



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

**ESTUDIO DE DIFERENTES
SISTEMAS DE BOMBEO
ALIMENTADOS POR ENERGÍA
SOLAR FOTOVOLTAICA PARA
DISTINTAS ESTRATEGIAS DE
RIEGO DE UNA PARCELA DE
OLIVAR**

Alumno: Alejandro Fontecha de la Rosa

Tutor: Prof. D. Francisco José Pérez Latorre
Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don FRANCISCO JOSÉ PÉREZ LATORRE, tutor del Trabajo Fin de Grado titulado: “Estudio de diferentes distemas de bombeo alimentados por energía solar fotovoltaica para distintas estrategias de riego de una parcela de olivar”, que presenta ALEJANDRO FONTECHA DE LA ROSA, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Linares.

Linares, junio de 2018

El alumno:

El tutor:

Alejandro Fontecha de la Rosa

Francisco José Pérez Latorre

INDICE

I. MEMORIA

Resumen.....	6
1. Introducción.....	7
2. Objetivos.....	9
3. Características generales de la finca.....	9
3.1 Ubicación.....	10
3.2 Condiciones climatológicas de la zona.....	12
3.3 Composición del suelo.....	13
3.4 Red de riego.....	14
4. Configuración y componentes del sistema.....	15
5. Estrategias de riego	18
5.1 Estrategia 1.....	19
5.2 Estrategia 2.....	20
5.3 Estrategia 3.....	22
6. Cálculo y dimensionado del sistema	25
6.1 Determinación de las necesidades hídricas y red de irrigación.....	25
6.1.1 Cálculo de la demanda de agua.....	25
6.1.2 Cálculo de la altura hidráulica de bombeo.....	26
6.1.3 Cálculo de la energía hidráulica necesaria.....	26
6.1.4 Cálculo de las necesidades de riego.....	27
6.1.5 Cálculo de las pérdidas de carga unitarias.....	29
6.2 Evaluación de la energía solar disponible.....	33
6.3 Dimensionado de los componentes de la instalación.....	39
6.3.1 Dimensionado del equipo de bombeo.....	39
6.3.2 Dimensionado de los paneles solares fotovoltaicos.....	48
6.3.3 Dimensionado del variador de frecuencia.....	50
6.3.4 Dimensionado del cableado.....	51
6.3.5 Dimensionado de las protecciones.....	52
6.3.6 Dimensionado de la estructura soporte de los paneles.....	54
7. Conclusiones del estudio.....	62
8. Referencias.....	65

II. ANEJOS

Anejo de cálculos

1. Obtención de las curvas de nivel.....	68
2. Datos condiciones meteorológicas.....	70
3. Informe de la energía solar disponible.....	73
4. Composición del suelo.....	77
5. Simulación de la red de riego.....	78
6. Cálculo de las necesidades de riego.....	90
7. Cálculo de la energía hidráulica necesaria.....	92
8. Dimensionado de los módulos solares fotovoltaicos.....	94
9. Cálculo del cableado.....	97

Anejo de planos

1. Plano 1: Ubicación
2. Plano 2: Curvas de nivel del entorno
3. Plano 3: Curvas de nivel de la finca
4. Plano 4: Perfil de la estructura
5. Plano 5: Estructura para la estrategia 1
6. Plano 6: Estructura para la estrategia 2
7. Plano 7: Estructura para la estrategia 3

RESUMEN

El presente estudio se pretende realizar un análisis de la reducción del consumo de energía de una instalación de riego mediante la instalación de un sistema de bombeo alimentado por energía solar fotovoltaica. Para ello se han establecido distintas estrategias de riego basándose en la sectorización de la finca, con ello se pretende reducir el consumo energético de la instalación, a partir de la estrategia de riego más viable. La sectorización de la finca consistirá en establecer periodos de riego para cada sector en función de las necesidades hídricas de las plantas. Para ello se ha analizado como intervienen las condiciones climatológicas en las necesidades de agua de cada planta, y la radiación real a lo largo de todo el año que incide sobre la finca a estudio, ya que de ello dependerá la producción de energía para el suministro de los diferentes grupos de bombeo. En definitiva, el principal objetivo del estudio será establecer la sectorización más adecuada para minimizar los costes y optimizar el uso de la energía.

1 INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente el olivar ha sido el cultivo de secano predominante en nuestra región, pese a la falta de lluvias y de riego, se puede obtener una producción aceptable en las condiciones más desfavorables, pero a partir de los años 90 con el fin de obtener mayor rentabilidad de las explotaciones se comenzó con la instalación en las plantaciones de sistemas de riego. Actualmente, el consumo de energía del sector agrario es del 4.5% del total nacional, del cual el 22% se corresponde con la agricultura de regadío, es por ellos que se busca que la agricultura incorpore en su desarrollo y gestión, la eficiencia energética para alcanzar los objetivos de Kioto y la reducción de emisiones de CO₂ y otros gases asociados al efecto invernadero. Para una mayor eficiencia del sistema es indispensable tener en cuenta las características de la plantación y el análisis foliar del olivo, los recursos hídricos de la zona, las características del terreno y la climatología.

En este trabajo, se plantea un estudio sobre ¿Cómo reducir el consumo de energía en una instalación de riego ya existente?, para ello en función de la eficiencia del riego, las necesidades hídricas de la planta y el calendario de riego se plantea la alimentación del sistema de bombeo mediante energía solar fotovoltaica, en vez del sistema actual alimentada por red eléctrica convencional. La instalación de módulos solares fotovoltaicos es la opción más viable para la generación de energía eléctrica, debido a la gran bajada que han experimentado los precios de la producción de 1 W por energía solar en los últimos años, el llamado efecto Swanson (ver gráfico), en gran parte, debido a las escasas necesidades de mantenimiento de la instalación. Para ello se debe estudiar la radiación incidente en la localización elegida y las condiciones meteorológicas, para optimizar la producción eléctrica.

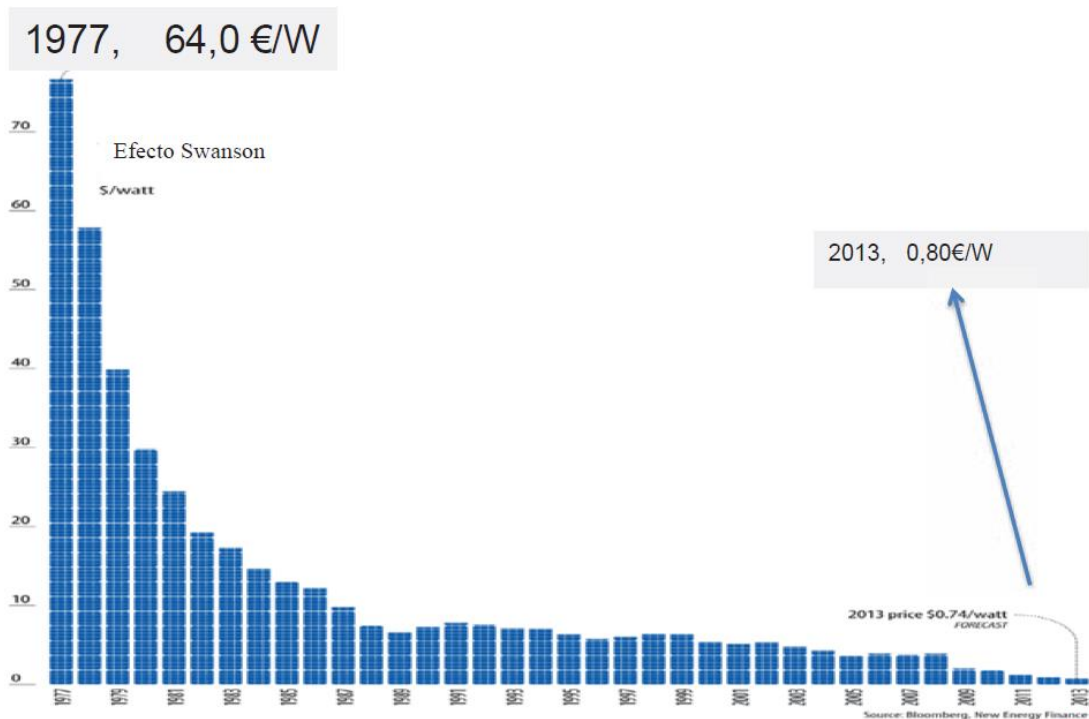


Figura 1.1 Evolución del precio de producción de 1W por energía solar

Para el presente estudio se considerarán los siguientes aspectos:

- Sectorización de la red de distribución, para ello se tendrán en cuenta los cultivos, la topografía, los requerimientos de presión de los distintos puntos, la topología de la red, y una caracterización hidráulica de la red.
- Detección de los puntos críticos de presión, serán los hidrantes con requerimientos energéticos especiales.
- Adecuación del bombeo a diferentes escenarios, se instalarán variadores de velocidad para obtener rendimientos altos en un rango amplio de caudales demandados, siempre suministrando con una presión mínima requerida de la red.

En consecuencia, de estos estudios se establecerán 3 estrategias de riego diferentes, con distintas sectorizaciones propuestas con el objetivo de garantizar el riego completo de la finca, en función de las horas de sol aprovechables para la generación de energía y de las necesidades de riego, con 3 equipos de bombeo diferentes para cada una de las estrategias, minimizando los costes y optimizando el uso de la energía. Con el objetivo de aunar las necesidades hídricas del cultivo (objetivo agronómico) con los requerimientos energéticos (objetivo energético) y poder conseguir el mejor resultado combinando ambos aspectos.

2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

La elaboración del presente estudio corresponde al Trabajo Fin de Grado del plan de estudios del Grado en Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Superior de Linares, de la Universidad de Jaén.

El estudio ha sido dirigido y supervisado por D. Francisco José Pérez Latorre, del departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, al que le gustaría expresar mi agradecimiento por todos estos meses de trabajo.

El objetivo es la realización de un estudio de diferentes estrategias de riego de una parcela de olivar mediante energía solar fotovoltaica, para ello se seguirán 3 estrategias distintas de riego y se establecerá la opción más eficiente desde un punto de vista técnico y como económico. Para la elaboración del estudio se ha tenido en cuenta:

- Determinación de las necesidades de agua del olivar.
- Planteamiento de tres estrategias diferentes de riego.
- Cálculo de la instalación de bombeo para cada estrategia propuesta.
- Cálculo de las necesidades hidráulicas de cada estrategia.
- Cálculo de la instalación fotovoltaica con variadores de velocidad en función de las necesidades.
- Comparativa de la eficiencia y viabilidad de cada opción.

Todo ello recogido en una memoria con anejo de cálculos y planos necesarios para su correcta interpretación. Con ello se pretende:

- Aprovechamiento de los recursos hídricos de la finca en cuestión.
- Mejorar la rentabilidad y producción de la explotación, mediante el estudio de las diversas estrategias de riego planteadas, reduciendo costes e incrementando la producción anual.
- Estudio que sirva como precedente y aplicable a fincas de características similares.

3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA FINCA

A la hora de realizar el estudio, principalmente se va a considerar:

- La ubicación de la parcela a estudio, y las condiciones meteorológicas de la zona (temperatura, precipitación efectiva, evapotranspiración, radiación y horas de sol).
- Orografía del terreno, desnivel y diferencias de cotas entre los distintos puntos de la finca.
- Composición del suelo de la finca
- La existencia de una red de tuberías para riego con 7 hidrantes ya instalados, por tanto, el estudio será a partir de la instalación existente en la finca.
- Diseñar distintas estrategias de riego en función de una sectorización de la parcela, en función de las horas de sol.
- La inversión realizada en la instalación y puesta en marcha del sistema elegido no sea excesiva, y sea amortizable a medio plazo.

3.1 Ubicación

La parcela de olivar sobre la que se realizará el estudio está ubicada en el término municipal de Navas de San Juan, en la provincia de Jaén, junto a la carretera J-6010, de fácil acceso por esa vía (VER PLANO).

Dicha finca se sitúa en la HOJA: 0906 del Mapa Geográfico Nacional a escala 1:25.000, con coordenadas geográficas DMS 38°09'08.5"N 3°15'30.6"W.

Se han obtenido las curvas de nivel del terreno a partir del modelo digital de elevación del Instituto Geográfico Nacional (IGN) mediante el software gvSIG, realizando curvas de nivel a cada 5 metros y a cada metro, y exportando los planos a AutoCAD. La finca presenta una elevación máxima de 501 metros sobre el nivel del mar, con un desnivel acumulado de 28 metros y una pendiente máxima del 9.5%.



Figura 3.1 Imagen aérea de la finca con curvas de nivel e hidrantes

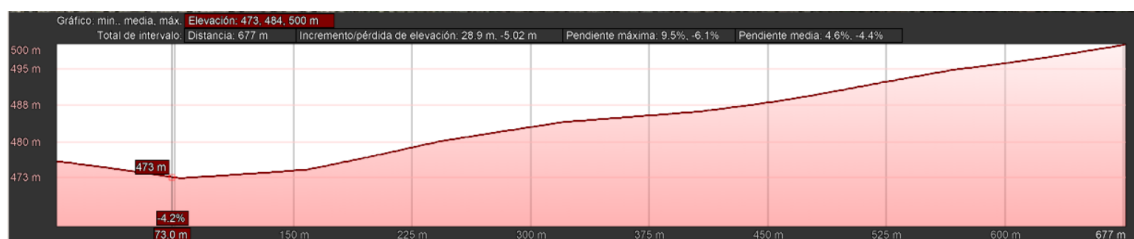


Figura 3.2 Gráfico del perfil de elevación de la finca

Está dividida en dos parcelas por un carril que da acceso a fincas contiguas, con una superficie total de 94567.9 m² y una plantación total de 895 olivos. Aproximadamente a 500 m se encuentra el cauce del río Guadalimar.



Figura 3.3 Imagen aérea de la finca

3.2 Condiciones climatológicas de la zona

Para el desarrollo de la planta y la producción de fruto, el riego es uno de los factores más importantes del cultivo, para ello se tiene en cuenta las características meteorológicas de la región. Los parámetros climáticos más importantes a tener en cuenta son las precipitaciones (mm), y la evapotranspiración (mm/día), que dependerá de la temperatura media diaria (°C). En el caso de que las precipitaciones sean escasas y la evaporación de la humedad del suelo muy alta, el cultivo sufrirá un déficit hídrico, que alterará a los procesos que experimenta la planta a lo largo de todo el año, con una repercusión final negativa en cuanto a la producción. Para alcanzar la máxima producción, el contenido de agua del suelo debe ser suficiente para las necesidades de la planta y compensar la evaporación a la atmosfera. Se conoce como evapotranspiración del cultivo (ET), a la pérdida de humedad de la superficie debido a la traspiración y a la que se pierde por evaporación.

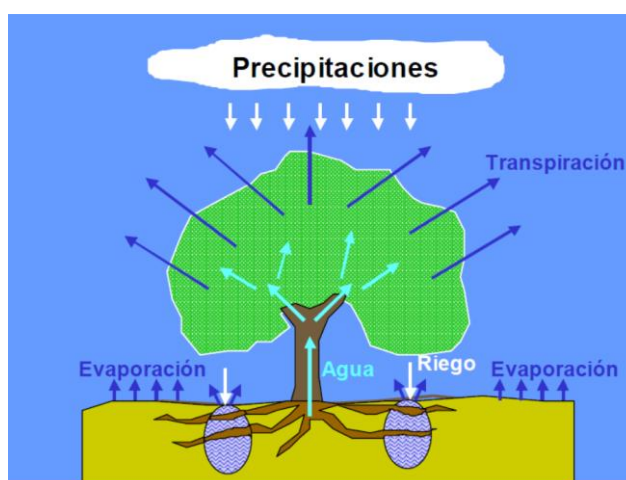


Figura 3.4 Esquema del proceso del agua que experimenta el cultivo

Para la obtención de los datos climáticos de la zona, se ha empleado el registro histórico de la red de estaciones agroclimáticas de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta Andalucía. Como referencia y por su proximidad se han tomado los datos de la estación de Sabiote, con coordenadas 38° 04' 46" N, 03° 14' 07" W, situada a 8.4km de la finca a estudiar.

Del registro datos histórico se ha obtenido las precipitaciones (mm), evapotranspiración (mm/día) y temperatura media (°C) por mes desde enero de 2001 hasta la actualidad, para ello se han realizado medias por meses y años mediante una hoja de cálculo.

Para el suministro eléctrico del sistema de bombeo se van a emplear paneles solares policristalinos, para su correcto funcionamiento y máxima eficiencia habrá que realizar un estudio de la radiación solar disponible de la zona o irradiación ($W \cdot h/m^2$), que se define como la energía incidente por unidad de superficie durante un periodo determinado de tiempo. Y la irradiancia (W/m^2), referente a la potencia instantánea recibida por unidad de superficie. Los datos de han obtenido de la base de datos del PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) del "Institute for Environment and Sustainability Renewable Energies" del Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, para las coordenadas en las que se localiza la finca. Se han obtenido informes de los diferentes parámetros a considerar para la instalación.

3.3 Composición del suelo

La situación geográfica de la finca en la comarca de Navas de San Juan, en el límite meridional de la meseta ibérica, hace que el suelo de la región, en términos de la serie estratigráfica, esté compuesto por faja granítica y por un dique de diabasa. Los materiales triásicos son conglomerados de Buntsandstein (areniscas, arenas y arcillas con yesos de Keuper) y dolomías y margas jurásicas.

Dependiendo de la zona, también existen sedimentos del triásico, integrados por areniscas y arcillas rojas y en algunos puntos por calizas. Los suelos rojos del término municipal pertenecen al tipo Rotthen, que debido a la sedimentación se ha producido una mezcla muy heterogénea de arenas y arcillas, por lo que son suelos frescos y sueltos, sin la compacidad del suelo arcilloso, aunque su contenido en arcilla es alto.

Por tanto, se puede considerar que el suelo de nuestra finca, presenta una textura **franco-arenosa**, con buenas condiciones para el cultivo del olivar.

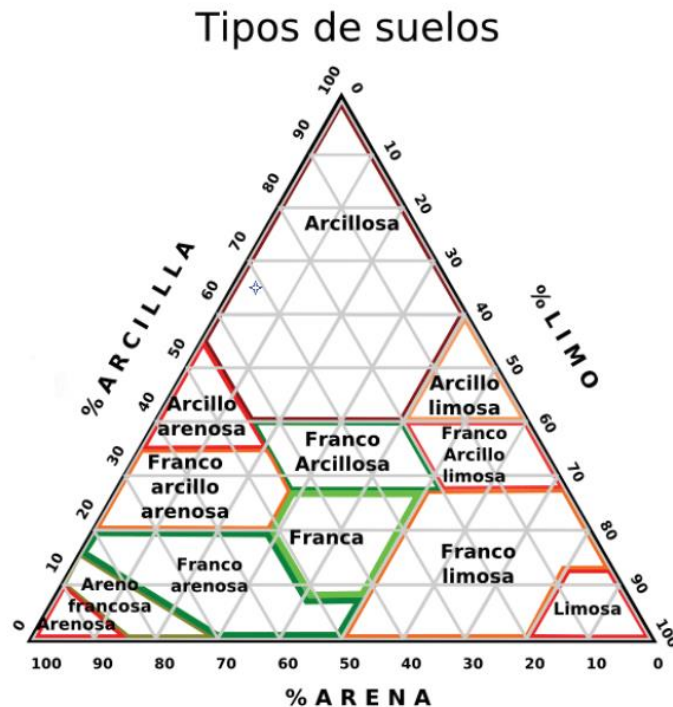
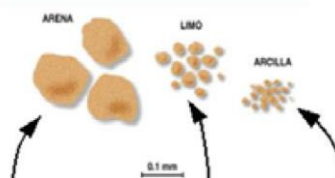


Figura 3.5 Diagrama ternario que representa el tipo de suelo en función de su composición



Textura	% Arena	% Limo	% Arcilla
Franco-Arenoso	40-90	5-40	5-20

Tabla 3.1 Composición del suelo de la finca

3.4 Red de riego

Actualmente la finca dispone de una instalación de riego compuesta por 7 hidrantes de las que parten las tuberías portagoteros. Cada hidrante abastece a un sector de árboles colindantes que van desde 170 árboles el que más, a 90 el que menos. La distribución y ubicación de hidrantes y pozo es la siguiente:



Figura 3.6 Imagen aérea con ubicación de hidrantes y pozo

Habiendo una diferencia de cotas de 337 metros entre el punto más desfavorable (hidrante 7) a 501 metros y el punto de captación (pozo), estando el nivel dinámico del agua a 164m.

La instalación está compuesta por tuberías de diferentes diámetros nominales, que van desde los 40 y los 75 milímetros, con distintas longitudes en cada tramo:

Tramo	L (m)	Dn (mm)
Pozo-1	110	40
Pozo-2	110	75
2-3	150	75
3-4	110	75
4-5	90	63
5-6	100	50
6-7	160	40

Tabla 3.2 Dimensiones de la red de tuberías existentes

La finca cuenta con una caseta en la que hay instalado un filtro, tras la tubería de captación, ya que se consideran aguas cargadas con sedimentos, siendo su densidad 998.2 kg/m^3 y viscosidad cinemática $1 \text{ mm}^2/\text{s}$.

4 CONFIGURACIÓN Y COMPONENTES DEL SISTEMA

La instalación para el estudio estará compuesta por los siguientes elementos:

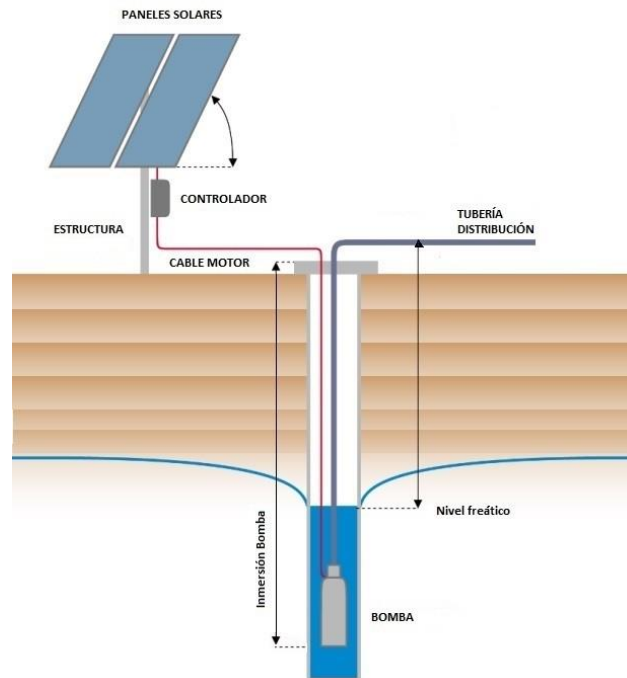


Figura 4.1 Esquema gráfico de la instalación de bombeo

- Sondeo

Perforación mediante sondeo a percusión de 155 mm de diámetro a 164 metros de profundidad (nivel dinámico) para sumergir la bomba, con un caudal suficiente para abastecer a toda la superficie hidráulica.

- Bomba sumergible

Dependiendo de la estrategia de riego se escogerán distintos modelos de bombas, dependiendo de la altura y caudal de demanda. Para ello se ha elegido el fabricante Grundfos y los modelos de bomba sumergibles SP. Para ello se empleará el siguiente mapa de selección de bombas:

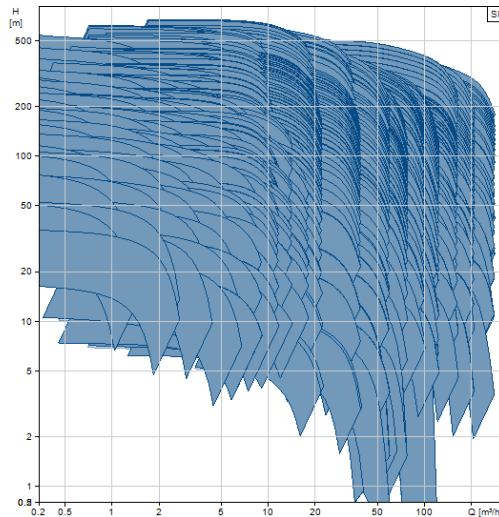


Figura 4.2 Catálogo de curvas de bombas

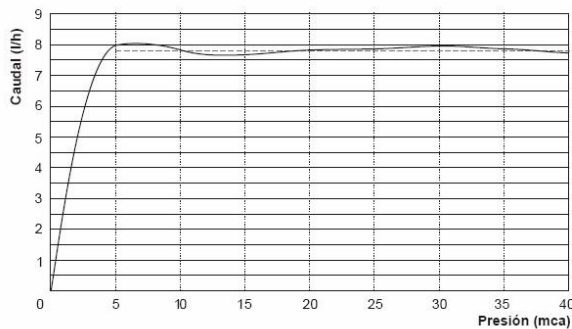
- Equipo de filtrado

Tras la captación de agua del sondeo, se le realiza un filtrado y desarenado, ya que del sondeo se obtienen aguas cargadas.

- Instalación hidráulica, hidrantes y goteros

Para el estudio se ha elegido una finca que ya posee instalación de riego y 7 hidrantes, con distintos diámetros entre 40 y 75 mm. De los hidrantes saldrán las tuberías portagoteros, que serán los encargados de verter el agua al suelo en forma de un goteo continuado, dentro de la gran variedad de goteros que hay en el mercado, se han elegido goteros autocompensantes, ya que son capaces de mantener el caudal constante siempre que la presión del hidrante sea mínima. Para nuestro caso, se instalarán dos goteros de 8 l/h por cada árbol, por tanto, se requerirá un mínimo de 20 mca en cada hidrante, para asegurar el correcto funcionamiento de cada gotero.

Tabla de descargas



Caudal: 8 l/h.
Rango Pres. Autocompensación:
5 -40 mca.
Pres. Cierre Mods. Antidrenantes:
1,5 / 4 mca.

Logitud recomendada de los laterales sobre terreno llano (m)

SETA 8 L/H. Presión de entrada: 2,5 Kg/cm ²	Espaciamiento (m)									
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	3,00	5,00	7,00	10,00	
Pe 16 (Esp. 1,2 mm.)	41	71	95	117	154	245	341	422	532	
Pe 16 (Esp. 1,4 mm.)	39	67	90	110	146	232	323	402	504	
Pe 18 (Esp. 1,3 mm.)	54	91	121	148	194	306	425	527	662	
Pe 20 (Esp. 1,2 mm.)	72	119	157	190	248	388	538	667	836	

Equación	C. Nominal
$Q = 7,84523 \cdot H^{0,0052}$	7,812 l/h
C.V.	Desv.
2,688 %	0,492 %

Figura 4.3 Información de las características técnicas del gotero autocompensante

- Paneles solares fotovoltaicos

En función de la potencia requerida por el equipo de bombeo será necesario un mayor o menor número de paneles, el único inconveniente que se nos presenta es que la dependencia de producción de energía se debe a las condiciones meteorológicas, en días en los que la radiación sea escasa, la producción de energía será menor, por tanto mediante un variador de frecuencia, variaremos la velocidad de giro del motor adaptándolo a nuestras necesidades. En cambio, en días en los que la radiación sea nula, no tendremos producción de energía eléctrica, aunque el problema podría solventarse mediante la instalación de baterías de acumulación.

- Variador de velocidad

Como se ha descrito en el apartado anterior, se calculará el dispositivo electrónico mediante el cual se regulará la velocidad de giro de la bomba, en función de las necesidades de altura y caudal requeridas, mediante la variación de la frecuencia suministrada a la bomba. Con ello conseguiremos que, con una misma bomba, funcionando a distintas velocidades de giro, podamos suministrar la altura y el caudal requerido.

- Instalación eléctrica

Estará compuesta todo el cableado de la instalación, cumpliendo los requisitos para soportar la intensidad necesaria y las condiciones meteorológicas, y las protecciones por sobrecargas, cortocircuitos y sobretensiones.

- Estructura soporte de los paneles solares fotovoltaicos

Se diseñará según normativa una estructura que sirva de soporte de los paneles, calculada según el peso propio, cargas de viento y nieve. Tendrá la inclinación y orientación óptima para una mayor producción de energía.

5 ESTRATEGIAS DE RIEGO

Como se ha descrito en la introducción, para el planteamiento de una correcta sectorización se deberá tener en cuenta el cultivo, en este caso el olivar y sus necesidades hídricas, la topografía del terreno, que presenta un desnivel de 337 metros desde el punto de captación de agua, hasta el punto más desfavorable de riego, lo que conllevará distintos requerimientos de presión para los distintos hidrantes, y la topología de la red, con las correspondientes pérdidas por cada tramo. Como la finca ya cuenta con 7 hidrantes instalados, se calculará el caudal que suministrará cada uno de ellos. Para el cálculo de las necesidades de caudal y altura, se ha empleado el software EPANET 2.0, desarrollado por la Agencia para la Protección del Medio Ambiente de EEUU, orientado al análisis del comportamiento de los sistemas de distribución de agua y el seguimiento de la calidad del agua, para ello se realizan simulaciones en periodos prolongados del comportamiento hidráulico. Para ello se diseña nuestra red de distribución existente, considerando diámetros nominales, longitudes y pérdidas de carga, y la demanda o requerimientos de cada hidrante, a partir de una curva de la bomba dada. En el anejo de cálculos se ampliará información acerca del diseño de la red a estudiar.



Figura 5.1 Modelo para simulación de la instalación en EPANETv2 sobre imagen área de la finca

Se han planteado 3 estrategias distintas de riego, para ello se ha realizado una sectorización de la finca, estableciendo sectores independientes en función de los hidrantes ya existentes, que se combinarán para las distintas estrategias de riego planteadas.

Se han establecido las siguientes estrategias:

5.1. Estrategia 1

El primer caso a estudiar será el más simple, en el que consideraremos la finca como un solo sector, es decir todos los hidrantes estarán suministrando caudal a su sector, y se realizará el riego de toda la finca a la vez. El total de olivos a regar en el mismo espacio de tiempo será de 895 árboles. Por tanto, el caudal total teórico suministrado vendrá dado por la ecuación:

$$Q_T = n^{\circ}olivos \cdot 2 \cdot Q_{gotero}$$

Por tener instalado dos goteros por árbol, y considerando que cada gotero proporciona 8 l/h, el caudal teórico que deberá suministrar la bomba es de 3.97 l/s.

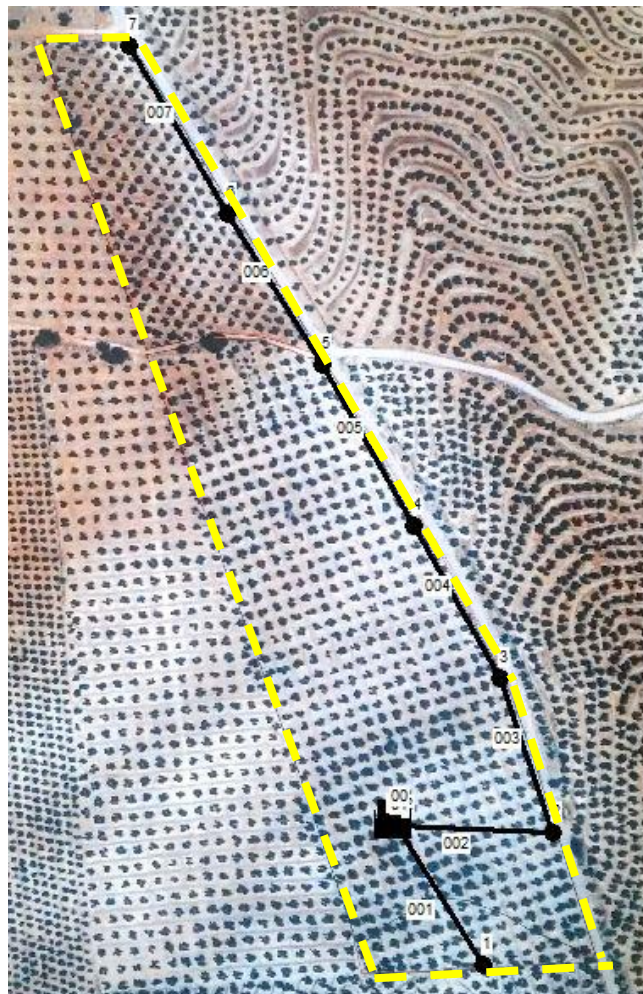


Figura 5.2 Modelo para simulación de la estrategia 1 en EPANETv2 con 1 sólo sector

5.2 Estrategia 2

En el segundo caso se considerarán 2 sectores distintos, el criterio que se ha escogido para la realización de los sectores es un balance energético entre la cota de captación de agua y la cota máxima del sector, para obtener dos alturas similares y que no haya gran diferencia en el salto energético, es por ellos que los sectores tienen distinto tamaño y distinto número de árboles. Por tanto, se han establecido los sectores:

- Sector 1: estarán en funcionamiento los hidrantes 1, 2 y 7. Para el hidrante 7 el salto energético es mayor, por tanto, se compensará con los sectores 1 y 2, en los que el salto energético es mínimo. Se regarán simultáneamente 345 olivos. Siendo caudal teórico requerido de 1.53 l/s.

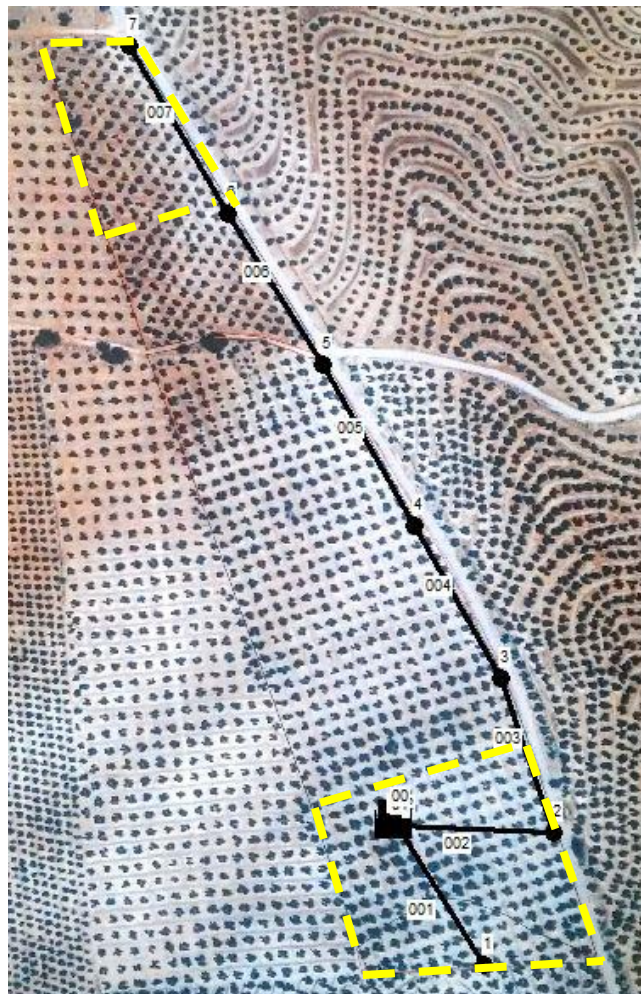


Figura 5.3 Modelo para simulación de la estrategia 2 en EPANETv2 con el sector 1

- Sector 2: estarán en funcionamiento los hidrantes 3, 4, 5 y 6, siendo el 6 de mayor salto energético. En este caso, se regarán 550 olivos simultáneamente, por tanto, el caudal teórico requerido será de 2.44 l/s.

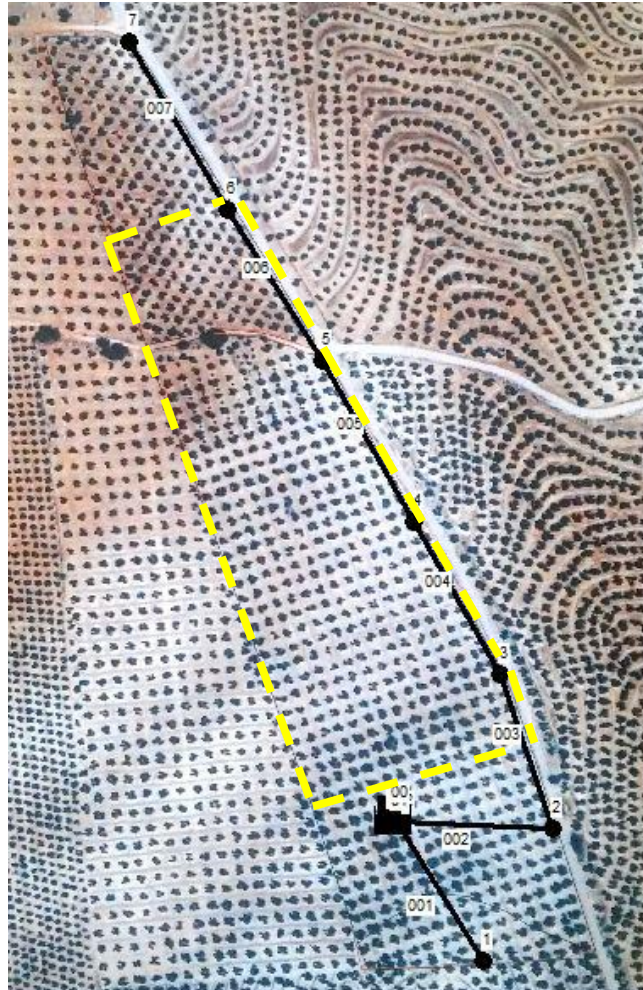


Figura 5.4 Modelo para simulación de la estrategia 2 en EPANETv2 con el sector 2

5.3 Estrategia 3

En la tercera y última estrategia se considerarán 3 sectores independientes. Al igual que en la estrategia anterior, el sector con la mayor cota tendrá un menor número de plantas, para compensar el salto energético debido a la diferencia de cotas y las pérdidas de carga hasta alcanzar el hidrante, y se obtengan alturas similares, por tanto, saltos energéticos similares, ya que una misma bomba tendrá que abastecer los 3 sectores. Por tanto, se establece:

- Sector 1: en el primer sector, estarán en funcionamiento los hidrantes 6 y 7, al haber mayor diferencia de alturas, mayor será el salto energético, por tanto, menor número de olivos se regarán, en este caso, 246. Por tanto, el caudal teórico requerido será de 1.09 l/s.

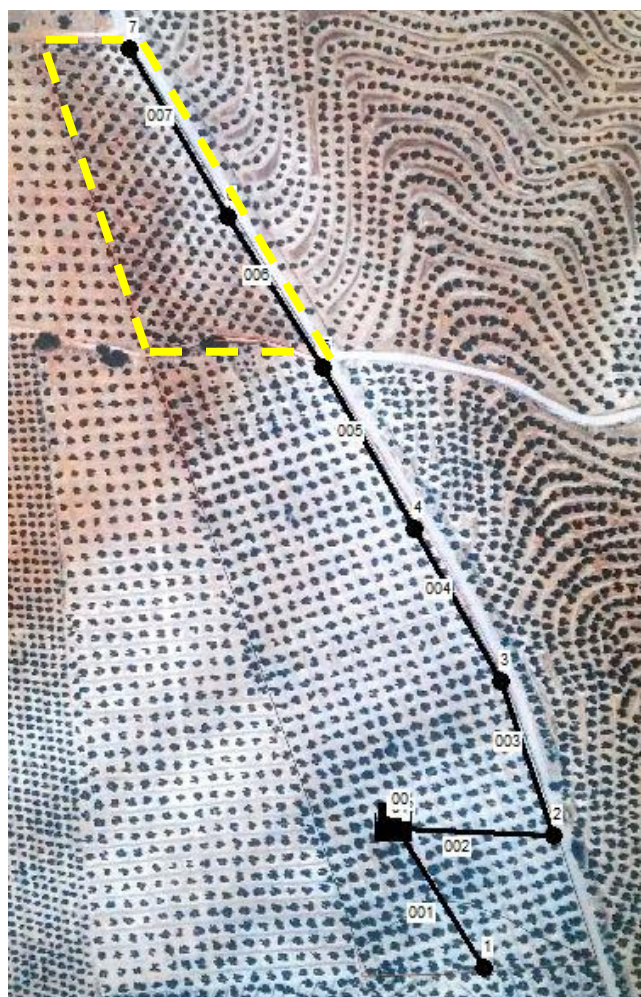


Figura 5.5 Modelo para simulación de la estrategia 3 en EPANETv2 con el sector 1

- Sector 2: estarán en funcionamiento los hidrantes 4 y 5. Tendrá un menor salto energético, esta diferencia con el sector 1 se compensará con un mayor número de árboles por regar, un total de 305 olivos. Por tanto, el caudal teórico requerido será de 1.35 l/s.

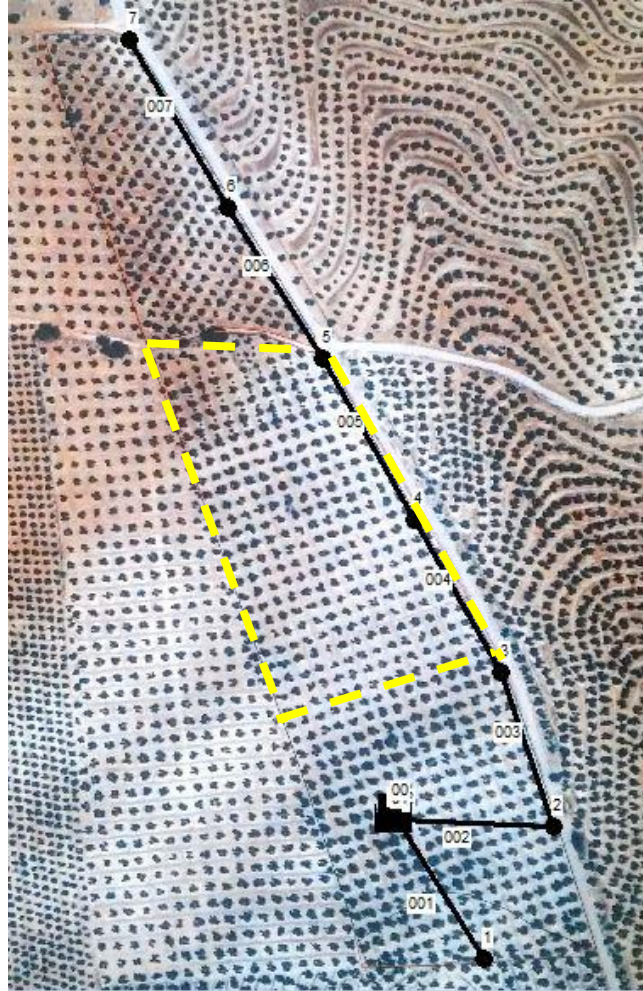


Figura 5.6 Modelo para simulación de la estrategia 3 en EPANETv2 con el sector 2

- Sector 3: finalmente en el tercer sector estarán en funcionamiento los hidrantes 1, 2 y 3, con un menor salto energético, y por ende, habrá que regar un mayor número de olivos, un total de 344 árboles. El caudal teórico requerido será de 1.53 l/s.

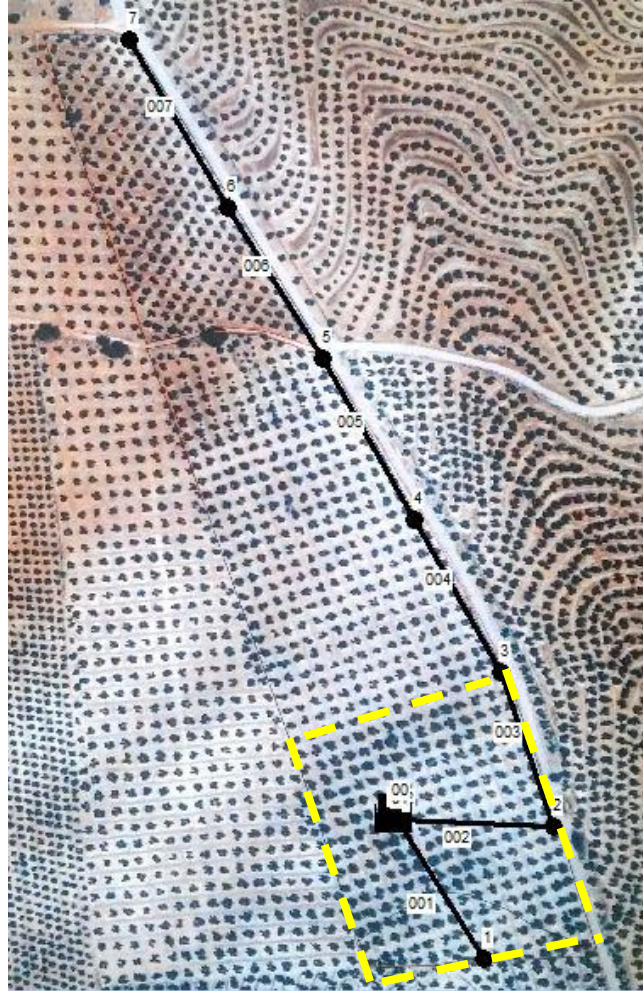


Figura 5.7 Modelo para simulación de la estrategia 3 en EPANETv2 con el sector 3

6 CÁLCULO Y DIMENSIONADO DEL SISTEMA

Para el correcto dimensionado de un sistema de bombeo dedicado a la fertirrigación para uso agrícola mediante energía solar fotovoltaica, se considerará principalmente:

- Evaluación de la energía hidráulica necesaria y red de distribución instalada.
- Evaluación de las necesidades hídricas del suelo y su reserva
- Evaluación de la energía solar disponible.

En primer lugar, se calculará el caudal de cálculo, la altura hidráulica de bombeo y las necesidades hídricas del cultivo, a partir de los cuales se calculará la energía hidráulica necesaria. Finalmente, con los datos de radiación obtenidos, se elegirá el mes de riego más desfavorable, a partir del cual se dimensionará, asegurando así el funcionamiento en la peor condición.

6.1 Determinación de las necesidades hídricas y red de irrigación

La determinación de las necesidades hídricas dependerá de varios factores, precipitaciones efectivas, evapotranspiración, y la capacidad del suelo para mantener la humedad, independientemente se podrá obtener caudal de cálculo y de la altura hidráulica de bombeo que se requerirá para cada estrategia.

6.1.1 Cálculo de la demanda de agua

Para el cálculo del caudal de cálculo, a diferencia del caudal teórico, se tendrán en cuenta las pérdidas de la instalación, se considerará un 15%, por tanto:

$$Q_{\text{cálculo}} = n^{\circ} \text{olivos} \cdot 2 \cdot Q_{\text{unitario gotero}} \cdot 1.15 \quad [1]$$

Realizando los cálculos para cada hidrante, los caudales de cálculo serán:

Hidrante	Q (l/s)
1	0.46
2	0.61
3	0.69
4	0.69
5	0.87
6	0.56
7	0.69

Tabla 6.1 Caudales requeridos a cada hidrante

6.1.2 Cálculo de la altura hidráulica de bombeo

La altura hidráulica requerida por la bomba se obtendrá realizando un balance de energía entre el punto de captación de agua y el punto más desfavorable de la instalación para cada sector de cada estrategia.

$$\frac{P_o}{\gamma} + \frac{v_o^2}{2 \cdot g} + z_o + H = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 + \Delta H_{o1} \quad [2]$$

Considerando:

- $P_o \cong 0$ ya que la presión en el pozo de bombeo será la presión atmosférica.
- $v_o \cong 0$ ya que el agua en el pozo está en reposo.
- $v_1 \cong 0$ se considerará aproximadamente 0 por simplificación

Nos queda:

$$H = (z_1 - z_o) + \frac{P_2}{\gamma} + \Delta H_{o1} \quad [3]$$

donde la presión requerida siempre será 20 mca para el correcto funcionamiento de los goteros, y en ΔH_{o1} se tendrá en cuenta las pérdidas que se producen en el filtro (10 mca) y las pérdidas de carga unitarias del tramo recorrido.

6.1.3 Cálculo de la energía hidráulica necesaria

La energía hidráulica es aquella obtenida a partir de la altura hidráulica requerida y la demanda de agua durante un cierto periodo de tiempo, a partir de la cual se obtendrá la potencia pico mínima del generador fotovoltaico.

$$E_{hd} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{día} \cdot H_t}{t} \quad [4]$$

donde:

- E_{hd} (kWh/día), energía hidráulica requerida por el sistema.
- $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, es la densidad del agua.
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, aceleración gravitatoria terrestre.
- $Q_{día}$ ($\text{m}^3/\text{día}$), caudal diario.
- H_t (m. c. a.), altura hidráulica total.
- t para 1 día.

Para una mayor altura hidráulica, mayor energía hidráulica se requerirá, y por tanto mayor generación de energía fotovoltaica se necesitará, lo que será directamente proporcional a un mayor número de módulos solares que se necesitará.

6.1.4 Cálculo de necesidades de riego

Para el cálculo de las necesidades de riego del olivar, se establece un balance hídrico de entrada y salida al suelo:

$$Pe + Rn = ETc + \Delta R \quad [5]$$

donde:

- **Pe** (mm/mes) es la precipitación efectiva, que se obtiene a partir de la precipitación total y de las características climatológicas y edafológicas de la zona. Para el caso de la provincia de Jaén, puede aceptarse para valores inferiores a 100 mm/mes, despreciando las precipitaciones puntuales de verano menores a 25 mm/mes, una eficiencia del 80% según Smith (1993), por tanto:

$$Pe = P \cdot 0.8 \quad [6]$$

- **Rn** es el riego neto. Nos mide la eficiencia de aplicación del sistema de riego. Según Orgaz y Ferreres (1997), en el riego por goteo se toman valores del 90% del total del riego.
- **ETc** (mm) es la evapotranspiración del cultivo, como ya se ha visto anteriormente es la pérdida de humedad de la superficie debido a la traspiración y a la que se pierde por evaporación.

$$ETc = ET_0 \cdot Kc \quad [7]$$

donde **Kc** es el coeficiente de cultivo, para el caso del olivo, hay que tener en cuenta la variabilidad temporal del coeficiente, ya que depende de las condiciones climáticas, y a la etapa de desarrollo de la planta. Según Pastor (1997), para la región de la Loma y el Condado, se considerará:

Mes	Kc
ENE	0.50
FEB	0.50
MAR	0.65
ABR	0.60
MAY	0.55
JN	0.55
JUL	0.55
AGO	0.55
SEP	0.55
OCT	0.60
NOV	0.65
DIC	0.50

Tabla 6.2 Valores de Kc para mes

- **ΔR** es la variación de la reserva del suelo en el tiempo considerado. El principal objetivo es evitar que el agua almacenada en el suelo, descienda por debajo de un nivel mínimo a partir del cual la planta sufre un déficit hídrico, y por tanto afectaría a la producción. También habrá que tener en cuenta la capacidad máxima que tiene el suelo de albergar agua, para el caso de suelo franco-arenoso, se ha considerado un máximo de 133 mm.

Para el cálculo de la cantidad de agua que habrá que aplicar en cada mes, se ha empleado el método FAO de balance de agua, por ser el más extendido en el cálculo de riego en la agricultura. Consiste en calcular las variaciones del contenido de agua del suelo en un periodo de tiempo determinado, por tanto, la ecuación del balance quedaría:

$$\Delta S_t = \Delta S_{t-1} + RN + Pe + ETc \quad [8]$$

siendo ΔS_i el contenido de agua del suelo (mm) al inicio ($i=t-1$) y al final ($i=t$) en un mes, RN es el riego neto, Pe es la precipitación efectiva y ETc es la evapotranspiración máxima de cultivo. Para simplificar los cálculos, se ha realizado una hoja de cálculo y se ha obtenido una gráfica en la que se muestra la precipitación efectiva, el riego neto y la evolución de la reserva para cada mes:

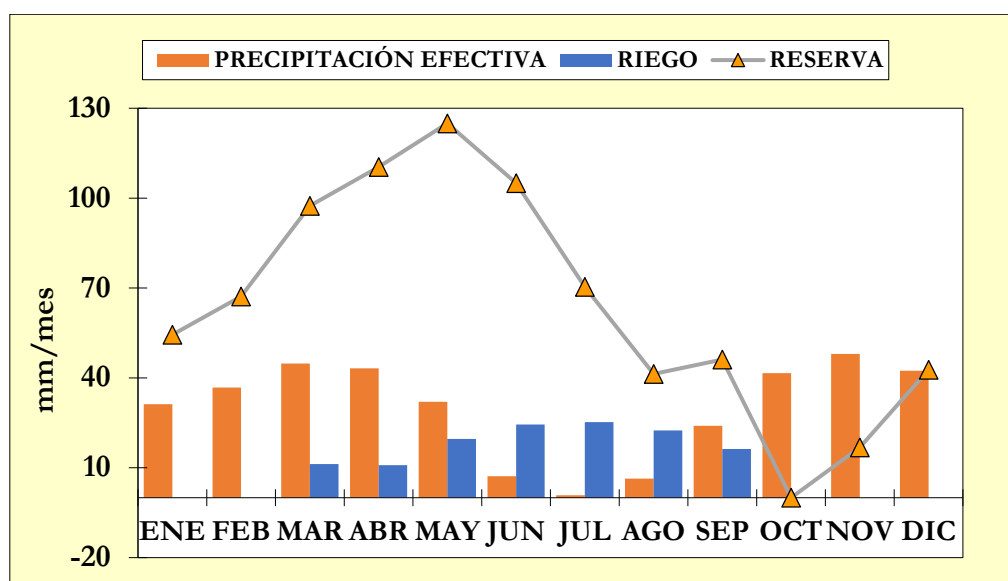


Figura 6.1 Gráfico comparativo mensual de las precipitaciones efectivas, el riego y la evolución de la reserva del suelo

Por tanto, considerando todos los factores anteriormente descritos, y que la reserva de agua del suelo sea siempre positiva para evitar el estrés hídrico, el riego (litros / olivo-día) más óptimo será:

Mes	Riego (l/olivo · día)
ENE	0
FEB	0
MAR	40
ABR	40
MAY	70
JUN	90
JUL	90
AGO	80
SEP	60
OCT	0
NOV	0
DIC	0

Tabla 6.3 Riego diario necesario por olivo y día

6.1.5 Cálculo de las pérdidas de carga unitarias

Las pérdidas de carga unitarias en una tubería, son las pérdidas de presión que se producen en un fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes del conducto, es por ello que principalmente dependen del fluido y del material del que esté compuesta la tubería.

El cálculo estas se realiza para el correcto dimensionado del grupo de bombeo. Se considerará el recorrido en el que se produzca la mayor pérdida de carga de toda la instalación, ya que esto condicionará las prestaciones que deberá ofrecer el equipo de bombeo para suministrar la altura y el caudal requerido.

Considerando tramos rectos de tuberías, como es el caso a estudio, y sin tener en cuenta válvulas, para el cálculo de las pérdidas de carga de una tubería (ΔP) de longitud L , se empleará la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$\Delta P = f \cdot \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} \quad [9]$$

donde:

- L es la longitud del tramo de tubería (m)
- D es el diámetro interior de la tubería (m)
- v es la velocidad del agua en el interior de la tubería (m/s)
- g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2)
- f es el factor de fricción de Darcy-Weisbach

También se puede expresar en función del caudal:

$$\Delta P = f \cdot \frac{8 \cdot L \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \quad [10]$$

El factor de fricción de Darcy-Weisbach (f) es un parámetro adimensional que depende del número de Reynolds del fluido (Re) y de la rugosidad relativa de la tubería (ϵ_R). El número de Reynolds se puede calcular:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad [11]$$

donde:

- ρ es la densidad del agua (kg/m^3)
- v es la velocidad del agua en el interior de la tubería (m/s)
- D es el diámetro interior de la tubería (m)
- μ es la viscosidad dinámica del agua ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)

O también en función de la viscosidad cinemática del fluido:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\vartheta} \quad [12]$$

donde:

- ϑ es la densidad cinemática del agua (m^2/s) $\rightarrow \vartheta = \mu/\rho$

Los valores de la densidad, viscosidad absoluta y viscosidad cinemática del agua a distintas temperaturas se pueden obtener de la siguiente tabla:

	Densidad	Viscosidad absoluta	Viscosidad cinemática
Temperatura	ρ	μ	ν
°C	kg/m^3	$kg/m \cdot s$	m^2/s
0	999,9	$1,792 \cdot 10^{-3}$	$1,792 \cdot 10^{-6}$
5	1000,0	$1,519 \cdot 10^{-3}$	$1,519 \cdot 10^{-6}$
10	999,7	$1,308 \cdot 10^{-3}$	$1,308 \cdot 10^{-6}$
20	998,2	$1,005 \cdot 10^{-3}$	$1,007 \cdot 10^{-6}$
40	992,2	$0,656 \cdot 10^{-3}$	$0,661 \cdot 10^{-6}$
60	983,2	$0,469 \cdot 10^{-3}$	$0,477 \cdot 10^{-6}$
80	971,8	$0,357 \cdot 10^{-3}$	$0,367 \cdot 10^{-6}$
100	958,4	$0,284 \cdot 10^{-3}$	$0,296 \cdot 10^{-6}$

Tabla 6.4 Valores de la densidad, viscosidad absoluta y viscosidad cinemática del agua para distintas temperaturas

Para este caso, se considerará agua a 20°C.

La rugosidad relativa de la tubería vendrá dada en función de la rugosidad absoluta del material de la tubería y del diámetro interior, por tanto:

$$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon}{D} \quad [13]$$

Las rugosidades absolutas de los materiales más comunes en la fabricación de tuberías vienen recogidas en la siguiente tabla:

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES			
Material	ε (mm)	Material	ε (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0

Tabla 6.5 Valores de la rugosidad absoluta para distintos materiales

En este caso, se considerarán tuberías de policloruro de vinilo (PVC), por tanto:

$$\varepsilon = 0.0015 \text{ mm}$$

Para el cálculo del factor de fricción, se tendrá en cuenta el número de Reynolds, que representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas del flujo circulando por la tubería. Cuando las fuerzas viscosas predominan (valores de Re bajos), el flujo es laminar, por tanto, la rugosidad de la tubería no tiene importancia debido al comportamiento viscoso del fluido. Si, por el contrario, predominan las fuerzas de inercia (valores de Re altos), el régimen es turbulento y la viscosidad tiene más importancia.

Para el caso de nuestro fluido, el agua, los valores entre los que se cuenta la transición entre laminar y turbulento serán entre 2000 (laminar) y 4000 (turbulento).

Para el cálculo de f , para un régimen laminar ($Re < 2000$), se puede emplear la ecuación de Poiseuille:

$$f = \frac{64}{Re} \quad [14]$$

Por el contrario, para casos en los que nuestro número de Reynolds sea mayor de 4000, estaremos en la zona del régimen turbulento, por tanto, el cálculo del factor de fricción se complica, ya que depende del Re y de ε . En estos casos se podría emplear la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad [15]$$

donde:

- f es el factor de fricción
- $\frac{\varepsilon}{D}$ es la rugosidad relativa ε_R

Para simplificar la obtención de f , existen representaciones gráficas, como el diagrama de Moody, que representa f en doble escala logarítmica en función del Re y de la rugosidad relativa ε_R :

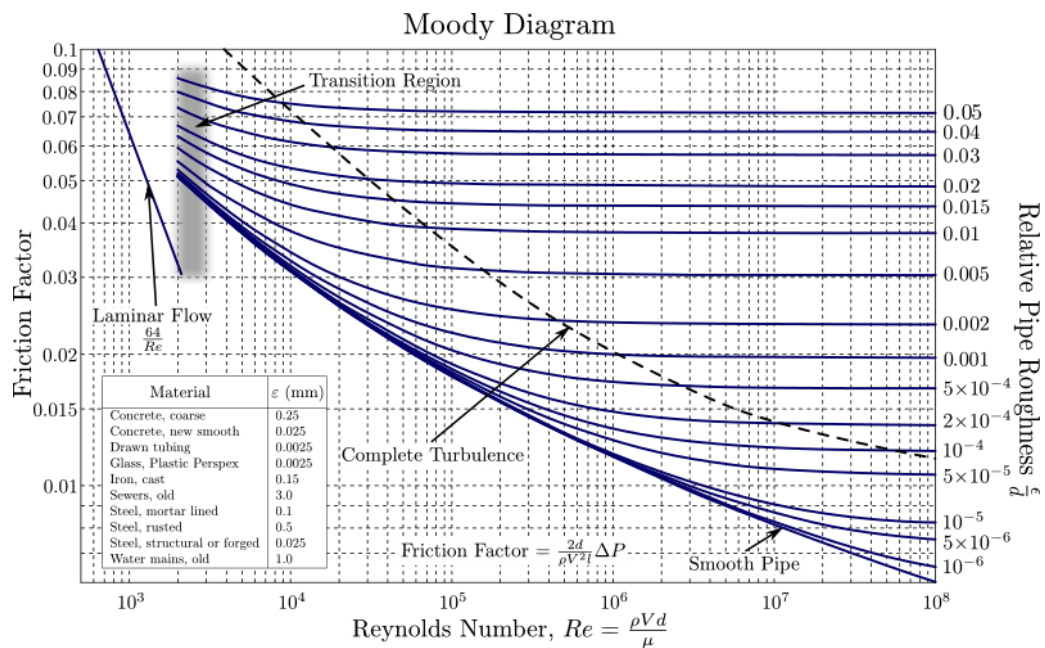


Figura 6.2 Diagrama de Moody

Otra forma de realizar el cálculo de las pérdidas de carga de la tubería, es a partir del software ASETUB PVC 2.1, el software ha sido desarrollado por la Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos, y lleva implementados todos los cálculos descritos anteriormente. A partir del diámetro nominal, el espesor nominal, el caudal o la velocidad media del flujo (obtenidos de EPANET) y la temperatura, nos proporciona el número de Reynolds, la viscosidad cinemática y la pérdida unitaria de carga. Para el caso de la tubería de 40 mm:

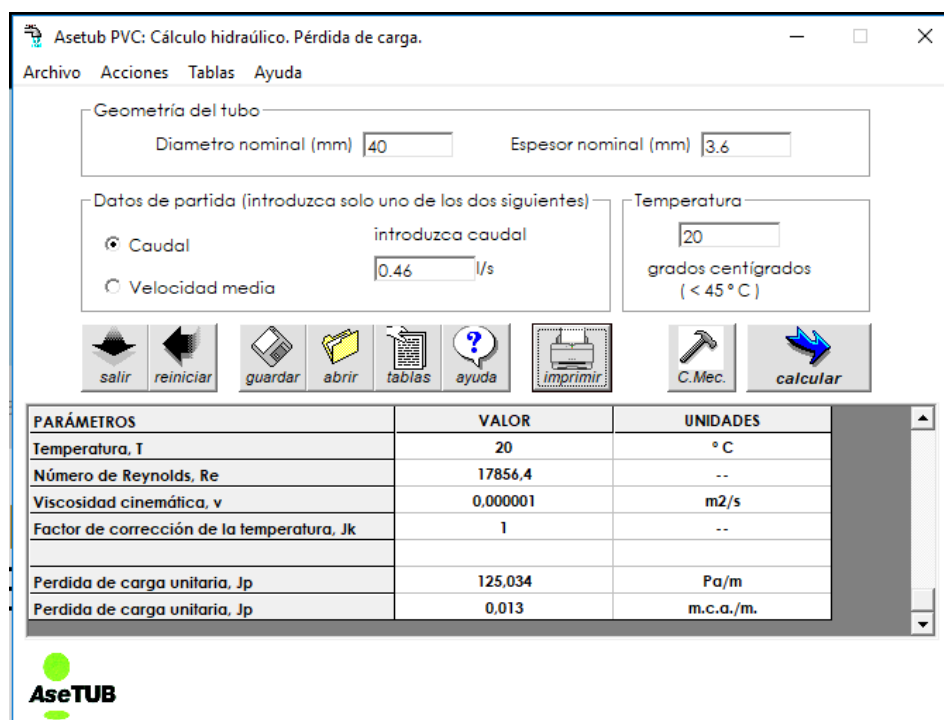


Figura 6.3 Pantalla inicial del software Asetub PVC

Por tanto, las pérdidas de carga de cada tramo de la instalación serán:

Tramo	L (m)	Dext (mm)	Dint (mm)	Pérdida unitaria de carga (mca/m)
Filtro-1	110	40	36.4	0.013
Filtro-2	110	75	70.6	0.021
2-3	150	75	70.6	0.016
3-4	110	75	70.6	0.011
4-5	90	63	59.2	0.016
5-6	100	50	46.4	0.021
6-7	160	40	36.4	0.026

Tabla 6.6 Tabla resumen de las características de la red de distribución existente

6.2 Evaluación de la energía solar disponible

La potencia suministrada por el generador fotovoltaico dependerá de la radiación solar incidente, que variará según la localización geográfica, la estación del año, la hora del día, y las condiciones climáticas. Normalmente, cuando se emplean los términos de irradiación e irradiancia cuando se habla de radiación solar, es importante diferenciar entre ellos. La irradiación se define como la energía incidente por unidad de superficie durante un determinado espacio temporal, mientras que la irradiancia se refiere a la potencia instantánea recibida por unidad de tiempo. Como referencia se pueden emplear mapas de irradiación anual con diferentes tonalidades acorde a la irradiación recibida en una superficie optimizada.

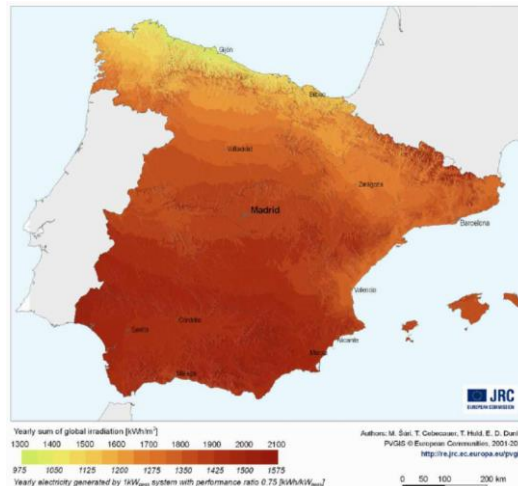


Figura 6.4 Mapa de España de radiación

En concreto, para el dimensionado del sistema solar fotovoltaico en nuestra ubicación, se emplearán los datos medios mensuales de radiación solar proporcionados por PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) del “Institute for Environment and Sustainability Renewable Energies” del Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, para las coordenadas en las que se localiza la finca.

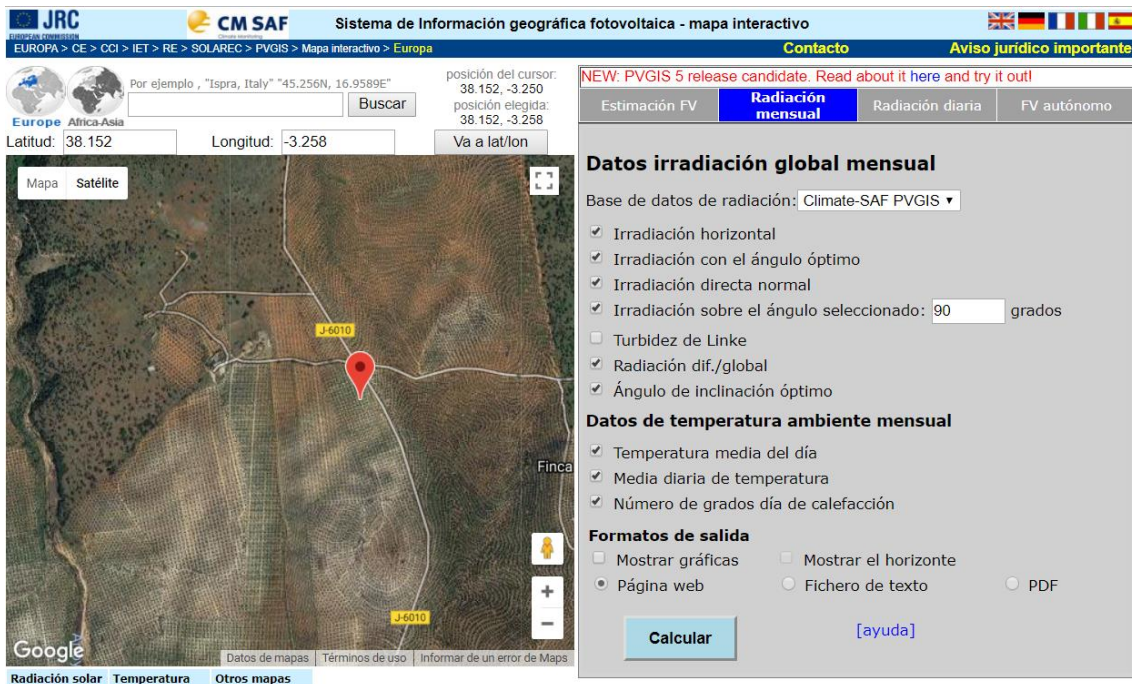


Figura 6.5 Pantalla inicial de PVGIS para la obtención de los datos de radiación en la finca a estudio

Una vez obtenidos los datos históricos de irradiancia media recibida (W/m^2) mediante una hoja de cálculo Excel se ha realizado un gráfico comparativo de todos los meses con las horas en las que se produce energía, del que se podrán obtener datos de irradiancia media para cada hora del día y para cada mes:

Evolución de la irradiancia por horas para cada mes

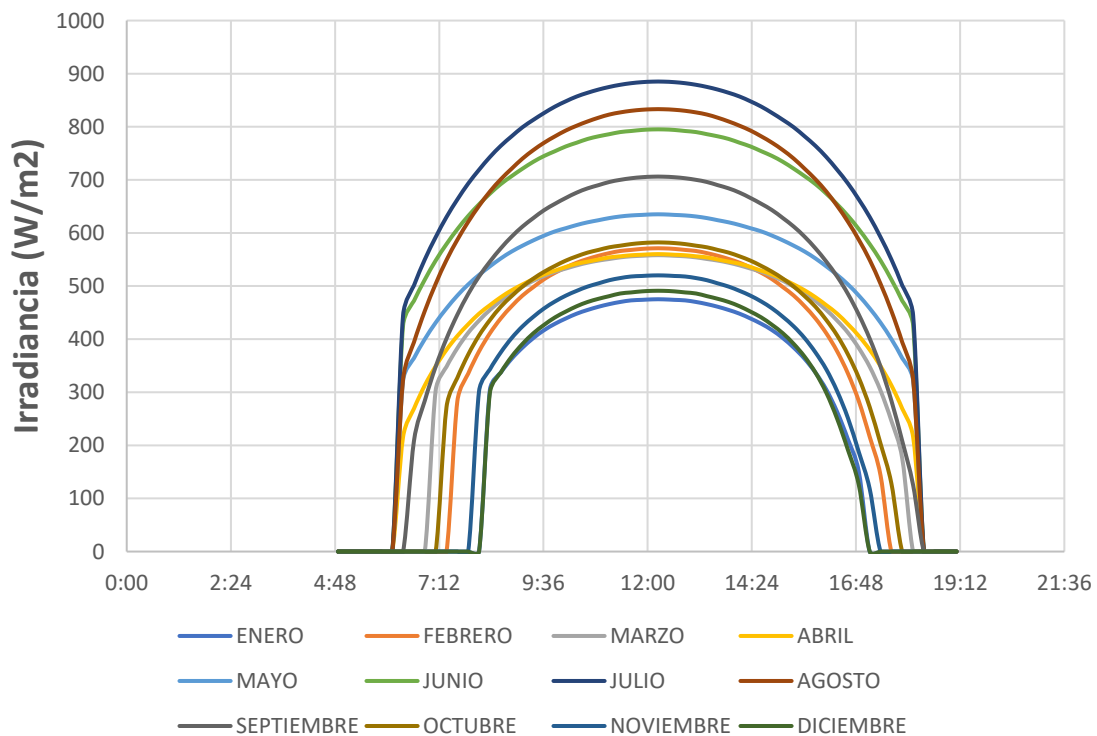


Figura 6.6 Gráfico de la evolución de la irradiancia recibida a lo largo del día para cada mes

Como se puede observar, el mes de Julio será el de máxima producción, ya que se obtienen los valores máximos de irradiancia y para un mayor número de horas de producción, con un total de once horas y media de radiación, alcanzando un máximo de 885 W/m^2 , por el contrario, el mes de riego que menos energía se produce será Marzo, con un total de nueve horas aproximadamente de producción de energía, alcanzando un máximo de 560 W/m^2 .

Para poder obtener una mejor comparativa, se ha realizado un gráfico en tres dimensiones en el que puede observar la evolución de la irradiancia para cada hora y para cada mes:

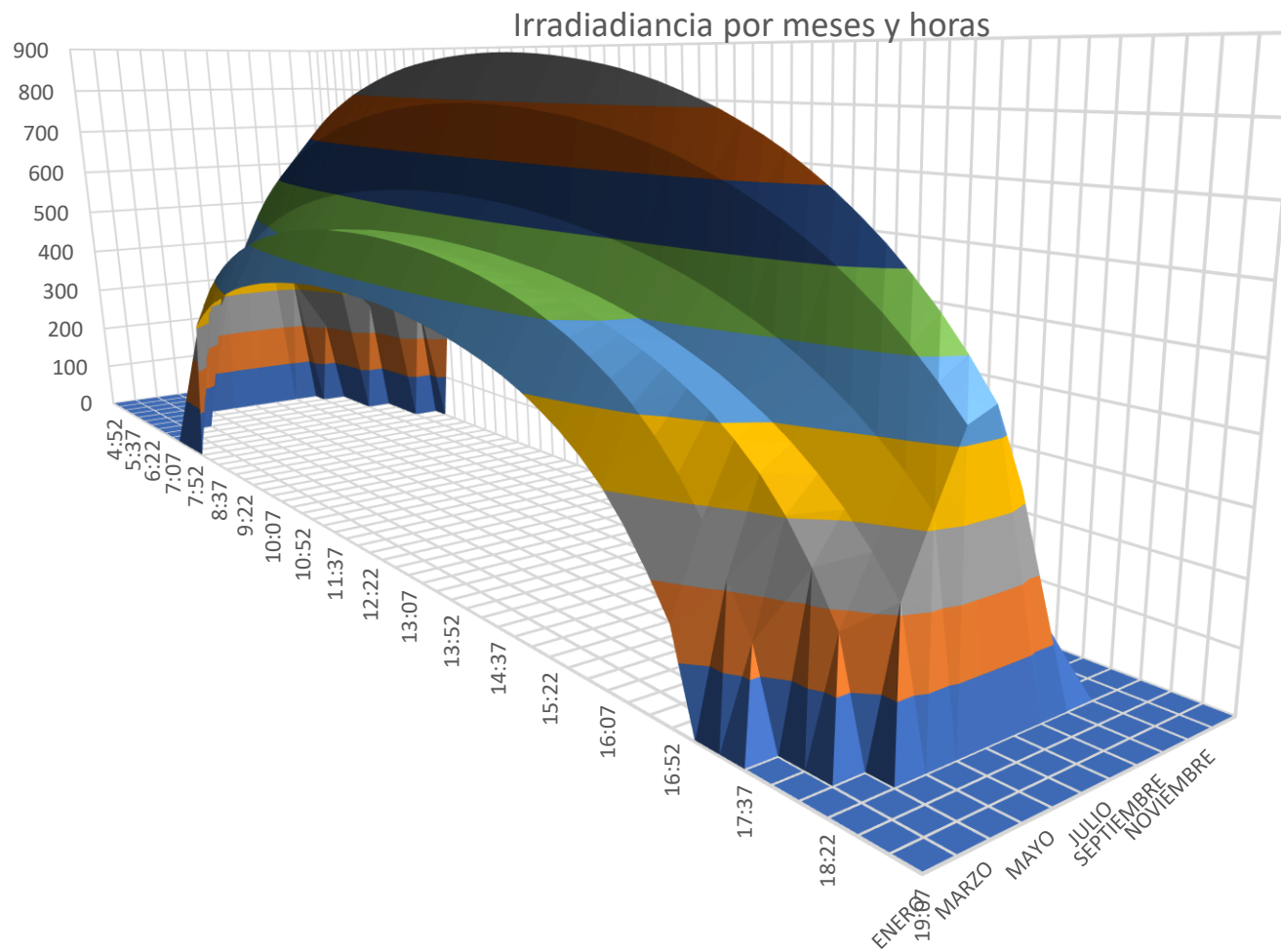


Figura 6.7 Modelo 3D de la evolución de la irradiancia recibida a lo largo del día para cada mes

Del informe obtenido con el histórico, se ha obtenido también la radiación y el ángulo óptimo de instalación. Por tanto, la irradiación solar media diaria sobre el plano óptimo obtenida es:

Mes	Hd (kWh/m ² /día)
ENE	3.80
FEB	4.94
MAR	5.89
ABR	5.96
MAY	6.51
JUN	7.20
JUL	7.57
AGO	7.35
SEP	6.42
OCT	5.48
NOV	4.23
DIC	3.76

Tabla 6.7 Irradiación solar media diaria sobre el plano óptimo

La orientación e inclinación de la instalación de los módulos es un factor determinante para maximizar la producción de energía. La opción más óptima será la instalación de un sistema mecánico que varíe el ángulo de inclinación, para que exista una orientación continua hacia el sol, lo que garantiza un uso máximo de la radiación. El ángulo óptimo va variando en función del mes:

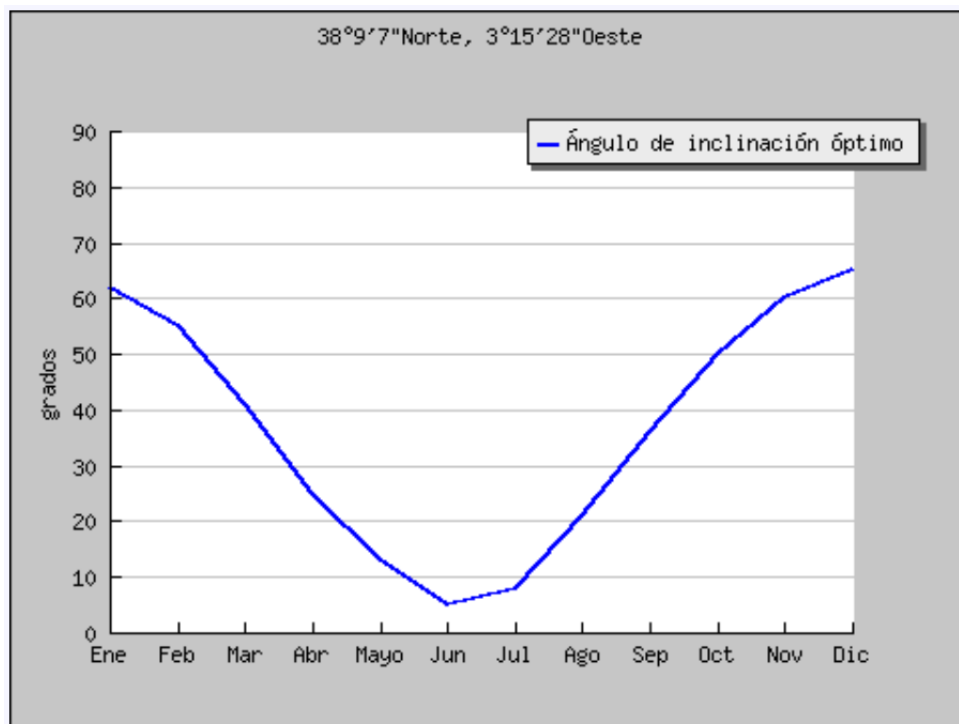


Figura 6.8 Evolución del ángulo óptimo de inclinación a lo largo del año

Para el caso a estudio, los módulos se instalarán sobre una estructura metálica fija, por tanto, el ángulo de inclinación y la orientación será fijo, y se optimizará para los meses de riego, entre marzo y septiembre.

La orientación de los paneles solares será siempre hacia el ecuador terrestre. Esto supone orientación sur para aquellas instalaciones situadas en el hemisferio norte terrestre. No obstante, son admisibles unas desviaciones de hasta $\pm 20^\circ$ respecto del ecuador del observador sin que se produzcan pérdidas significativas de rendimiento.

Para instalaciones que se sitúen en el hemisferio norte, como es el caso a estudio, la orientación se define por el ángulo llamado *azimut* (α), que es el ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del módulo, dependerá del hemisferio en el que se sitúe. Toma el valor 0° para módulos orientados al sur.

Por otro lado, el ángulo de inclinación (β) es aquel que forma la superficie del módulo con el plano horizontal, dependerá de la latitud de la ubicación.

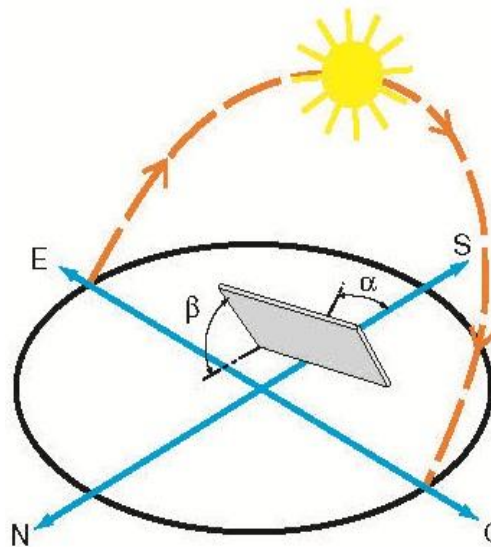


Figura 6.9 Ilustración de la correcta orientación de los módulos

Como se ha mencionado anteriormente, aunque el periodo de riego será de marzo a septiembre, se va a considerar que la instalación pueda emplearse en otras épocas del año (por ejemplo, cuando ocurran casos de inviernos secos y poco lluviosos).

Por este motivo, para que la instalación presente un rendimiento óptimo durante todo el año, la inclinación de los módulos solares será 34° .

En resumen, la disposición final de los módulos será:

Inclinación (β)	Azimut (α)
34°	0°

Tabla 6.8 Orientación óptima

6.3 Dimensionado de los componentes de la instalación

La elección de los componentes que componen la instalación dependerá principalmente de las necesidades de caudal y presión requeridas para cada estrategia de riego, de ello dependerá la elección del equipo de bombeo y en función de la potencia necesaria para su accionamiento, se elegirá el modelo y número de módulos solares.

6.3.1 Dimensionado del equipo de bombeo

La bomba será la encargada de suministrar el caudal y la altura requeridas, considerando las pérdidas de la instalación. Para su elección, cada fabricante dispone de catálogos con tablas que nos permiten escoger fácilmente según nuestras necesidades, en este caso se ha empleado el software WebCAPS del fabricante Grundfos para la elección del modelo a partir de las necesidades que se requieran.

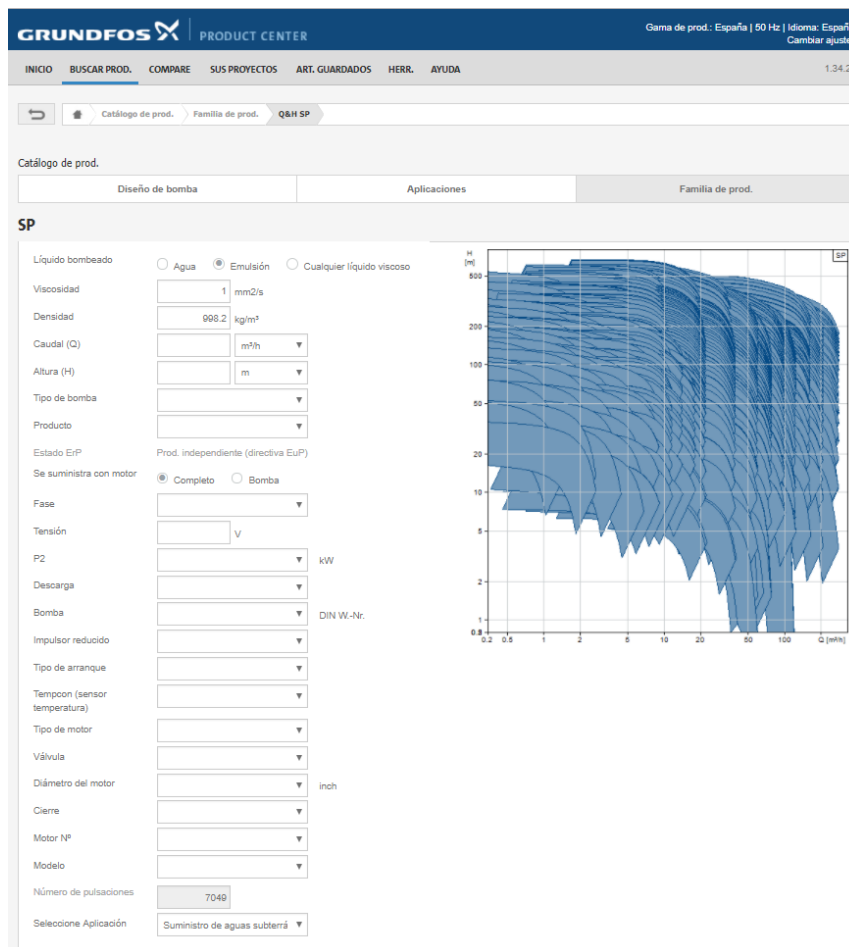


Figura 6.10 Aplicación de Grundfos para la elección de equipo de bombeo según las necesidades

Para ello, y como hemos visto anteriormente, se necesitará el caudal del cálculo, en el que se considerará un 15% de pérdidas, y la altura manométrica requerida, obtenida del balance de energía:

$$Q_{\text{cálculo}} = n^{\circ} \text{olivos} \cdot 16 \text{ l/h} \cdot 1.15 \quad [1]$$

$$H = (z_1 - z_0) + \frac{P_1}{\gamma} + \Delta H_{01} \quad [3]$$

→ **Estrategia 1**

Para la estrategia 1, en la que se considera un único sector, una vez realizados los cálculos, se han obtenido que las necesidades de caudal y altura son las siguientes:

Criterios de diseño de bomba	
Caudal (l/s)	Presión (m)
4.57	235.62

Tabla 6.9 Necesidades de bombeo requeridas

Con el punto de funcionamiento de la bomba y la carta de bombas disponibles:

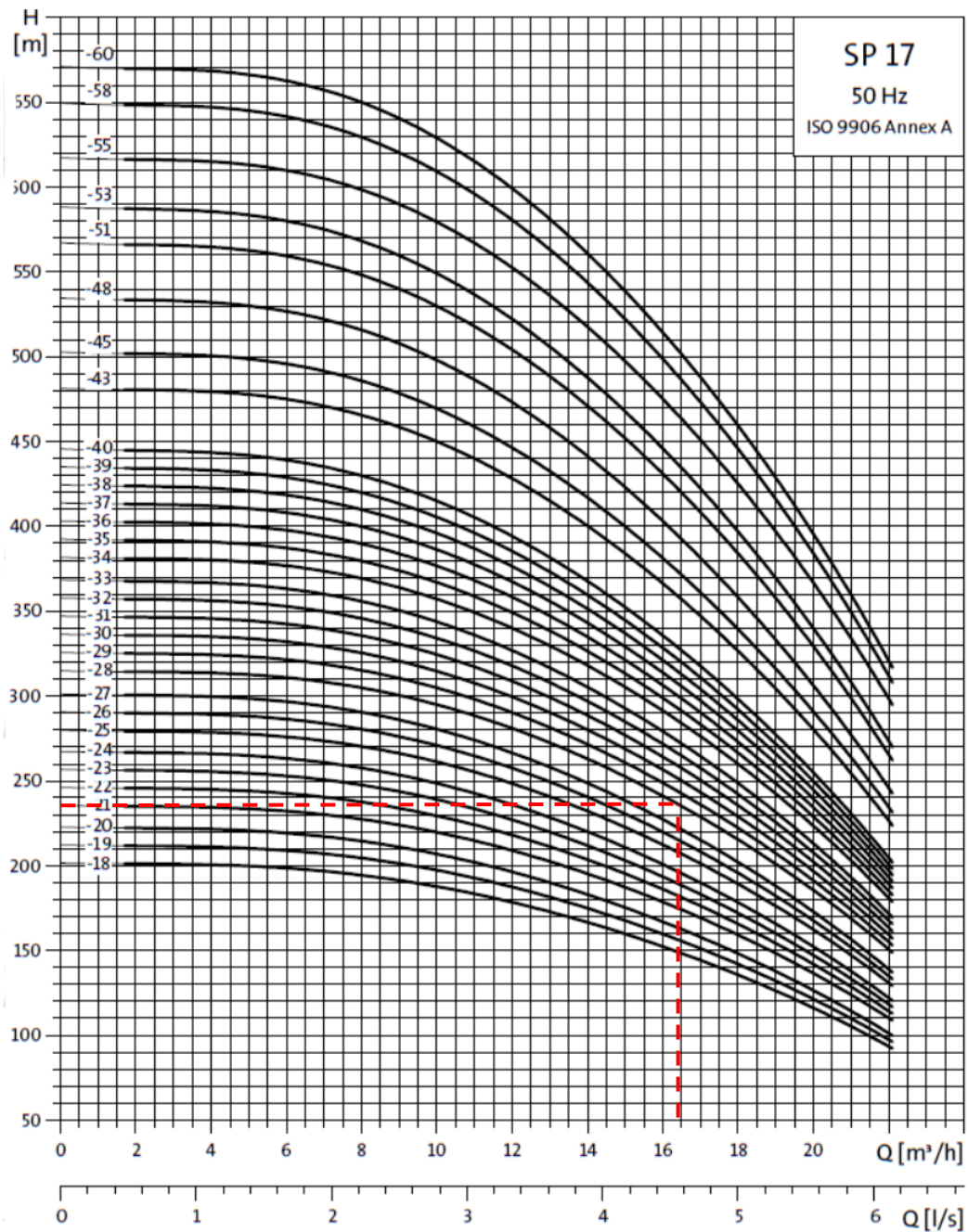


Figura 6.11 Elección del modelo según las necesidades de bombeo

Por tanto, configurando las necesidades que debe cubrir la bomba, las características del modelo más apropiado serán:

Modelo	SP 17-28
Tipo	Sumergible
Materiales	
Bomba	Acero Inoxidable, AISI 304
Motor	Acero Inoxidable, AISI 304
Impulsor	Acero Inoxidable, AISI 304
Datos eléctricos	
Rendimiento de la bomba	72 %
Rendimiento del motor	83.7
Rendimiento del conjunto	60.3%
Potencia Nominal	18.5 kW
Intensidad nominal	32.89 A
Frecuencia de alimentación	50 Hz
Tensión Nominal	3 x 400V
Velocidad nominal de giro	2909 rpm
Factor de potencia	0.77
Grado de protección (IEC 34-5)	IP 68
Clase de aislamiento (IEC 85)	F
Otros datos	
Etapas	28
Diámetro del motor	6"
Peso neto	104 kg
Peso bruto	141 kg

Tabla 6.10 Características técnicas de la bomba para la estrategia 1

Siendo la curva de funcionamiento a 2909 rpm:

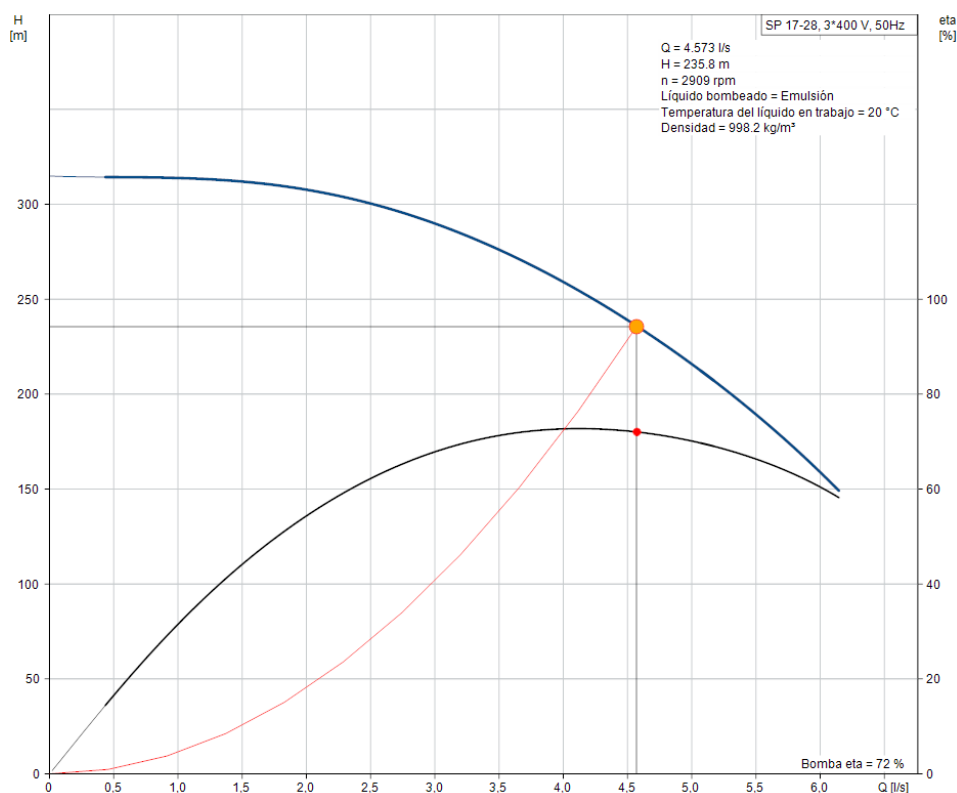


Figura 6.12 Curva de funcionamiento de la bomba para un solo sector y curva de rendimiento

→ **Estrategia 2**

Para la estrategia 2, se consideraban dos sectores, las necesidades de caudal y altura calculadas son las siguientes:

Criterios de diseño de bomba	
Caudal (l/s)	Presión (m)
1.76	235.62
2.82	222.57

Tabla 6.11 Necesidades de bombeo requeridas

Por tanto, siguiendo el mismo procedimiento del apartado anterior, para los dos puntos de funcionamiento calculados, la ficha técnica para el modelo más adecuado será:

Modelo	SP 9-48	
Tipo	Sumergible	
Materiales		
Bomba	Acero Inoxidable, AISI 304	
Motor	Acero Inoxidable, AISI 304	
Impulsor	Acero Inoxidable, AISI 304	
Datos eléctricos		
	Sector 1	Sector 2
Rendimiento de la bomba	67 %	67.6 %
Rendimiento del motor	81.4 %	81.1%
Rendimiento del conjunto	54.5 %	54.6 %
Potencia Nominal	9.2 kW	11.07 kW
Intensidad nominal	18.17 A	19.68 A
Frecuencia de alimentación	50 Hz	50 Hz
Tensión Nominal	3 x 400V	3 x 400V
Velocidad nominal de giro	2892 rpm	2877 rpm
Factor de potencia	0.79	0.81
Grado de protección (IEC 34-5)	IP 68	IP 68
Clase de aislamiento (IEC 85)	F	F
Otros datos		
Etapas	48	48
Diámetro del motor	6"	6"
Peso neto	80.6 kg	80.6 kg
Peso bruto	126 kg	126 kg

Tabla 6.12 Características técnicas de la bomba para la estrategia 2

Por tanto, para el punto de funcionamiento 1 (Estrategia 1) girando a 2892 rpm, la curva de funcionamiento y la de rendimiento serán:

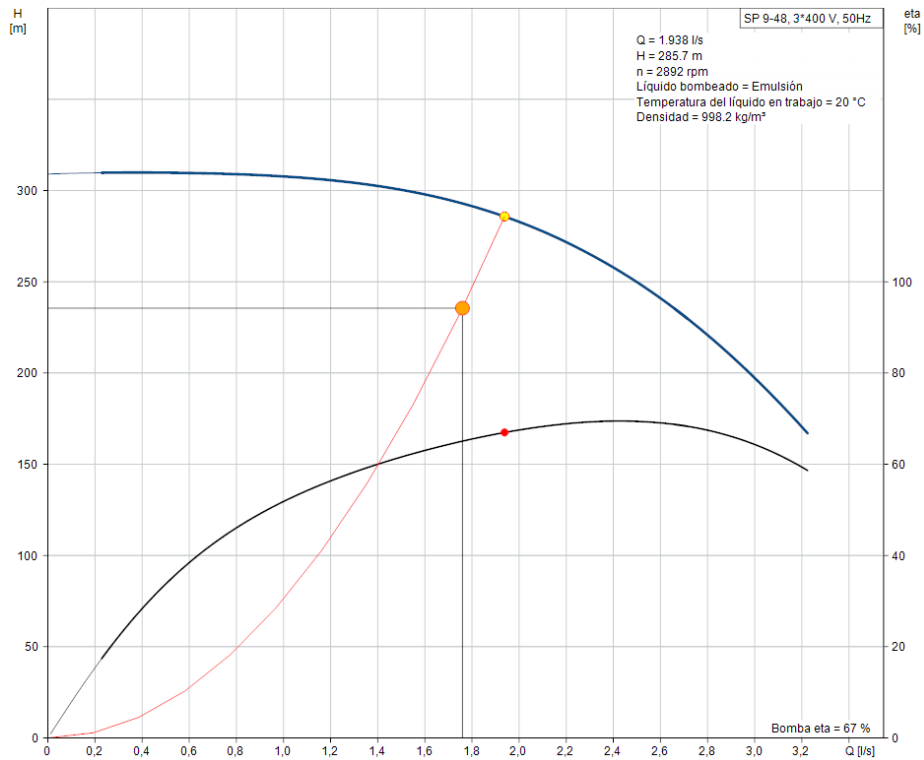


Figura 6.13 Curva de funcionamiento de la bomba para sector 1 y curva de rendimiento

Para el punto de funcionamiento 2 (Estrategia 2), girando a 2877 rpm, la curva de funcionamiento y rendimiento serán:

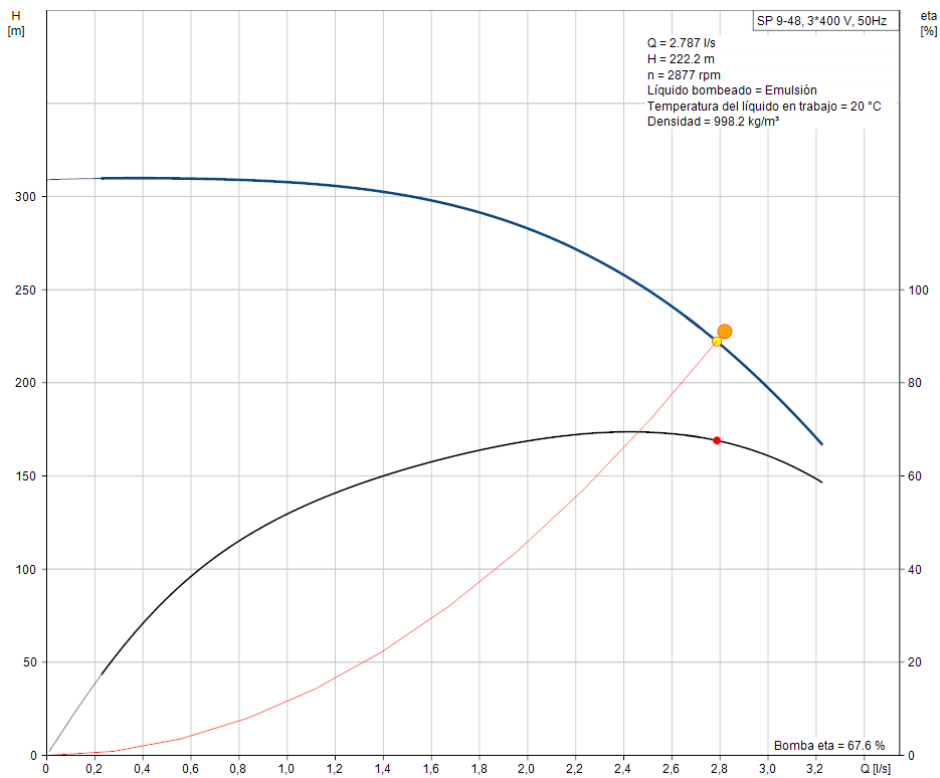


Figura 6.14 Curva de funcionamiento de la bomba para sector 2 y curva de rendimiento

Para obtener las curvas de la bomba H-Q a distintas velocidades de giro, a partir de los puntos obtenidos de alguna de sus curvas a cualquier velocidad de giro, aplicando parámetros adimensionales y relaciones de semejanza se podrán obtener las curvas características a distintas velocidades. Partiendo de los parámetros adimensionales de altura y caudal por el teorema de Π -Buckingham:

$$\Pi_H = \frac{g \cdot H}{\Omega^2 \cdot D^2} \quad \Pi_Q = \frac{Q}{\Omega \cdot D^3} \quad [16, 17]$$

Estableciendo relaciones de semejanza entre el modelo (curva que se tiene), y el prototipo (curva que se quiere obtener), se obtienen:

$$\frac{Q_1}{\Omega_1 \cdot D_1^3} = \frac{Q_2}{\Omega_2 \cdot D_2^3} \quad \frac{g \cdot H_1}{\Omega_1^2 \cdot D_1^2} = \frac{g \cdot H_2}{\Omega_2^2 \cdot D_2^2} \quad [18, 19]$$

Simplificando las expresiones, ya que los diámetros tanto en el modelo como en el prototipo van a ser los mismos, por ser la misma bomba, queda:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\Omega_1}{\Omega_2} \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right)^2 \quad [20, 21]$$

Donde las curvas de funcionamiento estarán definidas por las expresiones:

$$H_2 = H_1 \cdot \left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1}\right)^2 \quad Q_2 = Q_1 \cdot \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \quad [22, 23]$$

Por tanto, a partir de una hoja de cálculo Excel se obtienen fácilmente las curvas características de la bomba (H-Q) para distintas velocidades de giro:

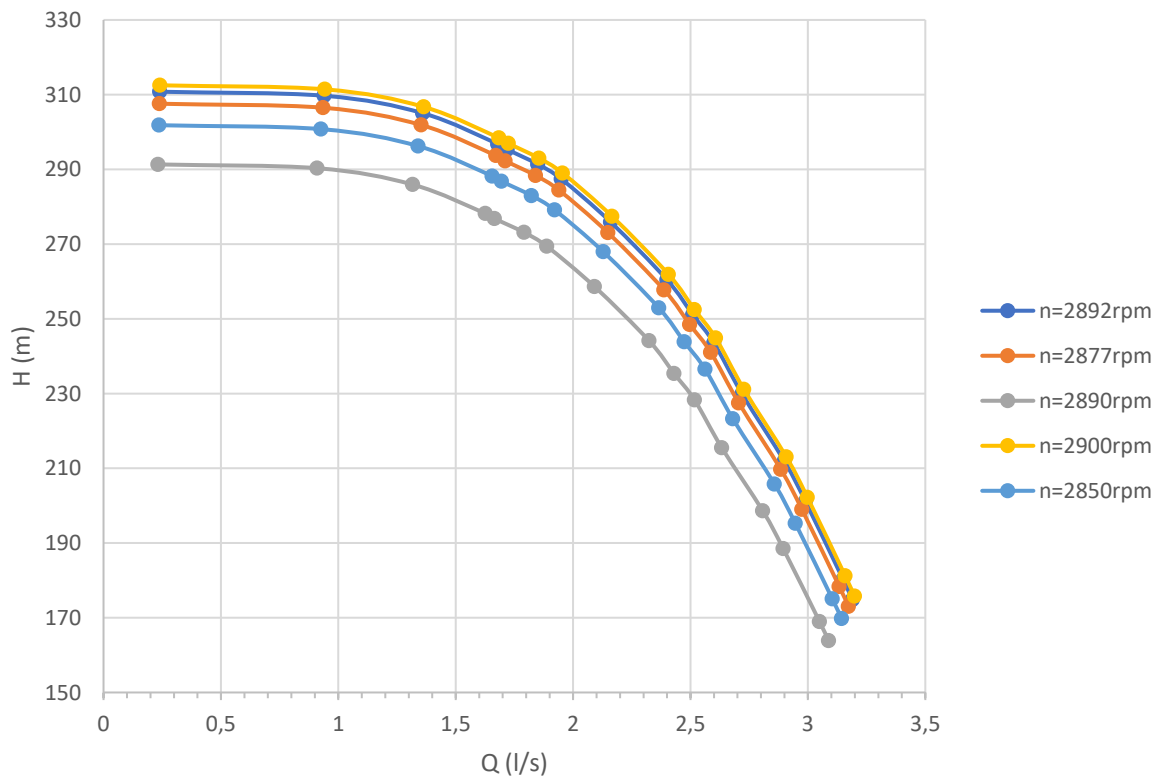


Figura 6.15 Curva de funcionamiento de la bomba a distintas velocidades

→ **Estrategia 3**

Para la estrategia 3, en la que se consideran tres sectores, las necesidades de caudal y altura son las siguientes:

Criterios de diseño de bomba	
Caudal (l/s)	Presión (m)
1.26	235.62
1.56	216.36
1.76	206.14

Tabla 6.13 Necesidades de bombeo requeridas

Por tanto, el modelo que cubre los tres puntos de funcionamiento será:

Modelo	SP 7-42		
Tipo	Sumergible		
Materiales			
Bomba	Acero Inoxidable, AISI 304		
Motor	Acero Inoxidable, AISI 304		
Impulsor	Acero Inoxidable, AISI 304		
Datos eléctricos			
	Sector 1	Sector 2	Sector 3
Rendimiento de la bomba	61.7 %	66.1 %	67.9 %
Rendimiento del motor	79.9 %	80.1 %	80 %
Rendimiento del conjunto	49.3 %	52.9 %	54.3 %
Potencia Nominal	5.88 kW	6.29 kW	6.55 kW
Intensidad nominal	11.41 A	21.13 A	12.26 A
Frecuencia de alimentación	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Tensión Nominal	3 x 400V	3 x 400V	3 x 400 V
Velocidad nominal de giro	2903 rpm	2893 rpm	2890 rpm
Factor de potencia	0.74	0.78	0.77
Grado de protección (IEC 34-5)	IP 68	IP 68	IP 68
Clase de aislamiento (IEC 85)	F	F	F
Otros datos			
Etapas	42		
Diámetro del motor	6"		
Peso neto	66.3 kg		
Peso bruto	108 kg		

Tabla 6.14 Características técnicas de la bomba para la estrategia 3

Por tanto, para el punto de funcionamiento 1 (Estrategia 1) girando a 2903 rpm, la curva de funcionamiento y la de rendimiento serán:

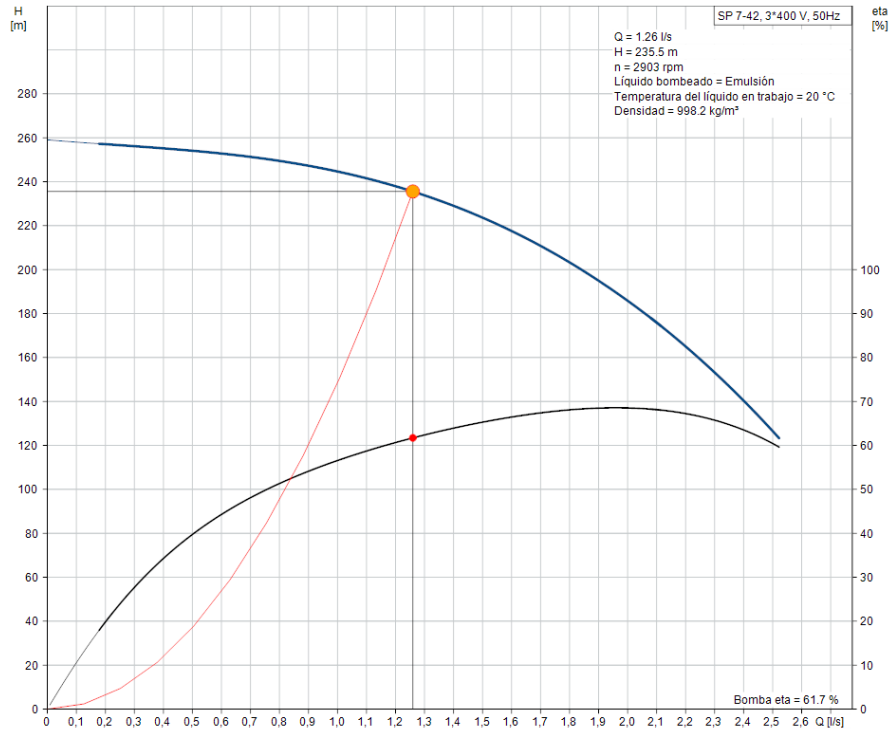


Figura 6.16 Curva de funcionamiento de la bomba para sector 1 y curva de rendimiento

Por tanto, para el punto de funcionamiento 2 (Estrategia 2) girando a 2893 rpm, la curva de funcionamiento y la de rendimiento serán:

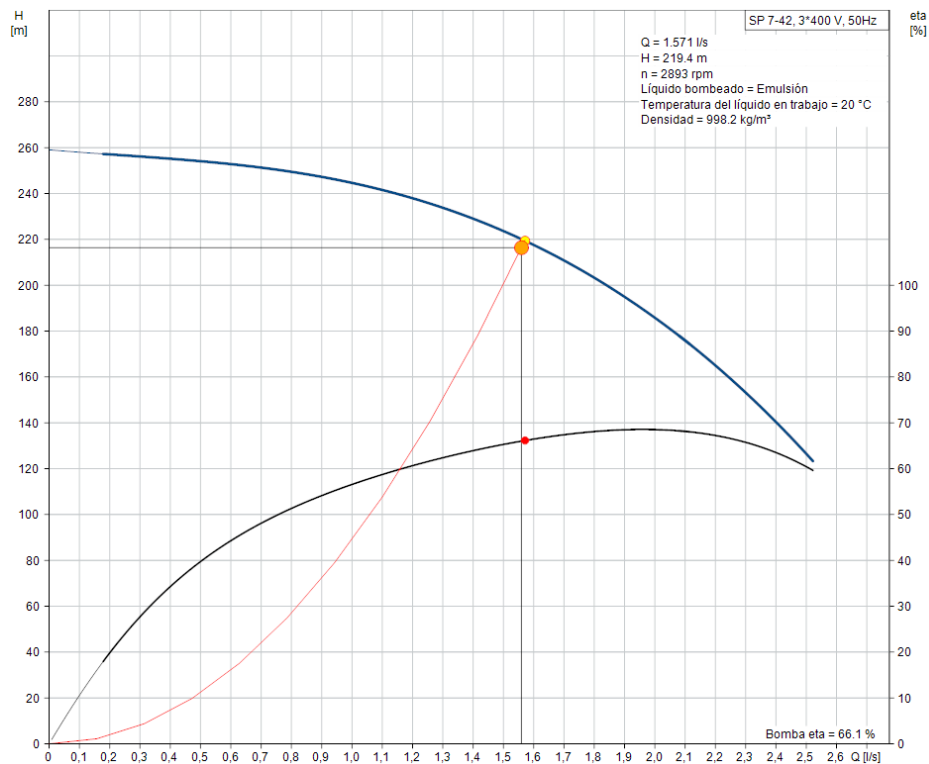


Figura 6.17 Curva de funcionamiento de la bomba para sector 2 y curva de rendimiento

Por tanto, para el punto de funcionamiento 3 (Estrategia 3) girando a 2890 rpm, la curva de funcionamiento y la de rendimiento serán:

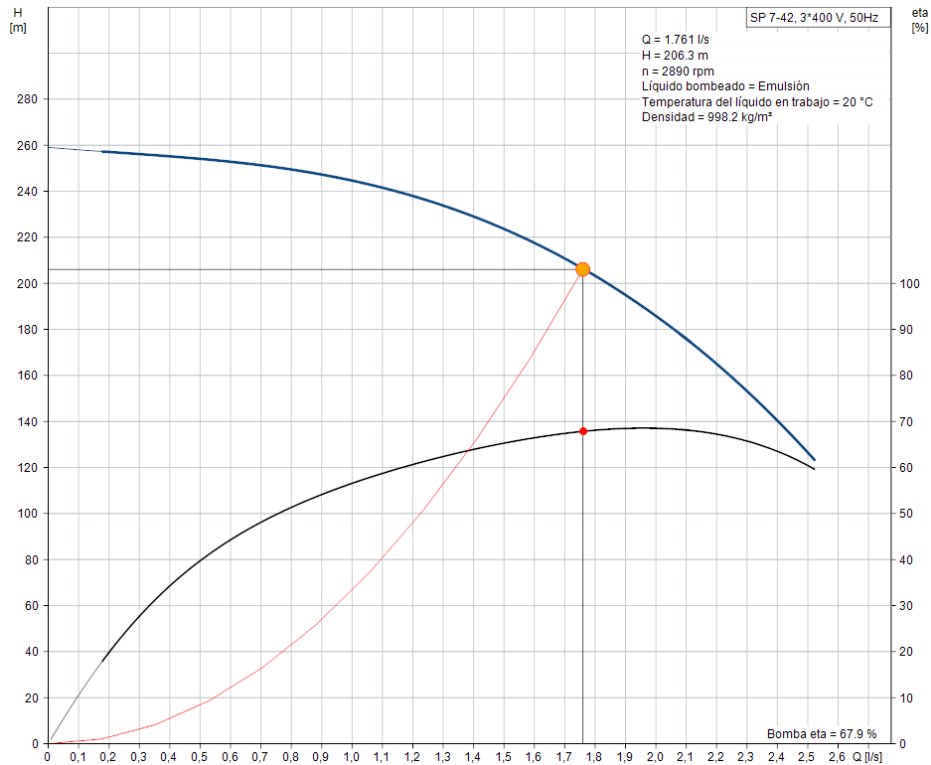


Figura 6.18 Curva de funcionamiento de la bomba para sector 3 y curva de rendimiento

Mediante la aplicación de las relaciones de semejanza definidas en el apartado anterior, se obtienen las distintas curvas H-Q para distintas velocidades de giro de la bomba:

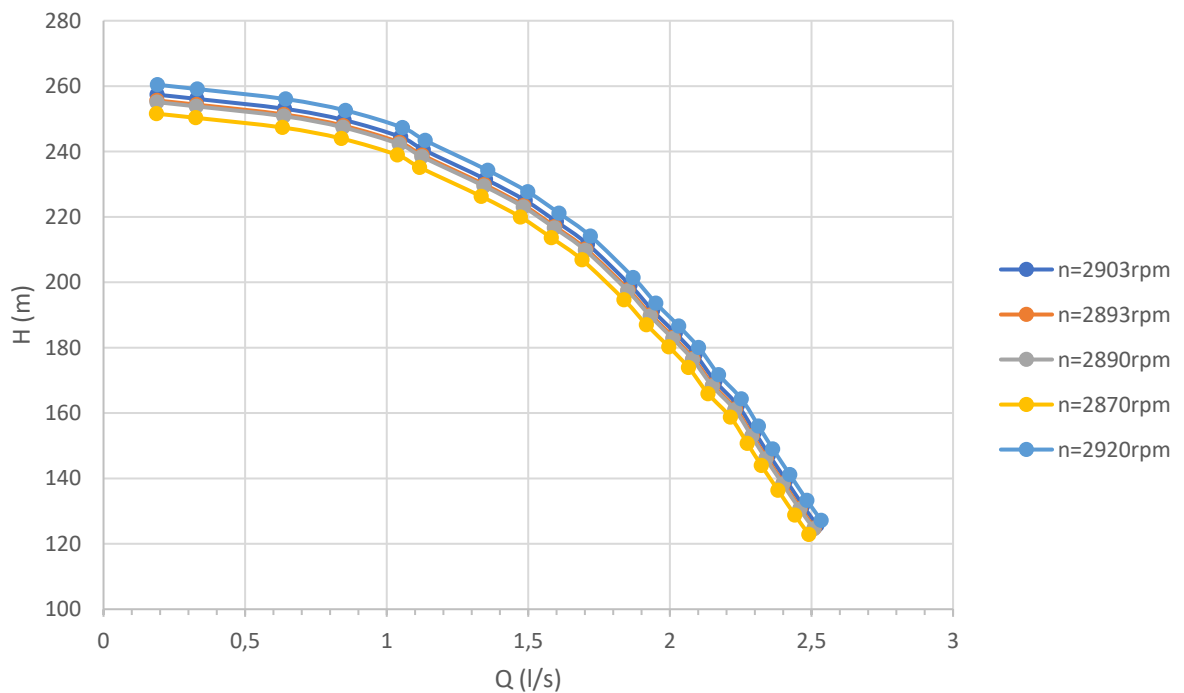


Figura 6.19 Curva de funcionamiento de la bomba a distintas velocidades

6.3.2 Dimensionado de los paneles solares fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos están compuestos por células fotovoltaicas, que absorben fotones de luz solar y los transforman en energía eléctrica, los fotones son absorbidos por los cristales de silicio que componen el módulo. Dependiendo de las células, en general, se clasificarán en monocristalinos o policristalinos.

- Módulos de Silicio Monocristalino, cuando están compuestos por un único tipo de cristal de silicio, tienen un mayor rendimiento, entre 11 y el 16%.
- Módulo de Silicio Policristalino, cuando están formados por diversos cristales, tienen un rendimiento menor, entre 10% y el 14%.

Para el dimensionado del generador fotovoltaico se tendrá en cuenta la potencia pico requerida al generador según las necesidades energéticas de la bomba. A partir de la media del mes de energía hidráulica requerida, la bomba seleccionada y el recurso solar disponible para la ubicación elegida, se puede obtener la potencia pico mínima requerida del sistema fotovoltaico.

$$P_p = \frac{E_{Hd} \cdot H_{st}}{\eta_{mb} \cdot F_t \cdot F_m \cdot H_d} \quad [24]$$

donde:

- P_p (kW_p) es la potencia pico que el generador deberá suministrar para satisfacer las necesidades energéticas de la bomba.
- E_{Hd} ($kWh/día$) es la energía hidráulica diaria requerida.
- H_{st} (kW/m^2) es la irradiancia normal en condiciones normales NOCT ($20^\circ C$ y 1.5 atm), se considerará 0.8 kW/m^2 .
- η_{mb} rendimiento conjunto del motor y bomba.
- F_m es el factor de acoplo medio, cociente entre la energía generada en condiciones de operación y la que se generaría trabajando en el PMP. Para el caso de bombas centrífugas $F_m = 0.9$
- H_d ($kWh/m^2/día$) es la irradiación solar media diaria sobre el plano óptimo obtenida en los apartados anteriores.
- F_t ($^\circ C^{-1}$) es el factor de corrección de la temperatura que se podrá obtener:

$$F_t = 1 - \delta \cdot (T_c - 25) \quad [25]$$

siendo:

- $\delta = 0.005$ $^\circ C^{-1}$ para el modelo de módulo elegido trabajando a una temperatura de célula de 45 $^\circ C$.

En este caso, al realizar los cálculos con una hoja de cálculo, se ha obtenido la potencia pico para cada mes, pero para el dimensionado, solamente se cogerá la máxima, es decir, el mes en el que la potencia pico requerida sea mayor. Por tanto, para cada estrategia:

Estrategia	Potencia pico (kW_p)
1 sector	11.96
2 sectores	7.64
3 sectores	4.44

Tabla 6.15 Potencia pico para cada estrategia

Para la instalación se han elegido módulos solares monocristalinos Luxor Eco-Line 60-270W (LX-270M) con las siguientes características:

Datos eléctricos	
Potencia nominal (Wp)	270.00
Corriente nominal (A)	8.60
Tensión nominal (V)	31.57
Corriente de cortocircuito (A)	9.04
Tensión de marcha en vacío (V)	37.98
Eficiencia en STC	16.69
Valores límite	
Tensión máxima del sistema (V)	1000 V
Corriente de retorno máxima (I)	15 A
Rango de temperatura	-45 a 80°C
Carga máxima por presión	5400 Pa
Coefficiente de temperatura	
Coefficiente de temperatura (V)	-0.34 % °C ⁻¹
Coefficiente de temperatura (I)	0.05 % °C ⁻¹
Coefficiente de temperatura (P)	-0.45 % °C ⁻¹
Dimensiones	
Peso (kg)	21 kg

Tabla 6.16 Características técnicas del módulo solar fotovoltaico

STC (Standard test conditions): irradiancia 1000 W/m², temperatura 25°C y 1.5 atm

NOCT (nominal operating cell temperature): irradiancia 800 W/m², temperatura 20°C y 1.5 atm

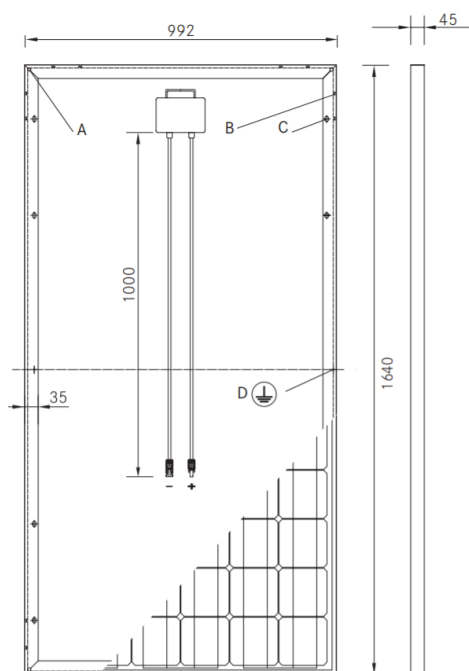


Figura 6.20 Dimensiones del módulo solar fotovoltaico elegido

Por tanto, para determinar el número de módulos necesarios para cada estrategia, dependerá de la potencia pico requerida y de la potencia del panel solar fotovoltaico.

$$N^{\circ} \text{Paneles} = \frac{P_p \text{ mínima del sistema}}{P_p \text{ panel}} + 1 \quad [26]$$

Estrategia	N° Paneles*
1 sector	46
2 sectores	30
3 sectores	18

Tabla 6.17 Número de módulos para cada estrategia

*Los resultados han sido sobredimensionados.

6.3.3 Dimensionado variador de frecuencia

El motor del equipo de bombeo tendrá instalado un variador de frecuencia, que es un sistema para el control de la velocidad de giro de un motor de corriente alterna (AC) por medio de la variación de la frecuencia de alimentación suministrada al motor en función de la energía almacenada en su bus de CC, evitando así agotar de golpe la energía que suministran los paneles solares, es decir, un variador de frecuencia se considera un variador de velocidad.

El principal objetivo de la instalación de un variador de velocidad es controlar la velocidad de giro de la bomba, y con ello, con una misma bomba, conseguir satisfacer los puntos de funcionamiento requeridos por el sistema para cada sector de riego. Otro de los objetivos de la instalación de este elemento es conseguir que el equipo de bombeo funcione sean cuales sean las condiciones meteorológicas, es decir, la cantidad de energía producida, siempre y cuando se pueda producir la energía mínima para el correcto funcionamiento.

Los principales beneficios de la instalación de un variador de frecuencia son:

- Conexión directa entre los paneles solares y el motor de la bomba, sin necesidad de elementos intermedios o rectificadores.
- Maximización y optimización del caudal y altura suministrados por la bomba, mediante la regulación de la velocidad de giro del motor en función de la tensión del bus de CC del variador que proporcionan la irradiación de los paneles solares.
- Carga estable de los condensadores del variador, cuando los paneles empiezan a producir energía a partir de la irradiación recibida, debido al puente rectificador de carga.
- Arranque suave de la bomba, evitando cargas bruscas y cambios repentinos en el suministro, lo que a la larga se traducirá en alargar la vida de los componentes.

Para el caso a estudio, el modelo más adecuado y el elegido es el variador OMRON MX2, por ser el más apropiado para este tipo de instalaciones y cumplir las condiciones de funcionamiento del sistema.



Figura 6.21 Modelo de variador de velocidad elegido

6.3.4 Dimensionado del cableado

El cableado es el encargado de transmitir la corriente desde los paneles solares de generación, hasta el punto de consumo de energía, el motor. Para el correcto dimensionado de la sección de los conductores, habrá que considerar que soporte la corriente nominal de funcionamiento, la corriente de arranque del motor y el breve periodo de tiempo hasta que actúan las protecciones sin producirse defectos en el cable. La sección, en milímetros cuadrados, se puede determinar mediante la ecuación:

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot I}{k \cdot \Delta V} \quad [27]$$

donde:

- L (mm^2) es la longitud del tramo de conductor que se considera.
- I (A) es la intensidad de corriente que circula por el conductor.
- k es la conductividad del material del conductor, dependerá de la temperatura de operación, considerando una temperatura estándar de 20°C, la conductividad para el cobre será 56 y para el aluminio 35.
- ΔV (V) es la caída de tensión máxima permitida en el tramo.

Se considerarán 2 tramos de cableado en nuestra instalación:

- Tramo 1: entre la caja de conexiones de los módulos solares y el variador de velocidad.
- Tramo 2: entre el variador y los bornes de conexión del motor de la electrobomba.

Habrà que considerar que considerar que la caída de tensión máxima en el tramo 1 no debe superar el 3% (1% recomendada), y en el tramo 2 no debe superar el 5% (3% recomendada).

Para instalaciones fotovoltaicas es recomendable emplear cables unipolares de doble aislamiento PV ZZ-F, de gran durabilidad, resistentes hasta los 1800 V, gran resistencia térmica y resistentes a condiciones climáticas adversas, es por ello, por lo que son muy adecuados para instalaciones a la intemperie aisladas.

Para todos los tramos y estrategias, los conductores estarán compuestos por dos conductores activos, positivo y negativo, de igual sección, y un cable de protección, con doble aislamiento que conectará todas las masas metálicas de la instalación a tierra, para evitar que aparezcan diferencias de potencial, y pueda producir una descarga a tierra de las tensiones en exceso, este conductor será del mismo material y sección que los otros dos conductores activos. A partir de la caja de conexiones de los módulos, el cableado irá introducido en tubo de PVC para mayor protección a condiciones meteorológicas adversas, en el caso de que fuera necesario que los tubos sean articulados, se sustituirá por tubos de polietileno (PE).

Tras realizar los cálculos, que irán adjuntos más adelante en el anejo, las secciones del conductor para cada tramo serán:

Tramo	Sección (mm^2)
Conexión entre módulos	4
Tramo 1	10
Tramo 2	4

Tabla 6.18 Sección del cableado para cada tramo

6.3.5 Dimensionado de protecciones

El cálculo de las protecciones se basará principalmente en evitar y eliminar tres tipos de incidentes que se pueden ocasionar en una instalación eléctrica: sobrecargas, cortocircuitos y sobretensiones, para cada uno de los defectos se dimensionará una protección.

Una sobrecarga se produce cuando la intensidad alcanza un valor extremo por un defecto de aislamiento, un fallo en el sistema o una excesiva demanda de carga, dañando a los conductores por un calentamiento en exceso, pudiendo provocar un cortocircuito. Para proteger contra sobrecargas se emplean interruptores automáticos de corte omnipolar con curva térmica de corte, o un fusible, que es el elemento de protección más común, el cual consiste en una tira metálica insertada en el circuito, que al sobrepasar cierta intensidad se funde, provocando un cortocircuito. Para el correcto dimensionado, deberán cumplir dos condiciones:

$$1. I_B \leq I_n \leq I_{adm}$$

donde:

- I_B es la intensidad de diseño según las cargas previstas.
- I_n es la intensidad nominal de la protección.
- I_{adm} es la intensidad máxima admisible del conductor.

$$2. I_f \leq 1.45 \cdot I_{adm}$$

donde:

- I_f es la intensidad de fusión en 5 segundos. Se cumple la expresión:

$$I_f = 1.60 \cdot I_n \quad [28]$$

Por tanto, las dos condiciones se pueden resumir en la expresión:

$$I_b \leq I_n \leq 0.9 \cdot I_{adm} \quad [29]$$

Para la correcta elección del fusible habrá que considerar:

- Tensión nominal del fusible (V_n) que tendrá que ser mayor o igual a la tensión de funcionamiento de la instalación.
- Intensidad nominal del fusible (I_n) que deberá ser mayor o igual a la máxima de funcionamiento.
- El fusible actuará en un tiempo inferior a 0.1 segundos.
- La intensidad de cortocircuito máxima que soporte el fusible debe ser mayor que la máxima intensidad de cortocircuito de la instalación.

En el caso de que se produzca un cortocircuito, habrá que emplear las adecuadas protecciones. Un cortocircuito se debe a una conexión incorrecta o un defecto en el aislamiento del conductor. Para el correcto dimensionado, deberán cumplir dos condiciones:

$$1. \quad I^2 \cdot t \leq I_{cu}$$

donde:

- $I^2 \cdot t$ se le denomina energía de paso, al producto entre la intensidad de disparo y el tiempo.
- I_{cu} es la intensidad máxima de cortocircuito que soporta el conductor:

$$I_{cu} = k^2 \cdot S^2 \quad [30]$$

donde k dependerá del material del conductor (115 para cobre aislado con PVC, 143 para cobre aislado con XLPE y 94 para aluminio) y S la sección del conductor.

$$2. \quad PdC \geq I_{sc,max}$$

donde:

- PdC es el poder de corte del dispositivo.
- $I_{sc,max}$ es la intensidad máxima de cortocircuito de la instalación.

En definitiva, el tiempo de corte del cortocircuito no debe ser superior al tiempo que los conductores tardan en llegar a la temperatura límite admisible.

Finalmente, otro problema que puede aparecer en instalaciones eléctricas son las sobretensiones, que por lo general en este tipo de instalaciones se ocasionan por descargas eléctricas durante tormentas sobre la estructura metálica que sustenta los módulos. El elemento de defensa contra este tipo de fenómenos son los pararrayos, fabricados de óxido de zinc o carburo de silicio, producen una descarga de corriente que ofrece una resistencia inversa derivando a tierra el exceso de tensión. Se suelen ubicar lo más próximo posible a la instalación para una mejor protección.

6.3.6 Dimensionado de la estructura soporte de los paneles

Aunque el dimensionado y cálculo de la estructura soporte de los módulos solares no es uno de los objetivos del presente estudio, se ha querido hacer un breve resumen de los conceptos teóricos para el cálculo de una estructura de este tipo. Para el dimensionado, habrá que considerar que el diseño sea acorde a la orientación e inclinación óptima para el aprovechamiento energético, y que la estructura sea resistente con el mínimo mantenimiento y soporte acciones climáticas adversas, para evitar la corrosión de la estructura.

Una vez instalada la estructura módulos solares instalado, deberá resistir sobrecargas del viento y nieve de acuerdo con el Código Técnico de la Edificación (CTE).

Se empleará para el diseño de los componentes de la estructura metálica, un acero laminado S275 galvanizado en caliente, con el objetivo de prevenir la corrosión, según las normas UNE 37-501 y UNE 37-508, y para la tornillería, acero inoxidable u otro tipo de acero galvanizado, también será admisible como método de unión la soldadura ordinaria (JR), de acuerdo a la norma UNE EN 1005.

Presentará las siguientes características:

S275-JR	
Módulo de elasticidad (E)	210000 N/mm ²
Módulo de rigidez (G)	81000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.3
Coefficiente de Dilatación Térmica (α)	$1.2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Densidad (ρ)	7850 Kg/m ³

Tabla 6.19 Características del acero

La estructura tendrá la siguiente disposición, diferenciándose en la longitud de la misma para cada estrategia, ya que el número de paneles que albergará será distinto:

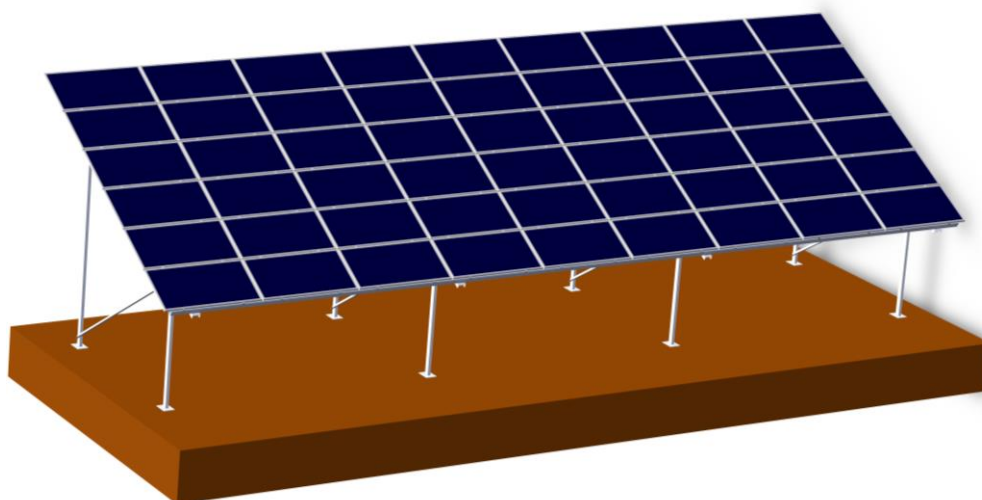


Figura 6.22 Modelo 3D de la estructura soporte de los paneles solares

La estructura irá anclada al suelo por medio de pletinas en la base de los pilares de la estructura atornilladas al suelo o a un bordillo prefabricado de hormigón que le aporte estabilidad, como se puede ver en la siguiente imagen.



Figura 6.23 Posible solución de anclaje al suelo

El diseño de la estructura soporte para los módulos fotovoltaicos se basará de los conocimientos obtenidos en la asignatura Elasticidad y Resistencia de Materiales II, en la que se veía el cálculo de estructuras metálicas simples según la *Instrucción Española de Acero Estructural (EAE)*, y para ello se podría emplear el software *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2017*, basado en elementos finitos para el modelado, análisis y dimensionado de la estructura.

También se tendrá en cuenta las acciones, que es todo aquello que provoca una respuesta resistente en la estructura. Se podrán clasificar según su naturaleza (directas o indirectas), según su variación en el tiempo (permanentes, permanentes de valor no constante, variables o accidentales) o según su variación en el espacio (fijas o libres).

Las acciones consideradas para el posterior cálculo serán el peso propio, viento y nieve, y se despreciarán sobrecargas de uso ya que nuestra estructura no soportará tránsito sobre ella.

➤ **Peso propio**

Se considerará en función de cada uno de las estrategias, ya que el número de paneles es distinto para cada una de ellas, se conoce que el peso por panel es de 21 kg. Se calculará:

$$\frac{\text{Peso panel}}{\text{Dimensiones del panel}} \quad [31]$$

Obtendremos la expresión en N/m^2 .

➤ Viento

Será la acción más desfavorable, se comprueba en dos direcciones y la acción será perpendicular a la superficie. Se puede calcular como:

$$q_e = q_b \cdot C_e \cdot C_p \quad [32]$$

donde:

- q_b es la presión dinámica del viento, que se podrá obtener:

$$q_b = 0.5 \cdot \delta \cdot v_b^2 \quad [33]$$

siendo:

- δ es la densidad del aire (1.25 kg/m^3)
- v_b es la velocidad del viento según la localización, tomando como referencia:

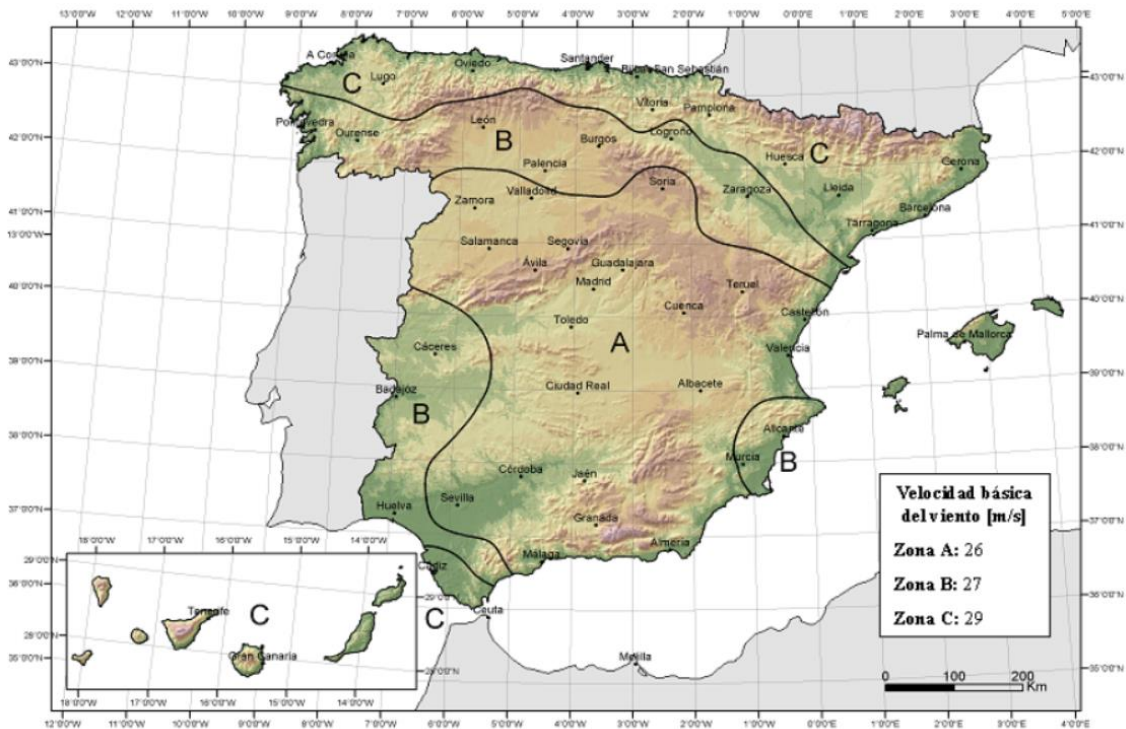


Figura 6.24 Mapa de España de clasificación de zonas según influencia del viento

La finca a estudio se encuentra en la zona A, por tanto, se considerará $v_b = 26 \text{ m/s}$.

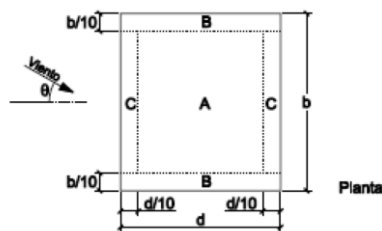
- C_e es el coeficiente de exposición, variará con la altura del punto que se considere y con el entorno en el que se encuentre la ubicación.

Grado de aspereza del entorno	Parámetro		
	k	L (m)	Z (m)
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	0,156	0,003	1,0
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	0,17	0,01	1,0
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	0,19	0,05	2,0
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	0,22	0,3	5,0
V Centro de negocios de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	0,24	1,0	10,0

Tabla 6.20 Clasificación según entorno

Para nuestro caso y ubicación, considerando una altura del punto considerado de tres metros, y un grado de aspereza del entorno III, se considerará $C_e=1.6$.

- C_p es el coeficiente eólico o de presión exterior, para elementos con un área de influencia entre $1m^2$ y $10m^2$, el coeficiente eólico está tabulado, diferenciando por zonas de influencia de la superficie (A, B y C).



Coeficientes de presión exterior					
$C_{p,10}$					
Pendiente de la cubierta α	Efecto del viento hacia	Factor de obstrucción φ	Zona (según figura)		
			A	B	C
0°	Abajo	$0 \leq \varphi \leq 1$	0,5	1,8	1,1
	Arriba	0	-0,6	-1,3	-1,4
	Arriba	1	-1,5	-1,8	-2,2
5°	Abajo	$0 \leq \varphi \leq 1$	0,8	2,1	1,3
	Arriba	0	-1,1	-1,7	-1,8
	Arriba	1	-1,6	-2,2	-2,5
10°	Abajo	$0 \leq \varphi \leq 1$	1,2	2,4	1,6
	Arriba	0	-1,5	-2,0	-2,1
	Arriba	1	-2,1	-2,6	-2,7
15°	Abajo	$0 \leq \varphi \leq 1$	1,4	2,7	1,8
	Arriba	0	-1,8	-2,4	-2,5
	Arriba	1	-1,6	-2,9	-3,0
20°	Abajo	$0 \leq \varphi \leq 1$	1,7	2,9	2,1
	Arriba	0	-2,2	-2,8	-2,9
	Arriba	1	-1,6	-2,9	-3,0
25°	Abajo	$0 \leq \varphi \leq 1$	2,0	3,1	2,3
	Arriba	0	-2,6	-3,2	-3,2
	Arriba	1	-1,5	-2,5	-2,8
30°	Abajo	$0 \leq \varphi \leq 1$	2,2	3,2	2,4
	Arriba	0	-3,0	-3,8	-3,6
	Arriba	1	-1,5	-2,2	-2,7

Tabla 6.21 Clasificación del coeficiente eólico según disposición

Para una inclinación óptima de 34°, por extrapolación lineal:

	C_p	C_s
A	2.34	-3.32
B	3.28	-4.28
C	2.48	-3.92

Tabla 6.22 Valores de C_p y C_s según zona de influencia

➤ Nieve

Aunque será la acción más adversa y más improbable, ya que las nevadas no son frecuentes en la zona ni son de gran intensidad, dependerá de la distribución y la intensidad, se puede calcular:

$$q_n = \mu \cdot s_k \quad [34]$$

donde:

- μ es el coeficiente de forma, según el CTE DB AE tomará valor 1 por estar la inclinación comprendida entre 30 y 60°.
- s_k es el valor característico de la carga de nieve sobre el terreno horizontal, según la norma del CTE DB AE, anejo E:



Figura 6.25 Mapa de España de clasificación de zonas según influencia de nieves

Para nuestra ubicación, zona 6, y una altitud de 500 metros, $s_k = 0.3 \text{ kN/m}^2$.

- Bases de cálculo

Se calcularán aquellas situaciones en las que, si son superadas, la estructura incumple alguno de los fines para los que ha sido diseñada, durante un periodo de vida útil determinado, en el caso de esta estructura de 25 años (EAE Tabla 5.1). Se pueden dar dos fallos, los que afectan a la seguridad de las personas, seres vivos o medio ambiente, asociados al colapso de tora o una parte de la estructura, comprobación mediante los Estados Límite Últimos (ELU), y los fallos que afectan al uso de la estructura y su durabilidad provocando una pérdida parcial de las prestaciones, comprobación mediante los Estados Límite de Servicio (ELS).

La combinación de acciones seguirá el criterio:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*,j} G_{k,j}^* + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad [35]$$

donde:

- $G_{k,j}$ es el valor característico de las acciones permanentes.
- $G_{k,j}^*$ es el valor característico de las acciones permanentes de valor no constante.
- $Q_{k,1}$ es el valor característico de las acciones variables determinantes.
- $\psi_{0,i}$ es el valor representativo de la combinación de las acciones variables que actúan simultáneamente con la acción variable determinante.

Como se ha nombrado anteriormente, los estados límite últimos (ELU) son los que pueden provocar el colapso de la estructura, su comprobación se realiza mediante la comprobación a resistencia, y debe cumplir la condición.

$$\frac{N}{A \cdot x \cdot f_{yd}} + \frac{M}{W \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad [36]$$

Se considerarán las combinaciones de carga de las tablas 11b, 11c y 12.1 de la EAE, teniendo en cuenta que la altitud es menor a 1000 metros y que las acciones son persistentes o transitorias en su estado más desfavorable.

Coefficientes parciales para las acciones, aplicables para la evaluación de los ELU				
Tipo de acción	Situaciones persistentes o transitorias		Situaciones accidentales	
	Efecto favorable	Efecto desfavorable	Efecto favorable	Efecto desfavorable
Permanente	1.00	1.35	1.00	1.00
Permanente de valor no cte	1.00	1.50	1.00	1.00
Variable	0.00	1.50	0.00	1.00
Accidental	-	-	1.00	1.00

Tabla 6.23 Tabla 12.1 de la EAE para la obtención de coeficientes parciales para las acciones (ELU)

Coefficientes de simultaneidad para la acción de la nieve			
	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Edificios emplazados a una altitud $H > 1000$ metros sobre el nivel del mar	0.7	0.5	0.2
Edificios emplazados a una altitud $H > 1000$ metros sobre el nivel del mar	0.5	0.2	0.0

Tabla 6.24 Tabla 11b de la EAE para la obtención de coeficientes de simultaneidad para la acción de la nieve (ELU)

Coefficientes de simultaneidad para la acción de la nieve		
ψ_0	ψ_1	ψ_2
0.6	0.2	0.0

Tabla 6.25 Tabla 11c de la EAE para la obtención de coeficientes de simultaneidad para la acción de la nieve (ELU)

Las combinaciones consideradas son las siguientes:

$$1.35 \cdot \text{Peso propio} + 1.5 \cdot \text{Nieve}$$

$$1.0 \cdot \text{Peso propio} + 1.5 \cdot \text{Viento de succión}$$

$$1.35 \cdot \text{Peso propio} + 1.5 \cdot \text{Viento de presión}$$

$$1.35 \cdot \text{Peso propio} + 1.5 \cdot \text{Nieve} + 1.5 \cdot 0.6 \cdot \text{Viento de presión}$$

$$1.35 \cdot \text{Peso propio} + 1.5 \cdot \text{Viento de presión} + 1.5 \cdot 0.5 \cdot \text{Nieve}$$

El estado límite de servicio en cambio, incluye las situaciones en la que nuestra estructura no cumple los requisitos de funcionalidad para los que ha sido diseñada, para su comprobación se tendrá en cuenta una deformación máxima de 1/300 veces la luz entre apoyos. Se considerará también que los perfiles que soporten los módulos solares, debido a los materiales de los que están fabricados, no podrán superar una deformación máxima de 15mm, puesto que se podrá producir una fractura de ellos.

Al igual que en los ELU, para los estados límite de servicio se establecerán unos coeficientes de simultaneidad igual que en el caso anterior, y unos coeficientes parciales para las acciones obtenidos de la tabla 12.2 de la EAE.

Coefficientes parciales para las acciones, aplicables para la evaluación de los estados límite de servicio		
Tipo de acción	Efecto favorable	Efecto desfavorable
Permanente	1.00	1.00
Permanente de valor no constante	1.00	1.00
Variable	0.00	1.00

Tabla 6.26 Tabla 12.2 de la EAE para la obtención de coeficientes parciales para las acciones (ELS)

Las combinaciones consideradas son las siguientes:

$$1.0 \cdot \text{Peso propio} + 1.0 \cdot \text{Nieve}$$

$$1.0 \cdot \text{Peso propio} + 1.0 \cdot \text{Viento de succión}$$

$$1.0 \cdot \text{Peso propio} + 1.0 \cdot \text{Viento de presión}$$

$$1.0 \cdot \text{Peso propio} + 1.0 \cdot \text{Nieve} + 1.0 \cdot 0.6 \cdot \text{Viento de presión}$$

$$1.0 \cdot \text{Peso propio} + 1.0 \cdot \text{Viento de presión} + 1.0 \cdot 0.5 \cdot \text{Nieve}$$

7 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

Tras el análisis de los resultados obtenidos a lo largo de todo el estudio y de sus anejos, se puede afirmar que se han cumplido los objetivos finales de dicho estudio. Se ha realizado un estudio de las necesidades de agua de olivar para un caso concreto, pero extrapolable a cualquier ubicación y situación, se han planteado tres estrategias de riego diferentes, basándose en la sectorización de la finca. Para las distintas situaciones se ha dimensionado un grupo de bombeo y un sistema de módulos solares fotovoltaicos en función de las necesidades de cada estrategia, para los casos en los que se tienen varios sectores se han empleado variadores de velocidad.

Además, se ha demostrado el potencial que tienen las energías renovables en instalaciones agrarias y su viabilidad, debido a su bajo coste actual en la instalación, la gran versatilidad que nos proporciona el sistema, y la reducción de costes energéticos que conlleva el sistema tradicional.

Como se ha mencionado anteriormente, el estudio giraba entorno a distintas estrategias de riego, ha quedado demostrado que realizando una sectorización de la finca para su riego, reduciremos costes notablemente ya que reduciremos elementos de la instalación.

A continuación se detalla una tabla con los costes fijos para cada estrategia:

Estrategia 1			
CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Bomba SP 17-28	1	7 500 €	7 500 €
Estructura E1	1	3700 €	3 700 €
Luxor Eco-Line 60-270W	46	235 €	10 810 €
Cable interconexión módulos PV ZZ-F 4	86	3.85 €/m	331,1 €
TOTAL			22341,1€

Tabla 7.1 Costes fijos de la instalación de la estrategia 1

Estrategia 2			
CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Bomba SP 9-48	1	6 000 €	6 000 €
Estructura E2	1	2 000 €	2 000 €
Luxor Eco-Line 60-270W	30	235 €	7 050 €
Cable interconexión módulos PV ZZ-F 4	59	3.85 €/m	227,15 €
TOTAL			15277,15€

Tabla 7.2 Costes fijos de la instalación de la estrategia 2

Estrategia 3			
CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Bomba SP 7-42	1	6 000 €	6 000 €
Estructura E3	1	1 500 €	1 500 €
Luxor Eco-Line 60-270W	18	235 €	4 230 €
Cable interconexión módulos PV ZZ-F 4	35	3.85 €/m	134,75 €
TOTAL			11864,75€

Tabla 7.3 Costes fijos de la instalación de la estrategia 1

No se han considerado ni el coste del variador de velocidad, ni el coste del cableado de los tramos 1 y 2, ya que es el mismo para las tres estrategias.

Para el coste variable, es decir, el gasto energético, se ha analizado la radiación media recibida por cada módulo para cada mes de riego, y con ello se ha obtenido la producción mensual de energía de cada módulo solar. Como para cada estrategia, el número de módulos será distinto, se obtendrá la producción total mensual y anual para cada estrategia:

Producción mensual y anual de energía para cada estrategia					
	kWh/m2/día	kWh/m2/mes	ESTRATEGIA 1	ESTRATEGIA 2	ESTRATEGIA 3
Enero	3	93	4278,00	2790,00	1674,00
Febrero	3,87	108,36	4984,56	3250,80	1950,48
Marzo	4,45	137,95	6345,70	4138,50	2483,10
Abril	4,42	132,6	6099,60	3978,00	2386,80
Mayo	4,73	146,63	6744,98	4398,90	2639,34
Junio	5,14	154,2	7093,20	4626,00	2775,60
Julio	5,3	164,3	7557,80	4929,00	2957,40
Agosto	5,15	159,65	7343,90	4789,50	2873,70
Septiembre	4,63	138,9	6389,40	4167,00	2500,20
Octubre	4,06	125,86	5789,56	3775,80	2265,48
Noviembre	3,27	98,1	4512,60	2943,00	1765,80
Diciembre	2,96	91,76	4220,96	2752,80	1651,68
		Total Anual	71 360,26 kWh	46 539,30 kWh	27 923,58 kWh

Tabla 7.4 Producción de energía mensual y anual para cada estrategia

Por tanto, el consumo anual, considerando solamente los meses de riego, para cada estrategia:

Producción anual por estrategia (kWh)	
Estrategia 1	53 364,14
Estrategia 2	34 802,70
Estrategia 3	20 881,62

Tabla 7.5 Producción de energía meses de riego

En cuanto al coste de producción para cada estrategia, considerando un precio medio de 0.1€/kWh, el precio final de la energía para cada estrategia sería:

Precio medio de la energía (€)	
Estrategia 1	5 336,41
Estrategia 2	3 480,27
Estrategia 3	2 088,16

Tabla 7.6 Precio de la producción anual de energía

Tras el análisis de todos los resultados y analizando la viabilidad se puede concluir que la estrategia 2, en la que se consideraban 2 sectores es la más viable, a pesar que la estrategia 3 tiene un menor coste, a la hora de programar el riego nos encontramos que para el mes de mayor producción de energía (Julio), con 11 horas de irradiación aprovechables para la producción, con solamente 5,6 horas diarias de funcionamiento por sector, se tendrían cubiertas las necesidades hídricas de la planta, en cambio, para la estrategia 3, para el mismo mes de Julio, y las mismas horas de funcionamiento (11 horas), serían necesarias 5.6 horas por sector, por tanto en un día, el sistema no sería capaz de cubrir las necesidades hídricas que demanda la plantación, por lo que para cubrir las necesidades diarias habría que emplear un día y medio.

Desde el punto de vista económico, existe una diferencia de 3412,4 € entre la opción más barata (estrategia 3) y la elegida (estrategia 2), aunque a largo plazo repercutirá en el correcto funcionamiento y la mejora en la producción, ya que el sistema será capaz de suministrar la demanda hídrica en cada época del año.

En cuanto a términos energéticos, se conseguirá una total autonomía de la instalación, reduciendo costes y optimizando el empleo de la misma, se tendrá un consumo anual (considerando solamente los meses de riego) de 34 802,7 kWh.

8 REFERENCIAS

- [1] ORGÁZ ROSÚA, F., VILLALOBOS MARTÍN, F., TESTI, L., PASTOR MUÑOZ-COBO, M., HIDALGO MOYA, J.C., HIDALGO MOYA, J., FERERES CASTIEL, E., "Programación de riegos en plantaciones de olivar. Metodología para el cálculo de las necesidades de agua de riego en el olivar regado por goteo".
- [2] INSTITUTO ANDALUZ DE INVESTIGACIÓN Y FORMACIÓN AGRARIA Y PESQUERA DE LA JUNTA DE ANDALUCIA, "Programación del Riego y la Fertirrigación en Olivar".
- [3] RODRÍGUEZ DÍAZ, J.A., "Eficiencia Energética en el Regadío", Universidad de Córdoba (Enero de 2018).
- [4] INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE ENERGÍA (IDAE), "Protocolo de Auditoría Energética en Comunidades de Regantes".
- [5] SCHENZER, D., "Bombas para usos agropecuarios, curso de actualización profesional", Montevideo (Julio 1997).
- [6] JENSEN, M.E., "Design and operation of farm irrigation systems", (1983).
- [7] PÉREZ FRANCO, D., "Selección de bombas y tuberías para uso agrícola", Montevideo (1998).
- [8] BOMBAS IDEAL, "Datos técnicos de hidráulica de bombas".
- [9] GRUNDFOS, "Catálogo de bombas sumergibles, motores y accesorios"
- [10] ASETUB, "Guía técnica: Las tuberías plásticas en las obras hidráulicas"
- [11] ROSSMAN, L. "EPANET 2, Manual de usuario", traducción de la Universidad Politécnica de Valencia
- [12] INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE ENERGÍA (IDAE), "Pliego de condiciones técnicas de instalaciones aisladas de red"
- [13] SUNFIELDS EUROPE, "Manual de instalaciones fotovoltaicas autónomas"
- [14] OMROM, "Catálogo técnico de productos"
- [15] MINISTERIO DE FOMENTO, GOBIERNO DE ESPAÑA, "EAE, Instrucción de Acero Estructural", (2010)
- [16] SE-AE, "Documento básico: Seguridad Estructural. Acciones en la edificación", (Abril 2009).
- [17] UNE-EN 61215 relativa a módulos fotovoltaicos de silicio cristalino.
- [18] UNE 37-501, UNE 37- 508 y MV102 relativa a la estructura soporte de los paneles solares.

Páginas webs consultadas:

- [1] Instituto Geográfico Nacional: <http://ign.es/>
- [2] PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System): <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [3] Grundfos: <https://es.grundfos.com/>
- [4] Luxor: <http://luxorecoline.com/>

Softwares empleados:

- [1] AutoCAD 2017
- [2] ASETUB PVC 2.1
- [3] EPANET 2.0
- [4] gvSIG
- [5] Google Earth Pro
- [6] Microsoft Excel

ANEJO DE CÁLCULOS

1. OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE NIVEL

Como se ha mencionado en la memoria, las curvas de nivel se han obtenido mediante el software gvSIG a partir de los recursos de la base de datos del IGN, para ello se ha realizado una búsqueda por listado en función del municipio, para el caso de Navas de San Juan, se ha encontrado en hoja 906-885, el archivo necesario ha sido el modelo digital del terreno (MDT05) a partir del cual se han obtenido las curvas de nivel.



Figura 1 Web del centro de descargas del IGN

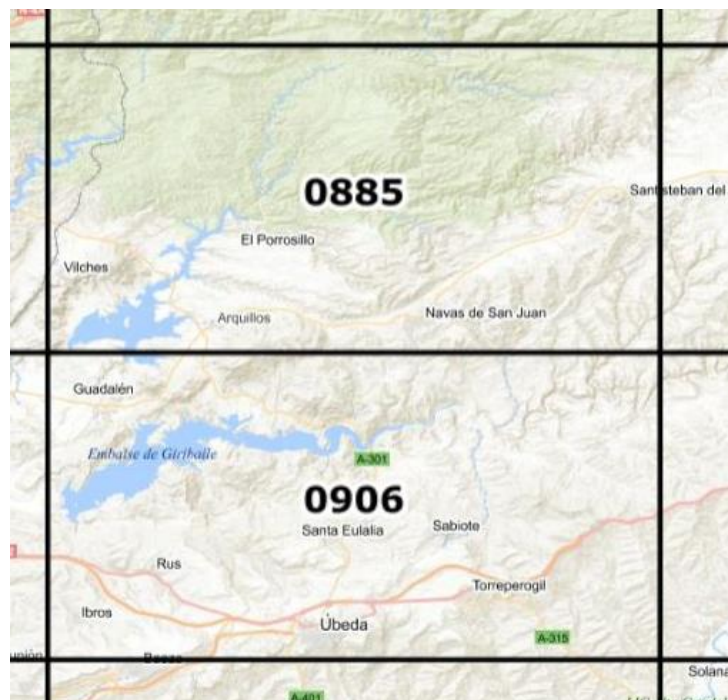


Figura 2 Hojas del mapa nacional en las que se encuentra la finca

Una vez obtenidos los archivos del centro de descargas del IGN, se ha recurrido al software gvSIG. Se ha añadido el archivo .asc.

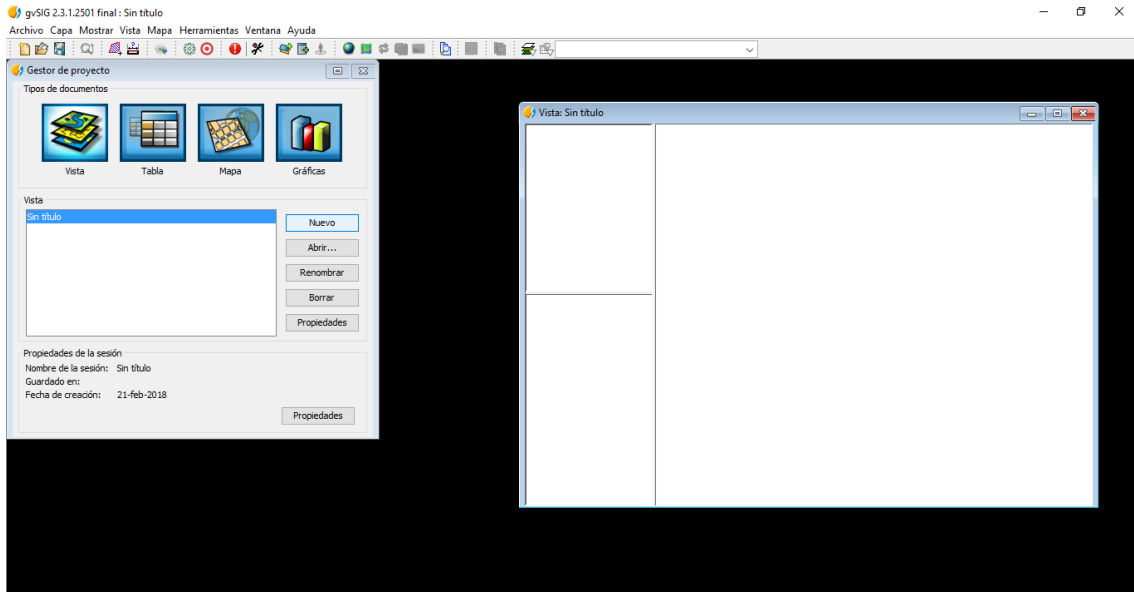


Figura 3 Pantalla principal del software gvSIG

Se han cargado todas las capas, y se ha seleccionado la equidistancia seleccionada para las curvas, en este caso 1 metro, se ha ejecutado, y tras la realización de las curvas de nivel se ha exportado el resultado a formato .dwg para realizar los planos necesarios mediante AutoCAD.

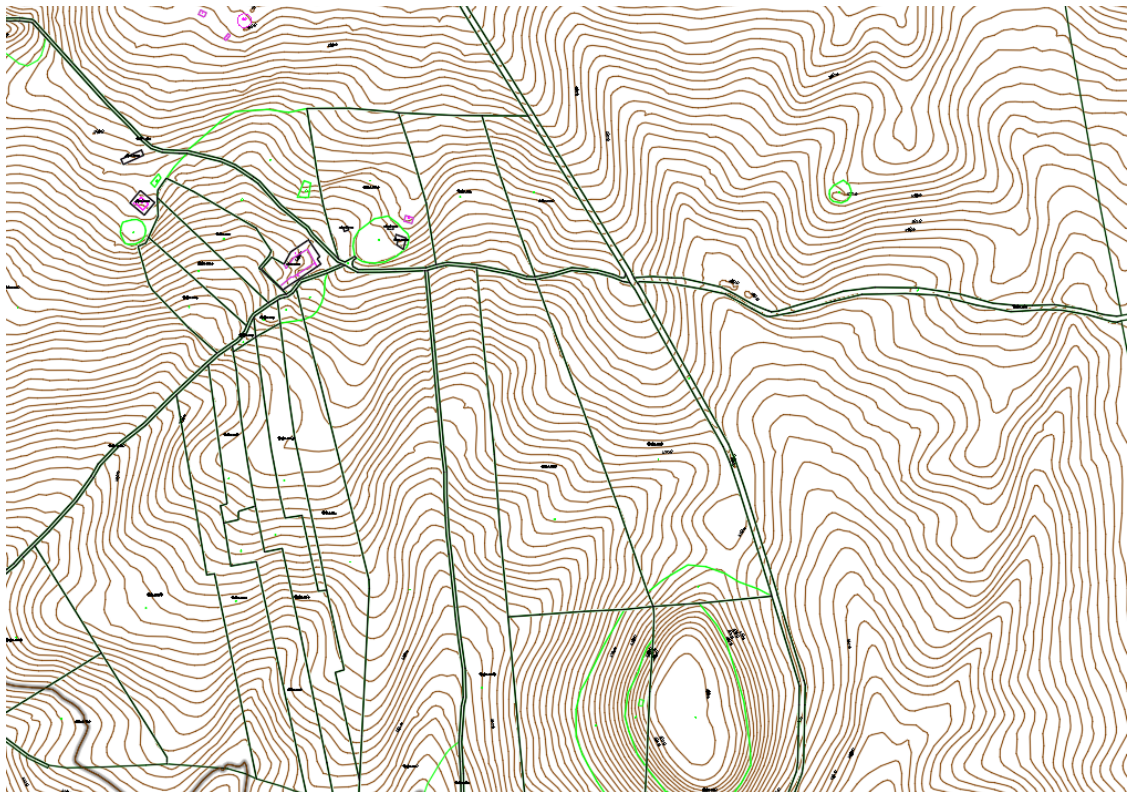


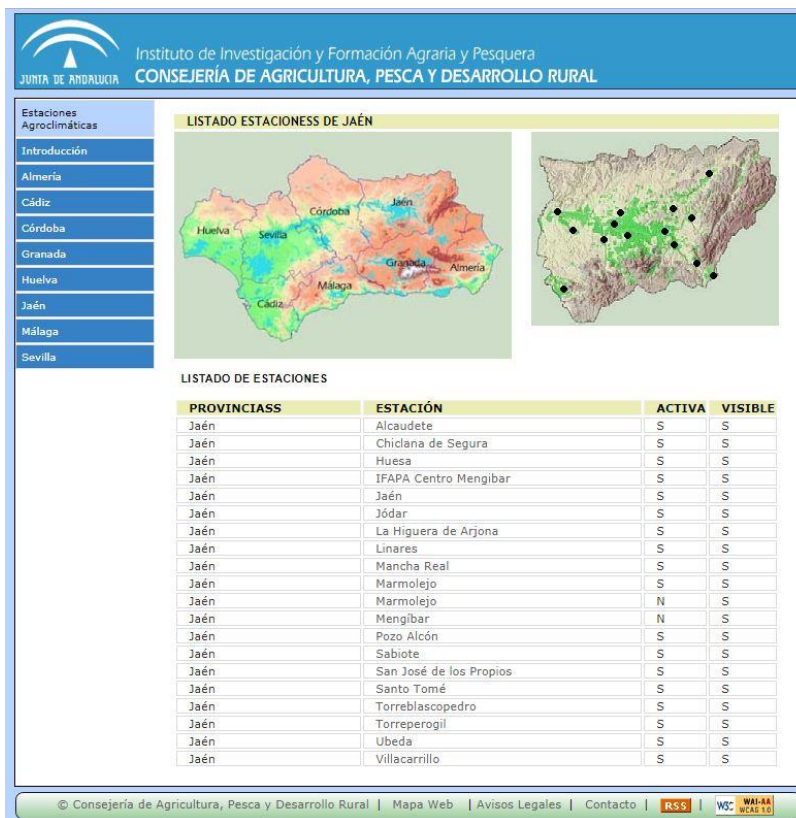
Figura 4 Curvas de nivel de la finca obtenidas mediante el software gvSIG

2. DATOS CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

Se encuentra, la comarca del Condado, en una zona donde predomina el tipo de clima Csa3, según la clasificación de Koeppen. Se trata de un clima Mediterráneo, como lo demuestra la sequía estival, con ciertos rasgos de continentalización lo que se traduce en una amplitud térmica relativamente elevada ya que el efecto suavizador del mar no le afecta provocando veranos e inviernos rigurosos. La época de lluvias presenta un máximo absoluto invernal y otro secundario en primavera junto a una severa sequía veraniega. Las temperaturas medias estacionales son suaves con una media anual de 16,6 grados C, una media estival de 25 grados C y de algo más de 8 grados C en invierno. La amplitud térmica mensual se sitúa en torno a los 15 grados C, lo que nos indica ese rasgo de continentalidad que define toda la cuenca alta y media del Guadalquivir. Por otra parte las medias estacionales mínimas se sitúan por encima de los 0 grados C lo que significa que las heladas no constituyen, por lo general, una limitación en el desarrollo agrícola de la zona.

A nivel de precipitaciones se incluye dentro del intervalo 400-800 mm. de precipitación anual, comportamiento similar al resto de la provincia. Por su configuración alargada de Norte a Sur y teniendo en cuenta que el límite Norte se introduce en Sierra Morena, se pueden diferenciar dos Microclimas dentro del término de Navas de San Juan que se diferencian principalmente por las temperaturas medias de los meses más cálidos, al norte oscila entre los 25°C. Y 28° C. Mientras que al Sur sus límites se establecen entre los 25 y los 30° C. El Norte se corresponde con un clima Mediterráneo Continental templado, que desde el punto de vista ecológico de cultivos se caracterizaría por un invierno tipo avena, fresco y un verano tipo arroz. Mientras que al Sur se localiza un clima Mediterráneo Subtropical con un invierno tipo avena cálido o fresco y un verano tipo algodón, más cálido. En cuanto a la potencialidad agro climática de la zona Norte queda comprendida entre los valores 10 y 20 del índice C. A. De L. Turc en secano y 45-55 en regadío, equivalentes a unas 6-12 Tm de M.S./Ha y año, en secano y de 27-33 en regadío. La zona Sur está comprendida entre 10-20 del índice en secano y los valores 45-60 en regadío, equivalentes a unas 6-12 Tm de M.S./Ha y año en secano y de 27-34 en regadío. En el diagrama bioclimático correspondiente a la estación de Navas de San Juan se refleja que la actividad vegetativa se ve interrumpida por una etapa de paralización ocasionada por la sequía estival durante los meses de julio y agosto y por una etapa de paralización ocasionada por el frío durante el mes de diciembre, aunque de menor entidad. La etapa de sequía se compensa en el mes de octubre con las precipitaciones de la estación de otoño. El viento de la comarca muestra una marcada tendencia del Sudoeste. Estos se dan principalmente en los meses de verano, en los que el 80% de los días sopla de esa dirección. Los vientos de componente Norte y Nordeste se corresponden con los meses finales del invierno. El régimen de vientos tiene influencia en la humedad y temperatura de la comarca, pues transportan las masas nubosas procedentes del golfo de Cádiz.

Para la obtención de los datos climáticos de la zona, se ha recurrido el registro histórico de la red de estaciones agroclimáticas de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta Andalucía. Como referencia y por su proximidad se han tomado los datos de la estación de Sabiote, con coordenadas 38° 04' 46" N, 03° 14' 07" W, situada a 8.4km de la finca a estudiar.



LISTADO ESTACIONES DE JAÉN

PROVINCIA	ESTACIÓN	ACTIVA	VISIBLE
Jaén	Alcaudete	S	S
Jaén	Chiclana de Segura	S	S
Jaén	Huesa	S	S
Jaén	IFAPA Centro Mengibar	S	S
Jaén	Jaén	S	S
Jaén	Jódar	S	S
Jaén	La Higuera de Arjona	S	S
Jaén	Linares	S	S
Jaén	Mancha Real	S	S
Jaén	Marmolejo	S	S
Jaén	Marmolejo	N	S
Jaén	Mengibar	N	S
Jaén	Pozo Alcón	S	S
Jaén	Sabiote	S	S
Jaén	San José de los Propios	S	S
Jaén	Santo Tomé	S	S
Jaén	Torreblascopedro	S	S
Jaén	Torreperogil	S	S
Jaén	Ubeda	S	S
Jaén	Villacarrillo	S	S

Figura 5 Listado de la web de la Red de Estaciones Agroclimáticas de Andalucía de la RIA en la provincia de Jaén



DATOS ESTACIONES
Estación Meteorológica de Sabiote

Provincia: Jaén
Código de Estación: 4
Zona Regable: --

Coordenadas UTM

X: 479346.0
Y: 4214660.0
Latitud: 38° 04' 46" N
Longitud: 03° 14' 07" W
Altitud: 822.0

Más Información

- Últimos Datos Registrados
- Datos Históricos

Figura 6 Web de Estación Agroclimáticas de Sabiote

Se han obtenido datos medios para cada mes desde el año 2001, obteniendo así los datos medios de los últimos 17 años, para facilitar el procesamiento de los datos se ha realizado mediante una hoja de cálculo Excel. Finalmente, los datos se recogen en la siguiente tabla:

	Precipitaciones ()	Evapotranspiración
ENERO	38.8	1.3
FEBRERO	45.9	1.7
MARZO	55.9	2.8
ABRIL	54.3	3.9
MAYO	39.6	5.3
JUNIO	8.8	7.1
JULIO	0.9	7.6
AGOSTO	8.1	7.0
SEPTIEMBRE	29.6	4.8
OCTUBRE	52.4	3.0
NOVIEMBRE	59.8	1.6
DICIEMBRE	53.2	1.1

Tabla 1 Datos climáticos medios obtenidos a partir de registro histórico

Como se puede observar en la tabla de datos y en el gráfico obtenido a partir de ellos, la evapotranspiración del terreno será mayor los meses de verano debido a la falta de lluvias y las temperaturas más altas, es por ello que en estos meses se necesita suplementar el agua del suelo con un riego, para aumentar la reserva de agua.

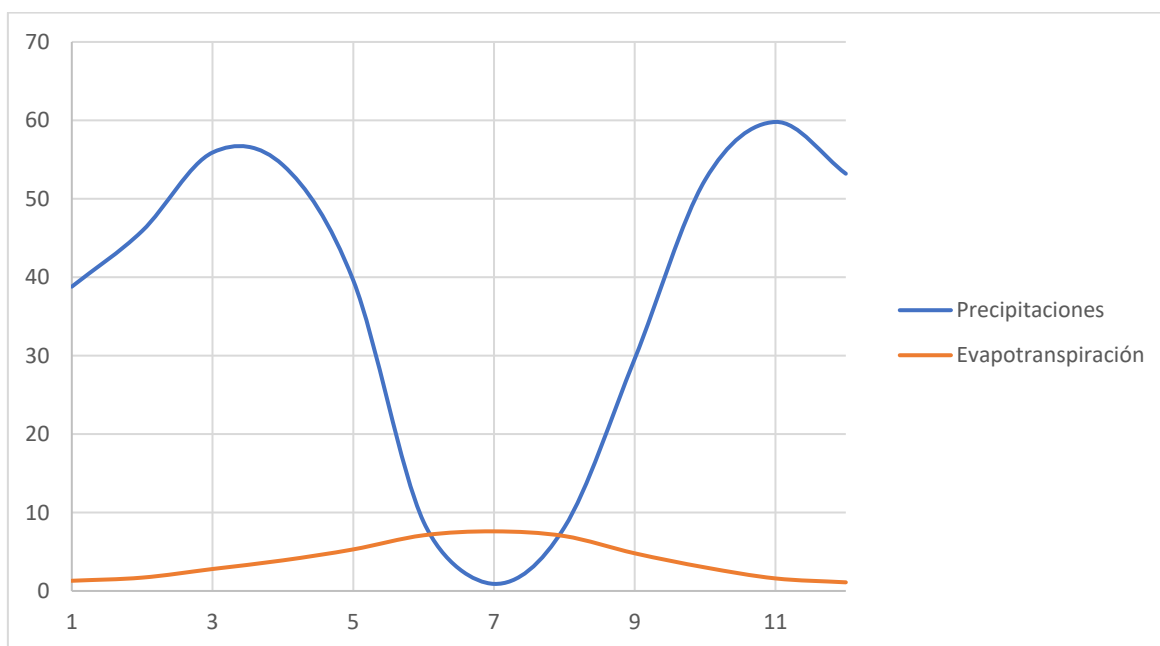


Figura 7 Gráfico comparativo mensual de las precipitaciones y la evapotranspiración

3. INFORME DE LA ENERGÍA SOLAR DISPONIBLE

El informe de datos medios mensuales de radiación y energía solar disponible se ha obtenido mediante la web de PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) del "Institute for Environment and Sustainability Renewable Energies" del Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, para la ubicación de la finca a estudio.

The screenshot shows the PVGIS web interface. At the top, there are logos for JRC and CM SAF, and the title "Sistema de Información geográfica fotovoltaica - mapa interactivo". Below the header, there is a search bar with the text "Por ejemplo, 'Ispra, Italy' '45.256N, 16.9589E'" and a "Buscar" button. The current position is 38.152, -3.258. The map shows a satellite view of a rural area with a red pin on a location. The settings panel on the right has the following sections:

- Datos irradiación global mensual**
 - Base de datos de radiación: Climate-SAF PVGIS
 - Irradiación horizontal
 - Irradiación con el ángulo óptimo
 - Irradiación directa normal
 - Irradiación sobre el ángulo seleccionado: 90 grados
 - Turbidez de Linke
 - Radiación dif./global
 - Ángulo de inclinación óptimo
- Datos de temperatura ambiente mensual**
 - Temperatura media del día
 - Media diaria de temperatura
 - Número de grados día de calefacción
- Formatos de salida**
 - Mostrar gráficas
 - Mostrar el horizonte
 - Página web
 - Fichero de texto
 - PDF

At the bottom of the settings panel, there is a "Calcular" button and a "[ayuda]" link.

Figura 8 Pantalla inicial de PVGIS para la obtención de los datos de radiación en la finca a estudio

El informe obtenido ha sido el siguiente:

Irradiación global en el emplazamiento seleccionado

Lugar: 38°8'58" Norte, 3°15'31" Oeste, Elevación: 472 m.s.n.m,

El ángulo de inclinación óptimo es: 34 grados

Irradiación anual perdida a causa de las sombras (horizontal): 0.1 %

Mes	Hh	Hopt	H(90)	lopt	TD	T24h	NDD
Ene	2310	3800	3760	62	9.7	7.8	290
Feb	3350	4940	4370	55	10.0	8.0	213
Mar	4770	5890	4230	41	13.8	11.6	125
Abr	5580	5960	3240	25	17.6	15.7	77
Mayo	6790	6510	2660	13	21.9	20.0	4
Jun	7940	7200	2340	5	26.5	24.7	0
Jul	8150	7570	2560	8	30.9	29.1	0
Ago	7130	7350	3390	21	30.7	28.9	0
Sep	5390	6420	4150	36	25.5	23.5	11
Oct	3990	5480	4500	50	20.8	18.4	77
Nov	2650	4230	4070	60	14.2	12.0	263
Dic	2160	3760	3890	64	11.0	8.8	291
Año	5030	5760	3590	34	19.4	17.4	1351

Hh: Irradiación sobre plano horizontal (Wh/m2/día)

Hopt: Irradiación sobre un plano con la inclinación óptima (Wh/m2/día)

H(90): Irradiación sobre plano inclinado:90grados (Wh/m2/día)

lopt: Inclinación óptima (grados)

TD: Temperatura media del día (°C)

T24h: Temperatura media diaria (24h) (°C)

NDD: Número de grados día de calefacción (-)

Rendimiento del sistema FV conectado a red

PVGIS estimación de la producción de electricidad solar

Lugar: 38°8'58" Norte, 3°15'31" Oeste, Elevación: 472 m.s.n.m,

Base de datos de radiación solar empleada: PVGIS-CMSAF

Potencia nominal del sistema FV: 1.0 kW (silicio cristalino)

Pérdidas estimadas debido a la temperatura y niveles bajos de irradiancia: 11.7% (utilizando la temperatura ambiente)

Pérdidas estimadas debido a los efectos de la reflectancia angular: 2.6%

Otras pérdidas (cables, inversor, etc.): 14.0%

Pérdidas combinadas del sistema FV: 26.0%

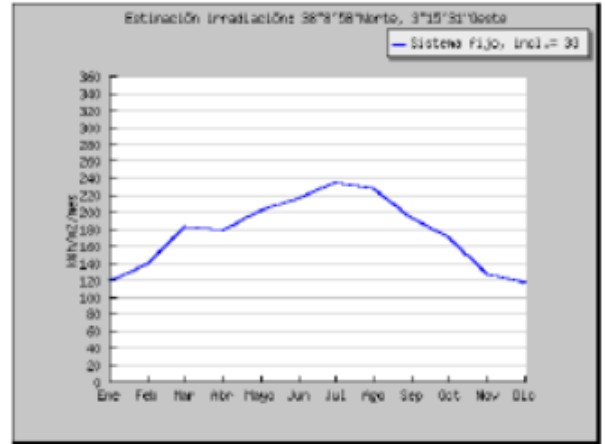
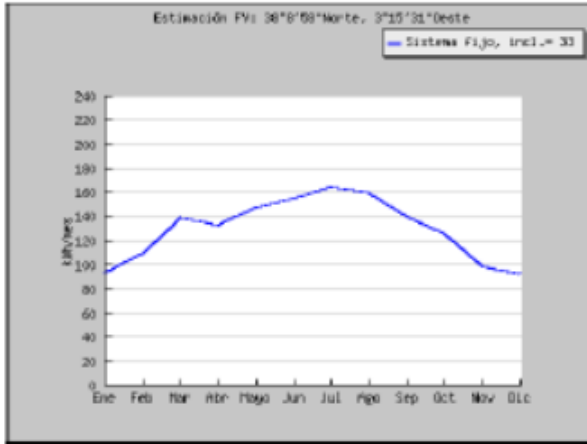
Sistema fijo: inclinación=34 grados, orientación=0 grados (Óptimo a la orientación dada)				
Mes	Ed	Em	Hd	Hm
Ene	3.00	93.0	3.80	118
Feb	3.87	108	4.94	138
Mar	4.45	138	5.89	183
Abr	4.42	133	5.96	179
Mayo	4.73	147	6.51	202
Jun	5.14	154	7.20	216
Jul	5.30	164	7.57	235
Ago	5.15	160	7.35	228
Sep	4.63	139	6.42	193
Oct	4.06	126	5.48	170
Nov	3.27	98.2	4.23	127
Dic	2.96	91.8	3.76	117
Año	4.25	129	5.76	175
Total para el año		1550		2100

Ed: Producción de electricidad media diaria por el sistema dado (kWh)

Em: Producción de electricidad media mensual por el sistema dado (kWh)

Hd: Media diaria de la irradiancia global recibida por metro cuadrado por los módulos del sistema dado (kWh/m2)

Hm: Suma media de la irradiancia global por metro cuadrado recibida por los módulos del sistema dado (kWh/m2)



Producción mensual de energía de un sistema FV con ángulo fijo Irradiación mensual sobre un plano con ángulo fijo

Por tanto, Por tanto, la irradiación solar media diaria sobre el plano óptimo obtenida para cada mes que se va a considerar para los siguientes cálculos:

Mes	Hd (kWh/m ² /día)
ENE	3.80
FEB	4.94
MAR	5.89
ABR	5.96
MAY	6.51
JUN	7.20
JUL	7.57
AGO	7.35
SEP	6.42
OCT	5.48
NOV	4.23
DIC	3.76

Tabla 2 Irradiación solar media diaria sobre el plano óptimo

4. COMPOSICIÓN DEL SUELO

Como se ha visto en las páginas anteriores, debido a la situación geográfica del terreno el suelo presenta una textura franco-arenosa, a continuación, se presenta una tabla resumen con las propiedades del suelo.

PROPIEDADES DEL SUELO FRANCO-ARENOSO	
% Arena	40-90
% Limo	5-40
%Arcilla	5-20
LFA (%)	45
PMP (cm^3/cm^3)	0.09
PMP (%)	12.14
CC(cm^3/cm^3)	0.21
CC (%)	24.22
Da (g/cm^3)	1.47
z (mm)	1000
Reserva (mm)	133

Tabla 3 Tabla resumen de las propiedades del suelo franco-arenoso

donde:

- **LFA** es el porcentaje en peso de partículas de limo fino + arcilla con tamaño inferior a 0.02mm.
- **PMP** es el punto de marchitez permanente, contenido de agua en el suelo para el que se produce marchitez irreversible en el cultivo, y por tanto, por debajo de este no puede extraer más agua.
- **CC** es la capacidad de campo, contenido de agua en el que se estabiliza un suelo cuando cesa el drenaje libre tras ser saturado.
- **Da** es la densidad aparente.
- **z** es la profundidad.
- **Reserva** es la cantidad máxima de agua que puede contener el suelo.

5. SIMULACIÓN DE LA RED DE RIEGO

Se ha realizado mediante el software anteriormente descrito una simulación de la instalación existente en la finca con los 7 hidrantes, para el diseño se ha tenido en cuenta la cota de cada punto, las pérdidas de carga unitarias, y la demanda de agua de cada hidrante en función de cada estrategia. La red diseñada ha sido la siguiente:



Figura 9 Modelo para simulación de la instalación en EPANETv2 sobre imagen área de la finca

Las características generales de la red de riego son las siguientes:

- Longitud y diámetro de las conducciones

Tramo	L (m)	Dn (mm)
Pozo-1	110	36.4
Pozo-2	110	70.6
2-3	150	70.6
3-4	110	70.6
4-5	90	59.2
5-6	100	46.4
6-7	160	36.4

Tabla 4 Dimensiones de la red de tuberías existentes

➤ Cota y caudal de cada hidrante

El caudal será el caudal de cálculo que dependerá del número de olivos que tenga que suministrar cada hidrante.

$$Q_{\text{cálculo}} = n^{\circ} \text{olivos} \cdot 2 \cdot Q_{\text{unitario gotero}} \cdot 1.15$$

Por tanto, todos los datos se recogen en la siguiente tabla:

Hidrante	Nº Olivos	Q (l/s)	Cota (m)
1	90	0.46	478
2	119	0.61	475
3	135	0.69	479
4	135	0.69	485
5	170	0.87	488
6	110	0.56	493
7	136	0.69	501

Tabla 5 Tabla resumen de las propiedades de cada hidrante

Una vez configurada toda la simulación en el software EPANET, solamente se ha tenido que modificar la demanda de cada hidrante y la curva de la bomba, por tanto, se simulará para cada estrategia.

- **Estrategia 1**

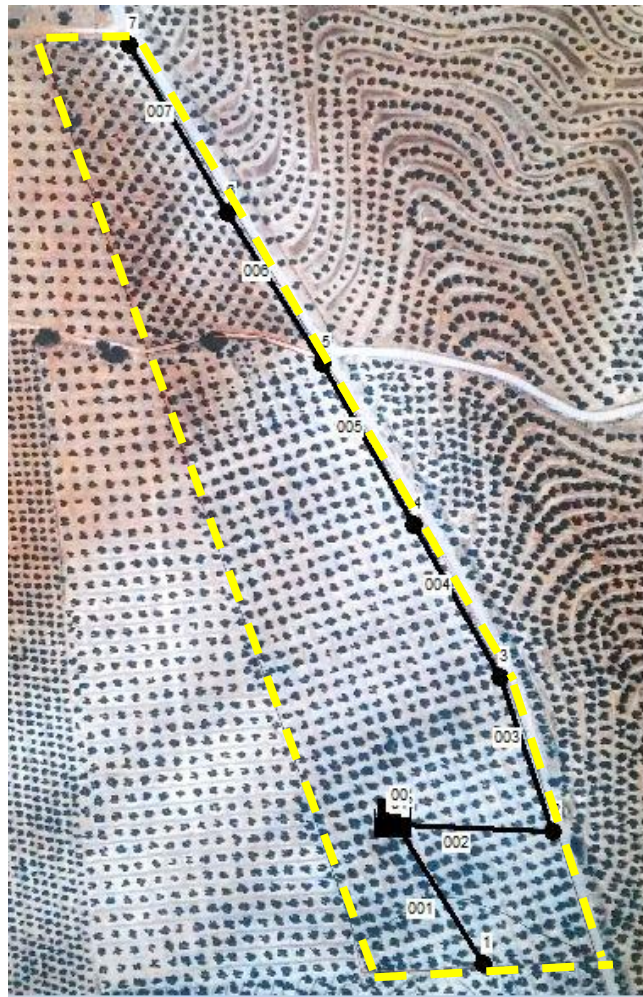


Figura 10 Modelo para simulación de la instalación en EPANETv2 de la estrategia 1

En el primer caso todos los hidrantes suministrarán a la vez, ya que se considera un solo sector, por tanto, el caudal total que deberá suministrar la bomba será la suma de todos ellos:

$$Q_{total} = 0.46 + 0.61 + 0.69 + 0.69 + 0.87 + 0.56 + 0.69 = 4.57 \text{ l/s} \quad [1]$$

Para la obtención de la altura que deberá suministrar la bomba, se realizará el balance de energía entre el punto 00 y el punto 7:

$$H = (z_7 - z_{00}) + \frac{P_7}{\gamma} + \sum H_{R\ 00-7} \quad [9]$$

$$H = (164 + 28) + 20 + 10 + 13.62 = 235.62 \text{ m} \quad [10]$$

Por tanto, la curva de la bomba será:

$$H = 313.33 - 3.751 \cdot Q^2 \quad [11]$$

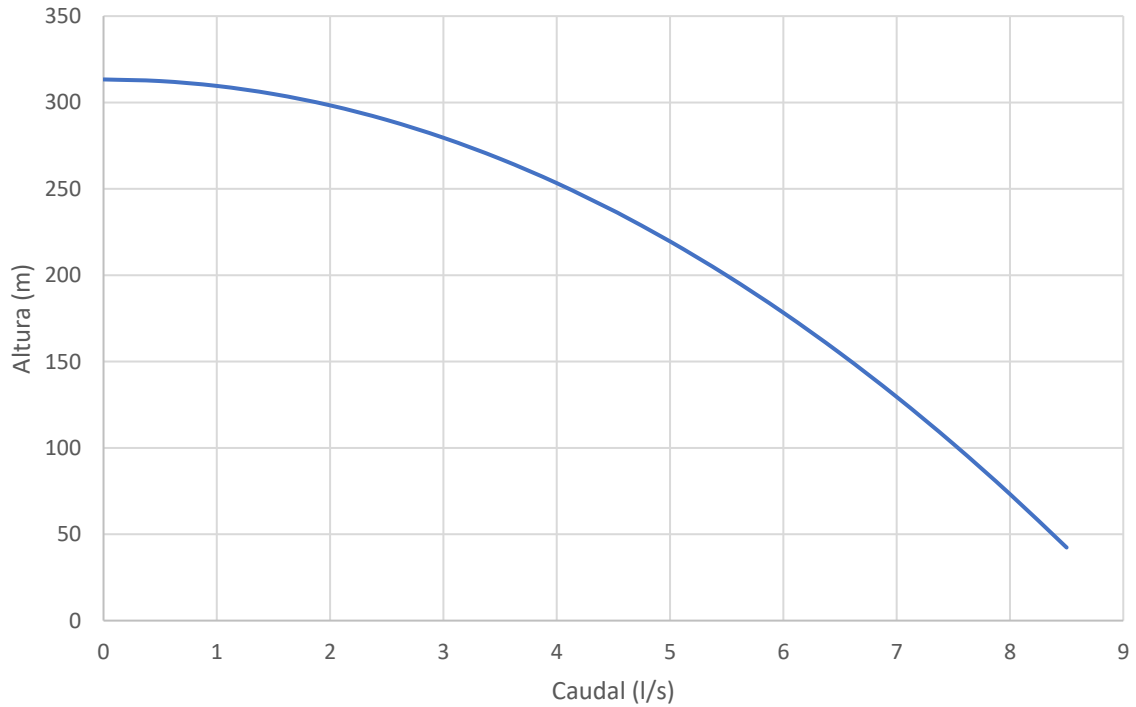


Figura 11 Curva teórica de la bomba para la estrategia 1

Tras ejecutar la simulación, los datos obtenidos han sido los siguientes:

ID Nudo	Cota m	Demanda LPS	Altura m	Presión m
Conexión 02	473	0.00	543.82	70.82
Conexión 1	478	0.46	542.99	64.99
Conexión 2	475	0.61	542.13	67.13
Conexión 3	479	0.69	540.40	61.40
Conexión 5	488	0.87	538.56	50.56
Conexión 4	485	0.69	539.55	54.55
Conexión 7	501	0.69	534.69	33.69
Conexión 6	493	0.56	537.17	44.17
Conexión 01	473	0.00	543.89	70.89
Embalse 00	309	-4.57	309.00	0.00

Figura 12 Datos obtenidos de los hidrantes tras la simulación de la estrategia 1

ID Línea	Longitud m	Diámetro mm	Rugosidad mm	Caudal LPS	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km	Factor de Fricción
Tubería 001	110	36.4	0.0015	0.46	0.44	7.53	0.028
Tubería 002	110	70.6	0.0015	4.11	1.05	15.32	0.019
Tubería 003	150	70.6	0.0015	3.50	0.90	11.51	0.020
Tubería 004	110	70.6	0.0015	2.82	0.72	7.79	0.021
Tubería 005	90	59.2	0.0015	2.13	0.77	10.97	0.021
Tubería 006	100	46.4	0.0015	1.26	0.74	13.86	0.023
Tubería 007	160	36.4	0.0015	0.69	0.67	15.51	0.025
Tubería 000	4	70.6	0.0015	4.57	1.17	18.52	0.019
Bomba 1	No Disponible	No Disponible	No Disponible	4.57	0.00	-234.89	0.000

Figura 13 Datos obtenidos de las tuberías tras la simulación de la estrategia 1

○ **Estrategia 2**

Sector 1

Sector 2

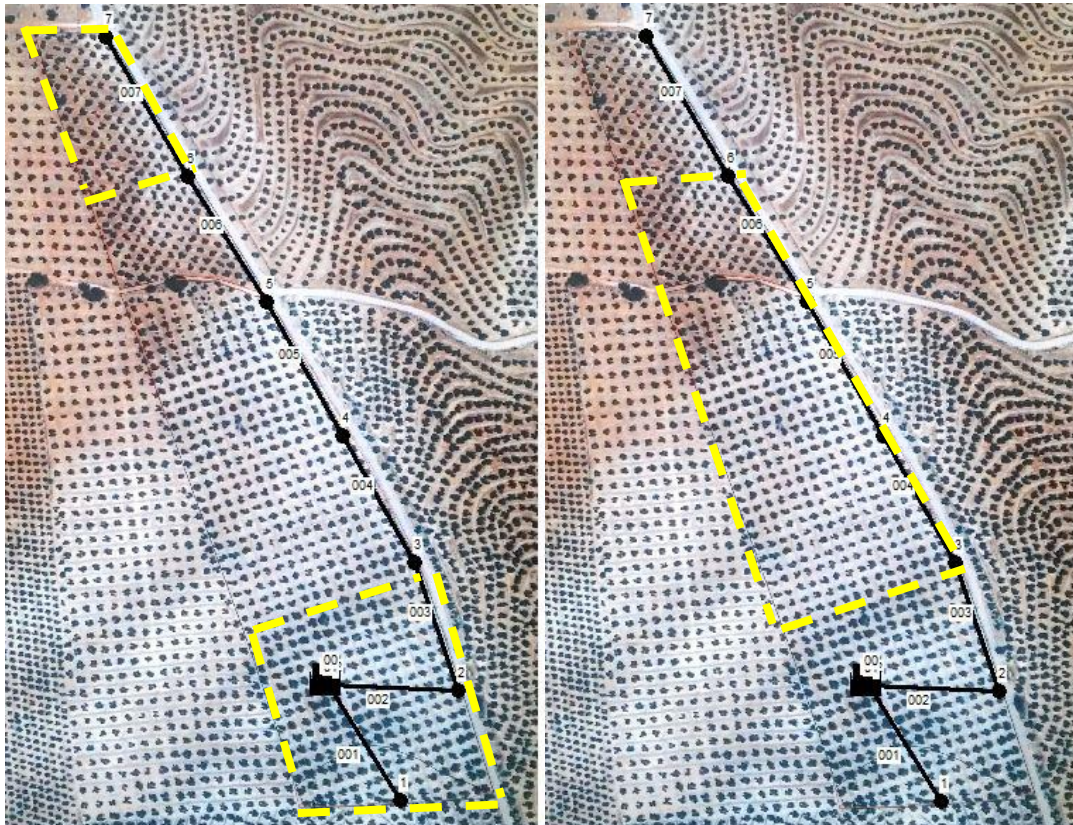


Figura 14 Modelos para simulación de la instalación en EPANETv2 de la estrategia 2

En este caso se establecen dos sectores, en el sector 1 estarán en funcionamiento los hidrantes 7, 1 y 2, mientras que en sector 2, los restantes 6, 5, 4 y 3. Por tanto habrá que calcular para cada sector el caudal y la altura para determinar las curvas de la bomba.

$$Q_{\text{sector 1}} = 0.69 + 0.46 + 0.61 = 1.76 \text{ l/s} \quad [12]$$

$$Q_{\text{sector 2}} = 0.87 + 0.56 + 0.69 + 0.69 = 2.81 \text{ l/s} \quad [13]$$

Para la obtención de las alturas, al igual que antes, mediante un balance de energía:

$$H_1 = (z_7 - z_{00}) + \frac{P_7}{\gamma} + \sum H_{R_{00-7}} \quad [14]$$

$$H_1 = (164 + 28) + 20 + 10 + 13.62 = 235.62 \text{ m} \quad [15]$$

$$H_2 = (z_6 - z_{00}) + \frac{P_6}{\gamma} + \sum H_{R_{00-6}} \quad [16]$$

$$H_2 = (493 - 473) + 164 + 20 + 10 + 9.46 = 223.46 \text{ m} \quad [17]$$

Por tanto, las curvas de la bomba serán, para distintas velocidades:

$$H = 314.16 - 17.48 \cdot Q^2 \quad [18]$$

$$H = 288.56 - 11.77 \cdot Q^2 \quad [19]$$

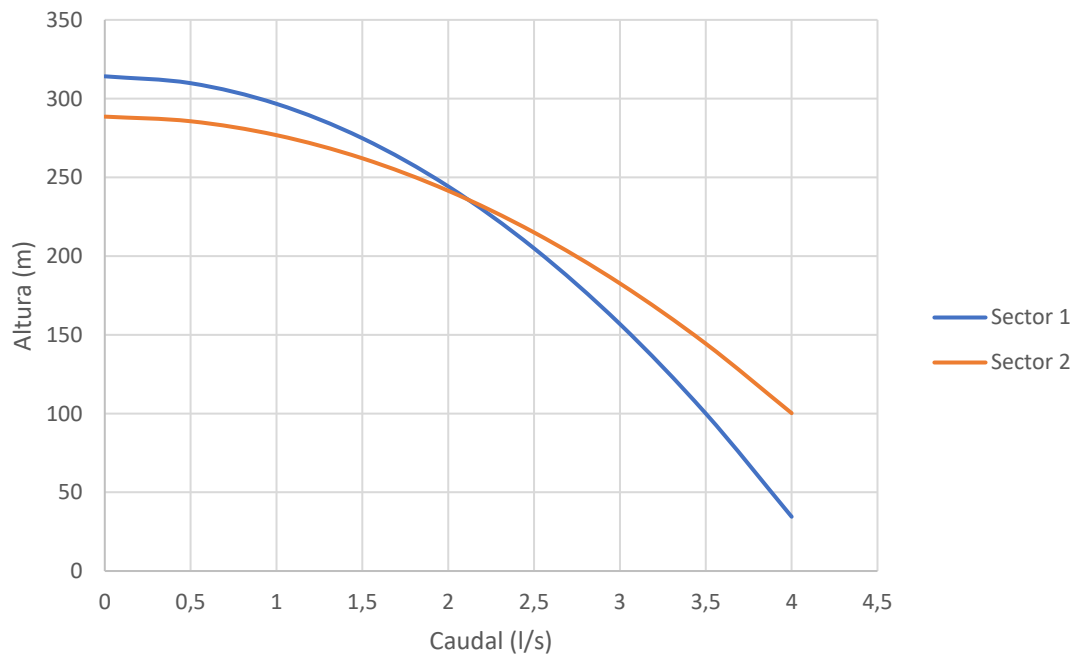


Figura 15 Curvas teóricas de la bomba para la estrategia 2

Tras ejecutar la simulación para cada uno de los sectores, los datos obtenidos han sido los siguientes:

→ Para el sector 1:

ID Nudo	Cota m	Demanda LPS	Altura m	Presión m
Conexión 02	473	0.00	544.16	71.16
Conexión 1	478	0.46	543.33	65.33
Conexión 2	475	0.61	543.94	68.94
Conexión 3	479	0.00	543.84	64.84
Conexión 5	488	0.00	543.63	55.63
Conexión 4	485	0.00	543.77	58.77
Conexión 7	501	0.69	540.66	39.66
Conexión 6	493	0.00	543.14	50.14
Conexión 01	473	0.00	544.17	71.17
Embalse 00	309	-1.76	309.00	0.00

Figura 16 Datos obtenidos de los hidrantes tras la simulación del sector 1 de la estrategia 2

ID Línea	Longitud m	Diámetro mm	Rugosidad mm	Caudal LPS	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km	Factor de Fricción
Tubería 001	110	36.4	0.0015	0.46	0.44	7.53	0.028
Tubería 002	110	70.6	0.0015	1.31	0.33	2.00	0.025
Tubería 003	150	70.6	0.0015	0.69	0.18	0.67	0.029
Tubería 004	110	70.6	0.0015	0.69	0.18	0.67	0.029
Tubería 005	90	59.2	0.0015	0.69	0.25	1.54	0.028
Tubería 006	100	46.4	0.0015	0.69	0.41	4.89	0.026
Tubería 007	160	36.4	0.0015	0.69	0.67	15.51	0.025
Tubería 000	4	70.6	0.0015	1.76	0.45	3.40	0.023
Bomba 1	No Disponible	No Disponible	No Disponible	1.76	0.00	-235.17	0.000

Figura 17 Datos obtenidos de las tuberías tras la simulación del sector 1 de la estrategia 2

→ Para el sector 2:

ID Nudo	Cota m	Demanda LPS	Altura m	Presión m
Conexión 02	473	0.00	531.53	58.53
Conexión 1	478	0.00	531.53	53.53
Conexión 2	475	0.00	530.68	55.68
Conexión 3	479	0.69	529.51	50.51
Conexión 5	488	0.87	528.51	40.51
Conexión 4	485	0.69	529.00	44.00
Conexión 7	501	0.00	528.17	27.17
Conexión 6	493	0.56	528.17	35.17
Conexión 01	473	0.00	531.56	58.56
Embalse 00	309	-2.81	309.00	0.00

Figura 18 Datos obtenidos de los hidrantes tras la simulación del sector 2 de la estrategia 2

ID Línea	Longitud m	Diámetro mm	Rugosidad mm	Caudal LPS	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km	Factor de Fricción
Tubería 001	110	36.4	0.0015	0.00	0.00	0.00	0.000
Tubería 002	110	70.6	0.0015	2.81	0.72	7.77	0.021
Tubería 003	150	70.6	0.0015	2.81	0.72	7.77	0.021
Tubería 004	110	70.6	0.0015	2.12	0.54	4.71	0.022
Tubería 005	90	59.2	0.0015	1.43	0.52	5.44	0.023
Tubería 006	100	46.4	0.0015	0.56	0.33	3.35	0.028
Tubería 007	160	36.4	0.0015	0.00	0.00	0.00	0.000
Tubería 000	4	70.6	0.0015	2.81	0.72	7.77	0.021
Bomba 1	No Disponible	No Disponible	No Disponible	2.81	0.00	-222.56	0.000

Figura 19 Datos obtenidos de las tuberías tras la simulación del sector 2 de la estrategia 2

○ **Estrategia 3**

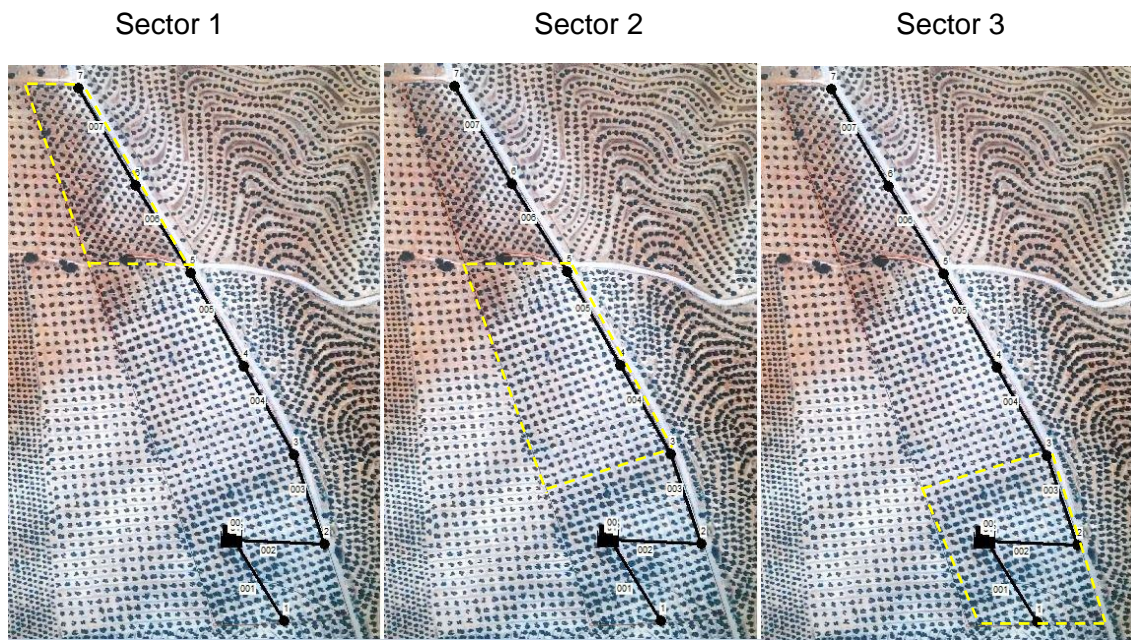


Figura 20 Modelos para simulación de la instalación en EPANETv2 de la estrategia 3

Finalmente, en el tercer caso se establecen tres sectores, en el sector 1 estarán en funcionamiento los hidrantes 7 y 6, en el sector 2, los hidrantes 5 y 4 y finalmente en el sector 3, los hidrantes 1, 2 y 3. Se calcula el caudal y la altura para cada sector.

$$Q_{sector\ 1} = 0.56 + 0.69 = 1.26\ l/s \quad [20]$$

$$Q_{sector\ 2} = 0.87 + 0.69 = 1.56\ l/s \quad [21]$$

$$Q_{sector\ 3} = 0.46 + 0.61 + 0.69 = 1.76\ l/s \quad [22]$$

Para la obtención de las alturas, al igual que antes, mediante un balance de energía entre el punto 00 y el punto 7:

$$H_1 = (z_7 - z_{00}) + \frac{P_7}{\gamma} + \sum H_{R\ 00-7} \quad [23]$$

$$H_1 = (164 + 28) + 20 + 10 + 13.62 = 235.62\ m \quad [24]$$

$$H_2 = (z_5 - z_{00}) + \frac{P_5}{\gamma} + \sum H_{R\ 00-5} \quad [25]$$

$$H_2 = (488 - 473) + 164 + 20 + 10 + 7.36 = 216.36\ m \quad [26]$$

$$H_3 = (z_3 - z_{00}) + \frac{P_3}{\gamma} + \sum H_{R\ 00-3} \quad [27]$$

$$H_3 = (479 - 473) + 164 + 20 + 10 + 6.14 = 206.14\ m \quad [28]$$

Por tanto, las curvas de la bomba serán, para distintas velocidades:

$$H_1 = 314.16 - 49.47 \cdot Q^2 \quad [29]$$

$$H_2 = 288.48 - 29.71 \cdot Q^2 \quad [30]$$

$$H_3 = 274.85 - 22.18 \cdot Q^2 \quad [31]$$

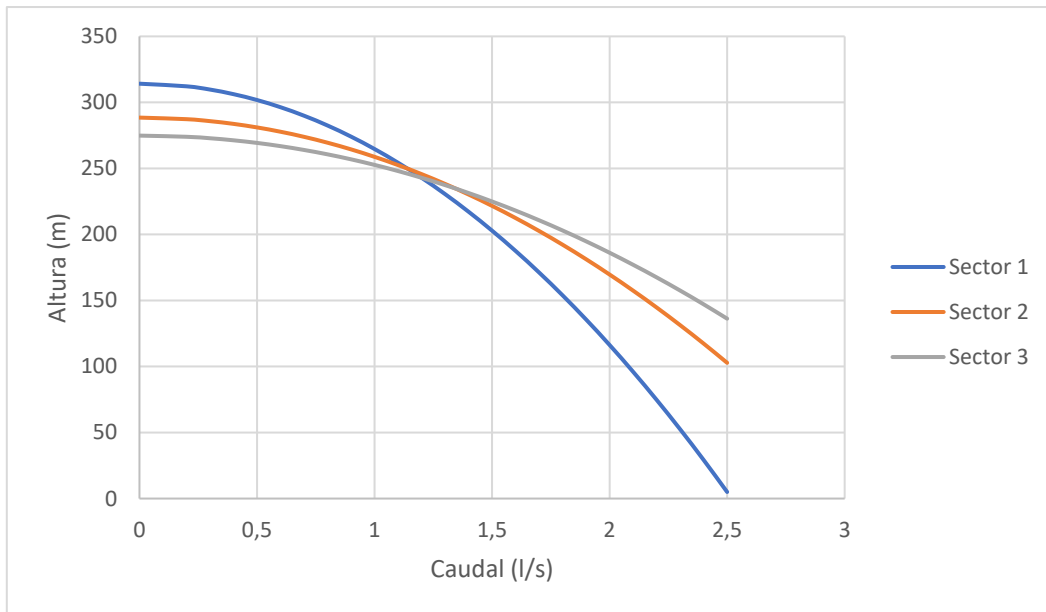


Figura 21 Curvas teóricas de la bomba para la estrategia 3

Tras ejecutar la simulación para cada uno de los sectores, los datos obtenidos han sido los siguientes:

→ Para el sector 1:

ID Nudo	Cota m	Demanda LPS	Altura m	Presión m
Conexión 02	473	0.00	544.97	71.97
Conexión 1	478	0.00	544.97	66.97
Conexión 2	475	0.00	544.77	69.77
Conexión 3	479	0.00	544.49	65.49
Conexión 5	488	0.00	543.89	55.89
Conexión 4	485	0.00	544.28	59.28
Conexión 7	501	0.69	540.02	39.02
Conexión 6	493	0.56	542.50	49.50
Conexión 01	473	0.00	544.98	71.98
Embalse 00	309	-1.26	309.00	0.00

Figura 22 Datos obtenidos de los hidrantes tras la simulación del sector 1 de la estrategia 3

ID Línea	Longitud m	Diámetro mm	Rugosidad mm	Caudal LPS	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km	Factor de Fricción
Tubería 001	110	36.4	0.0015	0.00	0.00	0.00	0.000
Tubería 002	110	70.6	0.0015	1.26	0.32	1.88	0.025
Tubería 003	150	70.6	0.0015	1.26	0.32	1.88	0.025
Tubería 004	110	70.6	0.0015	1.26	0.32	1.88	0.025
Tubería 005	90	59.2	0.0015	1.26	0.46	4.34	0.024
Tubería 006	100	46.4	0.0015	1.26	0.74	13.85	0.023
Tubería 007	160	36.4	0.0015	0.69	0.67	15.51	0.025
Tubería 000	4	70.6	0.0015	1.26	0.32	1.88	0.025
Bomba 1	No Disponible	No Disponible	No Disponible	1.26	0.00	-235.98	0.000

Figura 23 Datos obtenidos de las tuberías tras la simulación del sector 1 de la estrategia 3

→ Para el sector 2:

ID Nudo	Cota m	Demanda LPS	Altura m	Presión m
Conexión 02	473	0.00	525.33	52.33
Conexión 1	478	0.00	525.33	47.33
Conexión 2	475	0.00	525.03	50.03
Conexión 3	479	0.00	524.62	45.62
Conexión 5	488	0.87	524.12	36.12
Conexión 4	485	0.69	524.32	39.32
Conexión 7	501	0.00	524.12	23.12
Conexión 6	493	0.00	524.12	31.12
Conexión 01	473	0.00	525.35	52.35
Embalse 00	309	-1.56	309.00	0.00

Figura 24 Datos obtenidos de los hidrantes tras la simulación del sector 2 de la estrategia 3

ID Línea	Longitud m	Diámetro mm	Rugosidad mm	Caudal LPS	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km	Factor de Fricción
Tubería 001	110	36.4	0.0015	0.00	0.00	0.00	0.000
Tubería 002	110	70.6	0.0015	1.56	0.40	2.74	0.024
Tubería 003	150	70.6	0.0015	1.56	0.40	2.74	0.024
Tubería 004	110	70.6	0.0015	1.56	0.40	2.74	0.024
Tubería 005	90	59.2	0.0015	0.87	0.32	2.27	0.026
Tubería 006	100	46.4	0.0015	0.00	0.00	0.00	0.000
Tubería 007	160	36.4	0.0015	0.00	0.00	0.00	0.000
Tubería 000	4	70.6	0.0015	1.56	0.40	2.73	0.024
Bomba 1	No Disponible	No Disponible	No Disponible	1.56	0.00	-216.35	0.000

Figura 25 Datos obtenidos de las tuberías tras la simulación del sector 2 de la estrategia 3

→ Para el sector 3:

ID Nudo	Cota m	Demanda LPS	Altura m	Presión m
Conexión 02	473	0.00	515.26	42.26
Conexión 1	478	0.46	514.43	36.43
Conexión 2	475	0.61	515.04	40.04
Conexión 3	479	0.69	514.94	35.94
Conexión 5	488	0.00	514.94	26.94
Conexión 4	485	0.00	514.94	29.94
Conexión 7	501	0.00	514.94	13.94
Conexión 6	493	0.00	514.94	21.94
Conexión 01	473	0.00	515.27	42.27
Embalse 00	309	-1.76	309.00	0.00

Figura 26 Datos obtenidos de los hidrantes tras la simulación del sector 3 de la estrategia 3

ID Línea	Longitud m	Diámetro mm	Rugosidad mm	Caudal LPS	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km	Factor de Fricción
Tubería 001	110	36.4	0.0015	0.46	0.44	7.53	0.028
Tubería 002	110	70.6	0.0015	1.30	0.33	1.99	0.025
Tubería 003	150	70.6	0.0015	0.69	0.18	0.66	0.029
Tubería 004	110	70.6	0.0015	0.00	0.00	0.00	0.000
Tubería 005	90	59.2	0.0015	0.00	0.00	0.00	0.000
Tubería 006	100	46.4	0.0015	0.00	0.00	0.00	0.000
Tubería 007	160	36.4	0.0015	0.00	0.00	0.00	0.000
Tubería 000	4	70.6	0.0015	1.76	0.45	3.39	0.023
Bomba 1	No Disponible	No Disponible	No Disponible	1.76	0.00	-206.27	0.000

Figura 27 Datos obtenidos de las tuberías tras la simulación del sector 3 de la estrategia 1

6. Cálculo de las necesidades de riego

Teóricamente se ha visto en la memoria que para el cálculo de las necesidades de riego del olivar, se establecerá un balance hídrico de entrada y salida al suelo:

$$Pe + Rn = ETc + \Delta R \quad [32]$$

donde:

- **Pe** (mm/mes) era la precipitación efectiva, que era el 80 de la precipitación total (Smith 1993) para los casos donde las precipitaciones eran menores a 100 mm/mes.

$$Pe = P \cdot 0.8 \quad [33]$$

- **Rn** es el riego neto, en el riego por goteo se considerará el 90% del total del riego (Orgaz y Ferreres 1997),.
- **ETc** (mm) es la evapotranspiración del cultivo.

$$ETc = ET_0 \cdot Kc \quad [34]$$

donde Kc es el coeficiente de cultivo, teniendo en cuenta la variabilidad temporal del coeficiente (Pastor 1997), para la región de la Loma y el Condado, se ha considerado:

Mes	Kc
ENE	0.50
FEB	0.50
MAR	0.65
ABR	0.60
MAY	0.55
JN	0.55
JUL	0.55
AGO	0.55
SEP	0.55
OCT	0.60
NOV	0.65
DIC	0.50

Tabla 6 Valores de Kc para cada mes según Pastor (1997)

- ΔR es la variación de la reserva del suelo en el tiempo considerado, para el caso de suelo franco-arenoso, se ha considerado un máximo de 133 mm

El cálculo de la cantidad de agua que habrá que aplicar en cada mes, se ha empleado el método FAO de balance de agua:

$$\Delta S_t = \Delta S_{t-1} + RN + Pe + ETc \quad [35]$$

siendo ΔS_i el contenido de agua del suelo (mm) al inicio ($i=t-1$) y al final ($i=t$) en un mes, RN es el riego neto, Pe es la precipitación efectiva y ETc es la evapotranspiración máxima de cultivo. Para simplificar los cálculos, se ha realizado una hoja de cálculo y se ha obtenido una gráfica en la que se muestra la precipitación efectiva, el riego neto y la evolución de la reserva para cada mes:

Mes	ETo (mm/mes)	P (mm/mes)	Nºdías lluvia	Kc	Pe (mm)	Riego		Reserva
						L/olivo día	L/mm2	
Enero	39	39	13	0.5	31.2	0	0	54.4
Febrero	48	46	12	0.5	36.8	0	0	67.2
Marzo	84	56	15	0.65	44.8	40	11.2	97.4
Abril	117	54	6	0.6	43.2	40	10.9	110.4
Mayo	159	40	6	0.55	32	70	19.6	124.95
Junio	213	9	4	0.55	7.2	90	24.4	105
Julio	228	1	1	0.55	0.8	90	25.2	70.4
Agosto	210	8	2	0.55	6.4	80	22.4	41.3
Septiembre	144	30	5	0.55	24	60	16.3	46.1
Octubre	90	52	9	0.6	41.6	0	0	0
Noviembre	48	60	7	0.65	48	0	0	16.8
Diciembre	33	53	12	0.5	42.4	0	0	42.7

Tabla 7 Tabla resumen de las precipitaciones efectivas, el riego y la evolución de la reserva para cada mes

El principal criterio para estimar la necesidad de riego es evitar que el agua almacenada en el suelo, descienda por debajo de un nivel mínimo a partir del cual la planta sufre un déficit hídrico, y por tanto afectaría a la producción. También se ha tenido en cuenta no superar la capacidad máxima que tiene el suelo de albergar agua. Finalmente, se a realizado un gráfico comparativo de la precipitación efectiva, la cantidad de riego y la evolución de la reserva a lo largo de los meses.

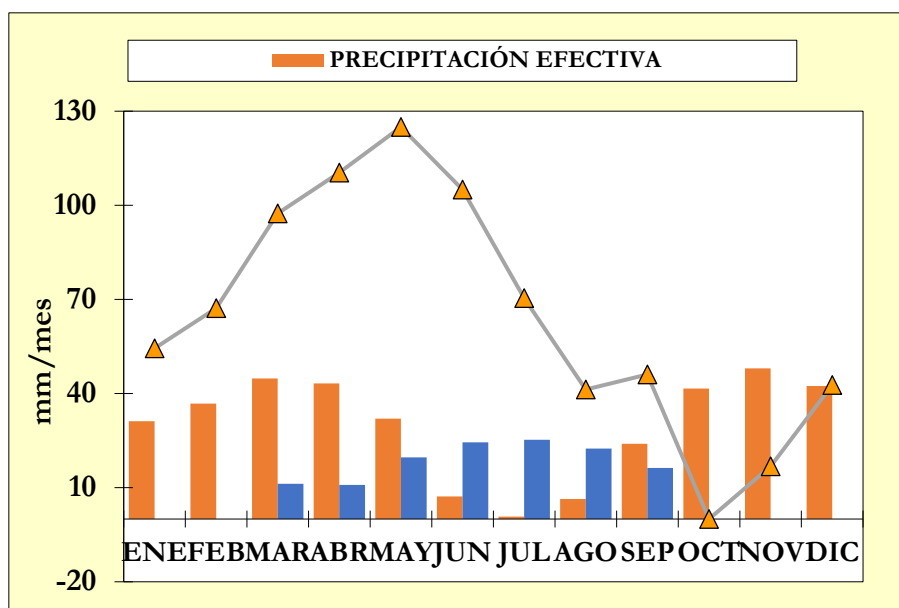


Figura 28 Gráfico comparativo mensual de las precipitaciones efectivas, el riego y la evolución de la reserva del suelo

7. Cálculo de la energía hidráulica necesaria

Como se ha visto en los apartados de la memoria, La energía hidráulica es aquella obtenida a partir de la altura hidráulica requerida y la demanda de agua durante un cierto periodo de tiempo, a partir de la cual se obtendrá la potencia pico mínima del generador fotovoltaico que se necesitará para el dimensionado de los módulos solares fotovoltaicos, se puede obtener por la expresión:

$$E_{hd} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{día} \cdot H_t}{t} \quad [36]$$

Para simplificar los cálculos se ha recurrido a una hoja de cálculo Excel, se adjuntan 3 tablas para cada estrategia:

Estrategia 1		
Mes	Demanda diaria de riego (m3/día)	Energía hidráulica (kWh/día)
Enero	0	0
Febrero	0	0
Marzo	35.8	22.99
Abril	35.8	22.99
Mayo	62.65	40.23
Junio	80.55	51.72
Julio	80.55	51.72
Agosto	71.6	45.97
Septiembre	53.7	34.48
Octubre	0	0
Noviembre	0	0
Diciembre	0	0

Tabla 8 Evolución de la demanda de riego y la energía hidráulica para cada mes

Estrategia 2				
Mes	Sector 1		Sector 2	
	Demanda diaria de riego (m3/día)	Energía hidráulica (kWh/día)	Demanda diaria de riego (m3/día)	Energía hidráulica (kWh/día)
Enero	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0
Marzo	13.8	8.86	22	13.34
Abril	13.8	8.86	22	13.34
Mayo	24.15	15.51	38.5	23.35
Junio	31.05	19.94	49.5	30.02
Julio	31.05	19.94	49.5	30.02
Agosto	27.6	17.72	44	26.69
Septiembre	20.7	13.29	33	20.01
Octubre	0	0	0	0
Noviembre	0	0	0	0
Diciembre	0	0	0	0

Tabla 9 Evolución de la demanda de riego y la energía hidráulica para cada mes

Estrategia 3						
	Sector 1		Sector 2		Sector 3	
Mes	Demanda diaria de riego (m3/día)	Energía hidráulica (kWh/día)	Demanda diaria de riego (m3/día)	Energía hidráulica (kWh/día)	Demanda diaria de riego (m3/día)	Energía hidráulica (kWh/día)
Enero	0	0	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0	0	0
Marzo	9.84	6.32	12.2	7.19	13.76	7.73
Abril	9.84	6.32	12.2	7.19	13.76	7.73
Mayo	17.22	11.06	21.35	12.59	24.08	13.53
Junio	22.14	14.22	27.45	16.18	30.96	17.39
Julio	22.14	14.22	27.45	16.118	30.96	17.39
Agosto	19.68	12.64	24.4	14.39	27.52	15.46
Septiembre	14.76	9.48	18.3	10.79	20.64	11.59
Octubre	0	0	0	0	0	0
Noviembre	0	0	0	0	0	0
Diciembre	0	0	0	0	0	0

Tabla 10 Evolución de la demanda de riego y la energía hidráulica para cada mes

Se ha considerado: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

8. Dimensionado de los módulos solares fotovoltaicos

Como se ha mencionado en anteriores apartados de este anejo para el dimensionado del generador fotovoltaico se ha tenido en cuenta la potencia pico requerida al generador según las necesidades energéticas de la bomba. A partir de la media del mes de energía hidráulica requerida, la bomba seleccionada y el recurso solar disponible para la ubicación elegida, se puede obtener la potencia pico mínima requerida del sistema fotovoltaico con la siguiente ecuación.

$$P_p = \frac{E_{Hd} \cdot H_{st}}{\eta_{mb} \cdot F_t \cdot F_m \cdot H_d} \quad [37]$$

donde:

- P_p (kW_p) es la potencia pico..
- E_{Hd} ($kWh/día$) es la energía hidráulica diaria requerida.
- H_{st} (kW/m^2) es la irradiancia normal en condiciones normales NOCT ($20^\circ C$ y 1.5 atm), se considerará 0.8 kW/m^2 .
- η_{mb} rendimiento conjunto del motor y bomba.
- F_m es el factor de acoplo medio, $F_m = 0.9$
- H_d ($kWh/m^2/día$) es la irradiación solar media diaria sobre el plano óptimo obtenida en los apartados anteriores.
- F_t ($^\circ C^{-1}$) es el factor de corrección de la temperatura que se podrá obtener:

$$F_t = 1 - \delta \cdot (T_c - 25) \quad [38]$$

siendo:

- $\delta = 0.005$ $^\circ C^{-1}$ para el modelo de módulo elegido trabajando a una temperatura de célula de 45 $^\circ C$.

Todos los cálculos se han realizado con una hoja de cálculo Excel, se ha obtenido la potencia pico para cada mes, pero para el dimensionado, solamente se tendrá en cuenta la máxima, es decir, el mes en el que la potencia pico requerida sea mayor. Por tanto, para cada estrategia:

Estrategia 1			
Mes	Energía hidráulica (kWh/día)	Irradiación solar diaria (kWh/m2/día)	Potencia pico necesaria (kWp)
Enero	0	3.8	0
Febrero	0	4.94	0
Marzo	22.99	5.89	6.5
Abril	22.99	5.96	6.42
Mayo	40.23	6.51	10.29
Junio	51.72	7.2	11.96
Julio	51.72	7.57	11.37
Agosto	45.97	7.35	10.41
Septiembre	34.48	6.42	8.94
Octubre	0	5.48	0
Noviembre	0	4.23	0
Diciembre	0	3.76	0

Tabla 11 Evolución de la energía hidráulica, la irradiación y la potencia pico para cada mes

Estrategia 2						
Mes	Sector 1			Sector 2		
	Energía hidráulica (kWh/día)	Irradiación solar diaria (kWh/m2/día)	Potencia pico necesaria (kWp)	Energía hidráulica (kWh/día)	Irradiación solar diaria (kWh/m2/día)	Potencia pico necesaria (kWp)
Enero	0	3.8	0	0	3.8	0
Febrero	0	4.94	0	0	4.94	0
Marzo	8.86	5.89	2.76	13.34	5.89	4.15
Abril	8.86	5.96	2.72	13.34	5.96	4.10
Mayo	15.51	6.51	4.36	23.35	6.51	6.57
Junio	19.94	7.2	5.07	30.02	7.2	7.64
Julio	19.94	7.57	4.83	30.02	7.57	7.27
Agosto	17.72	7.35	4.42	26.69	7.35	6.65
Septiembre	13.29	6.42	3.79	20.01	6.42	5.71
Octubre	0	5.48	0	0	5.48	0
Noviembre	0	4.23	0	0	4.23	0
Diciembre	0	3.76	0	0	3.76	0

Tabla 12 Evolución de la energía hidráulica, la irradiación y la potencia pico para cada mes

Estrategia 3									
Mes	Sector 1			Sector 2			Sector 3		
	Energía hidráulica (kWh/día)	Irradiación solar diaria (kWh/m2/día)	Potencia pico necesaria (kWp)	Energía hidráulica (kWh/día)	Irradiación solar diaria (kWh/m2/día)	Potencia pico necesaria (kWp)	Energía hidráulica (kWh/día)	Irradiación solar diaria (kWh/m2/día)	Potencia pico necesaria (kWp)
Enero	0	3.8	0	0	3.8	0	0	3.8	0
Febrero	0	4.94	0	0	4.94	0	0	4.94	0
Marzo	6.32	5.89	2.17	7.19	5.89	2.31	7.73	5.89	2.41
Abril	6.32	5.96	2.15	7.19	5.96	2.28	7.73	5.96	2.39
Mayo	11.06	6.51	3.44	12.59	6.51	3.65	13.53	6.51	3.82
Junio	14.22	7.2	4	16.18	7.2	4.24	17.39	7.2	4.44
Julio	14.22	7.57	3.80	16.118	7.57	4.04	17.39	7.57	4.23
Agosto	12.64	7.35	3.48	14.39	7.35	3.7	15.46	7.35	3.87
Septiembre	9.48	6.42	2.99	10.79	6.42	3.17	11.59	6.42	3.32
Octubre	0	5.48	0	0	5.48	0	0	5.48	0
Noviembre	0	4.23	0	0	4.23	0	0	4.23	0
Diciembre	0	3.76	0	0	3.76	0	0	3.76	0

Tabla 13 Evolución de la energía hidráulica, la irradiación y la potencia pico para cada mes

En definitiva, las potencias pico para cada estrategia son:

Estrategia	Potencia pico (kW _p)
1 sector	11.96
2 sectores	7.64
3 sectores	4.44

Tabla 14 Potencia pico para cada estrategia

A partir de la potencia pico que se producirá en la instalación se ha determinado que el módulo solar más idóneo ha sido el modelo Luxor Eco-Line 60-270W (LX-270M) con las características descritas en la memoria.

Para determinar el número de módulos necesarios en función de la potencia pico requerida y de la potencia del panel solar fotovoltaico, se ha empleado la siguiente expresión.

$$N^{\circ} \text{Paneles} = \frac{P_p \text{ mínima del sistema}}{P_p \text{ panel}} + 1 \quad [39]$$

Finalmente, el número de módulos para cada estrategia queda:

Estrategia	N° Paneles*
1 sector	46
2 sectores	30
3 sectores	18

Tabla 15 Número de módulos solares fotovoltaicos para cada estrategia

9. CÁLCULO DEL CABLEADO

Como se ha descrito el fundamento teórico del cálculo del cableado en la memoria, habrá que considerar que soporte la corriente nominal de funcionamiento, la corriente de arranque del motor y el breve periodo de tiempo hasta que actúan las protecciones sin producirse defectos en el cable. La sección, en milímetros cuadrados, se puede determinar mediante la ecuación:

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot I}{k \cdot \Delta V} \quad [27]$$

donde:

- L (mm^2) es la longitud del tramo.
- I (A) es la intensidad de corriente.
- k es la conductividad del material del conductor, se considerará $56 \text{ m}/\Omega \cdot mm^2$.
- ΔV (V) es la caída de tensión máxima permitida en el tramo.

Como se ha descrito anteriormente, se han considerado 2 tramos:

- Tramo 1: entre la caja de conexiones de los módulos solares y el variador de velocidad.
- Tramo 2: entre el variador y los bornes de conexión del motor de la electrobomba.

La conexión entre los módulos solares será mediante cable PV ZZ-F de 4 mm^2 sección, por recomendación del fabricante, solamente se diferenciará para cada estrategia la longitud de cableado, ya que, para cada una de ellas, el número de paneles es distinto.

Estrategia	Longitud (m)
Estrategia 1	86
Estrategia 2	59
Estrategia 3	35

Tabla 16 Longitud de cableado para interconexión de módulos para cada estrategia

Considerando que la caída de tensión máxima en el tramo 1 no debe superar el 1%, y en el tramo 2 no debe superar el 5%, la sección para cada tramo se calculará:

→ Tramo 1:

Longitud del tramo: $L = 10 \text{ m}$

Intensidad de corriente de cortocircuito del módulo: $I = 9.04 \text{ A}$

Caída de tensión considerada: $\Delta V = 37.98 \text{ V}$

Conductividad del material: $k = 56 \text{ m}/\Omega \cdot mm^2$

Por tanto:

$$S = \frac{2 \cdot 10 \cdot 9.04}{56 \cdot (0.01 \cdot 37.98)} = 8.52 \cong 10 \text{ mm}^2 \quad [28]$$

→ Tramo 2:

Longitud del tramo: $L = 10 + 164 = 174 \text{ m}$

Intensidad de corriente de cortocircuito del variador de velocidad: $I = 6.9 \text{ A}$

Caída de tensión considerada de la bomba: $\Delta V = 400 \text{ V}$

Conductividad del material: $k = 56 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$

Por tanto:

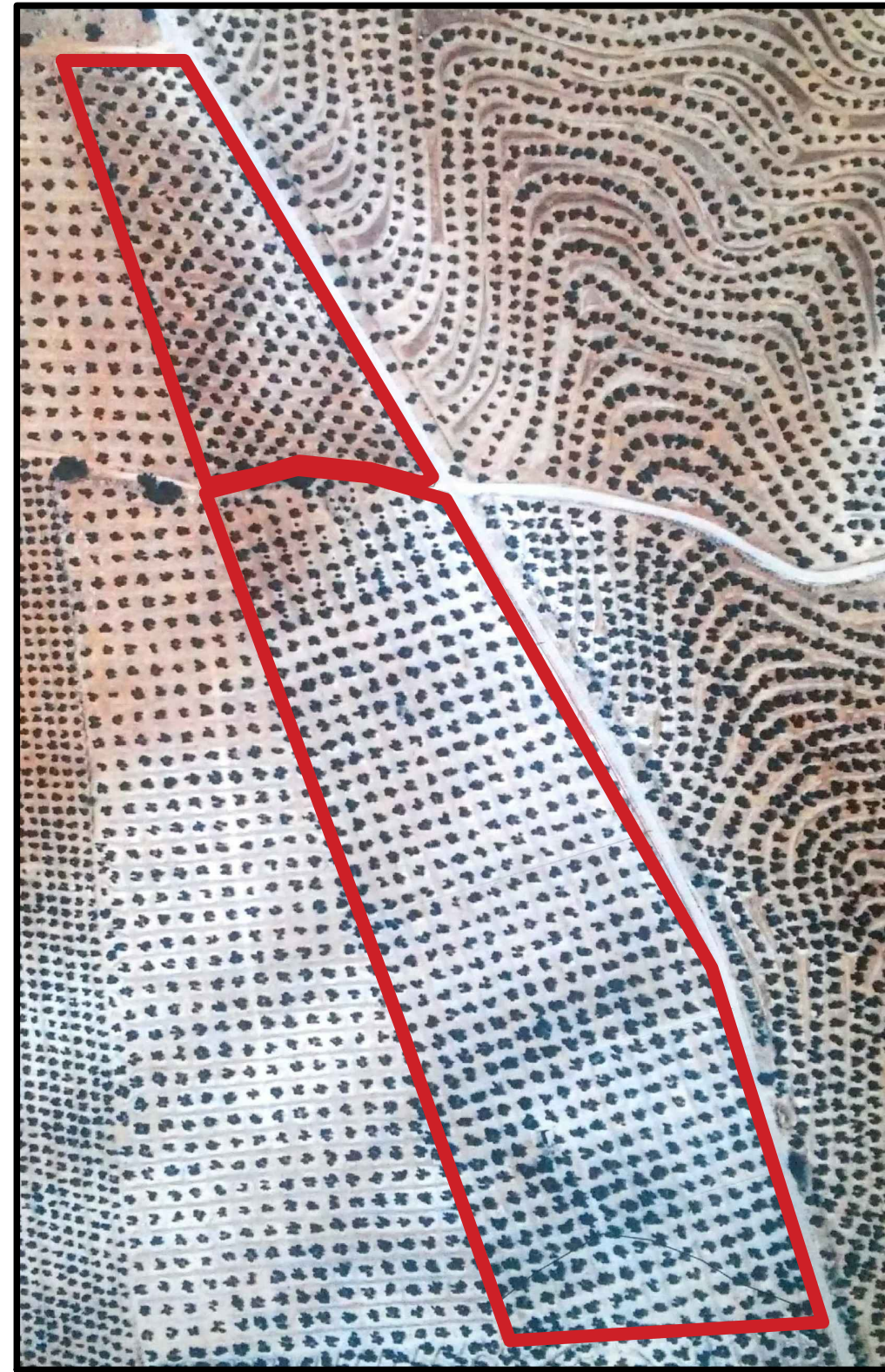
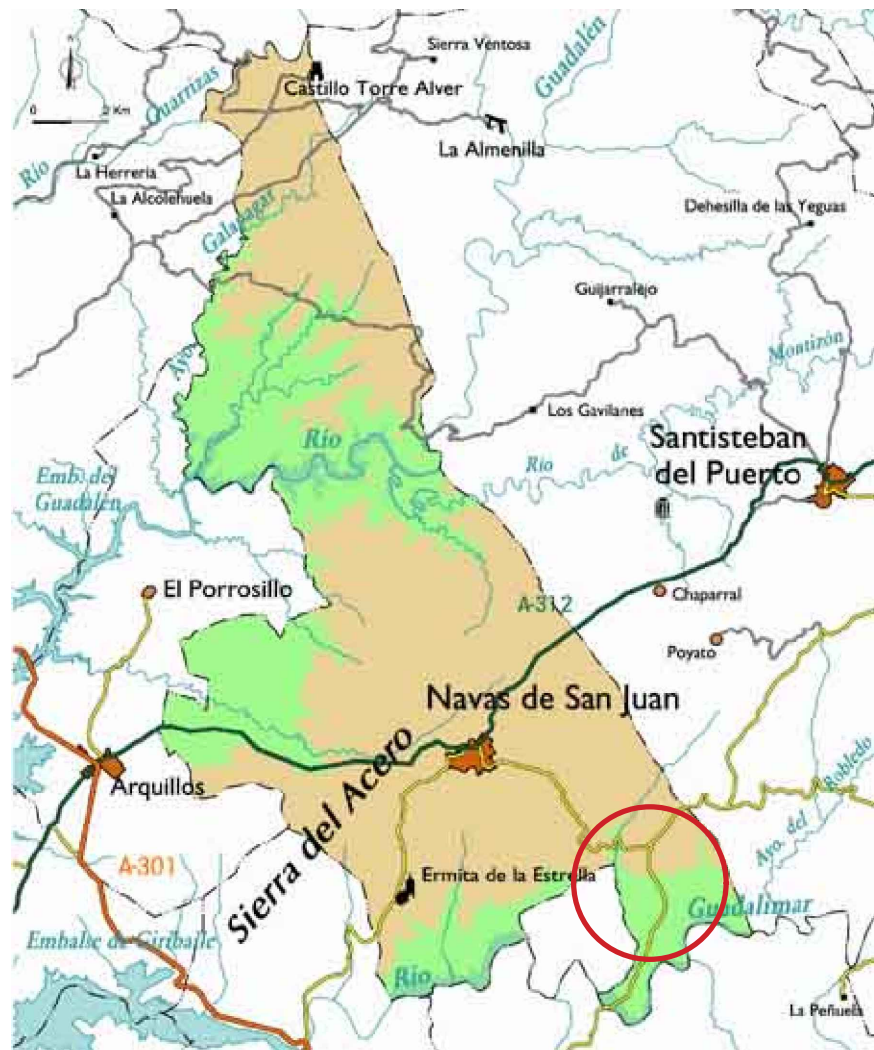
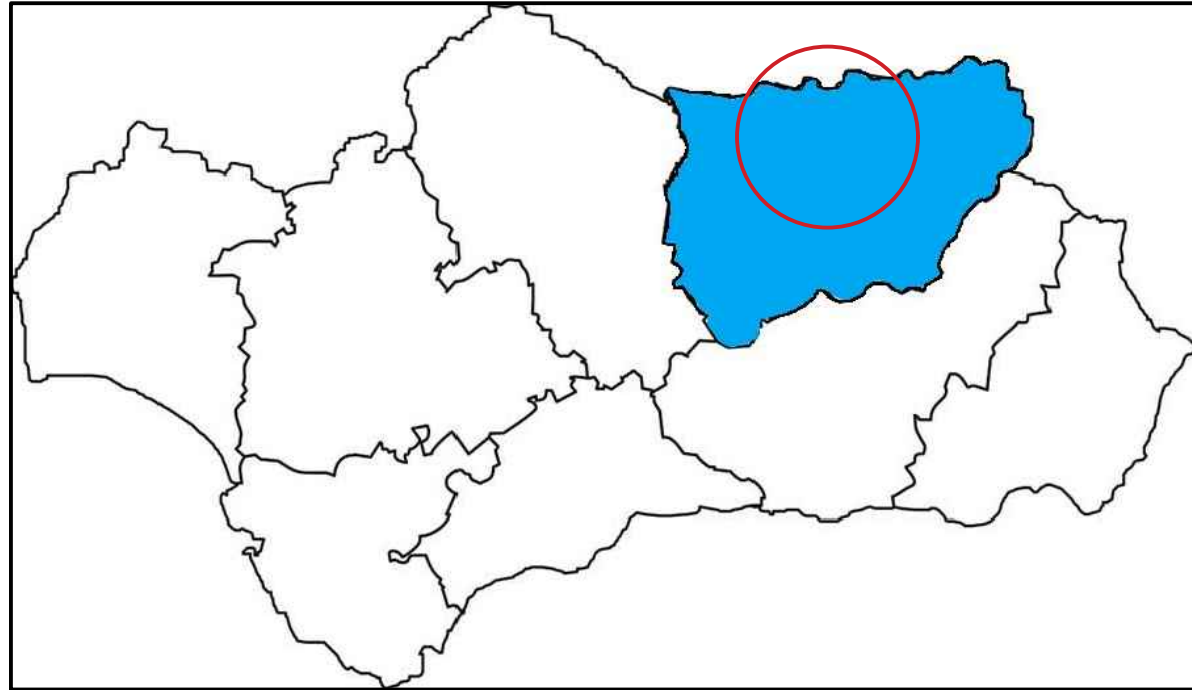
$$S = \frac{2 \cdot 174 \cdot 6.9}{56 \cdot (0.03 \cdot 400)} = 3.57 \cong 4 \text{ mm}^2 \quad [29]$$

Finalmente, las secciones del conductor para cada tramo serán:

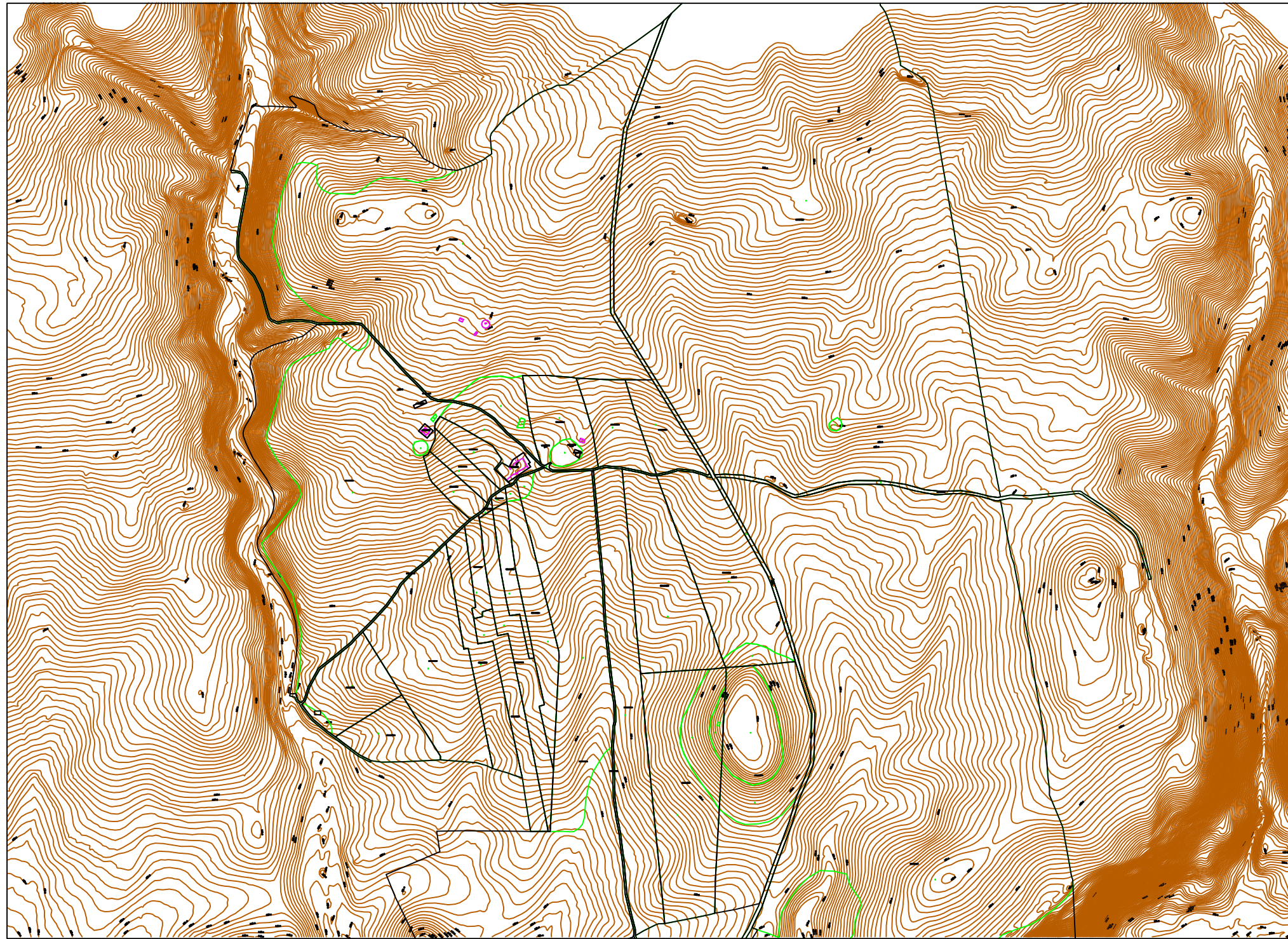
Tramo	Sección (mm^2)
Conexión entre módulos	4
Tramo 1	10
Tramo 2	4


Tabla 17 Sección del cableado para cada tramo

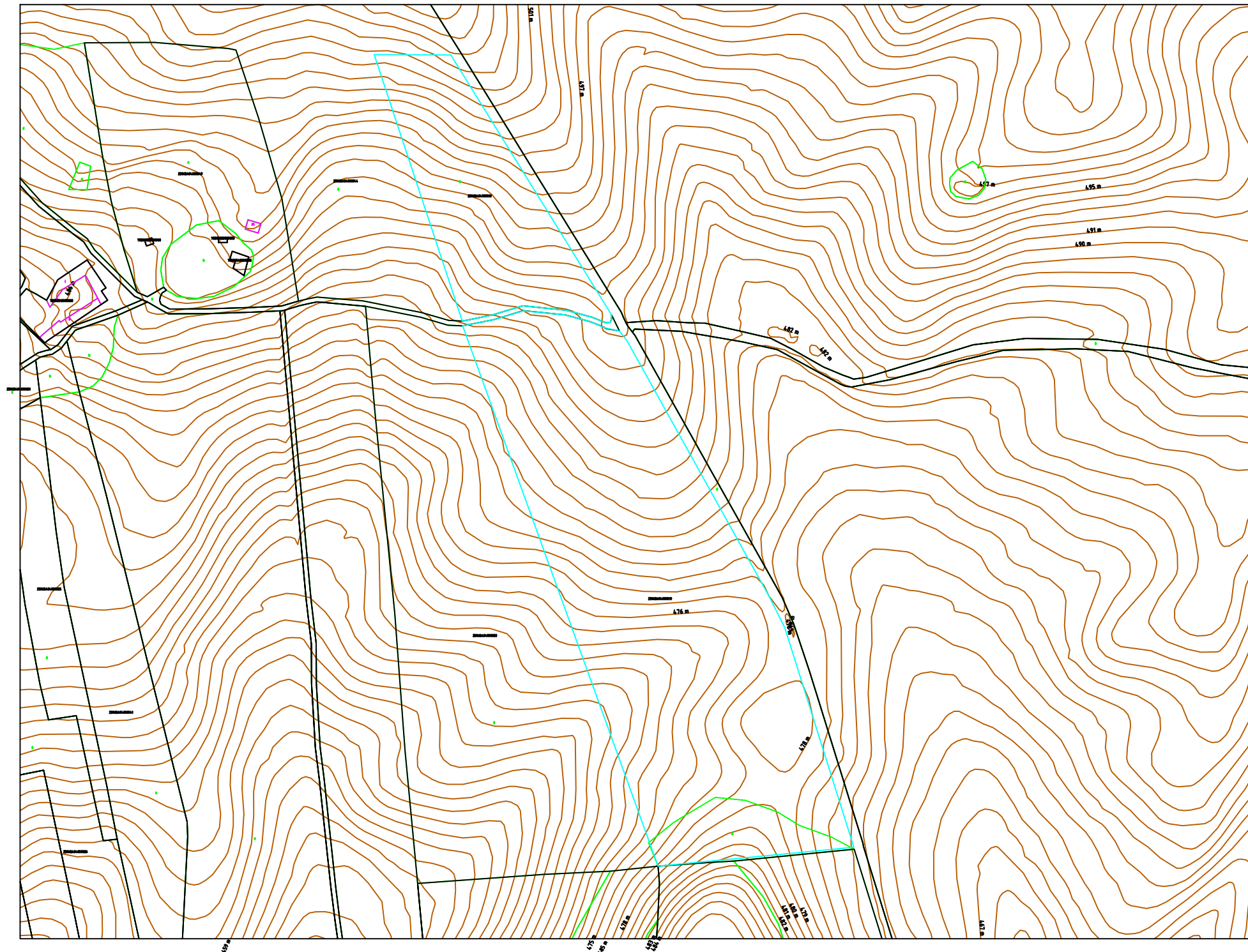
ANEJO DE PLANOS




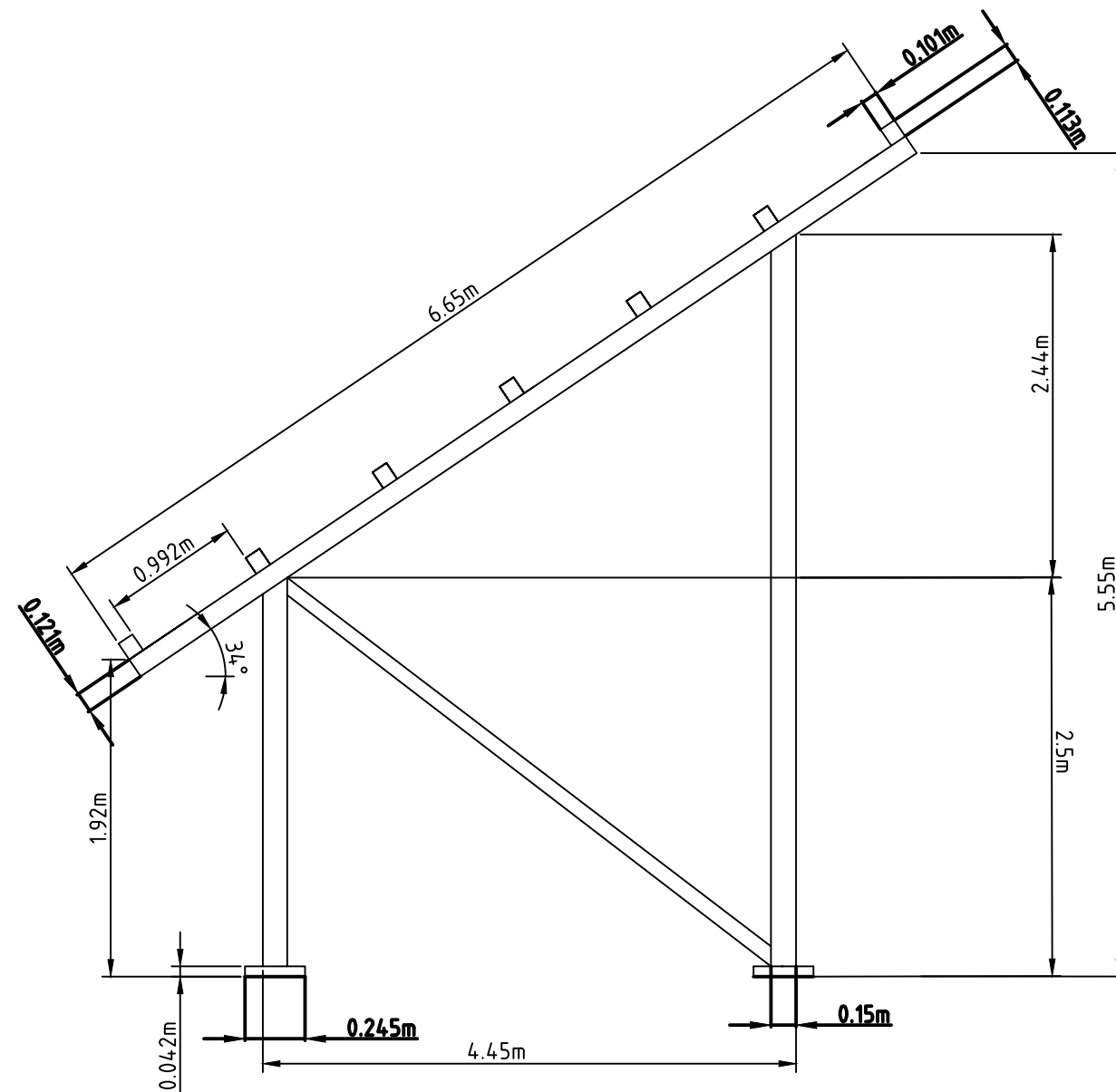
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	17/05/18	A.Fontecha		
COMPROBADO	17/05/18	A.Fontecha		
ESCALA:	Estudio de diferentes sistemas de bombeo alimentados por energía solar fotovoltaica para distintas estrategias de riego de una parcela de olivar			Nº PLANO 1
UBICACIÓN				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:




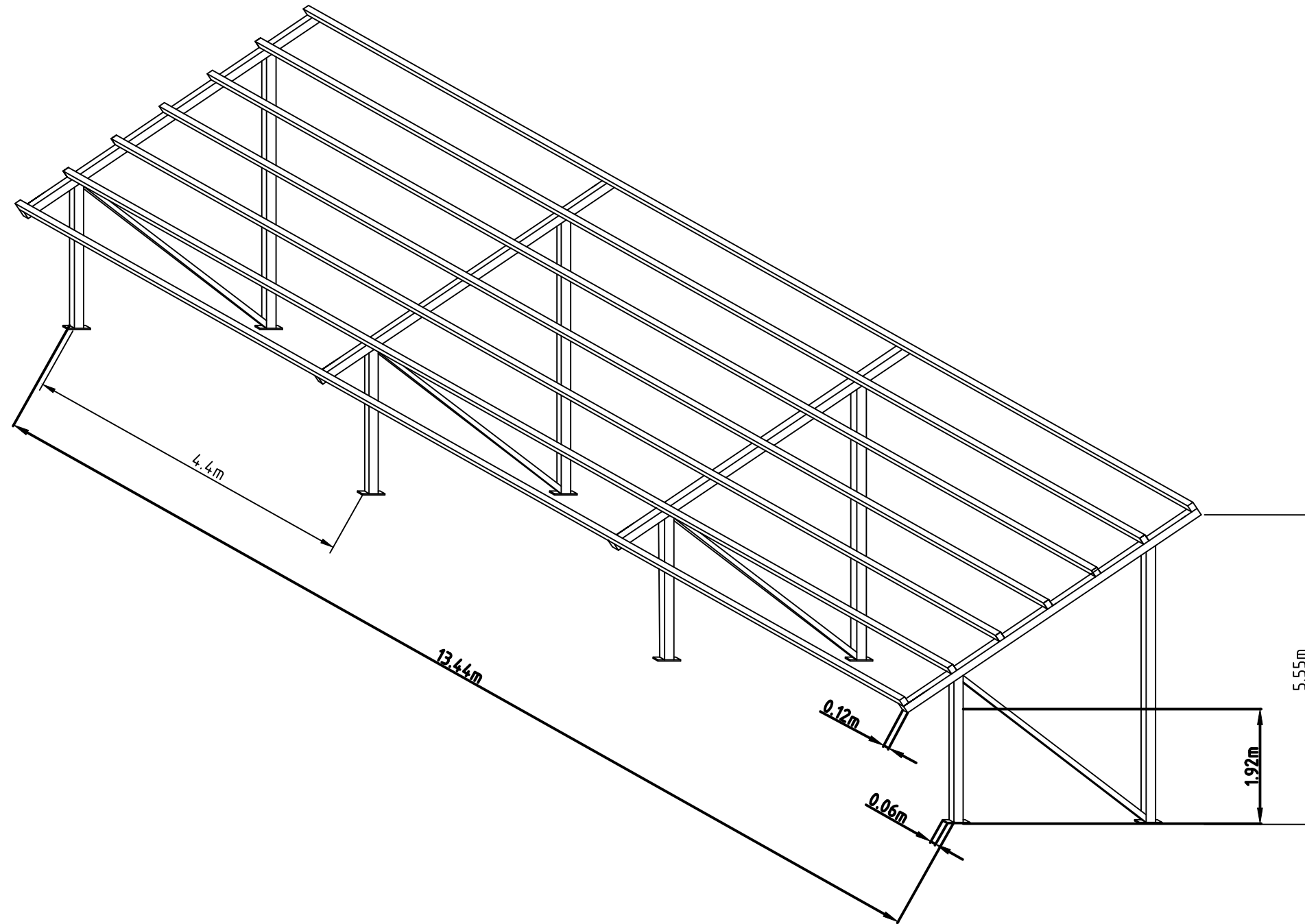
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	17/05/18	A.Fontecha		
COMPROBADO	17/05/18	A.Fontecha		
ESCALA:	Estudio de diferentes sistemas de bombeo alimentados por energía solar fotovoltaica para distintas estrategias de riego de una parcela de olivar			Nº PLANO 2
	CURVAS DE NIVEL DE LA ZONA			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:




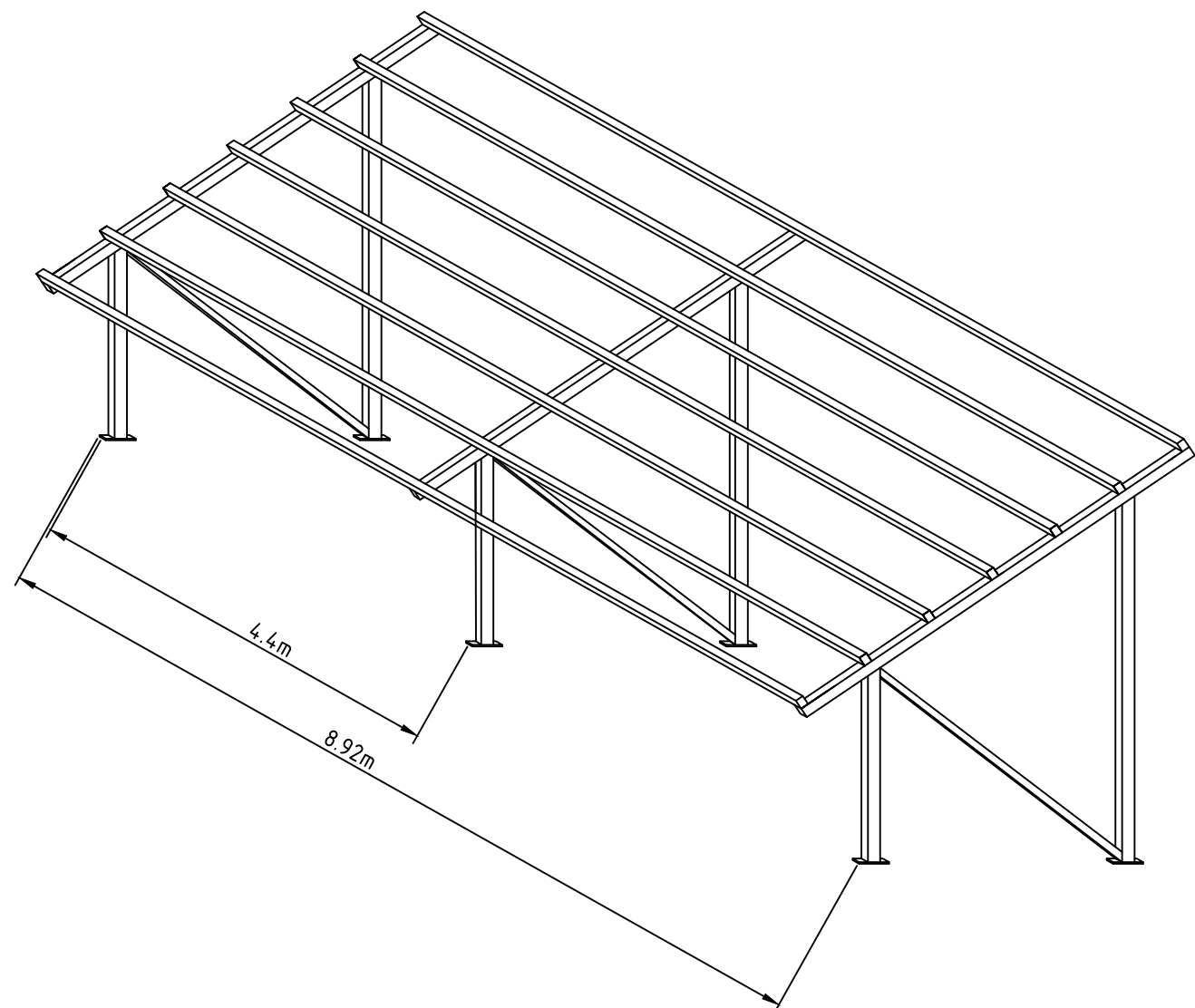
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	17/05/18	A.Fontecha		
COMPROBADO	17/05/18	A.Fontecha		
ESCALA:	Estudio de diferentes sistemas de bombeo alimentados por energía solar fotovoltaica para distintas estrategias de riego de una parcela de olivar			Nº PLANO 3
	CURVAS DE NIVEL DE LA FINCA			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:




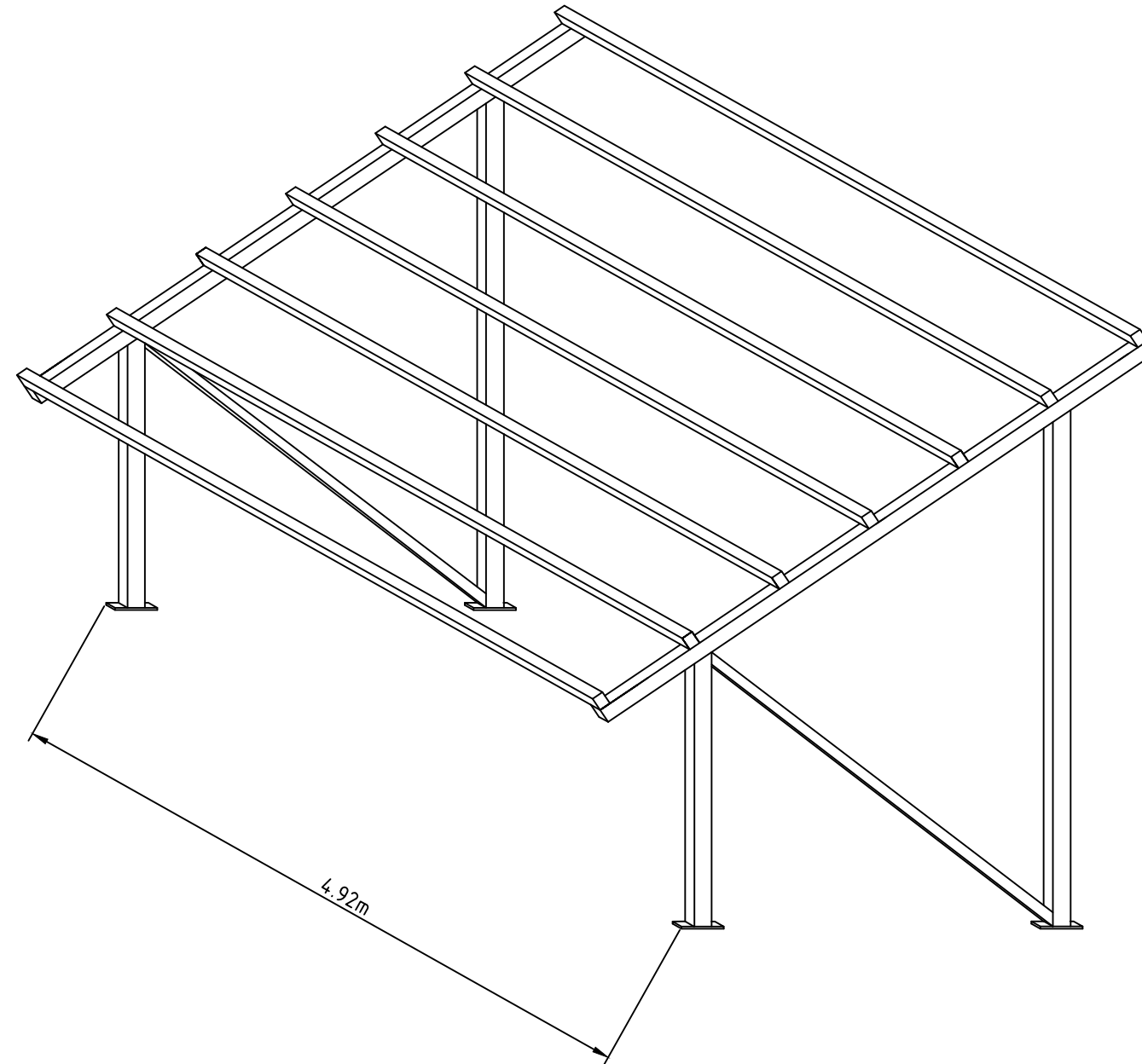
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	17/05/18	A.Fontecha		
COMPROBADO	17/05/18	A.Fontecha		
ESCALA:	Estudio de diferentes sistemas de bombeo alimentados por energía solar fotovoltaica para distintas estrategias de riego de una parcela de olivar			Nº PLANO 4
1:70	PERFIL DE LA ESTRUCTURA			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:




	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	17/05/18	A.Fontecha		
COMPROBADO	17/05/18	A.Fontecha		
ESCALA: 1:70	Estudio de diferentes sistemas de bombeo alimentados por energía solar fotovoltaica para distintas estrategias de riego de una parcela de olivar			Nº PLANO 5
ESTRUCTURA PARA LA ESTRATEGIA 1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	17/05/18	A.Fontecha		
COMPROBADO	17/05/18	A.Fontecha		
ESCALA:	Estudio de diferentes sistemas de bombeo alimentados por energía solar fotovoltaica para distintas estrategias de riego de una parcela de olivar		Nº PLANO 6	
1:70	ESTRUCTURA PARA LA ESTRATEGIA 2		SUSTITUYE A:	
			SUSTITUIDO POR:	



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	17/05/18	A.Fontecha		
COMPROBADO	17/05/18	A.Fontecha		
ESCALA:	Estudio de diferentes sistemas de bombeo alimentados por energía solar fotovoltaica para distintas estrategias de riego de una parcela de olivar			Nº PLANO 7
1:70	ESTRUCTURA PARA LA ESTRATEGIA 3			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR: