frac{2 \cdot 21 \cdot 10,2}{45 \cdot 1,5\% \cdot 342} = 1,85 \text{ mm}^2 \quad (101)$$

Se escoge la siguiente sección disponible de 2,5 mm². Se calcula de nuevo la caída de tensión y se comprueba que sea menor que la máxima recomendada:

$$U_r = \frac{2 \cdot l \cdot I_T}{\gamma \cdot S \cdot V_{mpp}} = \frac{2 \cdot 21 \cdot 10,2}{48 \cdot 2,5 \cdot 201,76} = 1,11\%$$

En la simulación de PVSyst se empleará la sección más restrictiva, de 2,5 mm².

Tramo de alterna

Para este circuito se ha decidido implementar un cable unipolar de cobre con aislamiento XLPE 2 en tubo hueco de la construcción. Para dimensionar la sección se emplearán las medidas nominales de corriente de salida del inversor. Del mismo modo se estima que el emplazamiento de la instalación eléctrica estará situado a unos 20 m de distancia del tanque regulador, por tanto, con una distancia estimada de 896 m desde las bombas al tanque regulador, se obtiene una longitud de cable razonable hasta las bombas de unos 920 m.

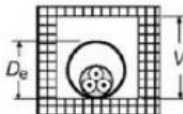
42		Cables unipolares o multipolares en tubo un hueco de la construcción ^{c,k}	En estudio. Pueden usarse los siguientes: $1,5 D_e \leq V < 20 D_e$ B2 $V \geq 20 D_e$ B1
----	---	---	---

Imagen 40. Diseño del cableado en corriente alterna. Fuente: Norma UNE-HD 60364-5-52.

Se dimensionará por el criterio de máxima corriente con la corriente máxima que es capaz de entregar el inversor:

$$I_{AC} = \frac{31}{f_{agrup}} = \frac{31}{0.9} = 34,4 \text{ A} \quad (102)$$

Según la ITC-BT-19 esta corriente corresponde a una sección de 6 mm².

4.2.4 Protecciones

En este apartado se explicará descriptivamente en qué consisten los elementos de protección necesarios para la adecuada explotación de una planta fotovoltaica como la diseñada en el proyecto, siguiendo el artículo 14 del Real Decreto 1699/2011 y el REBT.

Cada uno de estos componentes es esencial para asegurar que la instalación fotovoltaica funcione de manera segura, eficiente y duradera:

1. Protección contra sobretensiones (SPD)

- Sobretensiones transitorias: Dispositivos que protegen contra picos de tensión momentáneos, como los causados por rayos o fluctuaciones en la red.
- Sobretensiones permanentes: Protegen frente a aumentos sostenidos de la tensión que podrían dañar los equipos.

2. Interruptores automáticos

- Interruptores de corriente continua (DC): Desconectan automáticamente el circuito en caso de sobrecarga o cortocircuito en la parte de corriente continua, entre los paneles y el inversor.
- Interruptores de corriente alterna (AC): Actúan de manera similar en la parte de corriente alterna, entre el inversor y la red eléctrica o sistema de consumo.

3. Fusibles

- Protección contra sobrecorrientes: Protegen los módulos fotovoltaicos y las líneas de corriente continua al fundirse si se produce una corriente excesiva, evitando daños mayores.

4. Interruptor de aislamiento (Desconectador)

- Desconectador de DC: Permite aislar los paneles solares del inversor para realizar trabajos de mantenimiento o en caso de emergencia.

- Desconectador de AC: Aísla el inversor de la red eléctrica o sistema de consumo para garantizar la seguridad durante intervenciones técnicas.

5. Protección diferencial

- Protección contra fugas de corriente a tierra: Detecta corrientes residuales que puedan representar un peligro de descarga eléctrica y desconecta el circuito para evitar accidentes.

6. Tomas de tierra

- Conexión a tierra: Conexión de partes metálicas y pararrayos a tierra para desviar corrientes peligrosas y proteger tanto a las personas como a los equipos.

7. Protección contra incendios

- Detectores de incendio: Equipos que detectan fuego cerca de los componentes críticos y emiten una alerta para actuar rápidamente.

- Interruptor automático contra incendios (AFDD): Dispositivo que interrumpe el circuito si detecta arcos eléctricos que podrían causar un incendio.

8. Pararrayos

- Protección contra descargas atmosféricas: Sistema que protege la instalación de los efectos de los rayos, desviando su energía a tierra.

9. Monitorización y alarmas

- Sistemas de monitorización en tiempo real y alarmas: Permiten supervisar el funcionamiento de la instalación y recibir alertas inmediatas en caso de fallos o anomalías.

10. Cerraduras y protección física

- Seguridad contra accesos no autorizados: Elementos de seguridad que impiden el acceso a personas no autorizadas a los equipos críticos, como inversores y cuadros eléctricos.

4.2.5 Simulación en PVSyst

PVSyst es una herramienta avanzada de simulación y análisis utilizada ampliamente en el diseño y evaluación de sistemas fotovoltaicos. Desarrollada para ingenieros y profesionales del sector solar, PVSyst permite modelar con precisión la producción de energía de plantas fotovoltaicas conectadas a la red, teniendo en cuenta una amplia gama de parámetros técnicos y ambientales.

En esta presentación, se mostrarán los resultados de la simulación de una planta fotovoltaica conectada a la red, realizada con PVSyst.

Se correrá la simulación con los parámetros obtenidos en el diseño de la planta fotovoltaica propuesto en este capítulo. Se incluirán los detalles de los módulos fotovoltaicos seleccionados, el inversor, y el cableado, destacando cómo estos componentes influyen en el rendimiento energético global del sistema. Estos resultados proporcionarán una visión clara del comportamiento esperado de la planta bajo diversas condiciones operativas, permitiendo optimizar su diseño para maximizar la eficiencia y rentabilidad.

El software proporciona datos sobre la irradiación y climatología en el municipio de Cedillo. Estos datos han sido proporcionados por MeteoNorm.

	Global horizontal irradiation	Horizontal diffuse irradiation	Temperature	Wind Velocity	Linke turbidity	Relative humidity
	kWh/m ² /mth	kWh/m ² /mth	°C	m/s	[-]	%
January	66.5	31.8	8.1	2.70	2.653	79.8
February	90.6	34.3	9.1	2.99	2.826	73.4
March	137.3	50.8	11.9	3.10	3.177	66.8
April	166.1	62.0	13.8	2.99	3.145	67.4
May	211.9	65.8	17.8	2.90	3.205	59.3
June	229.6	66.0	22.0	2.90	3.202	51.9
July	247.0	53.6	24.5	3.00	2.963	45.7
August	216.5	54.2	25.0	2.90	3.091	43.2
September	156.0	45.5	21.6	2.50	3.048	52.0
October	110.9	44.0	17.1	2.50	2.982	65.6
November	71.9	29.7	11.2	2.80	2.764	78.8
December	57.3	23.4	8.8	2.70	2.672	80.8
Year	1761.6	561.1	15.9	2.8	2.977	63.7

Global horizontal irradiation year-to-year variability 3.6%

Imagen 41. Datos climatológicos en el municipio de Cedillo proporcionados por MeteoNorm. Fuente: PV Syst

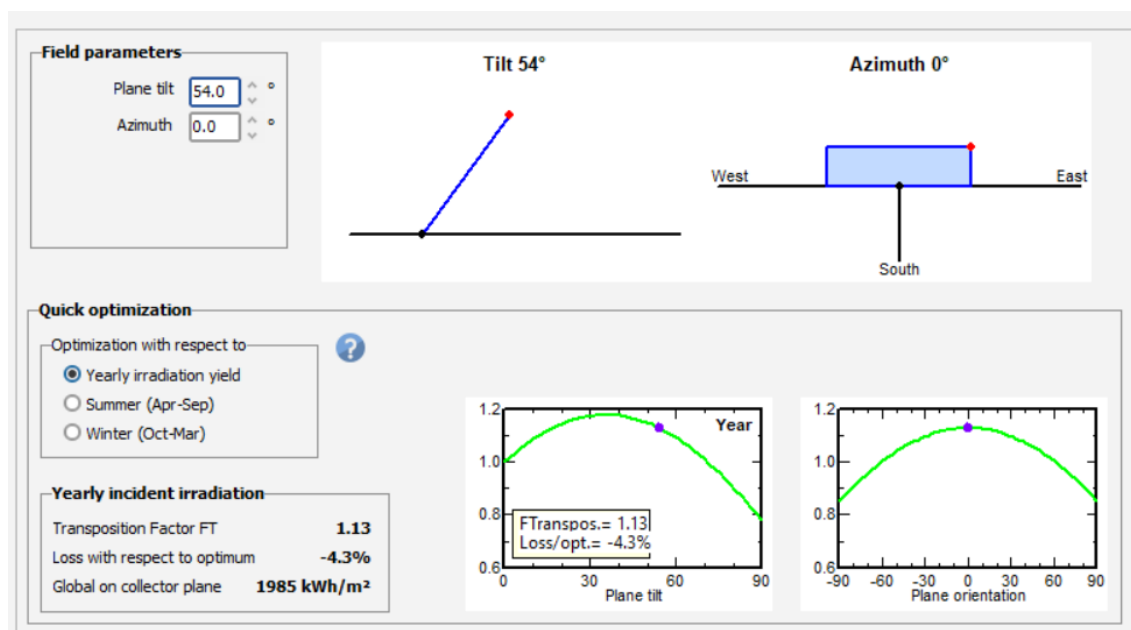


Imagen 42. Parámetros de diseño en la disposición de los módulos fotovoltaicos. Fuente: PV Syst

El software permite determinar el ángulo de inclinación que tendrán los módulos. Se modifica para que tenga una inclinación fija de 54° tal y como se diseñó en el Capítulo 4.2.1.

Sub-array

Sub-array name and Orientation

Name
Orient. **Fixed Tilted Plane**
Tilt **54°**
Azimuth **0°**

Pre-sizing Help

☐ No sizing
Planned power kWp
☒ or available area(modules) m²

Select the PV module

All modules All PV modules

☐ Use optimizer

Sizing voltages : Vmpp (40°C) **28.6 V**
Voc (3°C) **40.9 V**

Select the inverter

All inverters
☒ 50 Hz
☒ 60 Hz

Nb. of inverters ☒
Operating voltage: **335-560 V**
Global Inverter's power **6.7 kWac**
Input maximum voltage: **800 V**

Design the array

Number of modules and strings

Mod. in series ☒ between 12 and 17
Nb. strings ☒ only possibility 2
Overload loss **0.0 %**
Pnom ratio **0.97**

Nb. modules **24**
Area **39 m²**

Operating conditions

Vmp (40°C) **343 V**
Vmp (20°C) **377 V**
Voc (3°C) **491 V**
Plane irradiance **1000 W/m²**
Imp (STC) **17.5 A**
Isc (STC) **18.6 A**
Isc (at STC) **18.6 A**

☐ Max. in data
☒ STC
Max. operating power
(at 1065 W/m² and 30°C) **6.7 kW**
Array nom. Power (STC) 6.5 kWp

The inverter power is slightly oversized.

Imagen 43. Parámetros del sistema eléctrico. Fuente: PVSyst

La amplia gama de inversores y paneles fotovoltaicos que tiene el software registrado en su base de datos permite que se diseñe la simulación con las mismas condiciones calculadas anteriormente. El software indica que el inversor escogido está ligeramente sobredimensionado para las condiciones de potencia, corriente y tensión que le llega de los módulos. Esto supondrá un pequeño aumento de las pérdidas.

Wiring layout

	Aver. length m/circuit	Section mm ²	Per circuit		Global array
			Current A	Resistance mΩ	Resistance mΩ
One string : 12 modules					
String module connections	21	2.5 mm ²	8.8	158	2 strings : 79.0
Main box to inverter	5	2.5 mm ²	17.5	38	37.6

Please specify the total wire length for each circuit ("Sketch" button)

Field global wiring resistance	117 mΩ
MPP loss fraction at STC	0.6 %
Total copper mass	1 kg
Total wire cost	0

Imagen 44. Parámetros de cableado en la instalación eléctrica. Fuente: PVSyst

La simulación permite definir las secciones y distancias del cableado para calcular las pérdidas óhmicas de forma precisa.

A continuación, se presentarán los resultados principales de la simulación. El software muestra los resultados de una forma gráfica y visual que resulta muy sencilla para analizar el comportamiento de la instalación.

Sin embargo, resalta únicamente la siguiente tabla sobre la producción de energía mensual promedio de la planta en el transcurso de un año. Estos datos permitirán calcular el impacto económico de la instalación.

	Energía volcada a la red (kWh)
Enero	647,4
Febrero	741,4
Marzo	867,9
Abril	831,3
Mayo	845,5
Junio	828,7
Julio	899,3
Agosto	938
Septiembre	859,9
Octubre	795,4
Noviembre	648,2
Diciembre	598,3
Total	9501,3

Tabla 20. Energía que la instalación eléctrica es capaz de volcar a la red en un año. Fuente: Elaboración propia, derivado de PVSyst



PVsyst V7.4.8

VC0, Simulation date:
22/08/24 13:38
with V7.4.8

Project: Planta

Variant: New simulation variant

Alvaro Rebollo (Spain)

General parameters

Grid-Connected System

PV Field Orientation

Orientation
Fixed plane
Tilt/Azimuth 54 / 0 °

Horizon

Free Horizon

Sheds on ground

Sheds configuration

Nb. of sheds 24 units
Sizes
Sheds spacing 2.54 m
Collector width 0.98 m
Ground Cov. Ratio (GCR) 38.7 %
Shading limit angle
Limit profile angle 22.1 °

Near Shadings

Linear shadings : Fast (table)

Models used

Transposition Perez
Diffuse Perez, Meteonorm
Circumsolar separate

User's needs

Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module

Manufacturer Generic
Model CS6P - 270P
(Original PVsyst database)
Unit Nom. Power 270 Wp
Number of PV modules 24 units
Nominal (STC) 6.48 kWp
Modules 2 string x 12 In series
At operating cond. (30°C)
Pmpp 6.33 kWp
U mpp 360 V
I mpp 18 A

Total PV power

Nominal (STC) 6 kWp
Total 24 modules
Module area 38.6 m²
Cell area 35.0 m²

Inverter

Manufacturer Generic
Model Sunny Mini Central 7000 HV
(Original PVsyst database)
Unit Nom. Power 6.65 kWac
Number of inverters 1 unit
Total power 6.7 kWac
Operating voltage 335-560 V
Pnom ratio (DC:AC) 0.97

Total inverter power

Total power 6.7 kWac
Number of inverters 1 unit
Pnom ratio 0.97

Array losses

Array Soiling Losses

Average loss Fraction 2.6 %

Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
2.0%	2.0%	2.0%	2.5%	3.0%	3.5%	3.5%	3.5%	3.0%	2.5%	2.0%	2.0%

Thermal Loss factor

Module temperature according to irradiance
Uc (const) 29.0 W/m²K
Uv (wind) 0.0 W/m²K/m/s

DC wiring losses

Global array res. 117 mΩ
Loss Fraction 0.6 % at STC

Series Diode Loss

Voltage drop 0.7 V
Loss Fraction 0.2 % at STC

LID - Light Induced Degradation

Loss Fraction 2.0 %

Module Quality Loss

Loss Fraction -1.5 %

Module mismatch losses

Loss Fraction 2.0 % at MPP

Strings Mismatch loss

Loss Fraction 0.1 %



PVsyst V7.4.8

VC0, Simulation date:
22/08/24 13:38
with V7.4.8

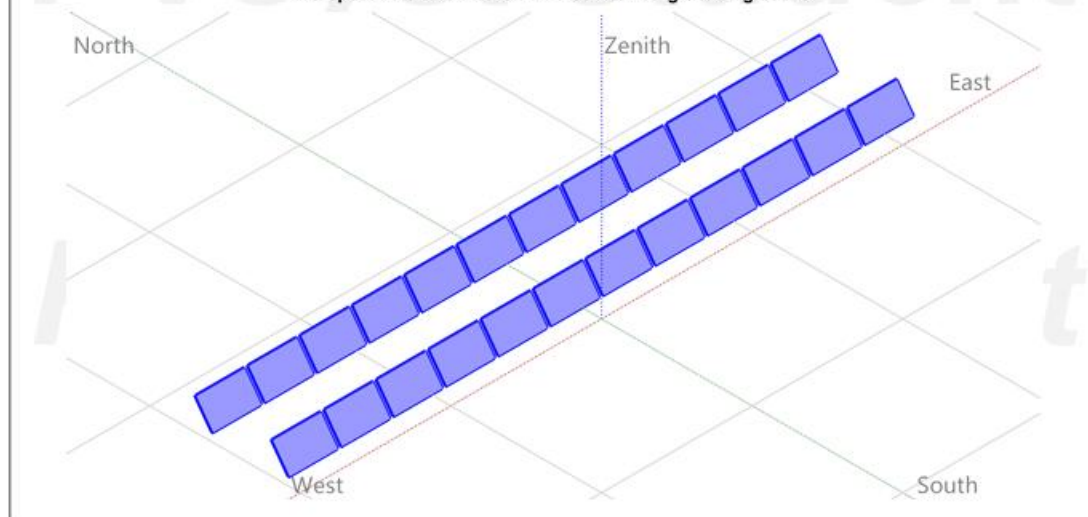
Project: Planta

Variant: New simulation variant

Alvaro Rebollo (Spain)

Near shadings parameter

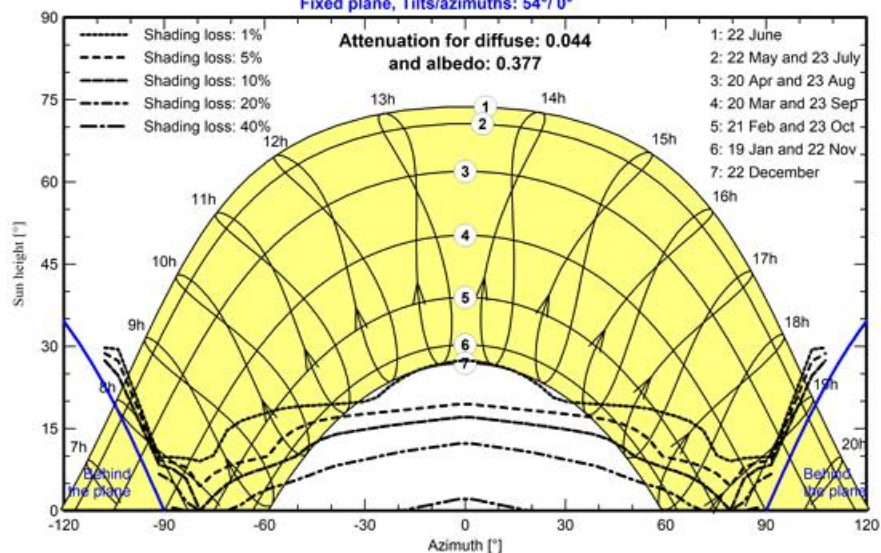
Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram

Orientation #1

Fixed plane, Tilts/azimuths: 54°/ 0°





PVsyst V7.4.8

VC0, Simulation date:
22/08/24 13:38
with V7.4.8

Project: Planta

Variant: New simulation variant

Alvaro Rebollo (Spain)

Main results

System Production

Produced Energy 9501.31 kWh/year

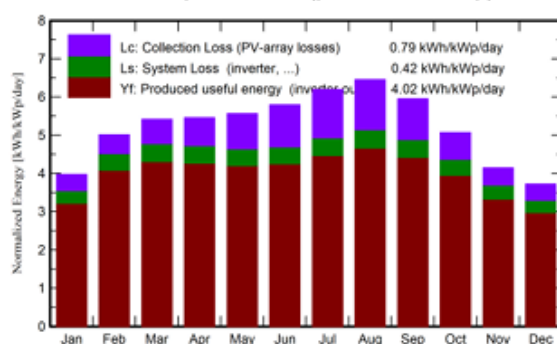
Specific production

1466 kWh/kWp/year

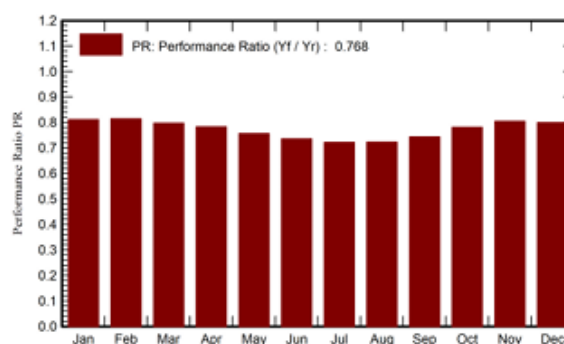
Perf. Ratio PR

76.78 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	66.5	31.83	8.14	123.1	114.6	714	647.4	0.812
February	90.6	34.30	9.11	140.5	133.6	821	741.4	0.815
March	137.3	50.83	11.88	167.9	158.8	961	867.9	0.798
April	166.1	62.03	13.81	163.7	152.4	920	831.3	0.784
May	211.9	65.80	17.82	172.5	158.1	933	845.5	0.756
June	229.6	65.99	22.01	173.9	157.5	914	828.7	0.735
July	247.0	53.60	24.46	192.2	175.1	992	899.3	0.722
August	216.5	54.17	25.04	200.1	184.4	1034	938.0	0.723
September	156.0	45.48	21.63	178.6	167.0	951	859.9	0.743
October	110.9	43.99	17.14	157.2	148.7	879	795.4	0.781
November	71.9	29.68	11.23	124.4	117.8	719	648.2	0.804
December	57.3	23.36	8.75	115.5	107.5	664	598.3	0.800
Year	1761.7	561.06	15.96	1909.6	1775.5	10503	9501.3	0.768

Legends

GlobHor Global horizontal irradiation
 DiffHor Horizontal diffuse irradiation
 T_Amb Ambient Temperature
 GlobInc Global incident in coll. plane
 GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings

EArray Effective energy at the output of the array
 E_Grid Energy injected into grid
 PR Performance Ratio



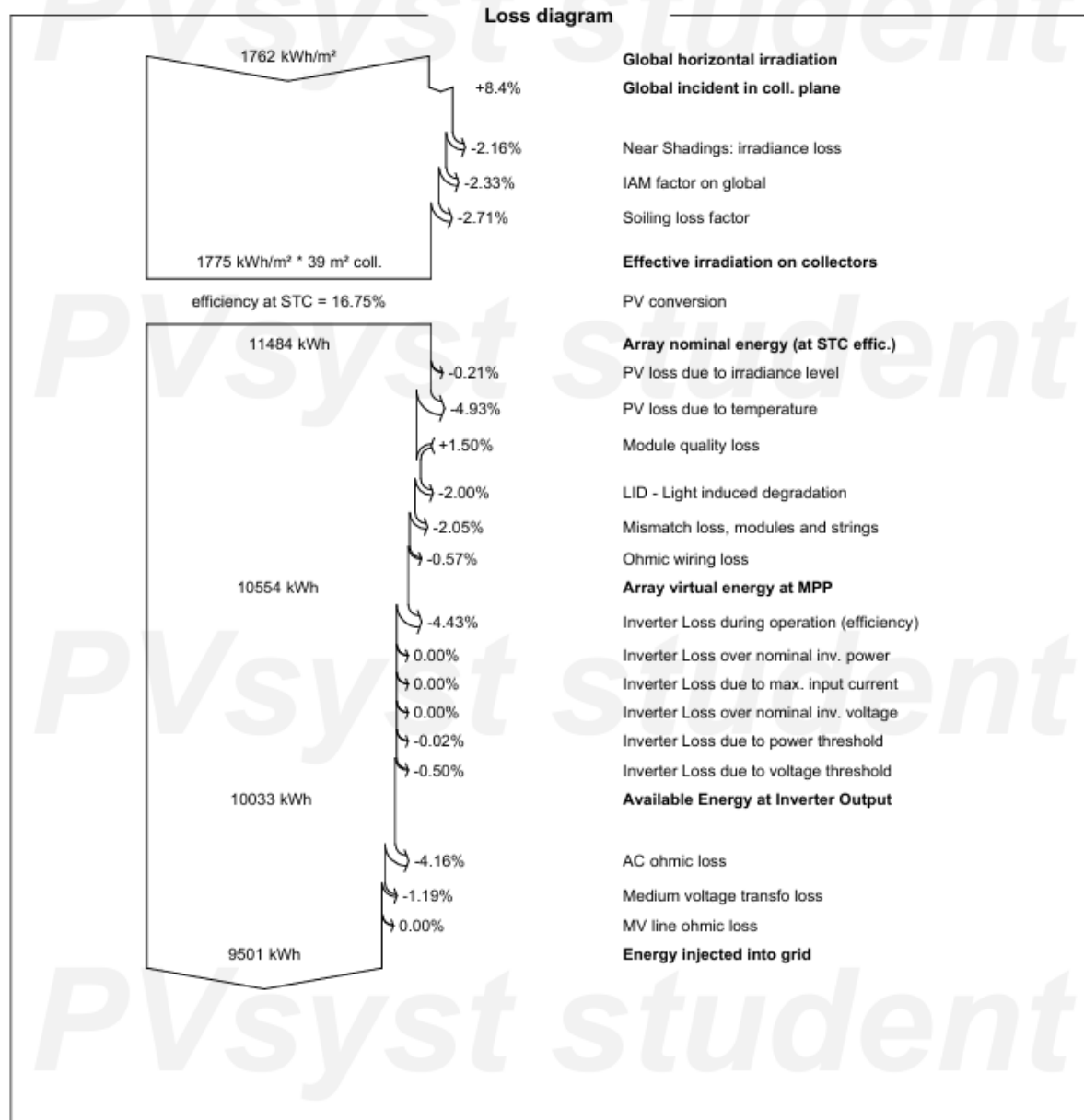
PVsyst V7.4.8

VC0. Simulation date:
22/08/24 13:38
with V7.4.8

Project: Planta

Variant: New simulation variant

Alvaro Rebollo (Spain)



Conclusión

A la vista de estos resultados se puede observar que la energía total que es capaz de suministrar la instalación fotovoltaica tan solo podría abastecer el funcionamiento de las bombas un total de 74,69 días seguidos las 24 h del día si las bombas están funcionando a plena carga.

Si se diera el caso en el que las bombas se encuentran funcionando a plena carga (5,3 kW) durante las 24 h del día todo el año se obtendría un total de energía requerida de 46,428 MWh.

En este caso la energía producida en un año por la instalación eléctrica tan solo supondría un 20,5% de la máxima posible requerida por las bombas a plena carga de forma continua. Este resultado es semejante al factor de trabajo del 24% del que se partió como hipótesis para dimensionar el tanque regulador de la instalación de captación de agua.

Es razonable que el factor de trabajo obtenido en la planta fotovoltaica sea menor que el propuesto de consumo de agua de la población ya que la planta fotovoltaica solo es capaz de suministrar potencia durante horas diurnas. Se puede interpretar que la diferencia entre ambos factores proviene del consumo de energía nocturno. Lógicamente este consumo es mucho menor que el diurno debido a que se minimiza la actividad humana en una población tan pequeña y con la media de edad tan alta como en la población de Cedillo.

De todas formas, estos son valores arbitrarios que muy bien podrían cambiar entre una población u otra, sin embargo, al no contar con los datos de consumo de agua anual en Cedillo no es posible obtener resultados más realistas.

Capítulo 5. Viabilidad económica

Para realizar el cálculo, se asumirá que toda la potencia generada se consume en las bombas, debido a que no se dispone de la distribución de la demanda de agua en Cedillo, lo que impide determinar el consumo energético real de las bombas. Solo ha sido posible diseñar las instalaciones considerando las condiciones máximas de operación. Partiendo del caudal requerido, se ha dimensionado la potencia de las bombas y, posteriormente, el suministro de energía a través de las placas fotovoltaicas.

Sin embargo, al no contar con la distribución de consumo de agua en la población de Cedillo, no es posible obtener el factor de trabajo real de las bombas a lo largo del día, lo que limita el

proyecto en términos de obtener resultados factibles que reflejen una situación real. Esta falta de datos de consumo impide obtener resultados precisos y representativos.

Por lo tanto, el estudio de viabilidad económica se centrará únicamente en calcular el ahorro que supone suministrar la energía necesaria a las bombas a través de la planta fotovoltaica, en lugar de utilizar la red eléctrica. Se obtendrá este cálculo con la energía resultante de la simulación en PVSyst.

Se tomarán como referencia los precios medios mensuales de la energía durante el año 2023.³³ PVSyst proporciona datos sobre la producción promedio mensual de la planta para cada hora del día, sin embargo, la OMIE no dispone de datos accesibles que muestren también el precio promedio mensual para cada hora, pero sí muestra el promedio del mes.

Por este motivo, se simplificarán los cálculos utilizando el total de la producción mensual de la planta multiplicados por el precio de la energía promedio mensual y así obtener el ahorro final.

Mes de estudio (2023)	Energía volcada a la red (kWh)	Precio medio aritmético (€/MWh)	Ahorro Total (€)	Energía demanda PCC (kWh)	Coste Total PCC (€)
Enero	647,4	69,55	45,03	3943,20	177,55
Febrero	741,4	133,47	98,95	3561,60	352,44
Marzo	867,9	89,61	77,77	3943,20	306,67
Abril	831,3	73,73	61,29	3816,00	233,89
Mayo	845,5	74,21	62,74	3943,20	247,41
Junio	828,7	93,02	77,09	3816,00	294,16
Julio	899,3	90,47	81,36	3943,20	320,82
Agosto	938	96,05	90,09	3943,20	355,26
Septiembre	859,9	103,34	88,86	3816,00	339,10
Octubre	795,4	90,14	71,70	3943,20	282,72
Noviembre	648,2	63,45	41,13	3816,00	156,95
Diciembre	598,3	72,17	43,18	3943,20	170,26
Total			839,20		3237,23

Tabla 21. Cálculo del ahorro total debido al suministro de la planta fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia, derivado de (OMIE, 2023)

En la tabla se muestran los resultados de ahorro anual por el empleo de energía proveniente de la planta fotovoltaica y el resultado del coste anual de energía si las bombas estuvieran funcionando en condiciones de plena carga de forma continua (PCC). Para estas condiciones PCC

³³ (OMIE, 2023)

se considera la potencia máxima de funcionamiento de las bombas 5,3 kW, menor que la empleada para dimensionar la planta tal y como se detalla en el Capítulo 4.1.4.

En las condiciones de funcionamiento PCC el ahorro anual tan solo cubriría el 26% de los costes de energía requerido por las bombas. Al desconocerse el factor de trabajo diario de las bombas, ya que no se dispone de la distribución de la demanda de agua en Cedillo, se da por concluido el análisis de la viabilidad económica reconociendo las limitaciones del proyecto.

Presupuesto estimado y LCOE (Levelized Cost of Energy)

En vista de los resultados de generación obtenidos se elaborará un pequeño análisis del presupuesto general del proyecto tomando como referencia los precios proporcionados por los fabricantes y los precios de obras similares anteriores.³⁴ Se reconocen las limitaciones para obtener un presupuesto real de las obras civiles, estudios y permisos debido a falta de información específica y por ello las estimaciones se han hecho siguiendo un criterio propio razonable con la ayuda de documentos en la red.³⁵

Posteriormente, se detallará en qué consiste la inversión en la parte de la instalación eléctrica de modo que se pueda obtener el resultado del LCOE con la producción total de energía obtenido en la simulación de PVSyst de 9,5 MWh anuales. Se supondrá una vida para el proyecto de 20 años. La fórmula empleada para el cálculo del LCOE es la siguiente:

$$LCOE = \frac{Inversión\ Inicial + \int (O\&M_{anual} \cdot Vida\ Útil)}{Producción\ Anual \cdot Vida\ Útil} \quad (103)$$

El LCOE (Coste Normalizado de la Energía) es una métrica ampliamente utilizada en el sector energético para evaluar y comparar la rentabilidad y la competitividad económica de diferentes tecnologías de generación de energía, como plantas solares, eólicas, de gas, o nucleares.

³⁴ (Certicalia, 2024)

³⁵ (JuntaEx, 2021)

Concepto	Coste estimado (€)
Obra Civil y Captación de Agua	
Obras de captación	40.000,00
Desarenador	10.000,00
Conducción de agua	40.000,00
Sistema de bombeo (2 bombas)	4.000,00
Tratamiento del agua (cloración)	3.000,00
Tanque de almacenamiento	15.000,00
Mano de obra y contingencias (obra civil)	50.000,00
Instalación Fotovoltaica	
Paneles fotovoltaicos	5.000,00
Inversor	2.000,00
Cableado y protecciones eléctricas	24.300,00
Mano de obra y montaje (fotovoltaica)	10.000,00
Estudios Previos y Permisos	
Estudios demográficos, hidrológicos, geológicos, y ambientales	10.000,00
Permisos de construcción y ambientales	5.000,00
Total de Inversión Inicial Estimada	218.300,00

Tabla 22. Presupuesto general del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en la tabla del presupuesto general que el coste estimado para la construcción de la instalación de captación de agua es mucho mayor que para la planta fotovoltaica. Esto se debe a que sería necesario mover gran cantidad de tierras y poner en funcionamiento maquinaria pesada. Además, la zona de captación se sitúa a casi 1 km de distancia del tanque donde se recibe el agua para distribuirla posteriormente a la población.

Concepto	Volumen
Paneles Fotovoltaicos	5.000,00 €
Inversor	2.000,00 €
Nº metros cable	45,00
Coste unitario cable (€/m)	20,00
Cableado y protecciones	2.900,00 €
Mano de obra y montaje	10.000,00 €
Estudios y permisos	2.000,00 €
Total Inversión Inicial	21.965,00 €

Tabla 23. Detalle del presupuesto de la planta fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia

Se ha tenido en cuenta un presupuesto de 2000 € para las protecciones y 900 € para el cableado, que solo cuenta con 45 m en total (dos vectores de placas en serie de 20 m cada uno y 5 m de distancia hasta el inversor).

Concepto	Volumen
Inversión Inicial	21.965,00 €
Coste de O&M Anual	439,30 €
Vida Útil (años)	20,00
Producción Anual (MWh)	9,50
Producción Total en 20 años (MWh)	190,00
LCOE (€/MWh)	161,85

Tabla 24. Cálculo del LCOE de la planta fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de los costes operacionales y de mantenimiento (O&M) se ha asumido un coste anual del 2% de la Inversión Inicial ya que la instalación es pequeña. El resultado final se ha obtenido de:

$$LCOE = \frac{Inversión\ Inicial + \int(O\&M_{anual} \cdot Vida\ Útil)}{Producción\ Anual \cdot Vida\ Útil} = \frac{21965 + 439 \cdot 20}{9,5 \cdot 20} = 161,85 \frac{€}{MWh}$$

Este resultado está por encima de la media de las plantas fotovoltaicas industriales dedicadas a la generación que se sitúa entre 24 y 96 €/MWh en 2023.³⁶ Teniendo en cuenta que el precio de la energía se sitúa hoy en día en unos 100 €/MWh se puede concluir que el coste de producir energía para abastecer las bombas y conseguir así un sistema autosuficiente durante las horas diurnas es mayor que el que el de suministrar esa misma energía desde la red. Por este motivo, se determina que la instalación fotovoltaica no contribuye eficazmente a la rentabilidad del proyecto.

Capítulo 6. Conclusiones

Este proyecto ha desarrollado un sistema integral de captación, tratamiento y distribución de agua, complementado con una instalación de autoconsumo energético basado en energía fotovoltaica, específicamente diseñado para el municipio de Cedillo. El proyecto abarca desde estudios preliminares exhaustivos hasta el diseño detallado de las infraestructuras necesarias, con el objetivo de proporcionar un suministro de agua potable de manera eficiente y sostenible, reduciendo a su vez la dependencia de fuentes de energía no renovables.

³⁶ (MaySunSolar, 2024)

En cuanto al diseño de las instalaciones, se han escogido sistemas que optimizan tanto la captación como el tratamiento del agua. Se decidió implementar un sistema de captación con obra transversal al río, utilizando una bocatoma de fondo para garantizar un control preciso del caudal y un suministro constante, a pesar de las fluctuaciones en la demanda. Para el tratamiento del agua, se seleccionó un desarenador en canal, adecuado para las características del agua del río Tajo, y un sistema de cloración continua con cloro líquido, garantizando así la potabilidad del agua distribuida.

En el ámbito energético, se optó por la instalación de placas fotovoltaicas de silicio monocristalino, conocidas por su alta eficiencia y larga vida útil. Esta elección permite que el sistema de captación y tratamiento opere de manera autónoma durante las horas de sol, aprovechando al máximo los recursos renovables disponibles en la región.

Siguiendo los criterios de diseño detallados en el Estado del Arte y los estudios previos se obtuvo un caudal máximo de 1,244 L/s, dato de partida para el diseño de la instalación de captación, conducción y tratamiento, y una potencia total de 6,4 kW para el dimensionamiento de la instalación eléctrica.

Por otro lado, los resultados obtenidos en la simulación del sistema eléctrico, realizada mediante PVSyst fueron razonables con respecto al factor de demanda de agua propuesto para la población de Cedillo, especificado en el cálculo del tanque regulador. La simulación también indicó que, aunque el sistema no cuenta con baterías debido a su elevado coste y baja eficiencia en este contexto, la conexión directa a la red eléctrica permite suplir la demanda energética durante la noche, garantizando la continuidad del servicio.

Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones del proyecto. A pesar de que se han tomado en cuenta múltiples factores técnicos, económicos y medioambientales, la viabilidad y el rendimiento a largo plazo del sistema dependerán de condiciones externas, como posibles cambios climáticos, variaciones en la calidad del agua y la necesidad de un mantenimiento constante de las infraestructuras instaladas. Además, la falta de datos específicos de consumo de agua diario por la población de Cedillo y en consecuencia la distribución de demanda de energía de las bombas, limitan en gran medida la posibilidad de obtener datos precisos y representativos del coste y ahorro de energía debido al impacto de la planta fotovoltaica.

De todas formas, a pesar de las limitaciones de diseño, en el estudio de la viabilidad económica a través del análisis del LCOE, se ha podido determinar con bastante seguridad que el proyecto debería prescindir de la instalación eléctrica para el autoconsumo de las bombas debido a que no resulta rentable. Como medida correctora, en vez de recurrir únicamente al suministro de la red, se podría considerar ampliar el tamaño de la planta capacitándola para dar más potencia y así disminuir el LCOE (costes fijos muy altos y variables pequeños). Es razonable que el valor obtenido en nuestra pequeña planta solar sea más alto que en la industria ya que las producciones de energía son mucho mayores aprovechando la economía de escala.

Por último, cabe destacar que el impacto ambiental, aunque mitigado en la medida de lo posible, seguirá siendo un desafío, especialmente en las áreas protegidas circundantes. Estos aspectos deberán ser monitoreados y gestionados cuidadosamente para asegurar la sostenibilidad y eficacia continuas del sistema propuesto.

Capítulo 7. Objetivos de Desarrollo Sostenible

Este proyecto se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por las Naciones Unidas, contribuyendo de manera significativa a la agenda global para un desarrollo más equilibrado y sostenible. A continuación, se destacan los principales ODS relacionados con el proyecto:

1. **ODS 6:** Agua limpia y saneamiento

- Meta 6.1 y 6.4: Este proyecto busca asegurar la disponibilidad y gestión sostenible del agua en Cedillo, garantizando el acceso a agua limpia y segura mediante la captación, tratamiento y almacenamiento adecuados del recurso hídrico.

2. **ODS 7:** Energía asequible y no contaminante

- Meta 7.2: La instalación de un sistema de autoconsumo eléctrico a través de energía fotovoltaica impulsa el uso de fuentes de energía renovable, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y contribuyendo a un suministro energético más limpio y sostenible.

3. **ODS 9:** Industria, innovación e infraestructura

- Meta 9.4: El proyecto promueve la construcción de infraestructuras resilientes y sostenibles, integrando tecnologías innovadoras tanto en el tratamiento de agua como en la generación de energía solar.

4. **ODS 11:** Ciudades y comunidades sostenibles

- Meta 11.6: Al minimizar el impacto ambiental mediante el uso de energías renovables y la gestión eficiente de recursos hídricos, el proyecto contribuye a la sostenibilidad del municipio de Cedillo, mejorando la calidad de vida de sus habitantes.

5. **ODS 13:** Acción por el clima

- Meta 13.2: La implementación de energías renovables y la optimización del uso de recursos naturales son acciones directas para combatir el cambio climático, alineándose con los esfuerzos globales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

6. **ODS 15:** Vida de ecosistemas terrestres

- Meta 15.1: Al promover la gestión sostenible de los recursos hídricos y minimizar los impactos ambientales, este proyecto contribuye a la conservación de los ecosistemas terrestres y acuáticos en la región de Cedillo.

Bibliografía

- [1] Álvarez, D. (2023). Río Tajo. *GEOenciclopedia*. Obtenido de <https://www.geoenciclopedia.com/rio-tajo-611.html>
- [2] Bayona, E. (2012). Funcionamiento de una célula fotovoltaica. *Researchgate*.
- [3] Boss Tech. (s.f.). ¿Cómo funciona un desarenador?
- [4] Carbotecnia. (2018). ¿Qué es la cloración? Método de desinfección de agua.
- [5] Cedex. (2020-2021). *Rio Tajo en Cedillo*. Obtenido de <https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-datos.asp?indroea=3285>
- [6] Certicalia. (2024). Precios para proyecto de obra en Extremadura.
- [7] CHT. (2011). Plan hidrológico de la cuenca del Tajo. *Confederación Hidrológica del Tajo*.

- [8] Cualla, A. L. (2000). Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. *Escuela Colombiana de Ingeniería*.
- [9] ECO. (2020). Estudio de Impacto Ambiental de una planta solar fotovoltaica denominada “FV Almaraz. *Iberenova Promociones S.A.U.*
- [10] Ecosistemas del sureste. (2015). El efecto fotovoltaico.
Embalses.net. (2024). Obtenido de <https://www.embalses.net/pantano-952-cedillo.html>
- [11] Endesa. (2023). El crecimiento imparable del autoconsumo fotovoltaico. Obtenido de <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/aumento-autoconsumo-fotovoltaico-espana>
- [12] FibrasyNormas. (2020). Desarenadores: Definición, estructura y ventajas.
- [13] Gobierno de Extremadura. (2014). *Plan de Ordenación de los Recursos Naturales, Anexo I*.
- [14] IGME. (2000). *Inventario Español de Lugares de Interés Geológico*. Obtenido de <https://info.igme.es/ielig/LIGInfo.aspx?Codigo=TM5052>
- [15] IMMODO. (2023). Energía Solar Fotovoltaica en 2024: Estado y Previsiones de la IAE sobre instalación y autoconsumo en España y resto del mundo.
- [16] INE. (2023). CEDILLO. *citypopulation*. Obtenido de https://www.citypopulation.de/es/spain/extremadura/c%C3%A1ceres/10062__cedillo/
- [17] JuntaEx. (2021). Base de precios de la construcción de Extremadura.
- [18] MaySunSolar. (2024). Una inmersión profunda en el LCOE. Obtenido de <https://www.maysunsolar.es/blog/una-inmersion-profunda-en-el-lcoe-coste-nivelado-de-energia#:~:text=Para%20calcular%20el%20LCOE%2C%20sumamos,entre%20su%20vida%20%C3%BAtil%20prevista.>
- [19] Ministerio de Educación y Formación Profesional. (s.f.). *Sistemas eléctricos en redes e instalaciones de agua*. Obtenido de https://sarreplec.caib.es/pluginfile.php/23338/mod_resource/content/3/index.html#
- [20] MITECO. (2024). *iAgua*. Obtenido de <https://www.iagua.es/data/infraestructuras/presas/cedillo>
- [21] OMIE. (2023). Evolución del mercado de electricidad.
- [22] Otovo. (2020). Cómo funcionan las placas solares. Obtenido de <https://www.otovo.es/blog/placas-solares/como-funcionan-placas-solares-fotovoltaicas/>
- [23] Salazar, R. (2021). *Tipos de Captaciones Superficiales*. Universidad de Nariño. Obtenido de <https://1library.co/document/z3j0kdey-acueductos-ing-roberto-salazar-cano.html>
- [24] Solarprofit. (2023). Predicciones del sector fotovoltaico. Obtenido de <https://solarprofit.es/es/blog/predicciones-energia-solar-en-2024/>

- [25] SSWM. (s.f.). Tecnologías de abastecimiento de agua, cloración centralizada. Obtenido de <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/cloraci%C3%B3n-centralizada>
- [26] Stauffer, B. (s.f.). SSWM. Obtenido de [https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/captacion/captaci%C3%B3n-de-r%C3%ADos,-lagos-y-embalses-\(reservorios\)](https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/captacion/captaci%C3%B3n-de-r%C3%ADos,-lagos-y-embalses-(reservorios))
- [27] Tecpa. (2024). La cloracion del agua en tratamientos de aguas residuales.
- [28] Torres, V. (2013). Instalación fotovoltaica conectada a red. *Universidad Rey Juan Carlos*.
- [29] Tritec. (2017). Tipos de paneles fotovoltaicos. *Tritec Intervento*.
- [30] WHO . (2023). Drinking-Water. *World Health Organization*.
- [31] Wikipedia. (2023). *Presa de Cedillo*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Presa_de_Cedillo
- [32] Wikipedia. (2024). Presa de Cedillo. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Presa_de_Cedillo
- [33] Wikipedia. (s.f.). Tajo. *Wikipedia*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Tajo>

Anexo I



