



universidad  
de león



**Escuela de Ingenierías**  
**Industrial, Informática y Aeroespacial**

**GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA  
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

Trabajo de Fin de Grado

**ESTUDIO DE MEJORA DE UN SISTEMA DE RIEGO CON  
UN RIEGO AUTOMATIZADO SOSTENIBLE**

**STUDY OF IMPROVEMENT OF AN IRRIGATION SYSTEM  
WITH A SUSTAINABLE AUTOMATED IRRIGATION**

Autor: Yerai De Anta Casquero  
Tutor: María Fernández Raga

(Julio, 2023)

<b>UNIVERSIDAD DE LEÓN</b> <b>Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial</b>  <b>GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA</b> <b>Trabajo de Fin de Grado</b>	
<b>ALUMNO:</b> Yerai De Anta Casquero	
<b>TUTOR:</b> María Fernández Raga	
<b>TÍTULO:</b> Estudio de mejora de un sistema de riego con un riego automatizado sostenible	
<b>TITLE:</b> Study of improvement of an irrigation system with a sustainable automated irrigation.	
<b>CONVOCATORIA:</b> Julio, 2023	
<b>RESUMEN:</b> El estudio se centra en diseñar un sistema de riego por aspersión, alimentado mediante energía solar, y programado y regulado por un PLC con el objetivo de demostrar las ventajas que presenta con respecto al sistema de riego por surcos comúnmente utilizado. Este diseño además cuenta con la peculiaridad de la división de la parcela por sectores mediante la utilización de electroválvulas reguladas por el PLC. Con esto se consigue administrar el agua estrictamente necesaria para el crecimiento de la planta y utilizar un sistema de bombeo menor debido a que se regará por sectores en vez de la totalidad de la parcela. A causa de esto, el generador fotovoltaico también tendrá menor dimensión y la inversión inicial será inferior.	
<b>ABSTRACT:</b> The study focuses on designing a solar-powered sprinkler irrigation system, programmed and regulated by a PLC (Programmable Logic Controller), in order to demonstrate the advantages it presents compared to the commonly used furrow irrigation system. This design also has the peculiarity of dividing the plot into sectors using electrovalves regulated by the PLC. This allows for the precise administration of water needed for plant growth and reduces the need for a larger pumping system since irrigation will be done in sectors rather than the entire plot. As a result, the photovoltaic generator will also be smaller, and the initial investment will be lower.	
<b>Palabras clave:</b> Riego, Aspersión, Panel solar, PLC, Electroválvulas, Eficiencia	
<b>Firma del alumno:</b>	<b>VºBº Tutor/es:</b>

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.1 Planteamiento del problema .....	11
1.2 Justificación.....	13
1.3 Objetivo general del estudio.....	14
1.3.1 Objetivos específicos .....	14
2. CONTEXTO.....	14
2.1. Localización del estudio .....	14
2.2. Características generales del suelo.....	20
2.3. Parámetros climatológicos de la zona .....	22
2.4. Tipo de cultivo.....	23
3. DISEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO PROPUESTO.....	25
3.1. Bombeo solar .....	26
3.1.1. Generador fotovoltaico .....	26
3.1.2. Inversor.....	26
3.1.3. Baterías.....	27
3.1.4. Variador de frecuencia .....	28
3.1.5. Bomba de agua .....	28
3.2. Controladores lógicos programables (PLC).....	29
3.2.1. Tipos de PLCs .....	30
3.2.2. Arquitectura maestro-esclavo.....	31
3.3. Tipos de cultivo de regadío más comunes en la zona .....	32
3.4. Sistemas de riego .....	33
3.5. Sistema de riego escogido .....	38
3.6. Diseño de la red hidráulica .....	41

3.7.	Justificación técnica: Distribución y elementos del sistema hidráulico .....	43
3.7.1.	Elementos empleados en la distribución del agua.....	49
3.7.2.	Dimensionamiento de las tuberías.....	60
3.7.3.	Cálculo de las pérdidas de carga en el circuito.....	63
3.7.4.	Dimensionamiento bomba .....	72
3.7.5.	Elección de la bomba.....	73
3.8.	Justificación técnica: Diseño del sistema fotovoltaico .....	76
3.8.1.	Generador fotovoltaico .....	76
3.8.2.	Inversor.....	82
3.8.3.	Variador de frecuencia .....	84
3.8.4.	Baterías.....	85
3.8.5.	Configuración de los strings .....	87
3.8.6.	Distancia mínima entre filas de módulos .....	88
3.8.7.	Cableado .....	90
3.8.8.	Protecciones .....	98
3.9.	Justificación técnica: Automatización del riego.....	101
3.9.1.	Elementos empleados en la automatización .....	101
3.9.2.	Programa y funcionamiento.....	102
4.	Presupuesto.....	114
4.1.	Sistema hidráulico.....	114
4.2.	Sistema fotovoltaico .....	115
4.3.	Automatización.....	116
5.	Conclusiones.....	117

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1. Reservas de agua embalsada (Fuente: Informe anual indicadores agricultura, pesca y alimentación 2021) .....	12
Figura 2.1.1. Localización de la parcela. (Fuente: Elaboración propia).....	15
Figura 2.1.2. Término municipal de Castrogonzalo. (Fuente: Sede Electrónica del Catastro) .....	15
Figura 2.1.3. Ubicación según catastro de la finca. (Fuente: (Sede Electrónica del Catastro)) .....	16
Figura 2.1.4. Imagen del visor SigPac de las fincas del estudio. (Fuente: SigPac).....	17
Figura 2.1.5. Ancho de la parcela. (Fuente: Visor SigPac) .....	18
Figura 2.1.6. Largo de la parcela. (Fuente: Visor SigPac) .....	18
Figura 2.1.7. Ancho parcela secundaria. (Fuente: Visor SigPac) .....	18
Figura 2.1.8. Largo parcela secundaria. (Fuente: Visor SigPac).....	19
Figura 2.1.9. Ubicación del pozo. (Fuente: Visor SigPac) .....	19
Figura 2.1.10. Distancia pozo-borde derecho. (Fuente: Visor SigPac) .....	19
Figura 2.1.11. Distancia pozo-borde inferior. (Fuente: Visor SigPac) .....	20
Figura 2.2.1. Mapa tipos de suelo en la comarca. (Fuente: Caracterización comarcas agrarias de Zamora).....	20
Figura 3.1.5.1. Bomba de agua. (Fuente: Riego por aspersión, Junta de Andalucía).....	28
Figura 3.1.5.2. Bomba eje horizontal (Fuente: Riego por aspersión, Junta de Andalucía) .	29
Figura 3.1.5.3. Bomba eje vertical. (Fuente: Riego por aspersión, Junta de Andalucía).....	29
Figura 3.2.1. PLC en rack. (Fuente: Google Imágenes) .....	31
Figura 3.2.2.1. Arquitectura maestro-esclavo. (Fuente: Controladores lógicos programables UNED) .....	32
Figura 3.4.1. Riego por inundación. (Fuente: Google Imágenes) .....	34

Figura 3.4.2. Riego por escurrimiento que inunda la parcela mediante una tubería de PVC con orificios. (Fuente: Hojas divulgadoras) .....	34
Figura 3.4.3. Riego por escurrimiento con los orificios abasteciendo a cada surco respectivamente. (Fuente: Google Imágenes) .....	35
Figura 3.4.4. Cañón de riego. (Fuente: Google Imágenes) .....	36
Figura 3.4.5. Pívor de riego. (Fuente: Google Imágenes) .....	37
Figura 3.4.6. Riego por goteo. (Fuente: Google Imágenes).....	38
Figura 3.4.7. Riego subsuperficial. (Fuente: Risiberia) .....	38
Figura 3.6.1. Sectores de la parcela. (Fuente: Elaboración propia) .....	42
Figura 3.7.1. Distribución 1. (Fuente: Elaboración propia) .....	44
Figura 3.7.2. Distribución 2 (Fuente: Elaboración propia) .....	45
Figura 3.7.4. Red hidráulica. (Fuente: Elaboración propia).....	47
Figura 3.7.5. Orientación red hidráulica (Fuente: Elaboración propia).....	48
Figura 3.7.1.1.1. Aspiración del agua. (Fuente: Elaboración propia) .....	49
Figura 3.7.1.1.2. Tubo sin toma. (Fuente: Hispano Aspersión) .....	49
Figura 3.7.1.1.3. Codo de 90°. (Fuente: Hispano Aspersión) .....	50
Figura 3.7.1.1.4. Macho con brida. (Fuente: Hispano Aspersión).....	50
Figura 3.7.1.1.5. Reducción. (Fuente: Hispano Aspersión) .....	50
Figura 3.7.1.3.1. Línea primaria. Fuente: (Elaboración propia).....	53
Figura 3.7.1.3.2. Hembra con rosca. (Fuente: Hispano Aspersión).....	53
Figura 3.7.1.3.3. Macho con rosca. (Fuente: Hispano Aspersión).....	54
Figura 3.7.1.3.4. Ampliación. (Fuente: Hispano Aspersión) .....	54
Figura 3.7.1.3.5. T reversible. (Fuente: Hispano Aspersión) .....	54
Figura 3.7.1.4.1. Línea secundaria. (Fuente: Elaboración propia).....	56
Figura 3.7.1.4.2. Acople aspersor. (Fuente: Elaboración propia).....	57
Figura 3.7.1.2.3. Tubo con toma de agua. (Fuente: Hispano Aspersión) .....	57

Figura 3.7.1.2.4. Tubo porta-aspersor (Fuente: Hispano Aspersión) .....	58
Figura 3.7.1.2.5. Alargadera. (Fuente: Hispano Aspersión).....	58
Figura 3.7.1.2.6. Tapón final(Fuente: Hispano Aspersión) .....	58
Figura 3.7.1.5. Electroválvula. (Fuente: Tameson) .....	59
Figura 3.7.1.6.1. Aspersor 5035 SD. (Fuente: NaanDanJain).....	60
Figura 3.7.5.1. Bomba centrífuga IR32-250C. (Fuente: Catálogo electrobombas SAER) ...	74
Figura 3.7.5.2. Líneas de alturas y piezométrica. (Fuente: Elaboración propia).....	75
Figura 3.8.1.1. Latitud de la finca. (Fuente: Google Maps) .....	78
Figura 3.8.1.2. Porcentaje de tiempo pasado en cada banda de cobertura de nubes, categorizado según el porcentaje del cielo cubierto de nubes. (Fuente: Weatherspark)..	79
Figura 3.8.1.3. Gráfico de irradiancia media. (Fuente: PVGIS).....	80
Imagen 3.8.1.4. Conexión baterías (Fuente: Google Imágenes) .....	87
Figura 3.8.6.1 Soporte paneles solares. (Fuente: generatupropiaenergia.es).....	89
Figura 3.8.6.2. Disposición paneles solares. (Fuente: Elaboración propia).....	89
Figura 3.8.7.4.1. Distancia caseta-bomba. (Fuente: SigPac) .....	97
Figura 3.9.2.1. Cambio de hora PLC. (Fuente: TIA Portal).....	103
Figura 3.9.2.2. Variables de fecha y hora del programa. (Fuente: TIA Portal).....	104
Figura 3.9.2.3. Lectura fecha y hora. (Fuente: TIA Portal) .....	105
Figura 3.9.2.4. Conversión de valores. (Fuente: TIA Portal).....	105
Figura 3.9.2.5. Movimiento de las variables (Fuente: TIA Portal).....	106
Figura 3.9.2.6. Comparaciones de hora. (Fuente: TIA Portal) .....	106
Figura 3.9.2.7. Sensor de nivel (Fuente: TIA Portal) .....	107
Figura 3.9.2.8. Funcionamiento general. (Fuente: TIA Portal) .....	108
Figura 3.9.2.9. Sector A. (Fuente: TIA Portal) .....	109
Figura 3.9.2.10. Sector B. (Fuente: TIA Portal) .....	110
Figura 3.9.2.11. Sector C. (Fuente: TIA Portal) .....	111

Figura 3.9.2.12. Sector D. (Fuente: TIA Portal) .....	111
Figura 3.9.2.13. Remanencia de variables. (Fuente: TIA Portal) .....	112
Figura 3.9.2.14. Recorrido agua sector A. (Fuente: Elaboración propia) .....	112
Figura 3.9.2.15. Recorrido agua sector B. (Fuente: Elaboración propia) .....	113
Figura 3.9.2.16. Recorrido agua sector C. (Fuente: Elaboración propia) .....	113
Figura 3.9.2.17. Recorrido agua sector D. (Fuente: Elaboración propia) .....	114

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.2.1. Erosión de suelo. (Fuente: Inventario nacional erosión de suelos, Zamora) ..	21
Tabla 2.3.1. Resumen datos climatológicos Castrogonzalo-Benavente. (Fuente: Weatherspark).....	22
Tabla 3.5.1. Comparativa métodos de riego. (Fuente: Elaboración propia) .....	40
Tabla 3.7.1.2.1. Diámetros de la salida de la bomba. (Fuente: Catálogo Electrobombas SAER).....	51
Tabla 3.7.3.1.1. Tabla valores k. (Fuente: Ingeniería Fluidomecánica, ULE) .....	67
Tabla 3.7.5.1. Serie electrobombas IR32 SAER. (Fuente: Catálogo electrobombas SAER) .	73
Tabla 3.8.1.1. Ángulo de inclinación paneles solares. (Fuente: PCT-A-REV).....	77
Tabla 3.8.1.2. Irradiancia media diaria sobre plano fijo con una inclinación 20º y azimut 0º (Fuente: PVGIS).....	79
Tabla 3.8.1.3. Irradiancia media mes de junio. (Fuente: PVGIS) .....	80
Tabla 3.8.1.4. Consumos del sistema .....	82
Tabla 3.8.5.1. Configuración paneles solares. (Fuente: Elaboración propia).....	88
Tabla 3.8.7.1.1. Intensidades máximas admisibles según el conductor. (Fuente: REBT) ...	92
Tabla 3.8.7.2.1 Factores de reducción. (Fuente: UNE-HD 60364-5-52:2022).....	93
Tabla 3.8.7.2.2 Factores de corrección. (Fuente: UNE-HD 60364-5-52:2022).....	94

Tabla 3.8.7.2.3 Corrientes admisibles. (Fuente: UNE-HD 60364-5-52:2022).....	95
Tabla 3.8.8.2.1 Resistividad del terreno. (Fuente: REBT) .....	100
Tabla 3.8.8.2.1 Sección de los conductores de protección. (Fuente: REBT) .....	100
Tabla 4.1.1. Presupuesto sistema hidráulico. (Fuente: Elaboración propia) .....	115
Tabla 4.2.1. Presupuesto sistema fotovoltaico. (Fuente: Elaboración propia) .....	116
Tabla 4.3.1 Presupuesto automatización del proceso. (Fuente: Elaboración propia) .....	116

## 1. INTRODUCCIÓN

Este estudio está enfocado en uno de los sectores históricamente más importantes en España, el sector agrícola. Dicho oficio es uno de los más antiguos ya que incluso desde la antigua Mesopotamia, el hombre ha desarrollado métodos para hacer llegar el agua a los cultivos. En las últimas décadas, la producción en los cultivos se ha desarrollado enormemente gracias al avance en la maquinaria agrícola y se ha convertido en un factor clave para la viabilidad económica de muchas explotaciones agrícolas, debido a que de no ser por estas tecnologías no sería posible cubrir la creciente demanda de alimentos y no se podrían satisfacer las necesidades de la población.

El factor más influyente ha sido la entrada de España en la Unión Europea en el año 1986 puesto que implicó la adopción de nuevas políticas agrarias, incluyendo la Política Agraria Común (PAC).

Entre las medidas más destacables para la agricultura española se encuentran [1]:

- Aumento de inversión en el sector y de subvenciones por parte de la UE que permiten la viabilidad económica del sector, la modernización de las explotaciones agrícolas y la diversificación de cultivos.
- Regulación de precios de los productos para evitar la competencia desleal y conseguir un precio justo para los productores.
- Establecimiento de normas de calidad y seguridad alimentaria lo que ha mejorado la competitividad de la agricultura española en el mercado europeo y mundial.

Además de la PAC, la entrada de España en la UE permitió que aumentaran las exportaciones agrícolas gracias a que desaparecieron barreras de comercio con ciertos países europeos. Todo ello ha llevado a que España sea uno de los principales productores y exportadores de Europa y en ciertos productos, como el aceite o las mandarinas, del mundo.

## 1.1 Planteamiento del problema

A pesar de la relevancia del cultivo para nuestro país, hay zonas en España donde el riego no ha evolucionado desde hace décadas y se continúan utilizando métodos antiguos y poco eficientes con respecto al empleo del agua y al impacto en el suelo. A mayores, cabe destacar que el agua cada vez es un recurso más valioso y cotizado, sobre todo con las sequías que están afectando tan duramente a España en los últimos años, mayormente los dos últimos años hidrológicos (período que comienza el 1 de octubre y finaliza el 30 de septiembre del año posterior), en los que las precipitaciones de 2020-2021 fueron inferiores en un 5% al valor normal (1981-2010) y el 2021-2022 ha sido el tercero con menos precipitaciones desde que se tienen datos, es decir, hace 61 años [2].

Además, según datos del Boletín Hidrológico Semanal de MITERD (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico), la reserva hídrica española era de 26.588 hm<sup>3</sup> el 31 mayo de 2023, lo que supone un 47.4% de su capacidad total (56.069 hm<sup>3</sup>), el cual es un valor muy por debajo de la media de los últimos 5 años donde las reservas se encontraban en un 61.3%, y también muy inferior a los últimos 10 años, donde la media se situaba incluso en un 68%. [3]

Si nos centramos en los embalses de uso consuntivo, es decir, empleados principalmente para el abastecimiento o regadío, estos acumulaban unas reservas de agua embalsada de un 35,5% de su capacidad, valor inferior al 38,2% del año anterior y al 48,3% de la media del último decenio. [4]

En el siguiente gráfico extraído del Informe anual de indicadores agricultura, pesca y alimentación 2021 realizado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación en mayo de 2022, podemos apreciar esta diferencia y la gravedad del problema.

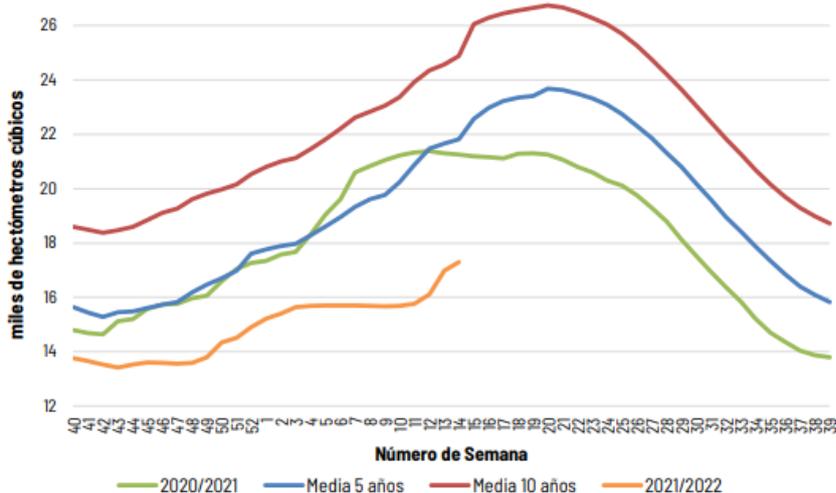


Figura 1.1.1. Reservas de agua embalsada (Fuente: Informe anual indicadores agricultura, pesca y alimentación 2021)

El gráfico refleja la evolución de la reserva de los embalses de uso consuntivo españoles en el año hidrológico. A pesar de que el informe está realizado a mediados del año hidrológico y no disponemos de los datos completos del curso 2021-2022, podemos apreciar que la tendencia del agua embalsada es muy inferior a antaño. (Fig.1.1.1)

Esta falta de agua afecta a unas zonas de la península más que a otras y a pesar de que la provincia de Zamora (provincia donde se realiza el estudio) no es una de las más afectadas, en el sector agrario están sufriendo cortes de agua en plena temporada de riego, lo cual afecta considerablemente al desarrollo de la planta y, por tanto, a la producción de las cosechas.

Y es que el agua se utiliza no solo para el regadío, sino como una fuente de producción energética. De hecho, un 26% (en 2019) [5] de la energía total renovable producida en España proviene del agua.

Es importante también destacar la relevancia del empleo de la energía en la industria agrícola, donde es necesario para el funcionamiento de la maquinaria, la irrigación de agua, la producción de insumos agrícolas, el transporte y procesamiento de alimentos posterior a la cosecha, etc.

Según datos del gobierno, el consumo energético agrario en España es de 2.715 ktep (kilotoneladas equivalentes de petróleo, siendo una tep=11630 kWh) en 2020, habiéndose incrementado un 4,3% con respecto a 2019 y un 8,8% con respecto a la media del

quinquenio 2015-2019. Cabe apuntar que el gobierno expresa en su informe mencionado anteriormente que estos datos no se han visto alterados por la crisis sanitaria del COVID-19. [4]

Todo esto indica que la agricultura debería de buscar una manera de optimizar su rendimiento energético, tanto a nivel de recursos hidráulicos, como en referencia a sus consumos energéticos.

## 1.2 Justificación

El método de riego tradicional preferido por los agricultores para cultivos de regadío es el riego a manta, o riego por surcos con agua procedente de una acequia. Este riego puede ocasionar el uso excesivo de agua o, por el contrario, que la cantidad suministrada no sea suficiente ya que es el agricultor quien lo calcula según su juicio sin ningún sistema de medida. De forma tradicional la gestión del agua se realiza en los horarios habituales acordados, sin tener en cuenta las condiciones del cultivo día a día, es decir, los agricultores de la zona disponen de unos turnos de riego en los que disponen del agua común. Esto conlleva que los agricultores utilicen más agua de la necesaria mientras pueden hacer uso de ella para asegurarse de que la planta tiene suficiente debido a que pasan varios días hasta que pueden volver a regar las fincas. Además, existen otros problemas asociados a esta práctica, como que se aprecia un gran impacto ambiental debido al arrastre de los fertilizantes y herbicidas por el riego a manta que penetran en el subsuelo, contaminando los acuíferos, o que el suelo se desprenda por erosión.

Por todo esto, se busca emplear un método para administrar correctamente el agua de manera sostenible. Esto se puede conseguir con un autómata programable que controle una red de suministro por aspersión de agua a un cultivo, administrando las horas de riego y dividiendo la parcela en sectores. Dicha sectorización permite una mejor administración del caudal y la utilización de una bomba de inferior potencia para suministrarlo, lo que supone una ventaja a raíz de que emplearemos una instalación fotovoltaica como alimentación eléctrica de la red de riego, por lo tanto, esto hará que necesitemos un kit solar más pequeño y barato.

### 1.3 Objetivo general del estudio

El principal objetivo de este estudio es la búsqueda de un sistema de riego por aspersión en el que se plantee la utilización de un sistema automatizado con un Controlador Lógico Programable (PLC) alimentado por placas solares, como sustitución a un riego por surcos. Se describirán ambos sistemas y la viabilidad de ambos hacia un entorno agrícola más moderno, sostenible y eficiente.

#### 1.3.1 Objetivos específicos

- Automatizar una red de riego con un controlador lógico programable que permita dividir la parcela en diferentes sectores para un control del agua empleada más preciso.
- Diseñar una alimentación adecuada para el sistema de riego a través de placas solares, de forma que se reduzca el impacto en el medioambiente.
- Estudiar la viabilidad de este sistema y la mejora que supondría para el entorno con respecto al sistema ya utilizado en la parcela.

## 2. CONTEXTO

### 2.1. Localización del estudio

El estudio se realizará en una finca perteneciente al término municipal de Castrogonzalo, Zamora. En líneas generales, es una finca utilizada para el cultivo de maíz en regadío, con una superficie de 1,55 hectáreas y una pendiente de 0.7%.

Su número de parcela es el 191 y su referencia catastral es: 49046A002001910000KS [6].

En estas imágenes se aprecia que está situada en el noroeste de Castrogonzalo:

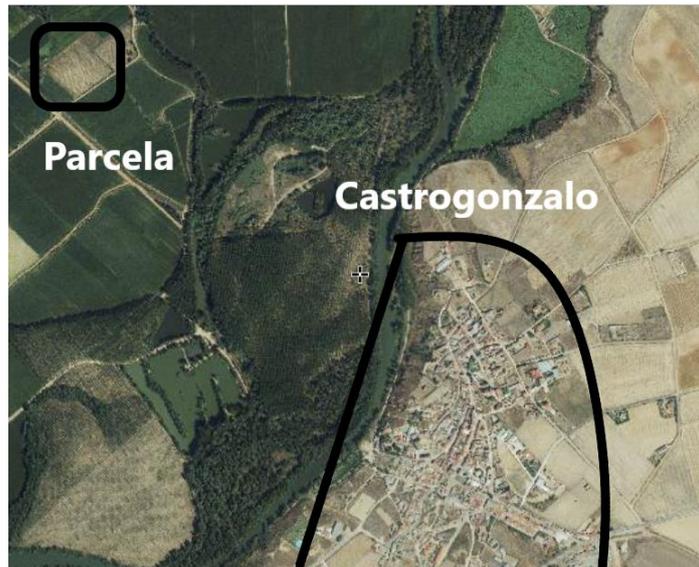


Figura 2.1.1. Localización de la parcela. (Fuente: Elaboración propia)

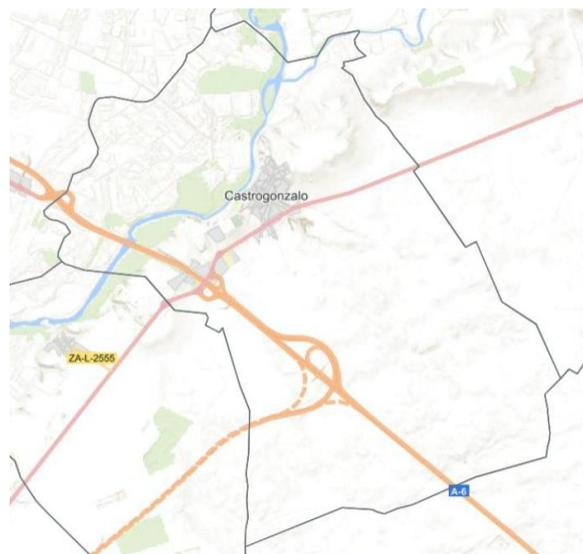
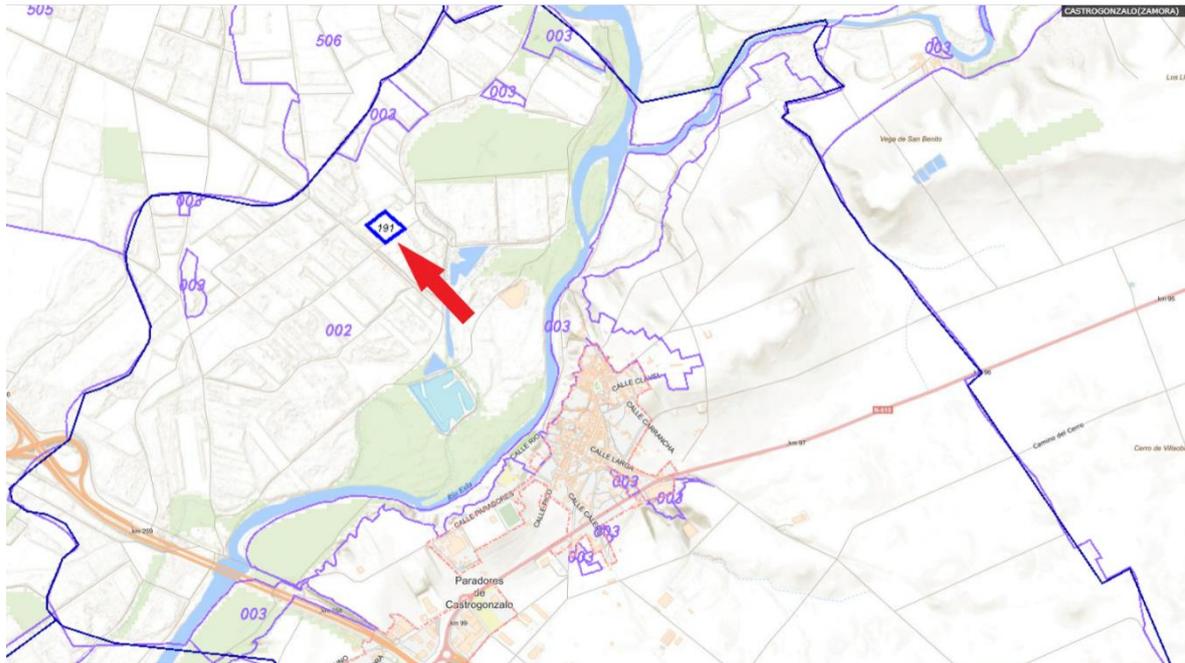


Figura 2.1.2. Término municipal de Castrogonzalo. (Fuente: Sede Electrónica del Catastro)



*Figura 2.1.3. Ubicación según catastro de la finca. (Fuente: (Sede Electrónica del Catastro))*

Su elección se debe a los siguientes factores:

- Dispone de una acequia paralela a la parcela la cual es normalmente utilizada para el riego por surcos y de un pozo que abastecerá el agua para la red de aspersión. Esto permite comparar ambos métodos en el mismo campo de aplicación.
- La finca tiene un tamaño estándar (1,55 hectáreas) y forma cuadrada. Al no estar centrado en una finca con una extensión o forma peculiares, el estudio se podría fácilmente externalizar a otras fincas similares.
- La finca tiene un recinto colindante de tamaño más reducido que podría ser utilizado para el montaje de la red fotovoltaica.
- La finca es cercana al lugar de residencia de la persona que realiza este estudio, lo cual favorece la obtención de datos y comprobación de ciertas características de la parcela.
- El coeficiente de regadío de la finca es de 100%. [6]
- La forma cuadrada de la finca y su superficie permiten una división sencilla de la red de aspersión en tramos pequeños que brindan la posibilidad de realizar una

programación simple y emplear una bomba de poca potencia, la cual, por tanto, necesitará una menor instalación fotovoltaica para ponerse en marcha.

El terreno en cuestión es el siguiente:

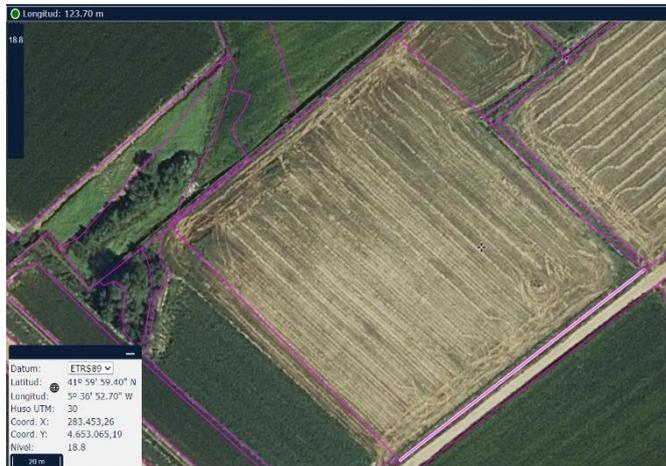


*Figura 2.1.4. Imagen del visor SigPac de las fincas del estudio. (Fuente: SigPac)*

La flecha superior indica el terreno donde serían montados los paneles solares de la instalación fotovoltaica mientras que la flecha inferior indica la zona de cultivo. Las líneas moradas delimitan los bordes de las parcelas y recintos y están establecidos por el visor SigPac del Gobierno de España.

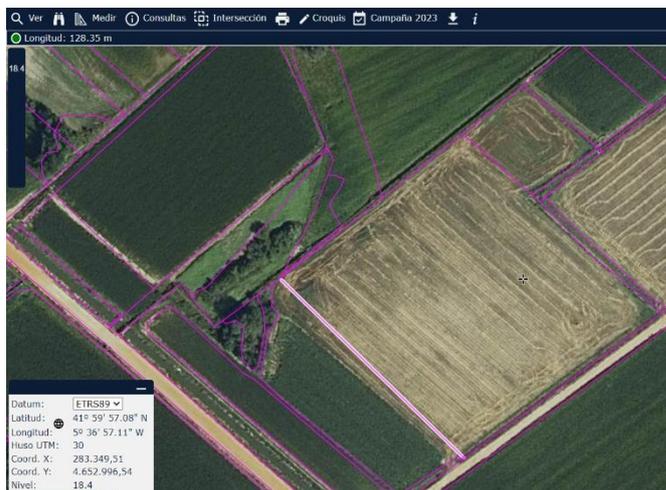
Es importante recalcar que la superficie aprovechable para el cultivo es de 1,42 hectáreas en la parcela principal y que el recinto empleado para la generación de energía eléctrica tiene una superficie de 1846,86 m<sup>2</sup>. [6]

-Medidas de la parcela principal:



Esta imagen representa el ancho de la parcela, en la esquina izquierda superior el visor Sig Pac indica que la distancia es aproximadamente 123 metros.

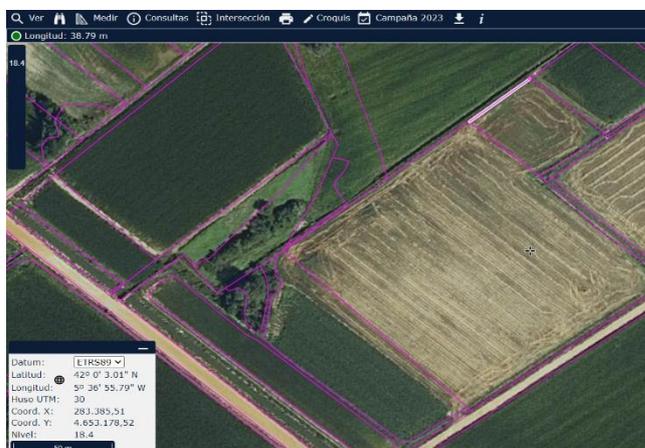
Figura 2.1.5. Ancho de la parcela. (Fuente: Visor SigPac)



Por otro lado, esta imagen representa el largo de la parcela, el cual es de 128 metros. Al ser la parcela casi cuadrada, las medidas de los lados restantes son aproximadamente las mismas que las aquí representadas.

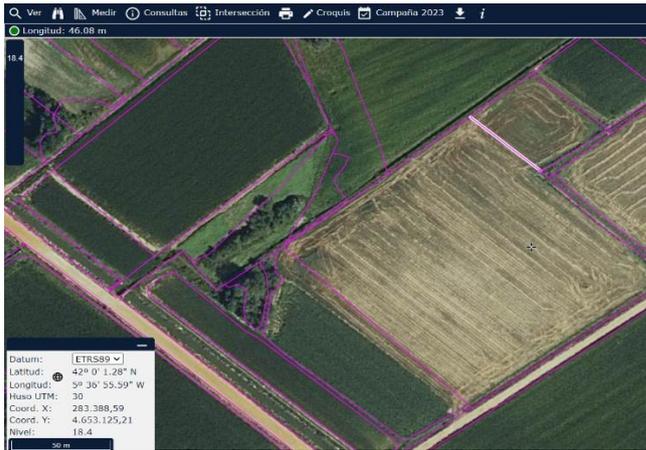
Figura 2.1.6. Largo de la parcela. (Fuente: Visor SigPac)

-Medidas de la parcela secundaria:



Al igual que en las imágenes previas, en esta se indica en la esquina superior izquierda que el recinto secundario tiene un ancho de aproximadamente 39 metros.

Figura 2.1.7. Ancho parcela secundaria. (Fuente: Visor SigPac)



En cuanto al largo, mide 46 metros.

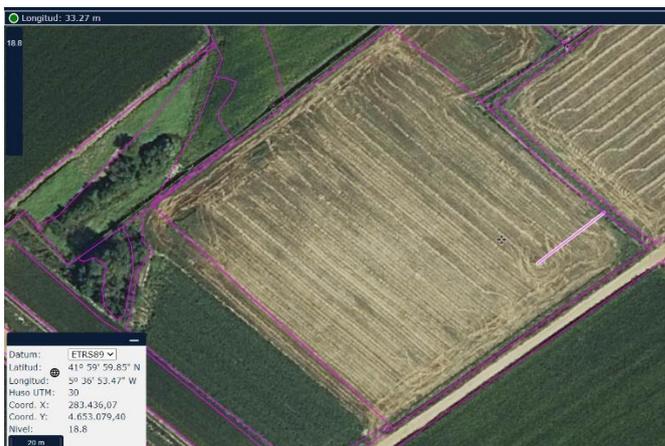
Figura 2.1.8. Largo parcela secundaria. (Fuente: Visor SigPac)

-Ubicación del pozo:



En el círculo negro se aprecia un pequeño punto negro. Dicho punto es el pozo.

Figura 2.1.9. Ubicación del pozo. (Fuente: Visor SigPac)



La distancia del pozo al borde derecho de la parcela es de 33 metros aproximadamente.

Figura 2.1.10. Distancia pozo-borde derecho. (Fuente: Visor SigPac)



La longitud del pozo al borde inferior de la parcela son aproximadamente 21 metros.

Figura 2.1.11. Distancia pozo-borde inferior. (Fuente: Visor SigPac)

## 2.2. Características generales del suelo

El tipo de suelo presente en la comarca de Benavente y los Valles aparece representado en el siguiente mapa:

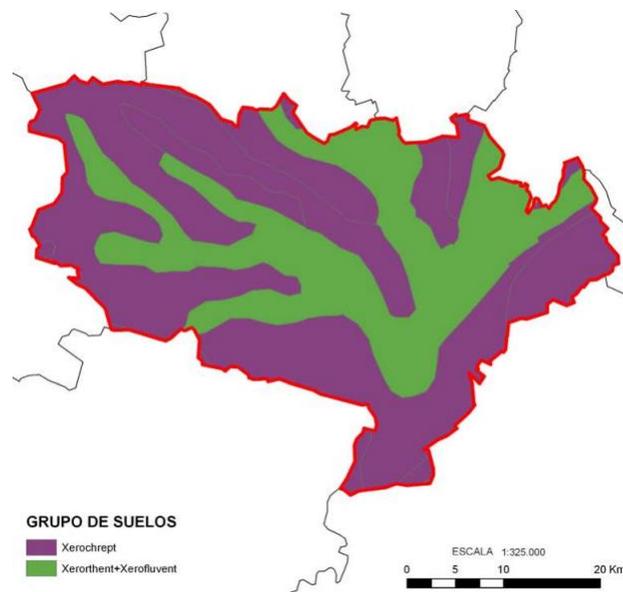


Figura 2.2.1. Mapa tipos de suelo en la comarca. (Fuente: Caracterización comarcas agrarias de Zamora)

Este mapa está diseñado en función de la Taxonomía edafológica del USDA-NRCS (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), y en él se muestra que los dos tipos

Yerai De Anta Casquero

de suelo más presentes en la comarca son el Xerochrept, que cubre un 63% de la superficie, y el Xerorthent junto al Xerorfluent, que representan la superficie restante (37%). [7]

El siguiente mapa ilustra la situación geográfica de los municipios de la comarca de Benavente y los Valles en función de su código INE:



Figura 2.2.2. Mapa términos municipales. (Fuente: Caracterización comarcas agrarias de Zamora)

El código INE de Castrogonzalo es 49041, por lo que se puede comprobar que Castrogonzalo tiene un tipo de suelo Xerochrept observando el mapa anterior.

Estos suelos son suelos profundos de entre 100 y 150 cm que presentan poca materia orgánica, una textura franco-arenosa y un pH ligeramente ácido. [7]

En cuanto a la erosión que sufre el suelo de Castrogonzalo, el gobierno recogió los datos que aparecen en la siguiente tabla:

Superficie erosionable		Pérdidas de suelo		Pérdidas medias (t/(ha*año))
Ha	%	t/año	%	
2378,61	0,23	1882,75	0,05	0,79

Tabla 2.2.1. Erosión de suelo. (Fuente: Inventario nacional erosión de suelos, Zamora)

### 2.3. Parámetros climatológicos de la zona

El terreno está ubicado en la provincia de Zamora, concretamente en la comarca de Benavente y los Valles. En ella, el periodo frío tiene una duración de 8 meses (número de meses donde la temperatura media de las mínimas es menor a 7°C) mientras que el periodo cálido, es decir, el número de meses con una media de máximas superior a 30°C, toma valores entre 0 y 1 mes. Por otro lado, el periodo seco o árido, referido a los meses donde hay déficit hídrico (la diferencia entre evapotranspiración potencial, ETP, y la real tiene valores negativos), dura meses. [7].

En concreto, el término municipal de Castrogonzalo, presenta un clima de tipo Mediterráneo templado [7]. Dicho clima se caracteriza por tener inviernos suaves, veranos secos, y primaveras y otoños lluviosos [8].

A 7 kilómetros de Castrogonzalo se encuentra Benavente, un municipio de más población que posee una estación de recogida de datos de AEMET, que permiten hacer una estimación del clima en Castrogonzalo debido a su cercanía.

El resumen de los datos climatológicos de Castrogonzalo y Benavente se recoge en la siguiente tabla:

Castrogonzalo					
Altitud (m)	Precipitación anual (mm)	Temperatura mínima media (°C)*	Temperatura media (°C)	Temperatura máxima media (°C)**	ETP anual (mm) (3)
725	307.1	6.3	11,75	17.83	681
Benavente					
Altitud (m)	Precipitación anual (mm)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura media (°C)	Temperatura máxima (°C)	Horas de sol en verano (junio, julio y agosto)
744	378	-7,1	13,1	37,9	282+350+350=982

\*Media de las temperaturas mínimas de los 12 meses del año

\*\*Media de las temperaturas máximas de los 12 meses del año

*Tabla 2.3.1. Resumen datos climatológicos Castrogonzalo-Benavente. (Fuente: Weatherspark)*

Los datos de Castrogonzalo pertenecen a un estudio realizado en 2013 pero no se han podido encontrar datos más actualizados debido a que no hay una estación meteorológica en el municipio.

Las siglas ETP hacen referencia al término evapotranspiración potencial. Este concepto se puede definir como el máximo de pérdidas de agua que se deben a la suma de la transpiración de las plantas y a la evaporación de agua desde el suelo, en una superficie cubierta de vegetación y con suficiente irrigación. [9]

Comparando los datos de ambos lugares se puede observar que con el paso del tiempo las temperaturas han pasado a ser más extremas y las precipitaciones han disminuido considerablemente.

## 2.4. Tipo de cultivo

El producto mayoritariamente cultivado en la ubicación que concierne a este estudio es el maíz. Esta planta es una de las más producidas a nivel mundial debido a que es la base de muchos alimentos de consumo diario.

Hay muchos tipos de plantas de maíz, siendo las variedades principales:

- Maíz duro: Granos redondeados y duros. Utilizado principalmente para hacer fécula de maíz o para alimentación animal.
- Maíz reventón: Utilizado en las palomitas ya que cuando se somete a altas temperaturas el grano explota. Sus granos son redondos de pequeño tamaño.
- Maíz dentado: Su nombre proviene de que tiene forma de diente. Se emplea en el ensilaje, método a través del cual se utiliza maíz para conservar el forraje del ganado.
- Maíz harinoso: Principalmente usado para la alimentación humana. Se caracteriza por tener un alto contenido de almidón blanco.
- Maíz ceroso: El cultivo de este tipo de maíz es especialmente local y limitado. Debido a la composición de su almidón es gomoso.

- Maíz opaco-2 o MPC (Maíz con proteínas de calidad): Se trata de un maíz que tiene un mejor rendimiento gracias a que posee genes modificados a través de una serie de cruzamientos.
- Maíz dulce: Se caracteriza por tener un gen recesivo que hace que algunos azúcares solubles no se conviertan en almidón, por lo que contiene un gran porcentaje de azúcar con respecto a otras variedades de maíz. Sin embargo, se trata de un tipo de maíz de muy bajo rendimiento por lo que es poco cultivado.
- Maíz baby: Utilizado en hortalizas y cosechado en etapas tempranas.
- Maíz transgénico: En Europa sólo se permite cultivar la variedad MON 810, comercializada por Monsanto. Se distingue de las demás por poseer un gen procedente de la bacteria *Bacillus thuringiensis* que le hace más resistente respecto al taladro del maíz.

España es el principal productor de maíz transgénico, cosechando más del 90% del total europeo. [10]

La producción del maíz está principalmente determinada por el tipo de suelo, el agua abastecida y la fertilización de la planta.

Los suelos deben ser no salinos, de más de un metro de profundidad, que no se encharquen pero que puedan retener una elevada cantidad de agua y que dispongan de altos niveles de materia orgánica, fósforo y potasio. La necesidad de un suelo fértil se ve reflejada en que el maíz extrae por cada tonelada de grano:

- 23 kg de nitrógeno.
- 10 kg de fósforo.
- 22 kg de potasio.

Estos elementos son suministrados principalmente por las reservas del suelo, los restos de cosechas anteriores, el agua de riego y los abonos. [11]

En cuanto al riego, es recomendable tratar de optimizar cada sistema buscando lograr la mayor eficiencia posible. Para ello hay que distinguir entre los diferentes tipos:

- Sistemas en los que se puede aplicar nitrógeno a través del sistema de riego, como por ejemplo en aspersión, pívot o cobertura total. En estos sistemas conviene aplicar el elemento en las etapas más próximas a la floración del cultivo
- En riego por inundación (suelos poco profundos y con grava) se recomienda emplear caudales elevados ya que de esta manera los tiempos de riego serán más cortos y el agua se distribuirá de manera homogénea en la parcela. [11]

Con respecto al riego es importante apuntar que la etapa del crecimiento en la que la planta tiene una necesidad hídrica más crucial es la fase de floración y granado temprano (60-95 días después de la siembra). Durante esta etapa es recomendable que la humedad del suelo no permanezca en punto de marchitamiento durante 1 o 2 días, o 6 o 8 días, puesto que la producción puede verse reducida en un 20% o 50% respectivamente.

Durante la fase de floración también hay que tener mucho cuidado con el exceso de riego ya que puede causar problemas graves y provocar que la producción disminuya incluso un 50%. [12]

### 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO PROPUESTO

El objetivo del estudio es diseñar un riego sostenible que ahorre recursos hídricos y energéticos.

Para ello se va a utilizar una finca de ejemplo que sirva de prototipo de sistema eficaz que consiga una producción respetuosa con el medioambiente. Este sistema debe repartir el agua de manera que se aprovechen los recursos hídricos y se aporte la cantidad de agua adecuada para el correcto crecimiento de las plantas. Para alimentarlo se empleará un kit fotovoltaico que aporte la electricidad sin perjudicar el entorno. A mayores, se utilizará un programador conectado a unas electroválvulas para regar la parcela por sectores y con una programación horaria. Esto permite dedicar el tiempo de riego exacto necesario a cada planta, reducir su estrés por calor al regar en el momento más caluroso del día, y aprovechar las mejores horas de producción solar.

### 3.1. Bombeo solar

El bombeo solar fotovoltaico consiste en un sistema autónomo de irrigación de agua que se alimenta, como su propio nombre indica, a través de la energía eléctrica capturada a través de un conjunto de placas solares. Sus aplicaciones más comunes son el riego agrícola en zonas remotas, el bombeo de agua de un pozo o embalse a una balsa o depósito, y el abastecimiento de agua potable. Los principales elementos que participan en él son:

#### 3.1.1. Generador fotovoltaico

Conjunto de paneles solares que son capaces de transformar la luz solar en una corriente continua de electricidad que se almacena en baterías, se emplea en equipos eléctricos o se redirige a la red eléctrica.

Su funcionamiento consiste en que las células fotovoltaicas del panel reciben luz solar, éstas absorben su energía lumínica y la transforman en energía eléctrica gracias a una combinación del efecto fotoeléctrico y una unión p-n. Dichas células emiten un flujo de electrones que recorren el metal de la célula (debido al efecto de la unión p-n) creando una corriente eléctrica. [13]

#### 3.1.2. Inversor

Es un equipo electrónico capaz de transformar la corriente continua (CC) procedente de los paneles solares y de las baterías a corriente alterna (CA). Se encargará de que esta energía sea útil para el consumo diario, además de optimizar la producción fotovoltaica.

Hay varias categorías de inversores dependiendo de si la instalación está aislada de la red o conectada a la red. Se exponen a continuación los tipos de inversores de sistemas aislados, como es el caso de este estudio:

- Inversores cargadores: A mayores de la energía eléctrica procedente de las placas solares, los inversores pueden regular la carga y descarga de las baterías

dependiendo de las necesidades de la instalación. Además, algunos modelos permiten conectar un generador de combustible para cuando las baterías y los paneles no satisfacen la demanda de potencia de los equipos eléctricos.

- Inversores híbridos: Son similares a los anteriores, pero a mayores incluyen la posibilidad de regular la electricidad procedente de la red eléctrica y enviar a través de ella el excedente generado por las placas, es decir, sirven tanto para sistemas conectados a la red como aislados de ella.

### 3.1.3. Baterías

Son acumuladores eléctricos que almacenan la energía que produce un generador fotovoltaico con el objetivo de reutilizar esta energía eléctrica cuando el consumo de la instalación es mayor que la generación de los paneles como, por ejemplo, en días nublados o durante la noche.

La carga de la batería se produce cuando los módulos fotovoltaicos producen más energía de la demandada por la instalación. Esta administración de la energía la realiza un regulador de carga o un inversor diseñado con esta función.

Las baterías almacenan la electricidad mediante la utilización de energía química por lo que cuando el producto químico se debilita, la batería pierde eficacia. Para evitarlo, se recomienda no descargarlas completamente.

Se trata de uno de los elementos más caros de la instalación y por eso son mayormente utilizadas en sistemas aislados. En los sistemas conectados a la red, el excedente de energía generada por los paneles puede ser vendida a una empresa eléctrica a cambio de bonificaciones en la tarifa de la luz.

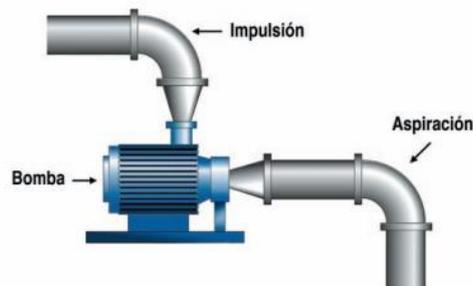
Los principales tipos de baterías son: Monoblock, Absortion Glass Mat (AGM), litio, Estacionarias, gel. [14]

### 3.1.4. Variador de frecuencia

Es un dispositivo que tiene la función de adaptar la velocidad y frecuencia de un motor eléctrico según la potencia que recibe en cada momento concreto. Hay variadores de frecuencia adaptados a las instalaciones fotovoltaicas que funcionan como inversores, es decir, transforman la corriente continua en alterna. Esto contribuye a la mejora de la eficiencia energética y a la disminución de costes de instalación y mantenimiento, ya que permiten evitar la utilización del inversor.

### 3.1.5. Bomba de agua

Elemento que suministra un determinado caudal de agua a la presión necesaria para que la instalación funcione correctamente. Estas bombas pueden ser accionadas por motores eléctricos o motores de combustión interna y actúan en dos fases: aspiración e impulsión:



*Figura 3.1.5.1. Bomba de agua. (Fuente: Riego por aspersión, Junta de Andalucía)*

Las utilizadas normalmente en agricultura son las turbomáquinas, bombas en las que el agua es impulsada a través de un rodete o impulsor, formado por palas, que gira a gran velocidad.

En función del eje de la bomba encontramos dos tipos:

- Eje horizontal: Se colocan en la superficie y elevan el agua de pozos o balsas poco profundos en los que la altura de aspiración no sea superior a 7 metros.

- Eje vertical: Se ubican sumergidas bajo el agua y su función es bombearla en pozos profundos y estrechos. [15]



*Figura 3.1.5.2. Bomba eje horizontal (Fuente: Riego por aspersión, Junta de Andalucía)*



*Figura 3.1.5.3. Bomba eje vertical. (Fuente: Riego por aspersión, Junta de Andalucía)*

## 3.2. Controladores lógicos programables (PLC)

Los PLC son controladores industriales que gestionan en tiempo real todo tipo de entradas y salidas (analógicas, binarias y digitales) con el objetivo de dar instrucciones a otros equipos que llevan a cabo un proceso industrial determinado. Estos dispositivos pueden llegar a estar formados por varios componentes como [16]:

- CPU: Unidad de procesamiento central que almacena el programa, analiza las entradas y toma decisiones en función de ellas. Es indispensable.

- Módulo de entradas y salidas: Permite conectar los elementos de la instalación (sensores, contactos, motores, etc.) al controlador.
- Fuente de alimentación del PLC.
- Módulo de memoria: En él se almacena el software del programa del PLC.
- HMI: Interfaz entre la máquina y el hombre donde este puede realizar cambios en el programa.
- Regulador PID.
- Procesador de la comunicación: Sirve para conectar una red de trabajo con el PLC, como, por ejemplo, PROFIBUS.

Funcionan de manera cíclica siguiendo estos pasos [16]:

- Al principio del ciclo se realizan tareas automáticas de mantenimiento del PLC como diagnósticos o controles de memoria.
- Posteriormente, se procede a actualizar los valores de las entradas, leyéndolos y convirtiéndolos en señales binarias o digitales.
- Acto seguido, la CPU ejecuta el programa de manera secuencial, es decir cada instrucción individualmente, y se generan señales de salida actualizadas.
- Por último, se actualizan las salidas convirtiéndolas de nuevo al tipo de señal apropiada para los actuadores. Tras esto, se comienza un ciclo nuevo.

### 3.2.1. Tipos de PLCs

- Compactos: Incorporan CPU, PS y módulo de entradas y salidas en una misma unidad. A veces incluyen también una fuente de alimentación. Se suelen utilizar en automoción como sustitución a los relés.
- Modulares: La CPU y los módulos vienen separados pero comunicados a través de un sistema bus. Son más potentes, procesan programas más pesados, almacenan más datos y tienen la opción de trabajar multitarea. Algunos de sus principales usos son control, posicionamiento, procesamiento de datos o monitorización.

- PLC de tipo montaje en rack: Tienen características muy similares a los modulares, pero, el rack donde se colocan dispone de un sistema de bus integrado para intercambiar información entre módulos. Su distribución se puede apreciar en la imagen:



*Figura 3.2.1. PLC en rack. (Fuente: Google Imágenes)*

- PLC con panel operador (OPLC): Integran una interfaz HMI (monitor con teclado o pantalla táctil) que permite al operario o programador realizar cambios en el funcionamiento del programa o en las variables del proceso. Esto ahorra costes en el desarrollo del sistema y lo hace más intuitivo. [16]

### 3.2.2. Arquitectura maestro-esclavo

El sistema de comunicación que utilizan los PLC en las industrias es el maestro-esclavo. Como se puede deducir de su denominación, este sistema consiste en un equipo maestro que indica las órdenes a una serie de equipos esclavos que las ejecutan, como se puede observar en el siguiente diagrama de una configuración de esta arquitectura [16]:



*Figura 3.2.2.1. Arquitectura maestro-esclavo. (Fuente: Controladores lógicos programables UNED)*

### 3.3. Tipos de cultivo de regadío más comunes en la zona

Los principales cultivos de regadío que podemos encontrar son los siguientes [17]:

- Maíz: El más común en la zona. Sus características principales son indicadas más adelante.
- Alfalfa: Cultivo perenne que fija el nitrógeno en el suelo y actúa como fuente de alimentación para otros seres vivos.
- Patatas: Planta que produce un sistema radicular fibroso con raíces poco profundas que se benefician de forma dificultosa de los nutrientes y humedad de las profundidades.
- Girasol: Cultivo cada vez más frecuente por su alta rentabilidad debido a la gran adaptabilidad climatológica y buen rendimiento que presenta.

- Trigo: Es un cultivo mayoritario por su elevada relevancia en la alimentación de los seres humanos. Es poco exigente en cuanto a riegos, en cambio requiere un mínimo de 8 horas de luz solar diarias para desarrollarse.
- Cebada: Su terreno ideal para el cultivo es el calizo. Se adapta con facilidad a las condiciones climatológicas, tolerando bien la salinidad en exceso. Presenta dificultades para desarrollarse en suelos arcillosos con mucha humedad.

### 3.4. Sistemas de riego

Dentro de los sistemas de riego utilizados comúnmente, se distinguen varios tipos según sus características:

- Riego superficial: Las distintas variedades de sistemas de regadío incluidas en los métodos por superficie, comparten la característica de que el agua es aplicada en la superficie del terreno y se distribuye a lo largo de la finca gracias a la acción de la gravedad. Los principales riegos superficiales son:

- Riego por inundación

En este sistema la superficie del terreno se cubre completamente con agua. Las parcelas en las que se emplea este método no tienen prácticamente desnivel y el agua comúnmente procede de una acequia cuyo abastecimiento se corta antes de que el agua haya avanzado hasta el final de la parcela para no emplear más agua de la necesaria. Según la pericia del agricultor para cortar el agua justo cuando observa que se ha suministrado la suficiente de manera que en el instante que esta acabe de avanzar llegue a cubrir toda la finca, se derrochará más o menos agua [18]. Por tanto, no se trata de un método muy eficaz en el ahorro de agua.



*Figura 3.4.1. Riego por inundación. (Fuente: Google Imágenes)*

- Riego por escurrimiento

Este método es empleado en las parcelas que tienen un elevado desnivel y consiste en instalar un tubo con orificios de forma que cuando el agua llegue al tubo, esta sea distribuida a lo largo de la finca al salir por cada orificio.

El agua se desplaza a lo largo del terreno por la acción de la gravedad como en los demás riegos superficiales.

Este método puede estar combinado con el método por surcos y hacer que cada orificio coincida con un surco o puede utilizarse para inundar la parcela de manera equitativa como se puede apreciar en las siguientes imágenes:



*Figura 3.4.2. Riego por escurrimiento que inunda la parcela mediante una tubería de PVC con orificios. (Fuente: Hojas divulgadoras)*



*Figura 3.4.3. Riego por escurrimiento con los orificios abasteciendo a cada surco respectivamente. (Fuente: Google Imágenes)*

Cabe destacar que este método puede incluir un desagüe al final de la parcela para redirigir el agua sobrante.

- Riego por surcos

En este método, la superficie del suelo está ondulada formando canales en los que circula el agua por separado. Sobre estas ondulaciones de la tierra florecen las plantas, lo cual es una ventaja para los cultivos a los que les afectan los encharcamientos ya que al no cubrirse de agua en la base corren menos peligro de tener problemas de aireación. [18]

Los surcos pueden estar hechos por el agricultor de diferentes formas dependiendo de las características de la parcela [19]:

- Surcos rectos: Terrenos de relieve uniforme.
- Surcos en contorno: En los relieves ondulados los surcos siguen caminos que se aproximan a las curvas de nivel.
- Surcos en zigzag: Utilizado si se desea aumentar la longitud de los surcos considerablemente.

El riego por surcos es muy versátil ya que se puede adaptar a la mayoría de los tipos de suelos, a parcelas con una pendiente elevada distribuyendo los

surcos por contorno y requiere un bajo costo de instalación [19]. Además de esto, es fácil de adaptar el caudal disponible a las dimensiones de la tierra regándola por tramos mediante el empleo de elementos que taponen la salida del agua a ciertos surcos. De esta manera, los agricultores regulan los surcos que se riegan simultáneamente.

- Riego por aspersión

En este método el agua es rociada sobre las plantas a través de una red de riego que conduce el agua con la presión adecuada para que los aspersores la distribuyan en forma de lluvia correctamente.

Se busca que el agua se infiltre en el suelo en el punto en el que cae para que quede a disposición del cultivo evitando la escorrentía. [15]

Hay diferentes tipos de aspersión:

○ Sistemas portátiles o cañones

Se trata de aspersores que disponen de ruedas para ser transportados por la finca y así regar solo las zonas deseadas. Son más grandes, soportan más caudal y presión y abarcan un perímetro más grande que los comunes. [19]



*Figura 3.4.4. Cañón de riego. (Fuente: Google Imágenes)*

○ Sistemas semiportátiles o pivots

La bomba se mantiene en un sitio fijo pero los aspersores y las tuberías no. Se denominan así porque giran o pivotan sobre un punto central, abarcando grandes zonas circulares en los terrenos. Tiene una alta eficiencia en el riego y se puede utilizar para fertilizantes líquidos. [19]



*Figura 3.4.5. Pívor de riego. (Fuente: Google Imágenes)*

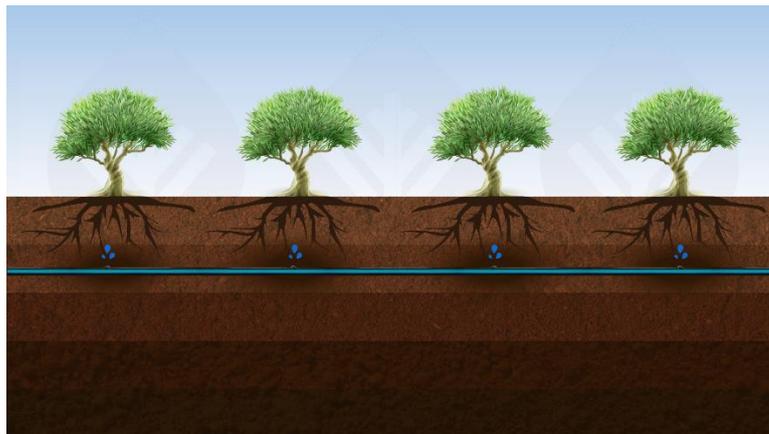
- Sistemas fijos: Son los más empleados. En ellos, tanto la unidad de bombeo como las tuberías y aspersores permanecen en el mismo sitio. Pueden ser superficiales (hay que montarlos en cada campaña de riego ya que se deben desinstalar para arar y sembrar las tierras) o subterráneos (no hay que desmontarlos, pero la instalación es considerablemente más costosa).
  
- Riego por goteo  
Sistema basado en aplicar bajos volúmenes de agua en forma de gotas justo en la zona donde al infiltrarse la planta puede extraerlas. Esta aplicación del agua se hace gracias a mangueras o tubos con pequeños orificios colocados a la altura de las plantas de manera que cada gota se suministra sin pérdidas por evaporación o escurrimiento.  
Sus principales ventajas son el aprovechamiento del agua, la posibilidad de aplicar fertilizantes líquidos con el agua de riego, la menor infestación de malezas y el ahorro de mano de obra.



*Figura 3.4.6. Riego por goteo. (Fuente: Google Imágenes)*

- Riego subsuperficial

Sistema de riego que consiste en una red de tuberías enterradas las cuales disponen de orificios abiertos dirigidos hacia las raíces de las plantas. De esta manera, la eficacia del uso del agua es muy elevada debido a que el agua no se evapora o se emplea en zonas donde no sea aprovechada como en otros sistemas de riego.



*Figura 3.4.7. Riego subsuperficial. (Fuente: Risiberia)*

### 3.5. Sistema de riego escogido

Se han estudiado las tres opciones más viables para sustituir al riego por surcos:

- Riego subsuperficial: Tiene una gran eficiencia en el uso del agua y también previene las enfermedades foliares. Sin embargo, no se ha escogido para el cultivo de esta finca porque la instalación es muy costosa y el maíz es un cultivo cuyas raíces crecen rápido, por lo que se corre el riesgo de que los goteros sean obstruidos por ellas.

Esto conlleva un grave problema ya que al ser subterránea la instalación tiene un difícil y caro mantenimiento.

- Riego por goteo: Es eficiente en el uso de agua, previene enfermedades foliares al no mojar las hojas de la planta y es fácil de programar y automatizar. Es útil en el riego para plantas de maíz, pero se ha considerado más apropiado el riego por aspersión por los motivos presentados a continuación.
- Riego por aspersión: Menos eficiente en el uso de agua y con posibilidad de provocar enfermedades foliares ya que al rociar agua sobre las plantas, las hojas se mojan y son más propensas a ello. Aun así, presenta una serie de ventajas que lo hacen el sistema de riego óptimo para este terreno [15]:
  - Cobertura uniforme: El riego por aspersión cubre toda la superficie de la parcela a diferencia de los riegos por goteo y subsuperficial. Como las raíces del maíz se extienden ampliamente, se pueden beneficiar de esta característica.
  - Se adapta a la mayoría de los tipos de suelo, incluidos los arenosos ya que se pueden realizar riegos cortos y frecuentes. Esto nos asegura que el suelo de la parcela no va a ser dañado.
  - Permite una gran flexibilidad en los riegos, pudiéndolos ajustar con simpleza a las necesidades de las plantas dependiendo de la fase del crecimiento en la que se encuentren.
  - Al igual que en los sistemas anteriores, permite la aplicación de fertilizantes junto con el agua del riego.
  - Reduce el estrés por el calor gracias a que rocía el agua sobre las plantas y las enfría. Esto es muy importante en la parcela estudiada debido a que la ubicación en la que se encuentra presenta veranos muy calurosos.
  - Se puede adaptar a la rotación con otros cultivos siempre y cuando la instalación esté diseñada para ser utilizada en el cultivo con mayores necesidades hídricas.
  - Al igual que el riego por goteo, tiene una automatización y programación sencillas.

A mayores de todas estas consideraciones, se ha consultado a agricultores locales y han recomendado el riego por aspersión.

En la siguiente tabla se resumen las características de estos sistemas de riego, puntuando cada aspecto del riego (según el nivel de importancia) para comprobar que el riego por aspersión es el más favorable:

Aspectos más relevantes a tener en cuenta en un sistema de riego	Métodos de riego		
	<u>Riego subsuperficial</u>	<u>Riego por goteo</u>	<u>Riego por aspersión</u>
Uso de agua	Muy eficiente (3 pts.)	Bastante eficiente (2 pts.)	Eficiente pero no tanto (1 pto.)
Enfermedades foliares	Son prevenidas (2 pts.)	Son prevenidas (2 pts.)	Son provocadas (0 pts.)
Aplicación de fertilizantes con el agua del riego	Es posible (1 pto.)	Es posible (1 pto.)	Es posible (1 pto.)
Cobertura uniforme	No (0 pts.)	No (0 pts.)	Sí (2 pts.)
Estrés por calor	Sí (-1 pto.)	Sí (-1 pto.)	No (1 pto.)
Otras ventajas	-	Fácil automatización (3 pts.)	-Fácil automatización -Adaptación a tipos de suelo -Flexibilidad en turnos de riego y en rotación de cultivos -Recomendación agricultores (6 pts.)
Otras desventajas	-Obstrucción de goteros -Coste elevado (- 3 pts)	-	Coste elevado (-2 pts.)
Puntos totales	2 puntos	7 puntos	9 puntos

Tabla 3.5.1. Comparativa métodos de riego. (Fuente: Elaboración propia)

Por otra parte, para alimentar una bomba eléctrica que irrigue el agua por el sistema de aspersión, se pueden utilizar diferentes métodos:

- Conectar la bomba a la red: Imposible en la ubicación seleccionada debido a que no hay tomas de red disponibles.

- Conectar la bomba a un grupo electrógeno: No utilizado debido a que se pretende utilizar un sistema lo más respetuoso posible con el medioambiente.
- Utilizar un sistema de bombeo solar: Se empleará este método ya que permite abastecer la bomba con energía fotovoltaica de manera que no se contamine el entorno. Además, la red de aspersión se programará a través de un PLC de forma que se vaya regando por sectores. Así, la potencia de la bomba será menor y por tanto el kit solar necesario para suministrarle electricidad también.

En resumen, la irrigación del cultivo se realizará a través de una red de aspersión alimentada con energía fotovoltaica y dividida en sectores para optimizar el consumo de recursos.

### 3.6. Diseño de la red hidráulica

La red de aspersión está formada por:

- Tubería de aspiración que extrae el agua del pozo y la conduce a la bomba.
- Bomba que suministra el agua de riego a la tubería primaria.
- Tubería primaria que cubre la parcela a lo ancho y alimenta a las secundarias.
- Tuberías secundarias paralelas entre sí que abastecen a los tubos porta-aspersores.
- Tubos porta-aspersores conectados a los aspersores.
- Aspersores que rocían el agua sobre las plantas.
- Electroválvulas que regulan el paso del agua para sectorizar la parcela.
- Piezas que permiten la correcta unión de las tuberías como "T" y codos.

Para dimensionar los elementos de la red, es necesario primero conocer cómo será dividida la parcela. Esta tiene una dimensión de 1,55 hectáreas de las cuales son cultivables un total de 1,42 hectáreas. Esta superficie será dividida, utilizando las electroválvulas, en 4 tramos de 0,335 hectáreas, como aparece en la siguiente imagen:

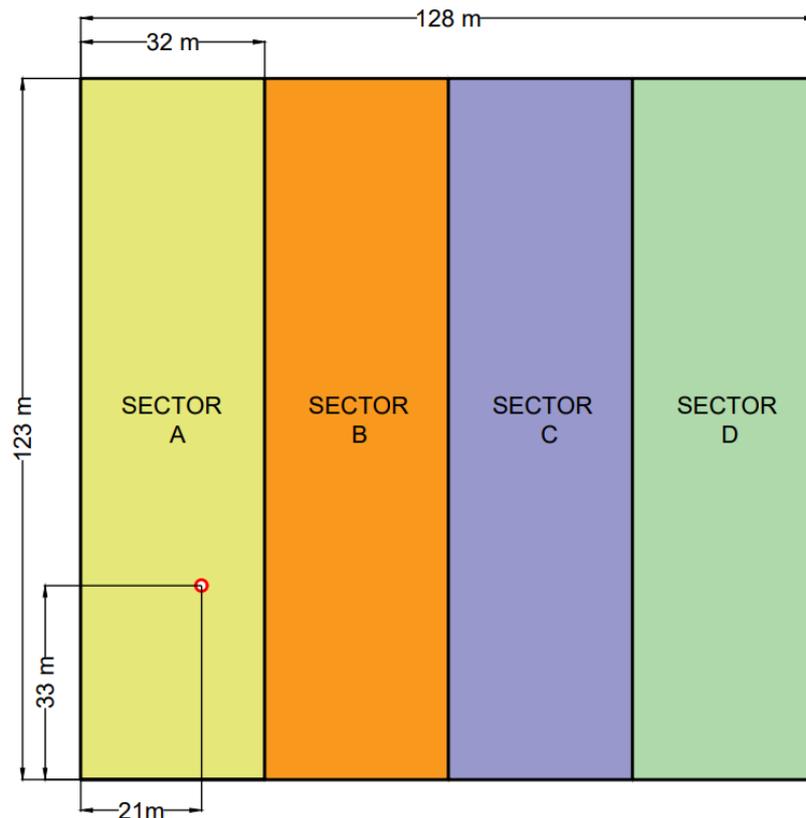


Figura 3.6.1. Sectores de la parcela. (Fuente: Elaboración propia)

Con el objetivo de obtener una estimación del caudal necesario que se debe aportar al cultivo para asegurar un correcto crecimiento de las plantas, se ha consultado al agricultor local cuánta agua suministra a la tierra. Su respuesta ha sido que la mayoría de los agricultores de la zona aprovechan a utilizar el máximo caudal que se les es permitido, es decir, 6000 m<sup>3</sup>/ha por temporada de riego según la normativa de la Unión Europea. Este período comprende desde el 15 de junio hasta el 31 de agosto, es decir, tiene una duración de 78 días. Con estos dos datos se obtienen los litros por metro cuadrado que son comúnmente suministrados al día en el terreno:

$$6000 \text{ m}^3/\text{ha} * \text{temp} * \frac{10^3 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ ha}}{10000 \text{ m}^2} = 600 \text{ l}/\text{m}^2 * \text{temp}$$

$$600 \text{ l}/\text{m}^2 * \text{temp} * \frac{1 \text{ temp}}{78 \text{ días}} = 7,7 \text{ l}/\text{m}^2 * \text{día}$$

Esta medida es útil para, cuando se seleccionen los aspersores, conocer cuántas horas deben estar en funcionamiento al día para regar el máximo agua posible a las plantas.

Como se mencionó anteriormente, la finca estará dividida en secciones de 0,355 ha que equivalen a 3550 m<sup>2</sup>. Los aspersores aptos para riego agrícola comúnmente cubren una superficie de 12m x 15m, es decir, 180 m<sup>2</sup>. Por tanto, para cubrir la superficie de cada sección serán necesarios aproximadamente 20 aspersores:

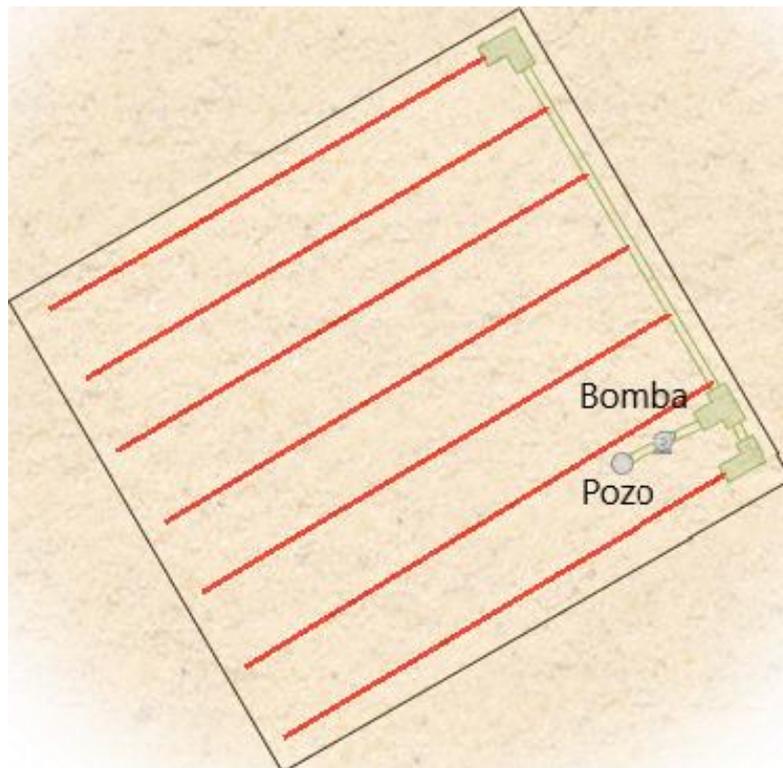
$$\frac{3550 \text{ m}^2}{180 \frac{\text{m}^2}{\text{aspersor}}} = 19,72 \text{ aspersores}$$

Al tener 4 tramos serían necesarios 80 aspersores.

### 3.7. Justificación técnica: Distribución y elementos del sistema hidráulico

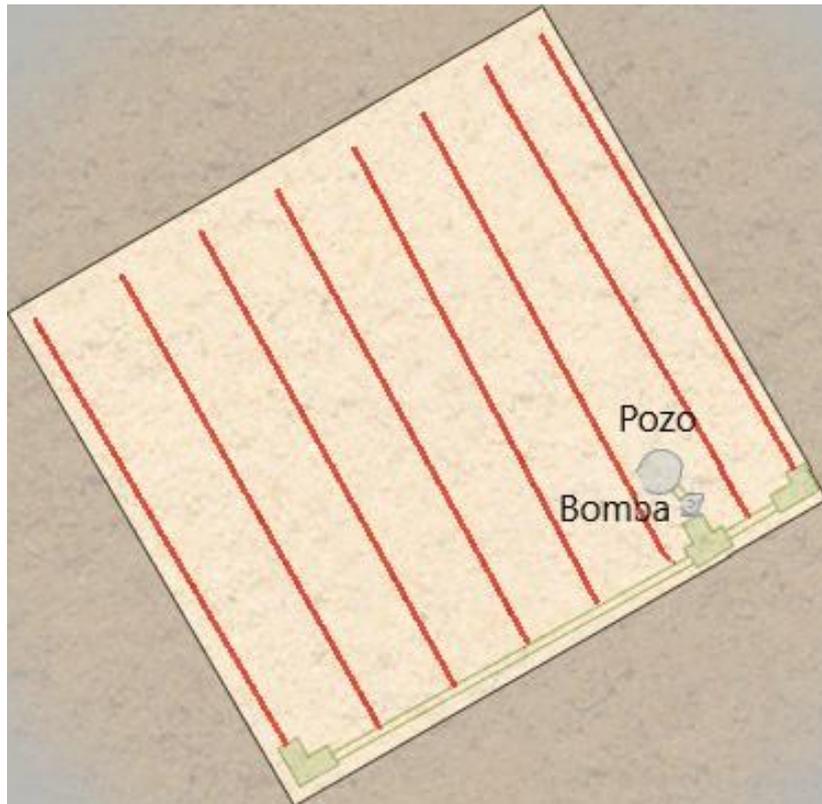
La red de aspersión puede tener diferentes configuraciones en función de la forma y tamaño de la parcela. Las tres distribuciones diferentes que se han estudiado en este terreno son las que aparecen en los siguientes esquemas. Para interpretarlos hay que tener en cuenta que:

- No se han incluido todos los elementos que intervienen en la distribución del agua (T's, electroválvulas, aspersores, etc) en los diagramas para que sean más fáciles de visualizar).
- La línea verde representa la línea primaria.
- Las líneas rojas representan las líneas secundarias



*Figura 3.7.1. Distribución 1. (Fuente: Elaboración propia)*

Esta distribución tiene la línea primaria paralela al borde más largo de la parcela (128 metros, mientras que el otro límite tiene una longitud de 123 metros). Ha sido la seleccionada porque es en la que se emplea una menor cantidad de elementos que producen pérdidas de carga y, por tanto, la bomba necesaria para impulsar el agua requerirá de una menor potencia. Se explicará en profundidad posteriormente.



*Figura 3.7.2. Distribución 2 (Fuente: Elaboración propia)*

En esta distribución la línea primaria está situada paralelamente al límite más corto de la parcela, lo que quiere decir que las líneas secundarias son paralelas al borde del terreno más largo. A pesar de que es muy similar a la distribución elegida y podría ser viable, esta distribución del terreno no se ha escogido debido a que al ser más largas las líneas secundarias que en la distribución elegida, habrá más pérdidas de carga. Esto se debe a que las tuberías que componen las líneas secundarias tienen un diámetro menor que las tuberías que componen la línea primaria. Por lo que, hay una mayor fricción entre el fluido y las paredes de las tuberías, lo que resulta en una mayor resistencia al flujo. Entonces, si las líneas secundarias son más largas que en la distribución anterior, las pérdidas de carga serán más grandes y por tanto se necesitaría una bomba de mayor potencia.

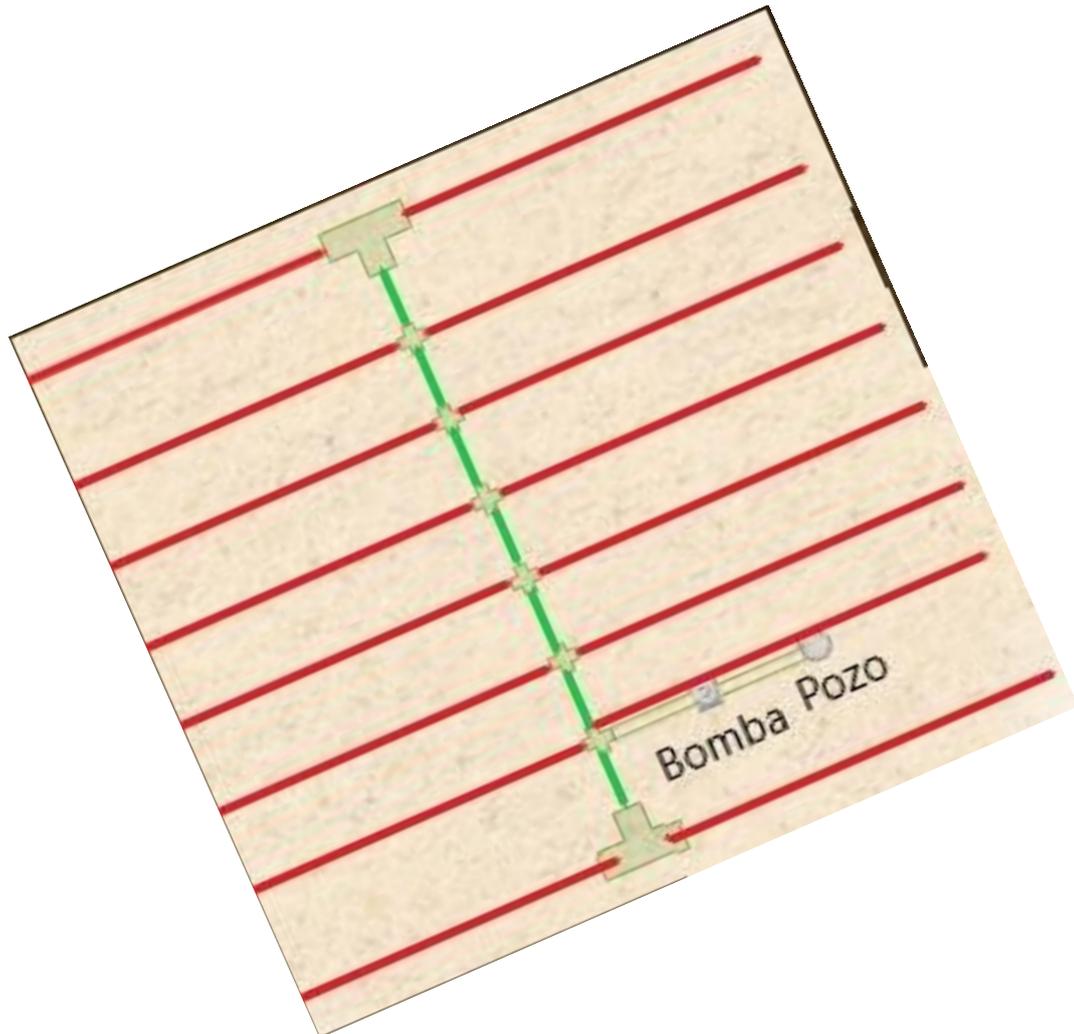


Figura 3.7.3. Distribución 3 (Fuente: Elaboración propia)

Esta distribución no ha sido escogida debido a que, como se aprecia en la imagen anterior, para la mayoría de las líneas secundarias en vez de una T, se necesita una cruz, donde las pérdidas de carga son mayores ya que el agua en vez de dividirse en dos flujos como en una T, se divide en 3. A mayores de este problema, también presenta el inconveniente de que serían necesarias más electroválvulas para dividir el terreno en sectores ya que hay un mayor número de líneas. Esto encarecería la instalación y provocaría unas pérdidas de carga importantes, ya que las electroválvulas son los elementos individuales de la instalación que más pérdidas de carga provocan como se demostrará más adelante.

La red de aspersión de agua estará distribuida de la siguiente manera:

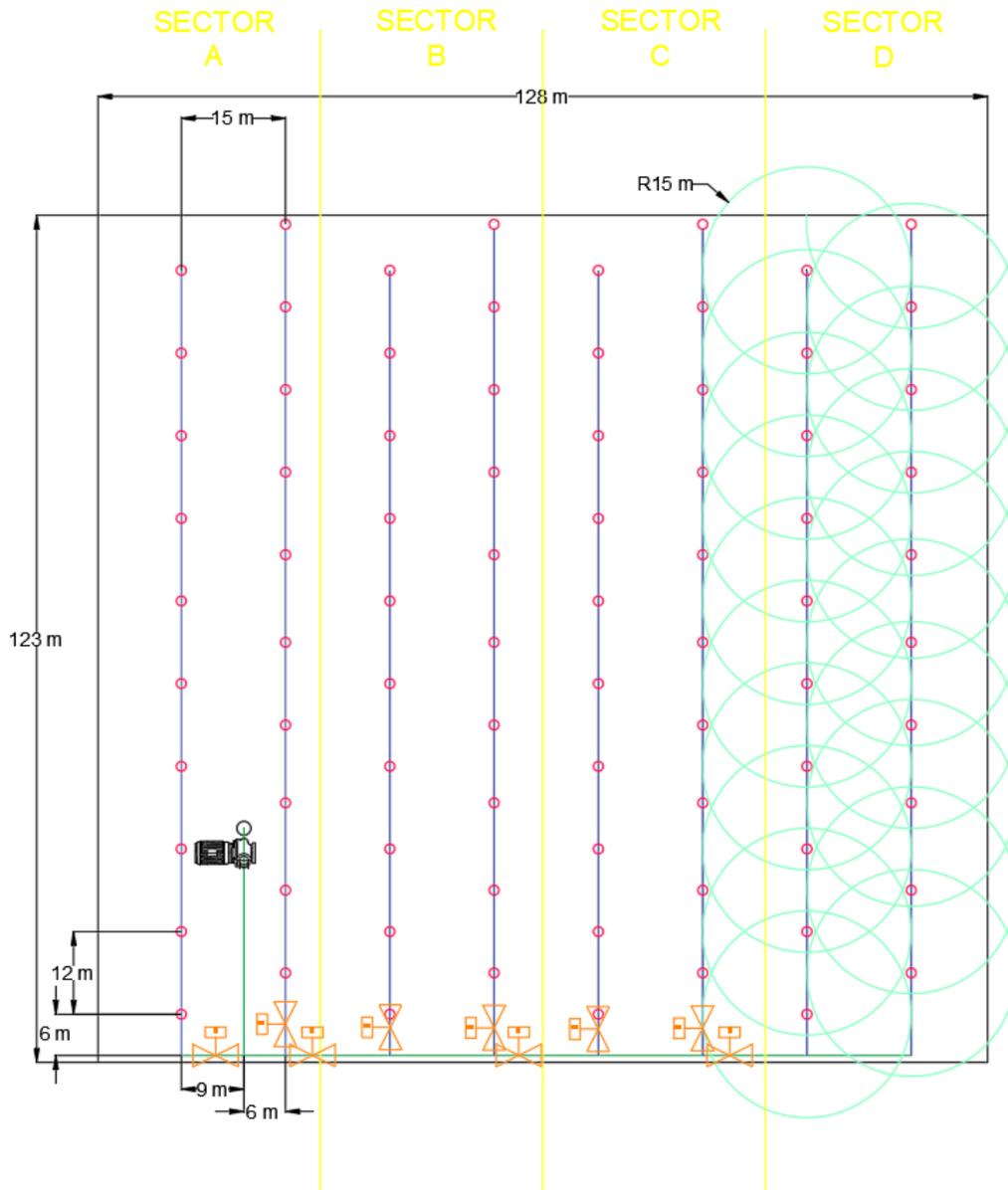


Figura 3.7.4. Red hidráulica. (Fuente: Elaboración propia)

En esta representación:

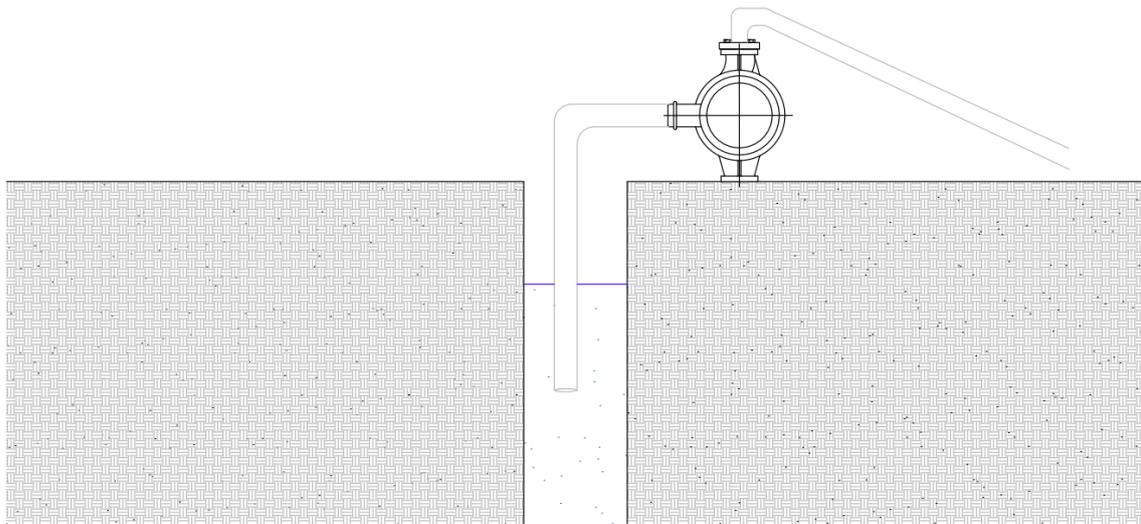
- Color verde: Línea primaria.
- Color azul: Línea secundaria.
- Color amarillo: Línea de separación de sectores.



### 3.7.1. Elementos empleados en la distribución del agua

#### 3.7.1.1. Aspiración

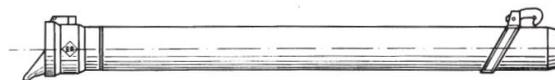
Se trata de la parte del circuito de agua en la que el agua es extraída del pozo y llevada a la bomba de esta manera:



*Figura 3.7.1.1.1. Aspiración del agua. (Fuente: Elaboración propia)*

Todos los elementos de la red de agua exceptuando las electroválvulas están hechos de aluminio y utilizan el método de acople mediante gancho.

- Tubo de 6 metros de longitud y 3" de diámetro para asegurarnos de que la tubería está correctamente sumergida en el agua, que suele encontrarse a 3 metros de profundidad en el pozo.
- Codo de 90° y 3" de diámetro unido al tubo.
- Reducción de 3" a 2" enlazada con el codo.
- Macho con brida de 2" unido a la bomba mediante los tornillos que incluye la bomba.



*Figura 3.7.1.1.2. Tubo sin toma. (Fuente: Hispano Aspersión)*

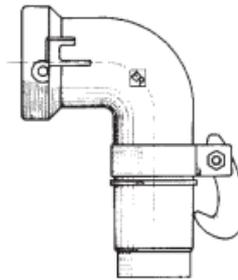


Figura 3.7.1.1.3. Codo de 90°. (Fuente: Hispano Aspersión)

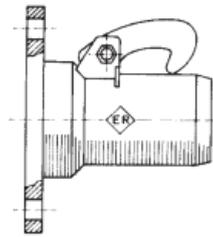


Figura 3.7.1.1.4. Macho con brida. (Fuente: Hispano Aspersión)

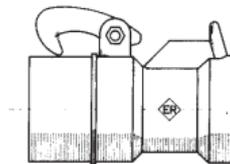
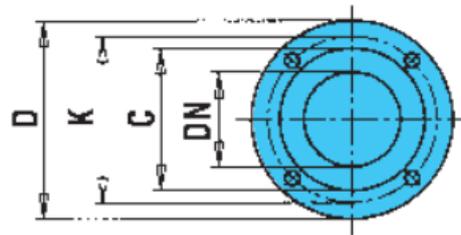


Figura 3.7.1.1.5. Reducción. (Fuente: Hispano Aspersión)

### 3.7.1.2. Salida de la bomba

La bomba escogida tiene un diámetro a la salida de 32 mm de diámetro en el orificio y 4 tornillos a 100 mm de diámetro del centro del orificio de salida como se puede observar en la siguiente tabla extraída del catálogo de bombas:



DNM					
D	K	C	DN	Agujeros ø n°	
140	100	78	32	19	4

*Tabla 3.7.1.2.1. Diámetros de la salida de la bomba. (Fuente: Catálogo Electrobombas SAER)*

A pesar de una exhaustiva búsqueda, no se han encontrado acoples adecuados con gancho para estas dimensiones de salida de la bomba, por lo que para este caso se encargaría a un taller que fabricara un codo de aluminio y diámetro 3" y ensamblado a una brida cuyos orificios para agujeros se encontraran a 100 mm de diámetro desde el centro del codo.

Al otro extremo del codo se acoplará una hembra que permitirá el enlace de otros elementos mediante el sistema de gancho.

Se ha elegido un diámetro de codo de 3" y no de 32mm, es decir 1 ¼", porque sería muy pequeño para el caudal que pasaría a través de él. Esto provocaría que el agua circulase a una velocidad muy elevada y por tanto el codo podría deteriorarse rápidamente.

### 3.7.1.3. Línea primaria

Al codo de salida de la bomba se conecta un tubo de 3 metros de longitud y 3" de diámetro seguido de 5 tubos de 6 metros y también 3" de diámetro. Todos ellos sin toma de agua, es decir, sin un orificio para adjuntar una tubería porta-aspersor vertical al tubo, como se puede apreciar en la Figura 3.7.1.1.2. Gracias a esto el agua recorrerá 33 metros hasta el límite de la parcela donde se dividirá en dos direcciones con una T de 3".

En el lado de la T más cercano al borde de la parcela, acoplada a la T irá una reducción de 3" a 2" seguida de una electroválvula de 2" y de una ampliación posterior a ella de 2" a 3". Como la electroválvula no dispone de acople a través de gancho, se utilizarán una hembra y un macho ambos con rosca de 2" y gancho, de manera que así la electroválvula pueda

quedar bien fijada (A partir de ahora se asume en cada conexión de electroválvula la utilización de ambos componentes y no será especificada).

A continuación, se utilizarán un tubo de 6 metros y uno de 3 metros, ambos con un diámetro de 3" y sin toma de agua, que conformarán un total de 9 metros entre la línea secundaria cercana al límite de la parcela y la línea primaria. Al último tubo se le acoplará un codo de 3" que enlazará con la línea secundaria a través de una reducción de 3" a 2".

Del otro lado de la T saldrá el resto de la línea primaria. Primero, habrá un tubo de 6 metros de 3" sin toma de agua y una T de 3" que enlazará la línea primaria con una de las líneas secundarias. Al comienzo de esta línea secundaria habrá una electroválvula que para ser enlazada con la T necesita una reducción de 3" a 2" ya que las electroválvulas son todas de 2" y las T de 3". La línea primaria continúa paralela al borde de la parcela y divide en tramos de 15 metros al final de los cuales sale una línea secundaria perpendicular a la primaria.

Se han separado 15 metros las líneas secundarias para el aprovechamiento de la parcela teniendo en cuenta el rango de los aspersores.

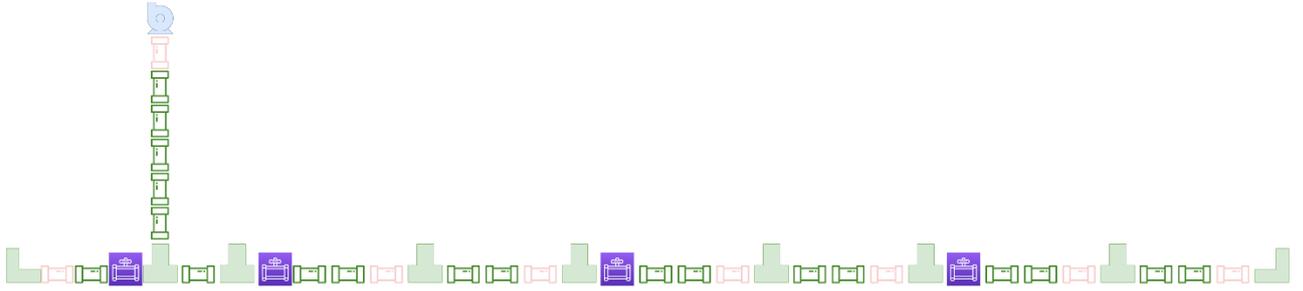
A partir de la última T mencionada, la estructura de cada tramo de la línea primaria es la siguiente (los elementos aparecen enumerados por orden de conexión):

- T de 3" pulgadas.
- Reducción de 3" a 2".
- Electroválvula de 2".
- Ampliación de 2" a 3".
- 2 tubos de 6 metros y 3" sin toma de agua.
- 1 tubo de 3 metros y 3" sin toma de agua.
- T de 3".
- 2 tubos de 6 metros y 3" sin toma de agua.
- 1 tubo de 3 metros y 3" sin toma de agua.

A partir de ahí, comenzaría el siguiente tramo que tendría la misma estructura.

Al final de la línea primaria, en la última línea secundaria será utilizado un codo de 90° y 3" en vez de una T.

La distribución de la línea primaria quedaría así:

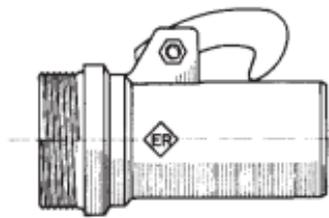


*Figura 3.7.1.3.1. Línea primaria. Fuente: (Elaboración propia)*

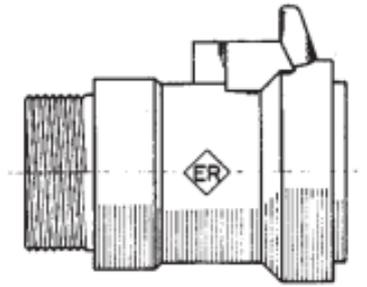
En esta imagen:

- Las tuberías verdes son tubos de 6 metros de longitud y 3" de diámetro.
- Las tuberías rosas son tubos de 3 metros de longitud y 2" de diámetro.
- Los símbolos de válvulas morados representan las electroválvulas.
- El símbolo azul claro representa la bomba centrífuga.
- No se han incluido las ampliaciones, las reducciones, los acoples hembra con rosca y macho con rosca de las electroválvulas para simplificar la representación. Se asume que están junto con cada electroválvula.

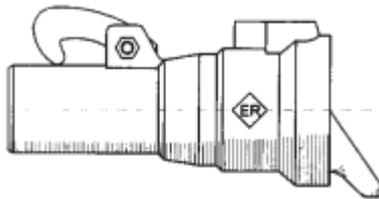
Los elementos utilizados son:



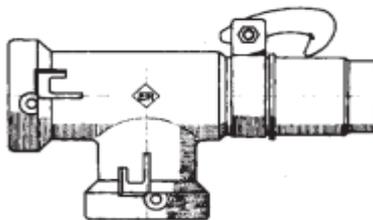
*Figura 3.7.1.3.2. Hembra con rosca. (Fuente: Hispano Aspersión)*



*Figura 3.7.1.3.3. Macho con rosca. (Fuente: Hispano Aspersión)*



*Figura 3.7.1.3.4. Ampliación. (Fuente: Hispano Aspersión)*



*Figura 3.7.1.3.5. T reversible. (Fuente: Hispano Aspersión)*

#### 3.7.1.4. Línea secundaria

Las líneas secundarias tienen 10 aspersores colocados cada 12 metros de la manera representada en la figura 3.7.1.4.1.

En la imagen se puede apreciar que no están colocados a la misma altura en las líneas secundarias. En la mitad de ellas el aspersor más cercano estará a 6 metros de la línea

principal y en la otra mitad el más cercano estará a 12 metros. De esta manera, el agua estará mejor distribuida ya que llegará a todas las plantas.

Por tanto, se utilizará la siguiente estructura en las líneas secundarias:

- Línea secundaria con electroválvula:
  - Reducción de 3" a 2".
  - Electroválvula de 2".

Los elementos siguientes se repiten hasta llegar al final de la tierra, donde se instalará un tapón de 2":

- Tubo de 6 metros de 2" sin toma de agua.
- Tubo de 6 metros de 2" con toma de agua.
- Tubería porta-aspersor de 1 metro unida a la toma de agua con alargadera de 2 metros, ambas de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro.

La alargadera es útil para que el aspersor esté a una altura que le permita rociar el agua siempre por encima de las plantas de maíz en vez de ser sobrepasado por ellas.

- Línea secundaria sin electroválvula:

Para las líneas secundarias que no llevan electroválvula la estructura es más sencilla y también se repite hasta alcanzar el final de la tierra, donde se colocarán tapones de 2":

- Tubo de 6 metros de 2" sin toma de agua.
- Tubo de 6 metros de 2" con toma de agua.
- Tubería porta-aspersor de 1 metro unida a la toma de agua con alargadera de 2 metros, ambas de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro.

La estructura de las líneas secundarias sería:

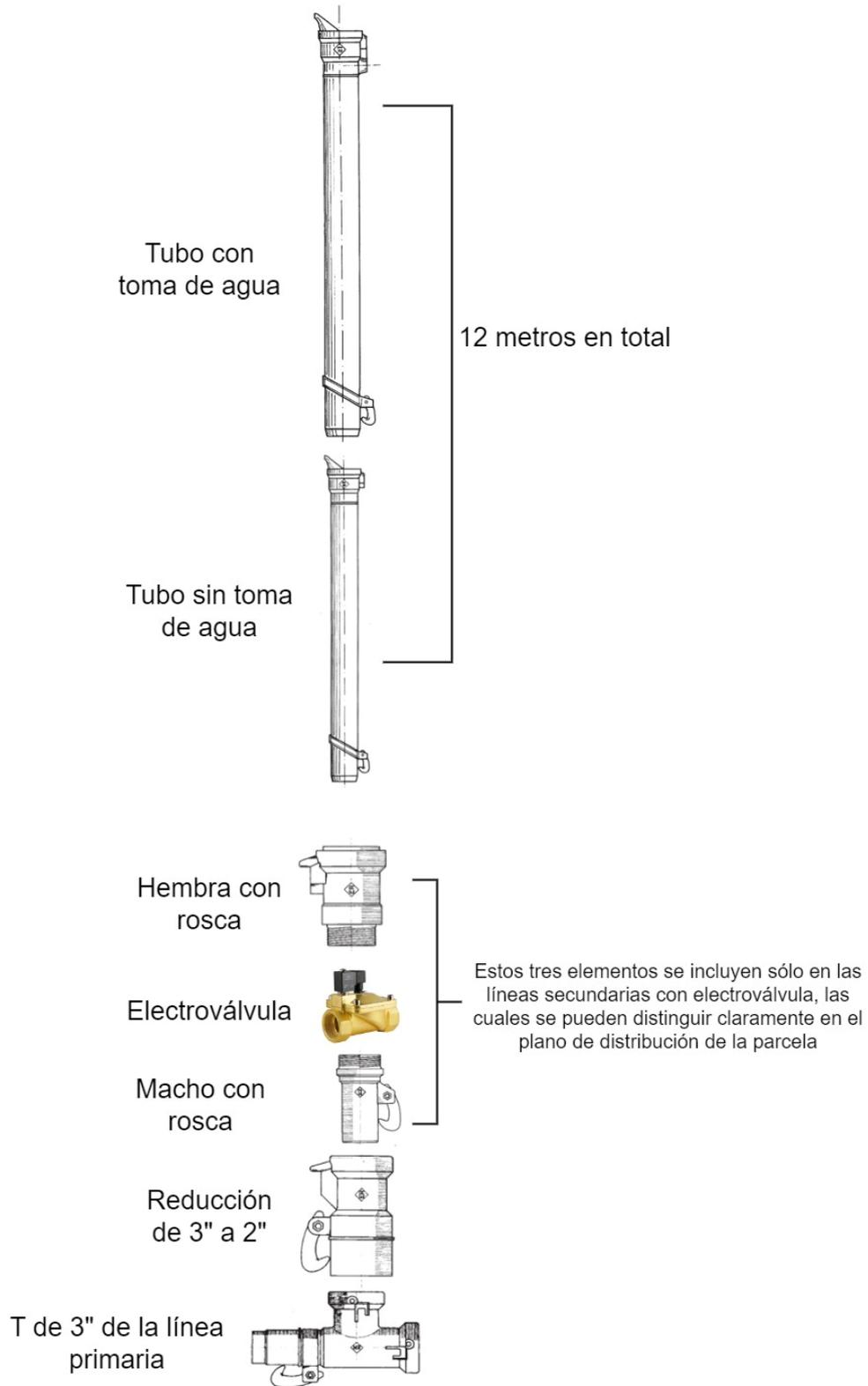
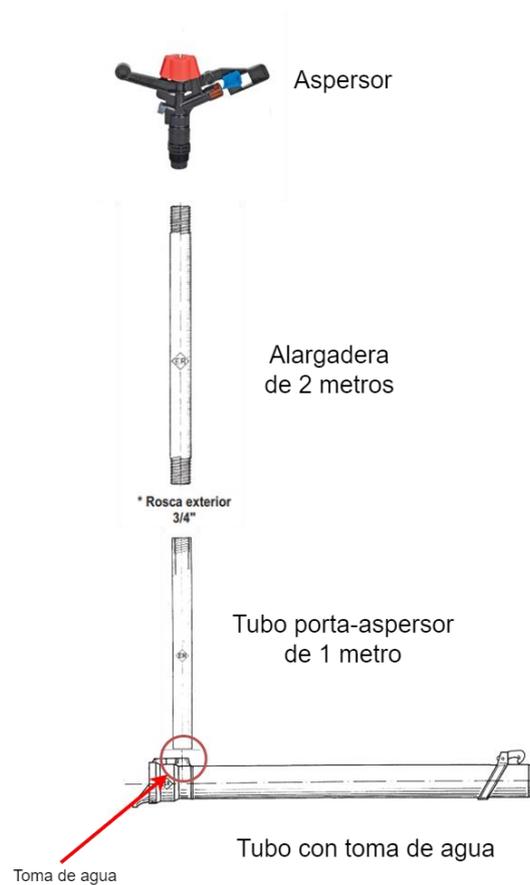


Figura 3.7.1.4.1. Línea secundaria. (Fuente: Elaboración propia)

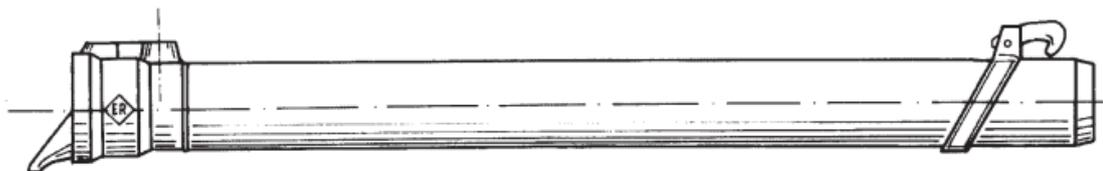
Es importante recalcar que esta imagen no representa una línea secundaria completa, sólo muestra el comienzo de la línea hasta el primer aspersor. A partir de ese punto, se repite la instalación de los dos tubos (con y sin toma de agua) para cada aspersor hasta el final de la línea donde se coloca un tapón de 2", como se ha especificado anteriormente.

En los tubos con toma de agua la instalación sería la siguiente:



*Figura 3.7.1.4.2. Acople aspersor. (Fuente: Elaboración propia)*

Los elementos utilizados en la línea secundaria son (también se utilizan los nombrados en el apartado anterior de la línea primaria):



*Figura 3.7.1.2.3. Tubo con toma de agua. (Fuente: Hispano Aspersión)*

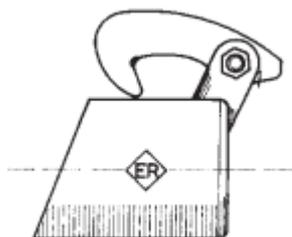


*Figura 3.7.1.2.4. Tubo porta-aspersor (Fuente: Hispano Aspersión)*



\* Rosca exterior  
3/4"

*Figura 3.7.1.2.5. Alargadera. (Fuente: Hispano Aspersión)*



*Figura 3.7.1.2.6. Tapón final (Fuente: Hispano Aspersión)*

### 3.7.1.5. Electroválvulas

Permiten o no el paso de la corriente de agua en función del sector del terreno que se desea regar. Las seleccionadas en este diseño serán las ST-IA 2" de la marca Tameson [20]. Sus principales características son:

- Válvula de solenoide de dos vías.
- Fabricada en latón, lo que garantiza una buena resistencia contra los efectos del medioambiente y poco desgaste por el paso del agua.
- Bobina de 24 V CC.
- Normalmente cerrada, es decir, se abre al aplicarle tensión a la bobina.
- Coeficiente  $K_v= 40,94 \text{ m}^3/\text{h}$  a 1 bar de agua.
- Rango de presión de 0 a 16 bar.



*Figura 3.7.1.5. Electroválvula. (Fuente: Tameson)*

### 3.7.1.6. Aspersores

El aspersor seleccionado para este diseño es el 5035 SD de la marca NaanDanJain [21]:



Figura 3.7.1.6.1. Aspersor 5035 SD. (Fuente: NaanDanJain)

Este aspersor es un aspersor plástico a impacto con una rosca macho de  $\frac{3}{4}$ " y un caudal nominal de aproximadamente  $1540 \text{ l/h}$ . Su elección se debe a que tiene un ángulo de riego ajustable de entre  $0$  y  $360^\circ$ . Esto permite que los aspersores de las líneas secundarias próximos al borde del terreno sean ajustados a  $180^\circ$  de manera que expandan el agua en forma de semicírculo. Así, se desperdicia la menor cantidad de agua posible al no ser vertida en terreno no cultivable.

Con la finalidad de aportar a la planta los  $7,7 \text{ l/m}^2 * \text{día}$ , los aspersores deberán estar operativos aproximadamente una hora al día:

$$180 \text{ m}^2 * 7,7 \text{ l/m}^2 * \text{día} = 1386 \text{ l/día}$$

$$\frac{1386 \text{ l/día}}{1540 \text{ l/h}} = 0,9 \text{ h} \approx 1 \text{ h}$$

Este valor correspondería a cada sector, por lo que, al tener 4 sectores, el sistema debería de funcionar 4 horas al día.

### 3.7.2. Dimensionamiento de las tuberías

Para elegir los diámetros de las tuberías anteriormente mencionados, se han realizado unas estimaciones previas para conocer el diámetro en función del caudal que circulará por la tubería y de la velocidad recomendada para las tuberías metálicas.

Dicha velocidad debe ser [22]:

Yerai De Anta Casquero

- Mayor de 0,5 metros por segundo para evitar sedimentaciones que obstruyan la tubería.
- Menor de 2 metros por segundo en tuberías metálicas y de 3,5 metros por segundo en tuberías de termoplásticos y multicapa, para evitar erosiones en las paredes de las tuberías.

Por lo tanto, utilizaremos el valor de 2 metros por segundo para estimar el diámetro de las tuberías del circuito.

### 3.7.2.1. Dimensiones aspiración y línea primaria

El caudal que circulará en la aspiración del agua y posteriormente por la línea primaria (incluyendo el codo de salida de la bomba), será igual al total que expulsarán los aspersores. Como en este circuito trabajarán 20 aspersores a la vez que rociarán 1540 l/h, el caudal total será:

$$20 * 1540 \text{ l/h} = 30800 \text{ l/h}$$

En las unidades deseadas:

$$30800 \text{ l/h} * \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} * \frac{1\text{m}^3}{10^3\text{l}} = 0,0085 \text{ m}^3/\text{s}$$

Empleando la relación:  $Q = v * S$

Se obtiene que la superficie es:

$$0,0085 \text{ m}^3/\text{s} = 2 \text{ m/s} * S \rightarrow S = 0,00425 \text{ m}^2 * \frac{10^4 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} = 42,5 \text{ cm}^2$$

La fórmula de la superficie es:  $S = \pi * r^2$

$$\text{Por tanto: } S = \pi * r^2 \rightarrow 42,5 \text{ cm}^2 = \pi * r^2 \rightarrow r = \sqrt{\frac{42,5 \text{ cm}^2}{\pi}} = 3,67 \text{ cm}$$

$$D = 2 * r = 2 * 3,67 \text{ cm} = 7,35 \text{ cm} = 73,5 \text{ mm}$$

La medida de tuberías de aluminio normalizadas más cercana a esta es de 3" (76,2mm).

3.7.2.2. Dimensiones línea secundaria

En cada línea secundaria hay 10 aspersores por tanto el caudal que debe circular por ellas

$$\text{es: } 10 * 1540 \text{ l/h} = 15400 \text{ l/h} * \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} * \frac{1\text{m}^3}{10^3\text{l}} = 0,00427 \hat{m}^3/\text{s}$$

Siguiendo los mismos cálculos que en el dimensionamiento de la aspiración y la línea primaria:

$$0,00427 \hat{m}^3/\text{s} = 2 \text{ m/s} * S \rightarrow S = 0,002138\text{m}^2 * \frac{10^4\text{cm}^2}{1\text{m}^2} = 21,38\text{cm}^2$$

$$S = \pi * r^2 \rightarrow 21,38 \text{ cm}^2 = \pi * r^2 \rightarrow r = \sqrt{\frac{21,38 \text{ cm}^2}{\pi}} = 2,60 \text{ cm}$$

$$D = 2 * r = 2 * 2,60 \text{ cm} = 5,21 \text{ cm} = 52,1 \text{ mm}$$

Las tuberías normalizadas con un diámetro más cercano a 52,1 mm son las tuberías de 2" (50,8 mm). Al ser el diámetro de estas más pequeño que el estimado, la velocidad será ligeramente mayor a 2 m/s como se mostrará más adelante. A pesar de esto, se han seleccionado estas tuberías igualmente porque con un diámetro mayor como por ejemplo 2½" o 3", la tubería sería demasiado grande para el caudal que albergaría y la velocidad por tanto sería bastante inferior.

3.7.2.3. Dimensiones tubería porta-  
aspersor

En los tubos porta-aspersor el caudal que circulará por ellos será el que debe expulsar el

$$\text{aspersor, es decir: } 1540 \text{ l/h} * \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} * \frac{1\text{m}^3}{10^3\text{l}} = 0,000427 \hat{m}^3/\text{s}$$

Con este dato, las medidas de las tuberías porta-aspersores deberían de ser:

$$0,000427 \hat{m}^3/\text{s} = 2 \text{ m/s} * S \rightarrow S = 0,0002138\text{m}^2 * \frac{10^4\text{cm}^2}{1\text{m}^2} = 2,138\text{cm}^2$$

$$S = \pi * r^2 \rightarrow 2,138 \text{ cm}^2 = \pi * r^2 \rightarrow r = \sqrt{\frac{2,138 \text{ cm}^2}{\pi}} = 0,825 \text{ cm}$$

$$D = 2 * r = 2 * 0,825 \text{ cm} = 1,65 \text{ cm} = 16,5 \text{ mm}$$

La medida normalizada de diámetros de tuberías más cercana a 16,5 mm es de  $\frac{3}{4}$ ", es decir, 19,05mm.

### 3.7.3. Cálculo de las pérdidas de carga en el circuito

Cuando el agua circula por el circuito, pierde presión o "carga" debido al roce con las paredes o al choque con elementos como válvulas o codos. Estas pérdidas dependen de muchos factores como la rugosidad de la tubería dependiendo del material que esté hecha y su desgaste, la velocidad a la que circula el agua y el diámetro de los elementos por los que pasa.

Para saber qué bomba es necesaria para alimentar el circuito, se debe utilizar la ecuación de Bernoulli para fluidos reales (unidades en Sistema Internacional) [23]:

$$\frac{p_1}{g\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \pm H_b = \frac{p_2}{g\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H_{1 \rightarrow 2} + H_k$$

$p$  = presión (Pa)

$g$  = aceleración de la gravedad  $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

$v$  = velocidad  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$\rho$  = densidad  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$z$  = altura (m)

$H_b$  = Energía aportada por una bomba o generada por una turbina (m)

$H_{1 \rightarrow 2}$  = Pérdidas de energía primarias (m)

$H_k$  = Pérdidas de energía secundarias (m)

Esta ecuación permite obtener el parámetro  $H_b$  y por tanto dimensionar la electrobomba en función del caudal y la energía que debe aportar, teniendo en cuenta las pérdidas de carga que hay a lo largo del circuito.

Estas se calculan con las siguientes fórmulas:

$$H_{1 \rightarrow 2} = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \text{ (m)}$$

$$H_k = K * \frac{v^2}{2g} \text{ (m)}$$

La velocidad se puede conocer a partir de los diámetros y caudales calculados en el apartado anterior y a la expresión:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \left( \frac{m}{s} \right)$$

A partir de ahora:

- El subíndice A hace referencia a la tubería y codo de la aspiración.
- El subíndice 1 indica la línea primaria.
- El subíndice 2 hace alusión a la línea secundaria.
- El subíndice P remite a la tubería porta-aspersor

Las velocidad del agua en estos elementos será:

$$v_A = v_1 = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 * 0,0085 \hat{m}^3/s}{\pi * (0,0762m)^2} = 1,863 \text{ m/s}$$

$$v_2 = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 * 0,00427 \hat{m}^3/s}{\pi * (0,0508m)^2} = 2,106 \text{ m/s}$$

$$v_P = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 * 0,000427 \hat{m}^3/s}{\pi * (0,01905m)^2} = 1,498 \text{ m/s}$$

El símbolo  $f$  hace referencia al término factor de fricción o coeficiente de resistencia de Darcy – Weisbach. Este parámetro depende de:

- El número de Reynolds:  $Re = \frac{v * D}{\nu} = \frac{v * D}{\eta}$

Siendo  $v$  la velocidad del agua,  $\nu$  la viscosidad cinématica del agua y  $\eta$  la viscosidad dinámica.

Estimando que el agua se encuentra a 10°C aproximadamente, su viscosidad cinématica a esta temperatura es  $1,309 * 10^{-6} m^2/s$  (14)

- La rugosidad relativa del material del que está hecho la tubería:  $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{D}$

Siendo  $\varepsilon$  la rugosidad absoluta.

En el caso de este sistema de riego, todos los componentes están hechos de aluminio. La rugosidad absoluta del aluminio varía entre 0,015 y 0,06 [24] dependiendo de el desgaste de la tubería. A pesar de que las tuberías serán nuevas, se realizarán los cálculos con 0,06 para asegurar que el sistema funcionará bien cuando las tuberías estén desmejoradas.

- El régimen de flujo de la tubería según el número de Reynolds:
  - o  $Re < 2300$  -> Laminar
  - o  $Re > 4000$  -> Turbulento
  - o  $2300 < Re < 4000$  -> Inestable [23]

Los números de Reynolds pertenecientes a las tuberías de este sistema son:

$$Re_A = Re_1 \frac{v * D}{\nu} = \frac{1,863 \frac{m}{s} * 0,0762m}{1,309 * \frac{10^{-6} m^2}{s}} = 108449,65$$

$$Re_2 = \frac{v * D}{\nu} = \frac{2,106 \frac{m}{s} * 0,0508m}{1,309 * 10^{-6} m^2/s} = 81730,17$$

$$Re_P = \frac{v * D}{\nu} = \frac{1,498 \frac{m}{s} * 0,01905m}{1,309 * 10^{-6} m^2/s} = 21800,53$$

Todos son mayores que 4000 por lo que el flujo es turbulento.

Para flujo turbulento, el factor de fricción se calcula con la ecuación de Colebrook-White [23]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Los valores de rugosidad relativa para este sistema de riego serán:

$$\frac{\varepsilon}{D_A} = \frac{\varepsilon}{D_1} = \frac{0,06 \text{ mm}}{76,2 \text{ mm}} = 0,000787$$

$$\frac{\varepsilon}{D_2} = \frac{0,06 \text{ mm}}{50,8 \text{ mm}} = 0,0012$$

$$\frac{\varepsilon}{D_P} = \frac{0,06 \text{ mm}}{19,05 \text{ mm}} = 0,0031$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación de Colebrook-White, los diferentes factores de fricción serán:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{0,000787}{3,7} + \frac{2,51}{108449,65\sqrt{f}} \right) \rightarrow f_A = f_1 = 0,0212$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{0,0012}{3,7} + \frac{2,51}{81730,17\sqrt{f}} \right) \rightarrow f_2 = 0,0232$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{0,0031}{3,7} + \frac{2,51}{21800,53\sqrt{f}} \right) \rightarrow f_P = 0,03$$

Con el propósito de dimensionar correctamente la bomba que aportará el agua al circuito, se calcularán las pérdidas de carga en el caso más desfavorable para la bomba. Esto quiere decir que en el caso de esta red de aspersión dividida por sectores, se debe tener en cuenta el sector con más pérdidas de carga. Este sector será el tramo D (figura 3.7.4) debido a que es donde más longitud de la línea principal recorre el agua y por tanto donde más pérdidas de energía por fricción habrá.

En el funcionamiento de los aspersores del tramo D, el agua perderá energía en los siguientes elementos:

#### 3.7.3.1. Aspiración

- Tubo de 6 metros y 3" de diámetro.

Se tiene en cuenta que el agua en vez de recorrer los 6 metros del tubo, normalmente recorrerá 3 debido a que suele estar a 3 metros de profundidad:

$$H_{1 \rightarrow 2} = f_A * \frac{L}{D} * \frac{v_A^2}{2g} (m) = 0,0212 * \frac{3m}{0,0762m} * \frac{\left(1,863 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \frac{9,81m}{s^2}} = 0,147m$$

- Codo de 90° con 3" de diámetro.

El valor del coeficiente K se extrae de la siguiente tabla:

Valores de k para diversos accesorios	
Válvula esférica, totalmente abierta	k = 10
Válvula de ángulo, totalmente abierta	k = 5
Válvula de retención de clapeta	k = 2,5
Válvula de pie con colador	k = 0,8
Válvula de compuerta abierta	k = 0,19
Codo de retroceso	k = 2,2
Empalme en T normal	k = 1,8
Codo de 90° normal	k = 0,9
Codo de 90° de radio medio	k = 0,75
Codo de 90° de radio grande	k = 0,60
Codo de 45°	k = 0,42

Tabla 3.7.3.1.1. Tabla valores k. (Fuente: Ingeniería Fluidomecánica, ULE)

En el codo seleccionado, el coeficiente K será K=0,9, por tanto:

$$H_k = K * \frac{v^2}{2g} = 0,9 * \frac{\left(1,863 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \frac{9,81m}{s^2}} = 0,159m$$

- Estrechamiento de 3" a 2" ..

El coeficiente K en un estrechamiento se puede estimar con la siguiente fórmula:

$$K \approx 0,42 * \left(1 - \frac{D_2^2}{D_1^2}\right)$$

Aplicada a este estrechamiento en el que hay una reducción de 76,2 mm(3") a 50,8 mm(2"):

$$K \approx 0,42 * \left(1 - \frac{D_2^2}{D_1^2}\right) \rightarrow K \approx 0,42 * \left(1 - \frac{50,8^2}{76,2^2}\right) = 0,23$$

$$H_k = K * \frac{v^2}{2g} = 0,23 * \frac{\left(1,863 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \frac{9,81m}{s^2}} = 0,041m$$

3.7.3.2. Línea primaria

- Codo de salida de bomba.

El codo será prácticamente igual que el de la aspiración por lo que las pérdidas serán aproximadamente las mismas ya que la velocidad del agua también lo es:

0,159 m.

- Tubo de 3 metros de longitud y 3" de diámetro seguido de 5 tubos de 6 metros y 3" de diámetro, todos ellos sin toma de agua.

En total hacen 33 metros de longitud:

$$H_{1 \rightarrow 2} = f_1 * \frac{L}{D} * \frac{v_1^2}{2g} (m) = 0,0212 * \frac{33m}{0,0762m} * \frac{\left(1,863 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \frac{9,81m}{s^2}} = 1,62m$$

- Al final de los 33 metros hay una T de 3" que divide la línea principal en dos.

En la tabla 3.7.3.1.1 se indica que la K para una T es 1,8:

$$H_k = K * \frac{v^2}{2g} = 1,8 * \frac{\left(1,863 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \frac{9,81m}{s^2}} = 0,318m$$

- En el tramo de línea primaria que va hasta el sector D hay un tubo de 6 metros de longitud y 3" de diámetro hasta la primera línea secundaria, y a partir de ella, hay otras 6 líneas secundarias entre las cuales hay 15 metros en tubos de 3". Debido a esto, las pérdidas primarias son:

$$H_{1 \rightarrow 2} = f_1 * \frac{L}{D} * \frac{v_1^2}{2g} (m) = 0,0212 * \frac{(6 + 6 * 15)m}{0,0762m} * \frac{\left(1,863 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \frac{9,81m}{s^2}} = 4,724m$$

- En cuanto a las pérdidas secundarias de esta parte del circuito:

- o Hay un total de 6 T de 3" (una por cada línea secundaria excepto la última), de las mismas características que la calculada previamente, por lo que sus pérdidas serán iguales:

$$H_{k(total)} = 6 * 0,318 m = 1,908m$$

- o El agua discurre a través de 3 electroválvulas hasta el sector D, que para ser instaladas requieren de un estrechamiento de 3" a 2" a la entrada de la electroválvula y una ampliación de 2" a 3" a la salida.

- Reducción de 3" a 2":

Estas reducciones son iguales que la utilizada a la entrada de la bomba por lo que:  $K=0,23$  y  $H_k = 0,041m$

Al haber 3 electroválvulas habrá 3 reducciones por lo que:

$$H_k = 0,041m * 3 = 0,123m$$

- Ampliación de 2" (50,8 mm) a 3" (76,2 mm):

La fórmula para conocer la K en las ampliaciones es diferente que en el caso de las reducciones:

$$K = \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right)^2 = \left(1 - \frac{50,8^2}{76,2^2}\right)^2 = 0,31$$

$$H_k = K * \frac{v^2}{2g} = 0,31 * \frac{\left(1,863 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \frac{9,81m}{s^2}} = 0,054m$$

Como hay 3 ampliaciones:

$$H_k = 0,054m * 3 = 0,16m$$

- Electroválvulas:

Las pérdidas de carga en las electroválvulas se obtienen con el coeficiente Kv, que hace referencia al caudal de agua en metros cúbicos por hora que pasa por una válvula completamente abierta con unas pérdidas de caudal de 1 kg/cm<sup>2</sup>. Este coeficiente es obtenido empíricamente por lo que debe de ser proporcionado por el fabricante.

En las electroválvulas seleccionadas para este sistema de riego, el coeficiente Kv equivale a:  $Kv = 40,94 \frac{m^3/h}{bar^{0,5}}$  [20]

La fórmula que relaciona el parámetro Kv con las pérdidas de carga es la siguiente:

$$H_k = \left(\frac{Q}{Kv}\right)^2 (bar)$$

En el tramo estudiado, las electroválvulas recibirán un caudal de 30800 l/h = 30,8 m<sup>3</sup>/h.

$$H_k = \left( \frac{Q}{Kv} \right)^2 (bar) = \left( \frac{30,8 \frac{m^3}{h}}{40,94 \frac{m^3}{h} \frac{1}{bar^{0,5}}} \right)^2 = 0,566 bar * \frac{10,2 m. c. a}{1 bar} = 5,77 m. c. a$$

*m. c. a. (metros de columna de agua)*

Las pérdidas totales de las electroválvulas serán:

$$5,77 m. c. a * 3 = 17,31 m$$

- Codo en 90° de 3" de diámetro del final de la línea primaria  
Este codo tiene las mismas características que los anteriores por lo que tendrá las mismas pérdidas: 0,159 m.

### 3.7.3.3. Línea secundaria

Con la finalidad de hacer una estimación precisa de las pérdidas de carga del sector D, sólo se deben tener en cuenta las dos líneas secundarias incluidas en él. En estas dos líneas se encuentran los siguientes elementos:

- 2 reducciones de 3" a 2" al comienzo de la línea:  
Debido a que se trata de las mismas medidas que en las reducciones anteriores, el coeficiente K será el mismo: K=0,23. Sin embargo, la velocidad del agua será diferente:

$$H_k = K * \frac{v^2}{2g} = 2 * 0,23 * \frac{\left(2,106 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \frac{9,81m}{s^2}} = 0,103 m$$

- Entre aspersor y aspersor, habrá 2 tubos de 6 metros de longitud y 2" de diámetro (50,8 mm = 0,0508m), la mitad de ellos tendrán toma de agua para conectar el tubo porta-aspersor.

Hay que tener en cuenta que en la mitad de las líneas secundarias el aspersor más cercano a la línea primaria estará a 6 metros de ella mientras que en el resto de las secundarias estará a 12 metros. Esto quiere decir que en las líneas a las que esté a 6 metros, habrá 6 metros menos de línea secundaria que en las demás.

Como se están realizando los cálculos de las pérdidas de carga para las líneas secundarias pertenecientes al sector D, este sólo tendrá dos líneas: una con el primer aspersor a 6 metros de la línea primaria y la otra con el primer aspersor a 12 metros de la primaria.

Las pérdidas longitudinales de estos tubos serán:

$$H_{1 \rightarrow 2} = f_2 * \frac{L}{D} * \frac{v_2^2}{2g} (m) = 0,0232 * \frac{(12 * 9 + 6) m + (12 * 10) m}{0,0508m} * \frac{\left(2,106 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \frac{9,81m}{s^2}} = 24,16 m$$

Es necesario considerar que en cada línea secundaria hay 10 tubos con toma ya que como se ha mencionado anteriormente, se emplea un tubo con toma para enlazar cada tubería porta-aspersor, y en cada línea secundaria hay 10 aspersores. En estos tubos el agua se divide como en una T de flujo directo, cuyas pérdidas se pueden obtener de la siguiente forma: [25]

$$K = 20 * f = 20 * 0,0232 = 0,464$$

$$H_k = K * \frac{v^2}{2g} = 0,464 * \frac{\left(2,106 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \frac{9,81m}{s^2}} = 0,104 m$$

En total:  $0,104m * 20 = 2,09m$

- Entre las dos líneas secundarias habrá 20 aspersores conectados a 20 tubos porta-aspersor de 1 metro de longitud y  $\frac{3}{4}$ ", cada uno de ellos con una alargadera de 2 metros y  $\frac{3}{4}$ ". Las pérdidas longitudinales de estos serán:

$$H_{1 \rightarrow 2} = f_P * \frac{L}{D} * \frac{v_P^2}{2g} (m) = 0,03 * \frac{((1+2)*20)m}{0,01905m} * \frac{\left(1,498 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \frac{9,81m}{s^2}} = 10,81m$$

Sumando las pérdidas de todos los elementos mencionados:

$$H_{total}(m) = 0,147 + 0,159 + 0,041 + 0,159 + 1,62 + 0,318 + 4,724 + 1,908 + 0,123 + 0,16 + 17,31 + 0,159 + 0,103 + 24,16 + 2,09 + 10,81 = 62,005 m$$

### 3.7.4. Dimensionamiento bomba

El dimensionamiento de la bomba se hace a través del parámetro  $H_b$ , el cual indica la energía que debe ser aportada por la bomba al circuito.

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \pm H_b = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H_{1 \rightarrow 2} + H_k$$

Los puntos de estudio para dimensionar la bomba serán el principio -1- y el final -2- del circuito de agua.

El punto inicial -1- estará justo en la superficie del agua del pozo.

El punto final -2- será exactamente la salida del último aspersor de la última línea secundaria.

Teniendo en cuenta que:

- Las presiones  $p_1$  y  $p_2$  serán iguales a 0 Pa debido a que la presión manométrica en un espacio abierto es 0 Pa.
- La velocidad en el punto inicial será 0 m/s debido a que el agua en el pozo está en reposo. Sin embargo, en el punto final la velocidad será la velocidad de salida del agua del aspersor, que será aproximadamente la velocidad a la que el agua recorre la tubería porta-aspersor, es decir:  $v_p = v_2 = 1,498 \text{ m/s}$  ( $v_2$  indica la velocidad en el punto final, no en las líneas secundarias como anteriormente).
- El punto inicial se encuentra a 3 metros de profundidad, que es la profundidad a la que suele encontrarse el agua en el pozo mientras que el punto final estará aproximadamente a 3 metros de altura sobre la superficie puesto que es la altura que tienen los tubos porta-aspersor con alargadera.

La ecuación de Bernoulli resultaría:

$$0 + 0 - 3 \text{ m} + H_b = 0 + 0 + 3 \text{ m} + \frac{\left(1,498 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} + 62,005 \text{ m}$$

Resolviendo esta ecuación, obtenemos la energía que debe ser aportada por nuestra bomba para el correcto funcionamiento del circuito en el trozo D del terreno:

$$H_b = 68,11 \text{ m}$$

### 3.7.5. Elección de la bomba

La bomba será seleccionada en función del caudal de agua que debe impulsar y la altura manométrica a la que debe hacerlo ( $H_b$ ).

El caudal será el calculado previamente:  $30800 \text{ l/h} * \frac{1\text{m}^3}{10^3\text{l}} = 30,8 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Consultando la siguiente tabla perteneciente al catálogo de electrobombas de la marca SAER:

Tipo	P2		In (A) 3~		Is / In	U.S.g.p.m.	0	17	26	35	44	53	62	70	79	88	110	132	154	176
	kW	HP	V 230/400	V 400 Δ		Q	0	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
						m <sup>3</sup> /h	0	67	100	133	167	200	233	267	300	333	417	500	583	667
IR32-125C	0,75	1	5,2-3	–	5,8	H (m)	17	16,6	16	15,3	14,3	13,2	11,8	10,3						
IR32-125B	1,1	1,5	6,9-4	–	6,4		21	20,6	20,1	19,2	17,8	15,8	14,1	12,3						
IR32-125A	1,5	2	7,4-4,3	–	7		25,4	25	24,6	24,1	23,2	22	20,5	18,8	16,9	15				
IR32-160C	1,5	2	8,4-4,8	–	7		28	27,4	27	26,3	25,6	24,8	23,4	22,3	20,7	18,5				
IR32-160B	2,2	3	7,8-4,5	–	6,8		33	32,2	32	31	30,2	29,2	28	27	25	23,2				
IR32-160A	3	4	10-5,7	–	7,6		37	36,5	36	35,4	34,7	33,8	32,8	31,6	30,1	28,3				
IR32-160NC	3	4	10-5,7	–	7,6		29			29	28,8	28,3	27,5	26,2	25,8	25,5	22,3	18,5		
IR32-160NB	4	5,5	16-9,2	9,2	8,4		36,4			36,4	36,2	35,8	35,4	34,7	34	33,2	31	27,5	23	
IR32-160NA	5,5	7,5	–	10,7	8,6		43			42,4	42,2	41,9	41,3	41	40,5	39,8	38	34,5	31,1	26
IR32-200N	4	5,5	15,6-9	9	8,4		56,3		54,7	54	53	51,7	50,2	48,6						
IR32-200NC	4	5,5	14,8-8,5	8,5	8,4		46		45	44	43	41,3	39,8	38,2	36,2	34,4	27,5			
IR32-200NB	5,5	7,5	–	11,5	8,6		53,6		53	52,8	52,5	51,7	51,1	50,2	49,8	47,4	43	35		
IR32-200NA	7,5	10	–	15	8,3		63		62,8	62,6	62,5	62,3	62,2	62	60,6	59,5	57,5	49,7	38,6	
IR32-250E	7,5	10	–	14,6	8,3		64			63	62,6	62,4	61,8	61,3	60,9	59	56			
IR32-250D	9,2	12,5	–	18,7	8,6		70			69,8	69,6	69,3	68,9	68,4	68,1	67,3	65,3	63		
IR32-250C	11	15	–	22,3	6,3		76,3			76,3	76	75,7	75,3	74,8	74,4	73,8	71,4	68,8		
IR32-250B	13,5	18,3	–	26,4	6,4		86			83,5	83	82,2	81,9	81,3	80,8	80	79,2	75	55	
IR32-250A	17	23	–	31,5	6,6		94			92	91	90,5	90	89,5	89	88,4	87,3	86	66	

Tabla 3.7.5.1. Serie electrobombas IR32 SAER. (Fuente: Catálogo electrobombas SAER)

La bomba que aporta una  $H_b > 68,11 \text{ m}$  a un caudal  $Q = 30,8 \text{ m}^3/\text{h} \cong 30 \text{ m}^3/\text{h}$  es la "IR32-250C".



*Figura 3.7.5.1. Bomba centrífuga IR32-250C. (Fuente: Catálogo electrobombas SAER)*

Características principales [26]:

- Tiene una potencia de 15 HP  $\cong$  11KW y funciona a una tensión de 400 V en trifásica con una corriente nominal de 22,3 A como indica la tabla anterior.
- El motor es un motor eléctrico de 2 polos que opera a 2950 rpm.
- La presión de trabajo es igual a 10 bar.
- En la admisión tiene un diámetro de 50 mm mientras que la salida es de 32 mm.

Con esta bomba, las líneas de alturas y piezométrica serán las siguientes:

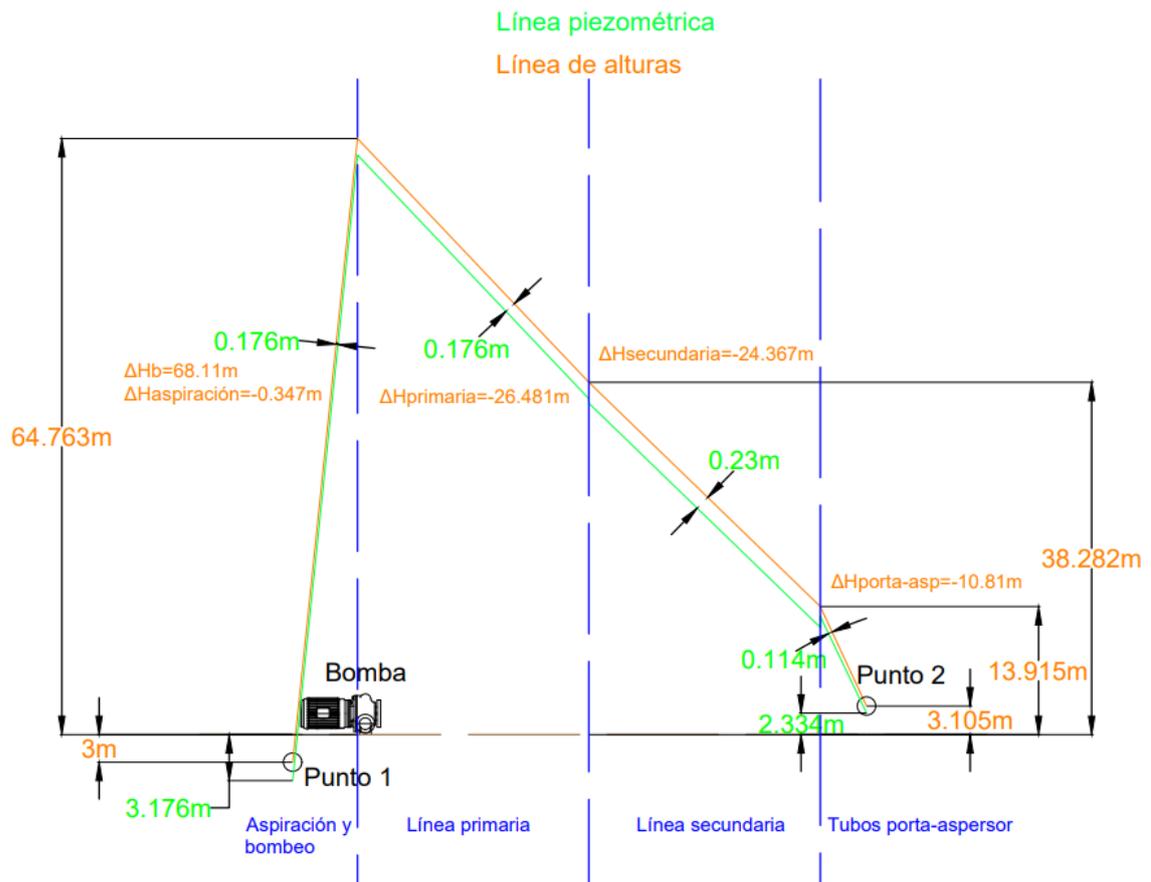


Figura 3.7.5.2. Líneas de alturas y piezométrica. (Fuente: Elaboración propia)

Cabe apuntar que:

- En el punto 2 la altura según la línea de alturas es 3'105m, pero en la realidad es 3m (Altura a la que se encuentra el aspersor). Esta diferencia se debe al error que se acumula en los cálculos de las pérdidas de carga.
- La diferencia entre la línea piezométrica y la línea de alturas en cada tramo se calcula mediante:
  - o Aspiración y línea primaria (se calculan igual porque en ellas el agua tiene la misma velocidad):

$$\frac{v_A^2}{2g} = \frac{v_1^2}{2g} = \frac{\left(1,863 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \frac{9,81m}{s^2}} = 0,176m$$

- Línea secundaria:

$$\frac{v_2^2}{2g} = \frac{\left(2,106 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \frac{9,81m}{s^2}} = 0,23m$$

- Tubos porta-aspersor:

$$\frac{v_3^2}{2g} = \frac{\left(1,498 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \frac{9,81m}{s^2}} = 0,114m$$

### 3.8. Justificación técnica: Diseño del sistema fotovoltaico

El sistema de riego requiere una instalación fotovoltaica que cubra la demanda de energía de los elementos eléctricos del sistema (bomba, PLC, electroválvulas, etc.) en todo tipo de condiciones atmosféricas. Para ello, se utilizarán los siguientes componentes:

#### 3.8.1. Generador fotovoltaico

El generador fotovoltaico es el conjunto de paneles solares que aportarán energía eléctrica al sistema.

Para un correcto dimensionamiento de los paneles solares hay que conocer la cantidad de energía que pueden aportar. Esta depende de la irradiación solar a la que se vean expuestos, de las características de los módulos fotovoltaicos y de su ubicación y orientación.

La ubicación de los paneles solares se realizará en la finca colindante a la estudiada (figura 2.1.4) debido a la cercanía con la instalación hidráulica.

Los módulos fotovoltaicos se encontrarán orientados al sur ya que según el PCT-A-REV (Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Aisladas de Red) de IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) el ángulo de azimut, es decir, el ángulo que forma la proyección sobre la horizontal de la normal a la superficie del módulo y el meridiano del lugar, óptimo es 0º y en España se corresponde con la orientación sur (En el hemisferio sur el valor ideal del ángulo de azimut son 180º). [27]

Para la inclinación ( $\Phi$ ) que deben de tener los paneles solares se sigue la siguiente tabla obtenida del PCT-A-REV:

Periodo de diseño	$\beta_{opt}$	$K = \frac{G_{dm}(\alpha=0, \beta_{opt})}{G_{dm}(0)}$
Diciembre	$\phi + 10$	1,7
Julio	$\phi - 20$	1
Anual	$\phi - 10$	1,15

Tabla 3.8.1.1. Ángulo de inclinación paneles solares. (Fuente: PCT-A-REV)

En esta tabla:

- $G_{dm}$  (óptima): Valor medio mensual o anual de la irradiación diaria sobre el generador orientado de forma que la energía obtenida sea máxima. (kWh/m<sup>2</sup>\*día)
- $G_{dm}$  (0): Valor medio de la irradiación diaria sobre el generador. (kWh/m<sup>2</sup>\*día)
- K: Relación entre la  $G_{dm}$  (óptima) y la  $G_{dm}$  (0)
- $B_{opt}$ : Ángulo de inclinación óptimo de los paneles solares.

Según estos datos, para que la K sea igual a 1 en julio, es decir, para que el  $G_{dm}$  (0) sea igual o lo más cercano posible a  $G_{dm}$  (óptima) y por tanto la irradiación sea la mayor posible sobre los módulos fotovoltaicos, el ángulo de inclinación más adecuado para ellos ( $B_{opt}$ ) sería igual al valor de la latitud ( $\Phi$ ) menos 20º. [27]

La latitud en la finca donde se situarán los paneles es de 42º:

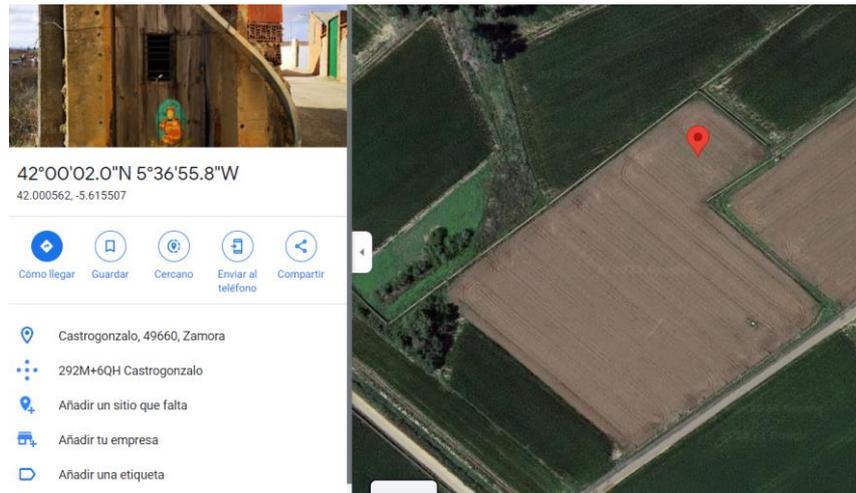


Figura 3.8.1.1. Latitud de la finca. (Fuente: Google Maps)

Por lo tanto,  $B_{opt}=42^{\circ}-20^{\circ}=22^{\circ}$ . Esto quiere decir que los paneles deberían de tener una inclinación de  $22^{\circ}$ , pero se tendrá en cuenta el valor de  $20^{\circ}$  para las estimaciones de irradiación solar debido a que es una inclinación más sencilla de encontrar en los soportes de placas que hay en el mercado.

Con el objetivo de estimar la irradiancia media que se obtendría en los paneles solares con la ubicación, orientación e inclinación especificadas, se utiliza la base de datos PVGIS de la Comisión Europea [28]. Para dimensionar el sistema fotovoltaico de forma que funcione correctamente, lo haremos en función del mes menos soleado de la temporada de riego (15 de junio-31 de agosto), es decir, en junio.

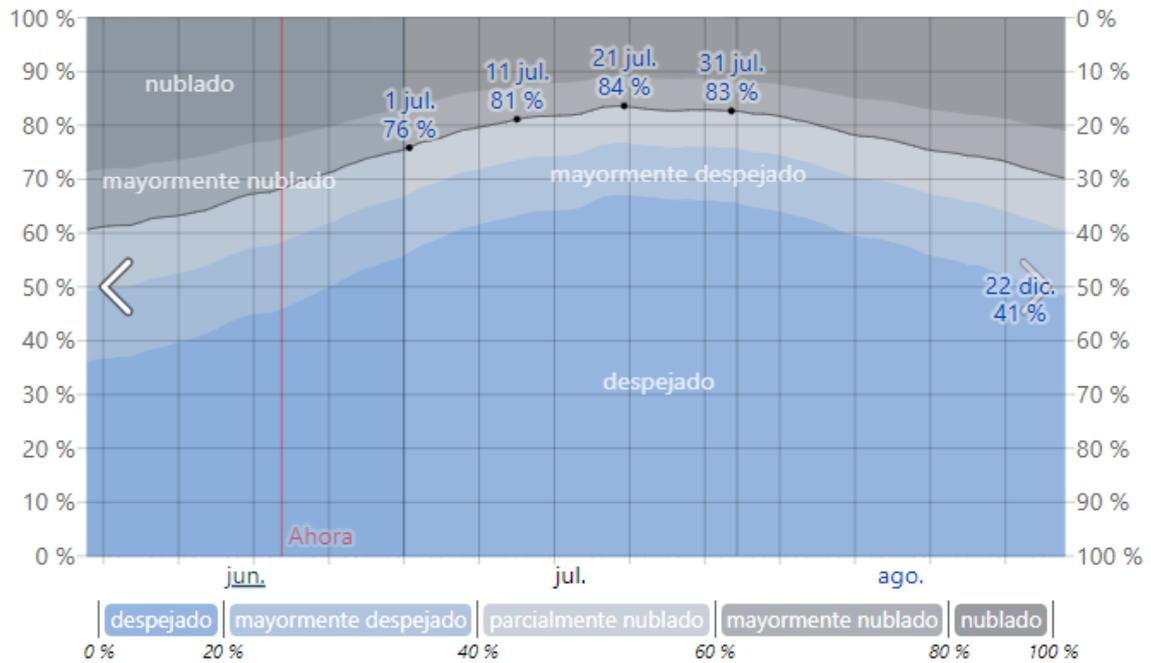


Figura 3.8.1.2. Porcentaje de tiempo pasado en cada banda de cobertura de nubes, categorizado según el porcentaje del cielo cubierto de nubes. (Fuente: Weatherspark)

Los datos obtenidos de irradiancia media en junio son:

**Irradiancia media diaria sobre plano fijo**

Hora	00:45	01:45	02:45	03:45	04:45	05:45	06:45	07:45	08:45	09:45	10:45	11:45	12:45	13:45	14:45	15:45	16:45	17:45	18:45	19:45	20:45	21:45	22:45	23:45
<b>G(i)</b>	0	0	0	0	0	11	94	264	457	629	761	849	892	882	801	678	508	327	151	36	0	0	0	0
<b>Gb(i)</b>	0	0	0	0	0	0	33	153	308	446	544	615	653	647	574	468	333	194	70	0	0	0	0	0
<b>Gd(i)</b>	0	0	0	0	0	11	60	109	147	179	212	230	233	229	222	206	172	130	80	36	0	0	0	0

G(i): Irradiancia global sobre plano fijo [W/m2].  
 Gb(i): Irradiancia directa sobre plano fijo [W/m2].  
 Gd(i): Irradiancia difusa sobre plano fijo [W/m2].

Tabla 3.8.1.2. Irradiancia media diaria sobre plano fijo con una inclinación 20° y azimut 0° (Fuente: PVGIS)

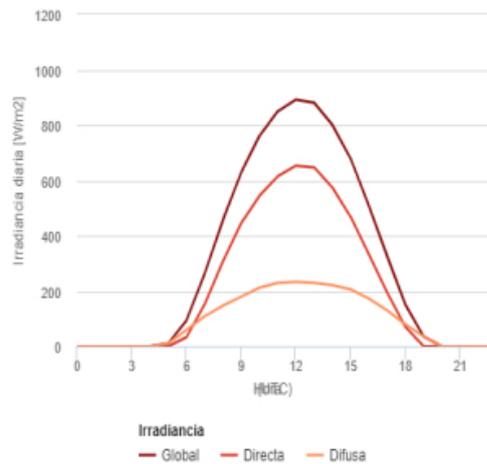


Figura 3.8.1.3. Gráfico de irradiancia media. (Fuente: PVGIS)

Como se especificó previamente, el sistema debe de estar funcionando 4 horas para cubrir la demanda hídrica del maíz, por lo que se programará para operar en las horas con más radiación solar que, según la tabla 3.8.1.2, son desde las 10:45 hasta las 14:45:

Periodo horario	Irradiación media en el mes de junio (W/m <sup>2</sup> )
10:45-11:45	849
11:45-12:45	892
12:45-13:45	882
13:45-14:45	801

Tabla 3.8.1.3. Irradiancia media mes de junio. (Fuente: PVGIS)

Dado que se busca dimensionar el sistema para el momento más desfavorable, se toma como referencia el valor más bajo de irradiancia dentro del periodo de 4 horas en el que va a funcionar la instalación, es decir, 801 W/m<sup>2</sup>.

Los módulos solares seleccionados son los JINKO Tier 1 Tiger Pro JKM545M-72HL4-V Monocristalino 545W. Sus características principales son [29]:

- Celdas: 144 de silicio monocristalino.
- Dimensiones (mm): 2274x1134x35
- Máxima potencia: 545Wp
- Tensión: 40.8V CC
- Corriente: 10.6A
- Tensión en circuito abierto: 49.52V CC

- Corriente de cortocircuito: 13.94V
- Protección: IP 68
- Longitud de los cables: (+) 400mm; (-) 200mm
- Degradación por año (hasta los 25 años): 0.55%

Estos paneles han sido seleccionados por presentar una elevada potencia pico y un buen comportamiento con el paso de los años.

El fabricante indica que el panel puede aportar 545 Wp para una irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>. Por tanto, se debe calcular la potencia que producirá el panel para una irradiancia de 801W/m<sup>2</sup>:

$$Potencia\ por\ panel = Potencia\ pico * \frac{Irradiancia\ real}{Irradiancia\ referencia} = 545\ W * \frac{801\ \frac{W}{m^2}}{1000\ \frac{W}{m^2}} = 436,54\ W$$

Es necesario conocer la eficiencia de la instalación para realizar una estimación apropiada del número de paneles necesarios. Esto se debe a que hay una serie de pérdidas que se deben tener en cuenta puesto que disminuirán la potencia que reciben los equipos de consumo. El IDAE (PCT-A-REV) indica que dichas pérdidas son [27]:

- Pérdidas por temperatura en los paneles solares.
- Pérdidas en el cableado.
- Pérdidas por dispersión de parámetros y suciedad.
- Pérdidas por errores en el seguimiento del punto de máxima potencia en los paneles solares.
- Eficiencia energética de otros elementos de la instalación como el inversor, variador, baterías, etc.
- Otras pérdidas como la degradación de los módulos con el paso del tiempo o las sombras que cubren la instalación (En el caso de este estudio serán 0 debido a que no hay nada cercano a la instalación que pueda cubrirla como árboles o edificios).

Según el PCT-A-REV, para el dimensionado del generador fotovoltaico se puede tener en cuenta un 0.6 de eficiencia en sistemas aislados con baterías.

Para proceder con el cálculo del número de paneles necesarios hace falta hacer una estimación del consumo de la instalación:

Equipo eléctrico	Consumo (W)
Bomba centrífuga	11000W (19)
PLC	Aproximadamente 30W
Electroválvula	13W (52)
Máx. electroválvulas activadas en el mismo momento: 4	13 W * 4 = 52 W
<b>Total</b>	<b>11082W</b>

*Tabla 3.8.1.4. Consumos del sistema*

El inversor, el variador de frecuencia y las baterías no se han incluido porque sus pérdidas ya han sido incluidas en el factor de 0.6 especificado anteriormente

Teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores, el número de módulos necesarios para esta instalación será:

$$N^{\circ} \text{ de módulos} = \frac{\text{Potencia necesaria}}{0,6 * \text{Potencia por panel}} = \frac{11082W}{0,6 * 436,54W} = 42,3 \cong 42 \text{ módulos}$$

La disposición y conexión de los paneles se determinará en función de los parámetros del inversor seleccionado.

### 3.8.2. Inversor

Es el equipo electrónico que transforma la corriente continua obtenida por los paneles fotovoltaicos a corriente alterna utilizable por los elementos de consumo.

Se ha escogido el inversor híbrido Deye SUN-12K-SG04LP3-EU debido a que dispone de la función de regulador de carga que permitirá cargar las baterías cuando las placas solares produzcan más energía de la necesaria y descargarlas cuando la energía procedente de las placas no sea suficiente. También incorpora la opción de conectar el inversor a la red, pero no será utilizada en esta instalación. A mayores, incorpora elementos de monitoreo y de seguridad que alargarán su ciclo de vida.

Sus características principales son [30]:

Yerai De Anta Casquero

- Rango de voltaje de las baterías: 40-60 V
- Máxima corriente de carga y descarga de baterías: 240V
- Rango de voltaje de entrada fotovoltaica: 160 V-800 V (Voltaje adecuado: 550V)
- Corriente de entrada fotovoltaica: 26+13 (A)
- Potencia de salida: 12000W. Es idónea para el consumo de la instalación (11085W) ya que asegura el correcto funcionamiento de los aparatos eléctricos a pesar de pérdidas en el cableado o en la eficiencia de los quipos.
- Voltaje de salida trifásica: 230/400 V AC
- Corriente de salida: 18.2 A
- Corriente máxima de salida: 20 A
- Frecuencia de salida: 50-60 Hz.
- Función MPPT (Maximum Power Point Tracking). Esta función consiste en realizar el seguimiento del punto de máxima potencia de los paneles de manera que se optimice la producción de energía.
- Compatible con baterías de litio, gel, AGM y plomo-ácido.
- Protecciones:
  - Protección contra rayos DC Tipo 2 y AC tipo 2
  - Protección de polaridad inversa de entrada de cadena fotovoltaica.
  - Protección contra sobrecorriente de salida.
  - Protección de cortocircuito de salida.
  - Protección contra sobre voltaje de salida.
  - Protección anti-isla. Esto quiere decir que, si la instalación está desenergizada, el inversor se desconectará automáticamente para evitar introducir corriente en el circuito que pueda causar peligros.
  - Protección IP 65.

Se podría haber utilizado un variador de frecuencia del motor que incluyese la función de invertir la corriente continua en corriente alterna, pero estos modelos no aportan las mismas prestaciones a la hora de incluir baterías en la instalación por lo que se ha seleccionado un variador de frecuencia común.

### 3.8.3. Variador de frecuencia

Elemento encargado de regular el motor en función de la energía procedente del sistema de alimentación.

Se ha de buscar un variador capaz de mantener la bomba (400 V AC, 11000 KW) en el punto óptimo de trabajo. Para ello se ha elegido el Siemens SINAMICS G120C 6SL3210-1KE22-6.

Las características que han determinado la elección de este modelo son [31]:

- Potencia nominal: 11000W  
Igual a la de la bomba centrífuga.
- Voltaje de salida: 380-480 V AC  
La bomba trabaja a 400V.
- Salida y entrada trifásicas: Permiten el conexionado y acople tanto de la bomba como del inversor.
- Corriente de salida: 25 A.  
Óptimo para la bomba debido a que esta utiliza 22,3 A.
- Frecuencia de salida: 0-550Hz.  
Apto para esta aplicación debido a que la bomba escogida opera a 2900 rpm, que equivale aproximadamente a 50Hz.
- Protección IP 20.
- Funciones importantes integradas:
  - o Posee un calculador de energía.
  - o Conexiones PROFINET, Ethernet, RS458.
  - o Contador de horas de funcionamiento, útil para la automatización del sistema.
  - o Integrado en el TIA Portal.
  - o Operable hasta 60º C.

La ventaja que presenta con respecto a otros variadores es que permite la fácil programación desde un PLC Siemens al estar integrado en TIA Portal y al tener tantos tipos de conexiones.

A mayores, como el variador de frecuencia se va a ubicar tan lejos del motor que va a controlar (aproximadamente 120 metros según medidas obtenidas del visor SigPac), debe instalarse un filtro dv/dt que proteja tanto el cable de alimentación como la bomba. Esto se debe a que cuando los cables entre el variador de frecuencia y el motor son de gran longitud, se presentan problemas de acoplamiento de impedancias y capacitancias variador-cable-motor que provocan sobretensiones muy dañinas para los equipos y el cableado, reduciendo así considerablemente su vida útil. El filtro dv/dt no soluciona el problema completamente, pero ayuda considerablemente a la conservación de la instalación. Se puede escoger el filtro 6SL3202-0AE23-8CA0 de la marca Siemens que se integraría fácilmente con el variador de frecuencia. Sin embargo, se ha escogido el modelo EBE 3064 del fabricante EURA Drives, debido a que es mucho más económico y sus características son aptas para la instalación [32]:

- Voltaje hasta 520 V AC
- Intensidad hasta 64 A
- Protección IP 20

#### 3.8.4. Baterías

Equipos encargados del almacenamiento de la energía para que esta sea utilizada en los momentos en los que la producción fotovoltaica no cubre la demanda o durante la noche, cuando esta es nula.

Son necesarios para asegurar que el riego se produce a pesar de que haya un día nublado y para mantener el PLC encendido de forma que se eviten desajustes en la automatización.

Debido a que esta instalación está diseñada para regar 4 horas al día en los meses de verano, es poco probable que se dé la situación en la que haya varios días seguidos con el cielo nublado durante todo el día, por lo que se seleccionarán baterías que puedan cubrir el consumo de 4 horas de riego, es decir, un día de trabajo. A mayores estas baterías servirán para mantener el PLC encendido durante la noche y así permitir la programación horaria del riego.

Consumo de la instalación durante 4 horas:  $11085 \text{ W} * 4 \text{ horas} = 44340 \text{ Wh}$

La fórmula para calcular la cantidad de carga que deben tener las baterías es:

$$\text{Total de carga necesaria} = \frac{\text{Consumo} * \text{Factor de corrección}}{\text{Profundidad de descarga}}$$

El factor de corrección sirve para compensar, de manera estimada, el deterioro de las baterías a lo largo del tiempo. Varía dependiendo del material del que está hecha la batería.

Este valor es de 1.05 en baterías de litio y 1.2 en baterías de plomo-ácido. [33]

La profundidad de descarga determina cuánto porcentaje de la batería es seguro descargar sin causar daños que acorten su ciclo de vida útil. Este dato también varía dependiendo de la composición de la batería.

Se han seleccionado 24 baterías de gel de 2V y 1600 Ah (C100) del fabricante BAE, con una profundidad de descarga del 70%. Como estas baterías son de gel, es decir, un tipo de las baterías de plomo-ácido, su factor de corrección será 1.2. Por tanto, el total de carga necesaria es:

$$\text{Total de carga necesaria} = \frac{\text{Consumo} * \text{Factor de corrección}}{\text{Profundidad de descarga}} = \frac{44340 \text{ Wh} * 1,2}{0,7} = 76011.42 \text{ Wh}$$

Si se conectan las 24 baterías en serie, al tener 2 V cada una, se obtiene un acumulador de energía que aportará un total de 48V, voltaje idóneo para conectarlo al inversor, puesto que opera con baterías de entre 40V y 60V. Además, junto con los 1600 Ah que entregan, se obtiene una carga de:

$$\text{Carga} = 48 \text{ V} * 1600 \text{ Ah} = 76800 \text{ Wh}$$

Por tanto, estas baterías contienen la carga necesaria para que la instalación funcione durante 4 horas sin energía fotovoltaica.

La conexión de las baterías sería la siguiente:

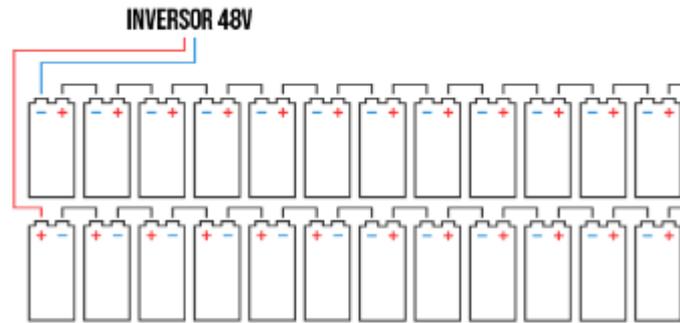


Imagen 3.8.1.4. Conexión baterías (Fuente: Google Imágenes)

### 3.8.5. Configuración de los strings

Una vez determinados los paneles solares e inversor que se van a utilizar en la instalación, hay que estudiar cómo se deben conectar dichos paneles para cumplir las necesidades y límites de tensión y corriente del inversor. Para ello, los módulos se pueden conectar en serie o en paralelo.

Si se conectan en serie, se forman cadenas de módulos llamadas “strings” que presentan un voltaje igual a la suma de las tensiones de todos los módulos conectados en serie y una corriente equivalente a la de un módulo. Por otra parte, si los strings se conectan en paralelo, la tensión total es la equivalente a un string y la corriente total es la suma de las corrientes de cada string.

Cabe apuntar que es imprescindible que los strings de una instalación fotovoltaica estén formados por la misma cantidad de módulos.

Además, es de suma importancia que además de escoger una configuración que cumpla los límites de tensión y corriente del inversor, esta se aproxime a la tensión recomendada por el fabricante del inversor, ya que en ese punto el equipo encontrará el punto de máxima potencia (MPP) de los paneles solares.

En esta instalación, al requerir 42 módulos, se ha elegido una configuración de 3 strings de 14 módulos cada uno. En la siguiente tabla se muestran los cálculos por los que se ha elegido esta configuración:

Configuración paneles = 3 strings de 14 módulos (51) (53)						
	Módulo Jinko 545W	String	Total en la entrada del inversor	Óptima para el inversor	Máximo admitido por el inversor	Apto: Sí/No
Voltaje (V)	40.8	40.8*14=571.2	571.2	550	800	Sí
Corriente (A)	10.6	10.6	10.6*3=31.8	-	26+13	Sí
Voltaje en circuito abierto (V)	49.52	49.52*14=693.28	693.28	-	800	Sí
Intensidad de cortocircuito (A)	13.94	13.94	13.94*3=41.82	-	34+17	Sí

Tabla 3.8.5.1. Configuración paneles solares. (Fuente: Elaboración propia)

### 3.8.6. Distancia mínima entre filas de módulos

Ahora que se conocen el número de cadenas y el número de paneles por cada una, se puede calcular la distancia que hay que dejar entre cada fila de módulos para evitar que se hagan sombra entre ellas.

Para ello se han seguido las indicaciones del PCT-C-REV, Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red, debido a que en el PCT-A-REV no se especifica la distancia mínima entre filas y además, se trata de un parámetro en el que no influye si la instalación es aislada o no.

El PCT-C-REV indica que la distancia  $d$  debe ser igual a [34]:

$$d = \frac{h}{\tan(61 - \text{latitud})} = \frac{A * \text{sen } \beta}{\tan(61 - \text{latitud})}$$

Siendo  $A$  el largo de la placa solar y  $\beta$  el ángulo de inclinación. Por tanto:

$$d = \frac{h}{\tan(61 - \text{latitud})} = \frac{2,275m * \text{sen } 20}{\tan(61 - 42)} = 2,25m$$

Utilizaremos entonces tres filas de módulos separadas 3 metros entre sí instaladas sobre este soporte sobre suelo regulable:



Figura 3.8.6.1 Soporte paneles solares. (Fuente: generatupropiaenergia.es)

La disposición de la instalación quedaría de la siguiente forma:

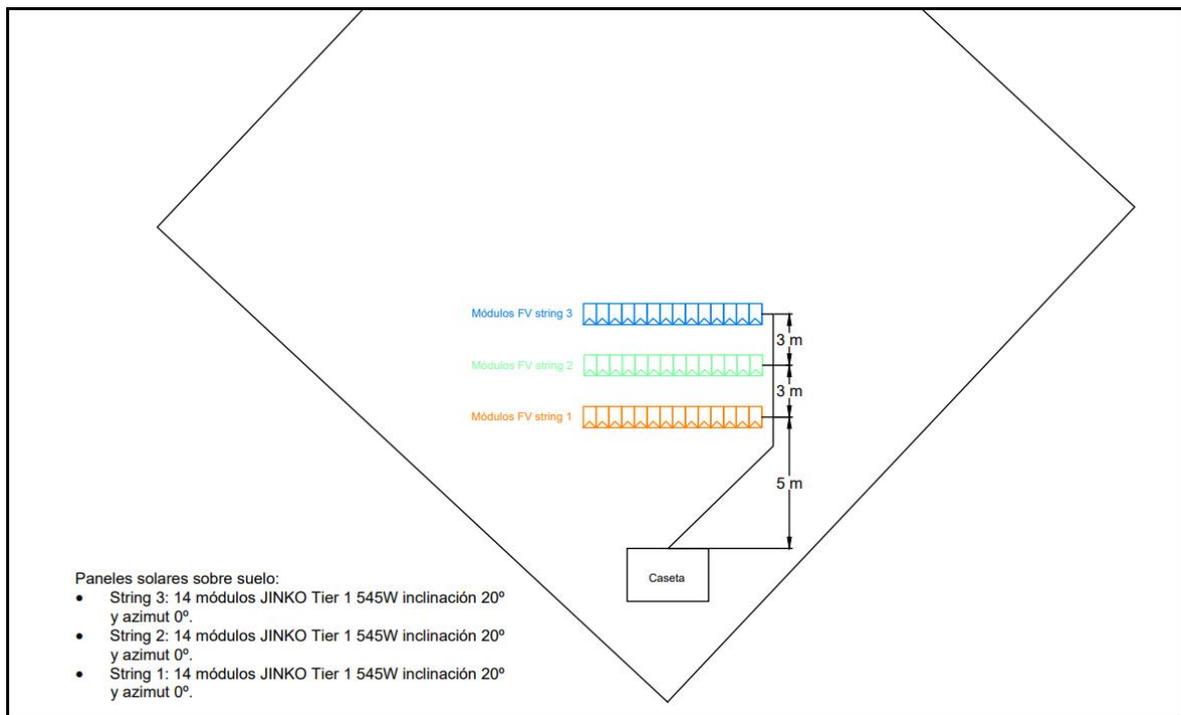


Figura 3.8.6.2. Disposición paneles solares. (Fuente: Elaboración propia)

### 3.8.7. Cableado

Para determinar el cableado, se deben seguir las indicaciones de la UNE-HD 60364-5-52:2022 (Instalaciones eléctricas de baja tensión. Selección e instalación de equipos eléctricos) [35] y del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, REBT. [36]

Además de esto, del PCT-A-REV se extrae el dato de que los conductores deben tener una sección suficiente para que la caída de tensión sea inferior al 1,5% de la tensión nominal continua del sistema. [27]

A mayores, hay que cumplir la norma ITC-BT-40 (Instalaciones generadoras de baja tensión) del REBT en la que se indica que la intensidad a la que se diseña la sección de un conductor debe ser un 25% mayor que la intensidad máxima que lo recorrerá.

El cableado de la instalación se va a diferenciar en varios tramos (La caja de protecciones incluirá tanto las protecciones de corriente continua como las protecciones de corriente alterna):

- Tramo 1 (CC): Conexiones desde los strings a la caja de protecciones (Para las protecciones de corriente continua).
- Tramo 2 (CC): Cableado desde la caja de protecciones al inversor.
- Tramo 3 (CA): Conexión inversor-caja de protecciones (Para las protecciones de corriente alterna).
- Tramo 4 (CA): Conexión desde la caja de protecciones hasta el variador de frecuencia
- Tramo 5 (CA): Conexión desde el variador de frecuencia a la bomba centrífuga
- Tramo 6 (CA): Conexión desde la caja de protecciones a la fuente de alimentación del PLC

#### 3.8.7.1. Tramo 1

Este tramo corresponde a los tres cables que van desde los strings de paneles solares hasta la caja de protecciones de corriente continua. Para dimensionarlos correctamente, hay que

tener en cuenta la intensidad de diseño indicada por el REBT y la caída de tensión admisible especificada por el PCT-A-REV.

Teniendo en cuenta esto y que la sección de un conductor de corriente continua se puede calcular con la fórmula:

$$S = \frac{2 * \rho * L * I * 1,25}{\Delta U * U}$$

Siendo:

- $\rho$ : Resistividad del cable
- $L$ : Longitud del cable
- $I$ : Intensidad máxima que recorrerá el cable
- 1,25: Sobredimensionamiento de la intensidad de diseño indicado por la ITC-BT-40
- $\Delta U$ : Caída de tensión admisible. Será siempre 0.015 según el PCT-A-REV
- $U$ : Tensión nominal

Las protecciones y los equipos eléctricos, excepto la bomba centrífuga, se situarán en una caseta cercana a los paneles solares para estar protegidos de las condiciones atmosféricas. Al estar cada fila de módulos, es decir, cada string, ubicados una detrás de otra a 3 metros de distancia como se indicó previamente, los cables procedentes de los strings tendrán diferentes longitudes entre sí. Como se puede ver en la Figura 3.8.6.2, la fila de módulos 3 se encontrará a 11 metros de la caseta, la fila 2 a 8 metros y la fila 1 a 5 metros. Debido a que la fila 3 es la que tiene la longitud más grande y el resto de los parámetros son iguales que en el resto de strings, se calculará la sección necesaria solo para esta fila ya que es en la que la sección resultará mayor, con el objetivo de establecer unas dimensiones de cable comunes para las tres filas de paneles solares.

Los cables procedentes de los strings se enterrarán, para alargar su conservación ante las condiciones atmosféricas, cercanos unos a otros, pero sin estar en contacto, de forma que no se vean afectados por el calor generado entre ellos y así no se puedan producir picos de corriente que afecten al aislamiento o a la instalación.

Los cables serán de cobre ( $\rho = 0,018 \Omega \frac{mm^2}{m}$ ).

La sección correspondiente la fila 3 de módulos será:

$$S = \frac{2 * \rho * L * I * 1,25}{\Delta U * U} = \frac{2 * 0,018 \Omega \frac{mm^2}{m} * 11 m * 13,94 A * 1,25}{0,015 * 571,2 V} = 0,81 mm^2$$

Según la ITC-BT-07 (Redes subterráneas para distribución en baja tensión) los cables de cobre no pueden tener una sección inferior a 6 mm<sup>2</sup>, por lo que, esta será la seleccionada en las tres filas de módulos. En cuanto al aislamiento, hay diferentes tipos como XLPE, EPR, PVC. Se seleccionará el XLPE debido a que presenta buenas propiedades mecánicas, resistencia a altas temperaturas y gran capacidad de aislamiento. Comprobando la intensidad máxima admisible para un cable unipolar de 6 mm<sup>2</sup> de cobre con aislamiento XLPE en esta tabla extraída de la ITC-BT-07:

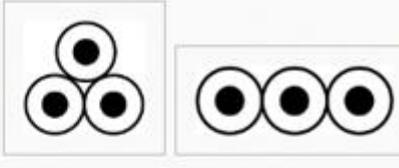
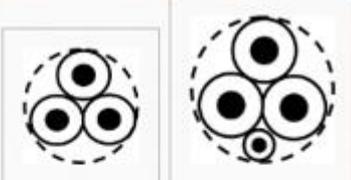
Sección nominal mm <sup>2</sup>	Terna de cables unipolares (1) (2)			1 cable tripolar o tetrapolar (3)		
						
	Tipo de aislamiento					
	XLPE	EPR	PVC	XLPE	EPR	PVC
6	72	70	63	66	64	56
10	96	94	85	88	85	75
16	125	120	110	115	110	97
25	160	155	140	150	140	125
35	190	185	170	180	175	150
50	230	225	200	215	205	180
70	280	270	245	260	250	220
95	335	325	290	310	305	265
120	380	375	335	355	350	305
150	425	415	370	400	390	340
185	480	470	420	450	440	385
240	550	540	485	520	505	445
300	620	610	550	590	565	505
400	705	690	615	665	645	570
500	790	775	685	-	-	-
630	885	870	770	-	-	-

Tabla 3.8.7.1.1. Intensidades máximas admisibles según el conductor. (Fuente: REBT)

La intensidad admisible para este tipo de cables es de 72 A, mayor a los 13,94 A procedentes de cada string, por lo que la sección seleccionada es apta.

3.8.7.2. Tramo 2

Este tramo incluye a los cables que van desde el cuadro de corriente continua hasta el inversor, los cuales estarán al aire libre (pero dentro de la caseta), tendrán 0,5 metros de longitud y se encontrarán en contacto, por lo que hay que tener en cuenta el efecto del calor que generan.

Para ello, debemos redimensionar la corriente que circula por ellos corrigiéndola con distintos factores de corrección en función de la agrupación de los cables, de la temperatura ambiente y del tipo de aislamiento. Se debe, por tanto, consultar la siguiente tabla extraída de la norma UNE-HD 60364-5-52:2022, la cual contempla los factores de reducción cuando hay más de un circuito en una misma canalización, como es el caso de los cables estudiados en este tramo:

**Tabla B.52.17 – Factores de reducción para un circuito o un cable multipolar o para un grupo de más de un circuito, o más de un cable multipolar para usarse con las corrientes admisibles de las tablas B.52.2 a B.52.13.**

Punto	Disposición (En contacto)	Número de circuitos o de cables multipolares											Para usarse con las corrientes admisibles, referencia	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16		20
1	Agrupados en el aire, sobre una superficie, empotrados o en el interior de una envolvente	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	B.52.2 a B.52.13 Métodos A a F
2	Capa única sobre pared, suelo o sistemas de bandejas de cables sin perforar	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70	Sin factor de reducción suplementario para más de nueve circuitos o cables multipolares			
3	Capa única fijada directamente bajo techo de madera	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				
4	Capa única sobre sistemas de bandejas perforadas horizontales o verticales	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				B.52.8 a B.52.13 Métodos E y F
5	Capa única sobre sistemas de bandejas de escalera, o bridas de amarre, etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				
<p>NOTA 1 Estos factores se aplican a grupos homogéneos de cables, cargados por igual.</p> <p>NOTA 2 Cuando la distancia horizontal entre cables adyacentes es superior al doble de su diámetro total, no es necesario ningún factor de reducción.</p> <p>NOTA 3 Los mismos factores de corrección se aplican:                      - a los grupos de dos o tres cables unipolares;                      - a los cables multipolares.</p> <p>NOTA 4 Si un sistema se compone de cables de dos o tres conductores aislados, se toma el número total de cables como el número de circuitos y se aplica el factor de corrección a las tablas para dos conductores cargados para los cables de dos conductores aislados y a las tablas para tres conductores cargados para los cables de tres conductores aislados.</p> <p>NOTA 5 Si un agrupamiento está formado por <math>n</math> cables unipolares, puede ser considerado como <math>n/2</math> circuitos de dos conductores cargados o como <math>n/3</math> circuitos de tres conductores cargados.</p> <p>NOTA 6 Los valores indicados son la media en el rango de las dimensiones de conductores y de los métodos de instalación de las tablas B.52.2 a B.52.13, la precisión general de los valores tabulados está en un <math>\pm 5\%</math>.</p> <p>NOTA 7 Para algunas instalaciones y para otros métodos de instalación no contemplados en esta tabla puede ser apropiado utilizar factores calculados para casos específicos, véase por ejemplo las tablas B.52.20 y B.52.21.</p>														

*Tabla 3.8.7.2.1 Factores de reducción. (Fuente: UNE-HD 60364-5-52:2022)*

En nuestro caso, el factor de corrección será de 0,7.

A mayores, hay que tener en cuenta la temperatura ambiente cuyo factor de corrección se obtiene de la siguiente tabla, obtenida también de la norma UNE-HD 60364-5-52:2022:

**Tabla B.52.14 – Factores de corrección para temperaturas ambiente diferentes de 30 °C a aplicar a los valores de las corrientes admisibles para cables en el aire**

Temperatura ambiente <sup>a</sup> °C	Aislamiento			
	PVC	XLPE y EPR	Mineral <sup>a</sup>	
			Cubierta de PVC o cable desnudo y accesible 70 °C	Cable desnudo e inaccesible 105 °C
10	1,22	1,15	1,26	1,14
15	1,17	1,12	1,20	1,11
20	1,12	1,08	1,14	1,07
25	1,06	1,04	1,07	1,04
30	1,00	1,00	1,00	1,00
35	0,94	0,96	0,93	0,96
40	0,87	0,91	0,85	0,92
45	0,79	0,87	0,78	0,88
50	0,71	0,82	0,67	0,84
55	0,61	0,76	0,57	0,80
60	0,50	0,71	0,45	0,75
65	-	0,65	-	0,70
70	-	0,58	-	0,65
75	-	0,50	-	0,60
80	-	0,41	-	0,54
85	-	-	-	0,47
90	-	-	-	0,40
95	-	-	-	0,32

<sup>a</sup> Para temperaturas ambiente más elevadas, consultar al fabricante.

*Tabla 3.8.7.2.2 Factores de corrección. (Fuente: UNE-HD 60364-5-52:2022)*

Suponiendo que la caseta alcance una temperatura de 40º en los días calurosos de verano y teniendo en cuenta que los cables tendrán un revestimiento XLPE, el factor de corrección será igual a 0,91.

Con estos factores, la intensidad corregida será:

$$I = \frac{13,94 \frac{A}{string} * 3 strings * 1,25}{0,7 * 0,91} = 82,06 A$$

La sección adecuada, en principio, para esta corriente sería:

$$S = \frac{2 * \rho * L * I * 1,25}{\Delta U * U} = \frac{2 * 0,018 \Omega \frac{mm^2}{m} * 0,5 m * 82,06 A * 1,25}{0,015 * 571,2 V} = 0,21 mm^2$$

Es necesario comprobar en la siguiente tabla de la norma UNE-HD 60364-5-52:2022 cuál es la intensidad admisible para los cables escogidos:

**Tabla C.52.1 - Corrientes admisibles en amperios - Temperatura ambiente 30 °C en el aire**

Método de referencia de la tabla B.52.1	Número de conductores cargados y tipo de aislamiento												
	A1	3 PVC	2 PVC	3 XLPE	2 XLPE								
A2	3 PVC	2 PVC		3 XLPE	2 XLPE								
B1				3 PVC	2 PVC		3 XLPE		2 XLPE				
B2			3 PVC	2 PVC		3 XLPE	2 XLPE						
C					3 PVC		2 PVC	3 XLPE		2 XLPE			
E						3 PVC		2 PVC	3 XLPE		2 XLPE		
F							3 PVC		2 PVC	3 XLPE		2 XLPE	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
<b>Tamaño (mm²) Cobre</b>													
1,5	13	13,5	14,5	15,5	17	18,5	19,5	22	23	24	26	-	
2,5	17,5	18	19,5	21	23	25	27	30	31	33	36	-	
4	23	24	26	28	31	34	36	40	42	45	49	-	
6	29	31	34	36	40	43	46	51	54	58	63	-	
10	39	42	46	50	54	60	63	70	75	80	86	-	
16	52	56	61	68	73	80	85	94	100	107	115	-	
25	68	73	80	89	95	101	110	119	127	135	149	161	
35	-	-	-	110	117	126	137	147	158	169	185	200	
50	-	-	-	134	141	153	167	179	192	207	225	242	
70	-	-	-	171	179	196	213	229	246	268	289	310	
95	-	-	-	207	216	238	258	278	298	328	352	377	
120	-	-	-	239	249	276	299	322	346	382	410	437	
150	-	-	-	-	285	318	344	371	395	441	473	504	
185	-	-	-	-	324	362	392	424	450	506	542	575	
240	-	-	-	-	380	424	461	500	538	599	641	679	
<b>Aluminio</b>													
2,5	13,5	14	15	16,5	18,5	19,5	21	23	24	26	28	-	
4	17,5	18,5	20	22	25	26	28	31	32	35	38	-	
6	23	24	26	28	32	33	36	39	42	45	49	-	
10	31	32	36	39	44	46	49	54	58	62	67	-	
16	41	43	48	53	58	61	66	73	77	84	91	-	
25	53	57	63	70	73	78	83	90	97	101	108	121	
35	-	-	-	86	90	96	103	112	120	126	135	150	
50	-	-	-	104	110	117	125	136	146	154	164	184	
70	-	-	-	133	140	150	160	174	187	198	211	237	
95	-	-	-	161	170	183	195	211	227	241	257	289	
120	-	-	-	186	197	212	226	245	263	280	300	337	
150	-	-	-	-	226	245	261	283	304	324	346	389	
185	-	-	-	-	256	280	298	323	347	371	397	447	
240	-	-	-	-	300	330	352	382	409	439	470	530	

NOTA Se debería consultar la tabla apropiada de corrientes admisibles dadas en el anexo B con el fin de determinar el rango de tamaños de los conductores para los cuales son aplicables las corrientes admisibles anteriores para cada método de instalación.

Tabla 3.8.7.2.3 Corrientes admisibles. (Fuente: UNE-HD 60364-5-52:2022)

Para encontrar la intensidad admisible correcta, se precisa buscar 3XLPE dentro de la fila B1 (porque se ha supuesto que los cables estarán dentro de un conducto, sin entrar en contacto con pared aislante), y una vez encontrada la columna correspondiente, hay que buscar la corriente inmediatamente superior a 82,06 A, que será 85 A. La sección de cable de cobre que soporta estos 85 A es de 16 mm<sup>2</sup>, por lo que será la escogida para este tramo.

#### 3.8.7.3. Tramos 3,4 y 6

En el caso de estos tres tramos, las características de los cables serán iguales ya que se trata de los cables que van desde el inversor a la caja de protección de corriente alterna y los cables que van desde dicha caja al variador de frecuencia y a la fuente de alimentación del PLC. Por tanto, tendrán las mismas condiciones ambientales, y transportarán una corriente y voltaje similares. Debido a esto, se escogerá la misma sección para ambos tramos.

Estos cables serán cables tetrapolares de cobre, tendrán un revestimiento XLPE y una longitud de aproximadamente 0,5 metros.

Para calcular la sección en corriente alterna se utiliza la siguiente expresión:

$$S = \frac{\sqrt{3} * \rho * L * I * 1,25}{\Delta U * U}$$

La corriente de salida del inversor es de 20 A y la tensión es de 400 V AC, por tanto:

$$S = \frac{\sqrt{3} * \rho * L * I * 1,25}{\Delta U * U} = \frac{\sqrt{3} * 0,018 \Omega \frac{mm^2}{m} * 0,5 m * 20A * 1,25}{0,015 * 400 V} = 0,065 mm^2$$

Como estos cables no están enterrados, no se sigue la condición de la IBT-BT-07 que indica que la sección mínima es de 6 mm<sup>2</sup>. Sin embargo, el cable que cumple estas características más pequeño encontrado es de 6 mm<sup>2</sup>, por lo que será la sección escogida para este tramo.

#### 3.8.7.4. Tramo 5

Este tramo incluye el cable que enlaza el variador de frecuencia, más concretamente, el filtro dv/dt instalado en la salida del variador, con el motor eléctrico de la bomba centrífuga.

El cable será tetrapolar de cobre con aislamiento XLPE, irá enterrado y tendrá una longitud de aproximadamente 120 metros. Además, su sección debe ser tal que pueda soportar los 400 V y 22,3 A que el variador le entregará a la bomba. La sección adecuada sería la siguiente:

$$S = \frac{\sqrt{3} * \rho * L * I * 1,25}{\Delta U * U} = \frac{\sqrt{3} * 0,018 \Omega \frac{mm^2}{m} * 120 m * 22,3A * 1,25}{0,015 * 400 V} = 17,38 mm^2$$

Debido a que los cables serán subterráneos, revisando la Tabla 3.8.7.1.1, se aprecia que la sección nominal de cables inmediatamente superior a 17,38 mm<sup>2</sup> es 25 mm<sup>2</sup>, cuya corriente admisible correspondiente es de 150 A en cables tetrapolares. Como por esta conexión circularán 22,3 A en condiciones normales, la sección de 25 mm<sup>2</sup> es adecuada para este tramo.

En esta imagen se representa la distancia entre la caseta y la bomba según el visor SigPac:

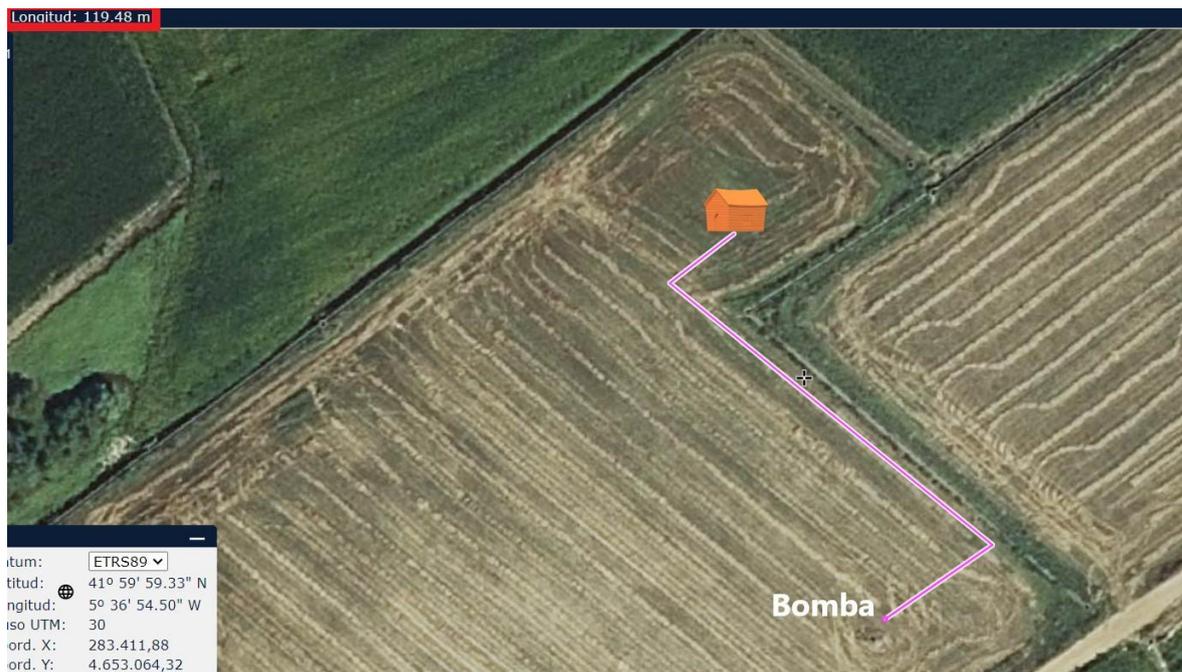


Figura 3.8.7.4.1. Distancia caseta-bomba. (Fuente: SigPac)

### 3.8.8. Protecciones

#### 3.8.8.1. Cuadro de protecciones

Con el objetivo de disponer de una instalación segura ante fallos de aislamiento, fallos de equipamiento o una mala utilización humana, se ha de añadir un cuadro de protecciones dimensionado de acuerdo con los voltajes e intensidades el circuito eléctrico.

Para ello, se ha escogido el cuadro de protección DC-3MPPT-AC400 del fabricante ERIA debido a que protege de sobretensiones y sobreintensidades tanto en corriente continua como corriente alterna. Sus protecciones son:

- En corriente continua:
  - 3 fusibles de 16 A cada uno, uno por string, siendo la máxima intensidad por cada string 13,94 A.
  - 3 descargadores de sobretensiones transitorias hasta 1000 V CC, siendo el valor máximo por cada string de 693,28 V.
- En corriente alterna:
  - Magnetotérmico 4P 32 A
  - Diferencia 4P 40 A 30mA
  - Descargador sobretensiones transitorias tipo 2 400 V AC.

Debido a que ningún aparato eléctrico de los incluidos en el circuito supera los 32 A o los 400 V AC, estas protecciones pueden funcionar correctamente.

A mayores de estos elementos de seguridad, tanto el inversor como el variador de frecuencia disponen de protecciones internas contra sobreintensidades que puedan afectar al circuito o al personal. Incluso se incluirá un fusible de 500 A y 80V para la conexión de las baterías.

3.8.8.2. Puesta a tierra

Las puestas a tierra son elementos que, en caso de que un humano entre en contacto con un equipo o cable en mal estado y se produzca una descarga eléctrica, permiten que la corriente eléctrica fluya a través de ellos en vez de por el cuerpo humano. Esto se debe a que tienen una mayor conductividad eléctrica que el cuerpo de un humano. Por lo tanto, es imprescindible instalar una toma de tierra adecuada para garantizar la seguridad del sistema.

Para la determinación de la puesta a tierra, se sigue la norma ITC-BT-18 (Instalaciones de puesta a tierra) del REBT [36]. Esta indica que el valor de resistencia de tierra debe de ser tal que cualquier masa no dé lugar a tensiones de contacto superiores a 24 V en zonas conductoras y 50 V en los demás casos. Como la instalación de este estudio tiene como objetivo el riego de tierras, se puede dar el caso de que el agua esparcida por los aspersores afecte a elementos eléctricos de la instalación por lo que se trata de una zona conductora y la tensión máxima de contacto debe de ser 24 V.

Por otro lado, la intensidad máxima de contacto será la misma que la sensibilidad del diferencial de la instalación, es decir, 30mA.

Con estos datos, la resistencia máxima será:

$$R_t = \frac{V_c}{I_c} = \frac{24V}{0,03A} = 800 \Omega$$

Ahora, es necesario dimensionar el electrodo de la puesta a tierra. Para esta instalación, se ha considerado suficiente utilizar una pica clavada en el suelo, cuya longitud depende de la siguiente ecuación obtenida de la ITC-BT-18 (64):

$$R = \frac{\rho}{L} \rightarrow L = \frac{\rho}{R}$$

Siendo  $\rho$  la resistividad del terreno, la cual viene indicada en la siguiente tabla:

Naturaleza del terreno	Valor medio de la resistividad Ohm.m
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terraplenes cultivables poco fértiles y otros terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables	3.000

Tabla 3.8.8.2.1 Resistividad del terreno. (Fuente: REBT)

Como nuestra instalación se encuentra sobre un terreno cultivable fértil, la resistividad será  $\rho = 50 \Omega m$ . Entonces, la longitud de la pica deberá de ser mínimo:

$$L = \frac{\rho}{R} = \frac{50 \Omega m}{800 \Omega} = 0,0625 m$$

Para cumplir con su función pues, será suficiente con una pica de 1 metro de longitud de hierro galvanizado.

En cuanto al cableado de la puesta a tierra, se sigue la siguiente tabla extraída de la instrucción ITC-BT-18:

Sección de los conductores de fase de la instalación S (mm <sup>2</sup> )	Sección mínima de los conductores de protección S <sub>p</sub> (mm <sup>2</sup> )
S ≤ 16	S <sub>p</sub> = S
16 < S ≤ 35	S <sub>p</sub> = 16
S > 35	S <sub>p</sub> = S/2

Tabla 3.8.8.2.1 Sección de los conductores de protección. (Fuente: REBT)

Los principales cables de la puesta a tierra son:

- El conductor de protección contra sobretensiones de corriente continua: Según la tabla anterior, su diámetro debe de ser de 16 mm<sup>2</sup> puesto que los cables que van desde las protecciones de corriente continua al inversor (tramo 2 del cableado) tienen dicha sección.
- El conductor de la tierra de la parte de la instalación que funciona en corriente alterna trifásica: El conductor de fase de esta parte de la instalación con mayor sección es el de 25 mm<sup>2</sup> (16 < S ≤ 35) por lo que, según la tabla, se debe escoger también una sección de 16 mm<sup>2</sup>.

### 3.9. Justificación técnica: Automatización del riego

Como se ha mencionado en puntos anteriores del estudio, para que este diseño sea lógico y eficiente, es necesario que esté programado de manera que se riegue a ciertas horas del día y dividiendo la parcela en sectores. Para ello, se empleará un PLC con los módulos pertinentes de forma que estos equipos controlen una serie de electroválvulas para ir abriendo y cerrando sectores de la red hidráulica, y un variador que a su vez es el que regula la actividad de la bomba centrífuga de agua.

#### 3.9.1. Elementos empleados en la automatización

- Electroválvulas Tameson: Sus características fueron expuestas en el punto “3.7.1.: Elementos empleados en la distribución del agua”.
- Controlador PLC Siemens 1212C DC/DC/Rly 6ES7 212-1HD30-0XB0:  
Se encarga de almacenar el programa y ejecutarlo en función de las necesidades del riego. Sus características principales según el programa TIA Portal son:
  - Memoria de trabajo 25 KB.
  - Fuente de alimentación 24 V DC.
  - 8 entradas digitales de 24 V DC y 2 entradas analógicas.
  - 6 salidas de relé y 2 salidas de impulso.
  - 4 contadores rápidos ampliables.
  - Hasta 3 módulos de comunicación serie y 2 módulos de señales para ampliación I/O.
  - Permite conexiones como PROFINET, adaptación a un HMI y comunicación PLC-PLC.
- Programa TIA Portal (Totally Integrated Automation): Herramienta desarrollada por Siemens cuyo principal objetivo es permitir desarrollar programas con funciones capaces de realizar cualquier proceso industrial, integrándolos en dispositivos de la propia marca.

- Módulo de fuente de alimentación Siemens 6EP3436-8SB00-0AY0: Esta fuente es necesaria para adecuar la tensión procedente del inversor a la tensión de alimentación que requiere el PLC (24 V CC). La fuente acepta una entrada trifásica de 400-500 V AC y entrega a su salida una tensión 24 V CC.
- Módulo de salidas SIMATIC S7-1200 6ES7222-1HF32-0XB0: Este módulo permitirá conectar todas las salidas del programa al PLC. Es necesario debido a que con las que el PLC trae no es suficiente.
- Sensor de nivel: Servirá para que en cuanto el nivel de agua del pozo baje de cierto valor en el que la bomba no puede realizar la aspiración, el proceso se detenga. Esto es muy importante para preservar la bomba y aumentar su ciclo de vida debido a que si funciona sin recibir la suficiente agua puede verse gravemente dañada.
- Pulsador: Será útil para activar el riego manualmente en caso de que este no se haya activado automáticamente por cualquier circunstancia o bien relacionada con la irradiancia del sol o bien con algún fallo en la automatización.
- Cables RV-K de 1.5 mm<sup>2</sup> con aislamiento PVC para las conexiones del PLC a las electroválvulas y de las electroválvulas al cable de tierra.

### 3.9.2. Programa y funcionamiento

Como se ha mencionado, en la programación se ha utilizado el programa TIA Portal de Siemens. En él se pueden utilizar los diferentes lenguajes de programación: KOP, SCL, CEM, FUP, GRAFCET y AWL. Sin embargo, en el PLC utilizado (S7-1200) sólo se incluyen los cuatro primeros. En el desarrollo del programa de riego, se ha utilizado el lenguaje KOP. Este lenguaje también recibe el nombre de Ladder y está basado en la lógica cableada.

Es fundamental apuntar que el controlador se encontrará activado todo el día independientemente de las condiciones meteorológicas gracias a la energía de las baterías. Esto asegurará un correcto funcionamiento del programa y evita posibles fallos por bajadas de tensión o corriente.

Para que el PLC reconozca la hora y determine el momento en el que se deben de encender el sistema de riego, es necesario primero configurar el reloj interno del PLC al huso horario en el que debe funcionar. Esto se hace entrando en las propiedades del controlador en el programa e introduciendo la siguiente configuración:

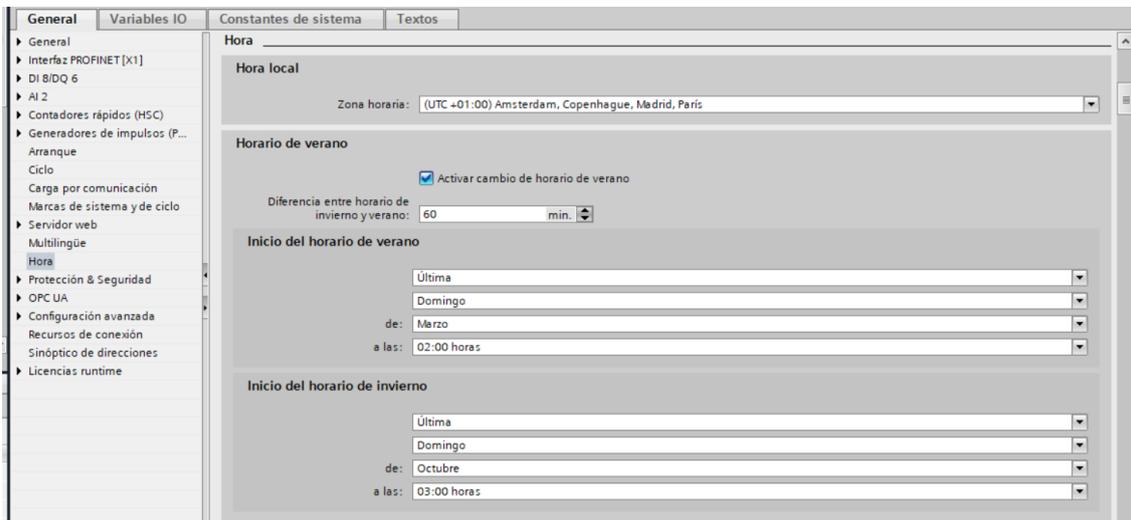


Figura 3.9.2.1. Cambio de hora PLC. (Fuente: TIA Portal)

Una vez hecho esto, se deben crear las variables de fecha y hora que permitirán configurar el programa en función de ellas:

Fecha y hora							
Nombre	Tipo de datos	Valor de arranq...	Remanen...	Accesible d...	Escrib...	Visible en ..	
Static			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Fecha_hora_sistema	DTL	DTL# 1970-01-01 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Fecha_hora_local	DTL	DTL# 1970-01-01 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Ret_val_sistema	Word	16#0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Ret_val_local	Word	16#0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_sistema	Time_Of_Day	TOD#00:00:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_local	Time_Of_Day	TOD#00:00:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_inicio	Time_Of_Day	TOD#00:00:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_fin	Time_Of_Day	TOD#00:00:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_inicio_ARRAY	Array[1..7] of Time...		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_inicio_ARRAY[1]	Time_Of_Day	TOD#10:45:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_inicio_ARRAY[2]	Time_Of_Day	TOD#10:45:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_inicio_ARRAY[3]	Time_Of_Day	TOD#10:45:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_inicio_ARRAY[4]	Time_Of_Day	TOD#10:45:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_inicio_ARRAY[5]	Time_Of_Day	TOD#10:45:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_inicio_ARRAY[6]	Time_Of_Day	TOD#10:45:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_inicio_ARRAY[7]	Time_Of_Day	TOD#10:45:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_fin_ARRAY	Array[1..7] of Time...		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_fin_ARRAY[1]	Time_Of_Day	TOD#14:45:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_fin_ARRAY[2]	Time_Of_Day	TOD#14:45:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_fin_ARRAY[3]	Time_Of_Day	TOD#14:45:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_fin_ARRAY[4]	Time_Of_Day	TOD#14:45:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_fin_ARRAY[5]	Time_Of_Day	TOD#14:45:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_fin_ARRAY[6]	Time_Of_Day	TOD#14:45:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Hora_fin_ARRAY[7]	Time_Of_Day	TOD#14:45:00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figura 3.9.2.2. Variables de fecha y hora del programa. (Fuente: TIA Portal)

La utilidad de estas variables se reflejará mejor posteriormente en los bloques KOP, pero es importante destacar el uso de los “arrays”, puesto que permiten utilizar una hora de comienzo diferente para cada día de la semana. En este estudio, debido a que la irradiancia es máxima entre las 10:45 y 14:45 horas, se utilizará el mismo horario para todos los días de la semana, pero se podría modificar según el día en caso de ser necesario.

De forma que el PLC tenga en cuenta la hora del día que es, se tienen que utilizar los bloques RD\_SYS\_T y RD\_LOC\_T que se utilizan para leer la hora del sistema y la hora local respectivamente:

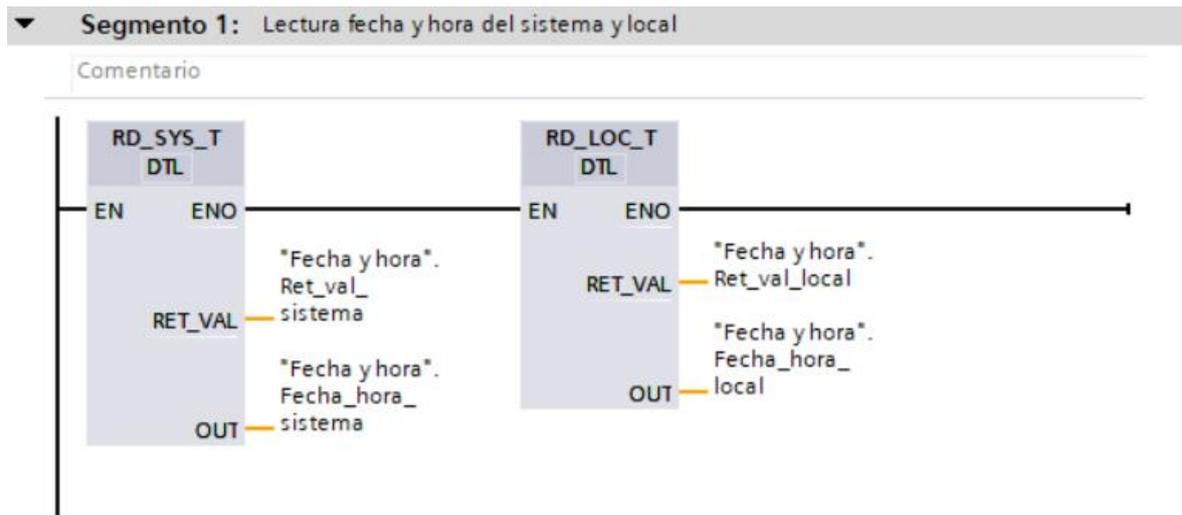


Figura 3.9.2.3. Lectura fecha y hora. (Fuente: TIA Portal)

El parámetro RET\_VAL muestra el estado de la instrucción, es decir, indica si se produce algún error, mientras que el parámetro OUT almacena la fecha y la hora en una variable.

Además de esto, se deben de utilizar los siguientes bloques de conversión T\_CONV, que nos permiten extraer de dentro de la variable de fecha y hora, una variable específica de la hora:

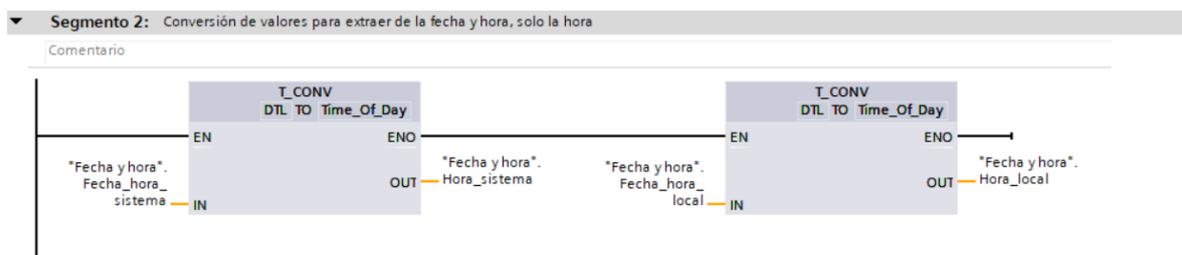


Figura 3.9.2.4. Conversión de valores. (Fuente: TIA Portal)

Esto es necesario para que el controlador disponga de una variable hora con la que realizar comparaciones que permitan activar elementos del riego dependiendo de la hora. A partir de este punto se empleará únicamente la hora local en el programa, la hora del sistema no será necesaria.

Por otro lado, se deben establecer dentro del programa las horas de inicio y fin del riego que el PLC comparará con la hora local para dar instrucciones. Con este fin, se utilizarán

dos bloques MOVE, que dependiendo del día de la semana que sea, extraerán la información de la hora de inicio y la hora fin de los arrays respectivos:

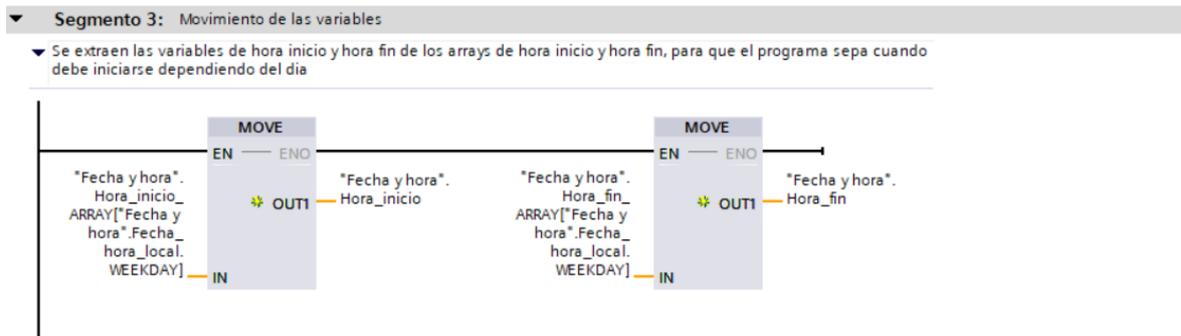


Figura 3.9.2.5. Movimiento de las variables (Fuente: TIA Portal)

Es una de las partes más complejas del programa ya que para que cumplan su objetivo es necesario que a la entrada de los bloques se introduzcan los arrays de hora inicio y hora fin con la peculiaridad de que, dentro de los corchetes, en vez de ir un número que representa el día de la semana como se ve en la figura 3.9.2.2, se utiliza la variable Fecha\_hora\_local.WEEKDAY. Esto quiere decir que el bloque leerá la información del array dependiendo del día de la semana que sea puesto que lo indica la variable fecha y hora. Si no se introdujera así la variable y se utilizara un número, el PLC sólo leería las horas de inicio y fin del día de la semana correspondiente a ese número. A pesar de que en este programa todos los días tienen las mismas horas de inicio y fin de riego, es una función interesante en caso de se requiera modificarlas.

Una vez establecidos los métodos para que el PLC identifique la hora que es y las horas a la que debe iniciar y finalizar el sistema de riego ya se pueden incluir las comparaciones de dichas variables:

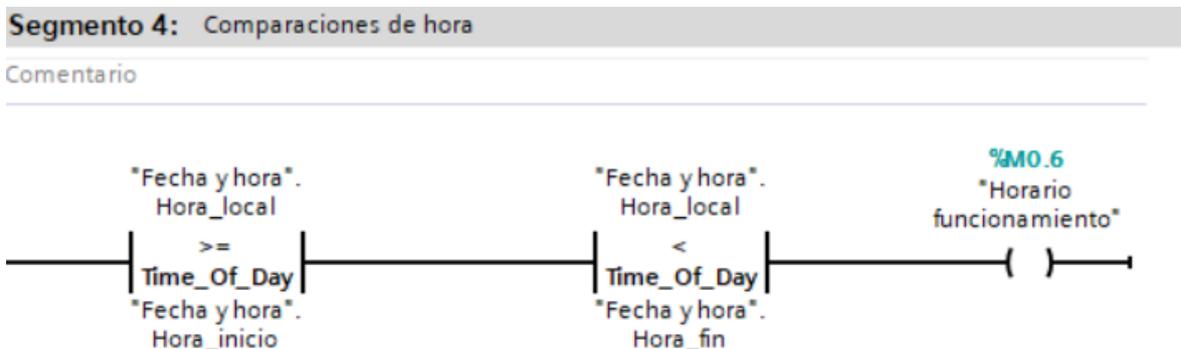


Figura 3.9.2.6. Comparaciones de hora. (Fuente: TIA Portal)

Se puede apreciar que, si la hora local es mayor o igual que la hora de inicio y a la vez menor que la hora de fin, se activará la bobina y el PLC lo reconoce como que se encuentra en el horario de funcionamiento.

A mayores de la condición de la hora, se utilizarán en el sistema un pulsador Start/Stop y un sensor de nivel para la seguridad de la bomba que dará un 1 lógico cuando esté en contacto con el agua y un 0 cuando no sea así. La integración del sensor en el programa se muestra en esta imagen:



Figura 3.9.2.7. Sensor de nivel (Fuente: TIA Portal)

El funcionamiento de este segmento es muy sencillo y simplemente, al utilizar un contacto normalmente cerrado, cuando el sensor entregue un 1, el contacto estará abierto, y la bobina estará a 0. Por otra parte, en el momento en el que el sensor se ponga a 0 debido a falta de agua en el pozo, la bobina se activará.

Con todas estas condiciones, ya se puede crear el segmento que incluya el funcionamiento general del programa:

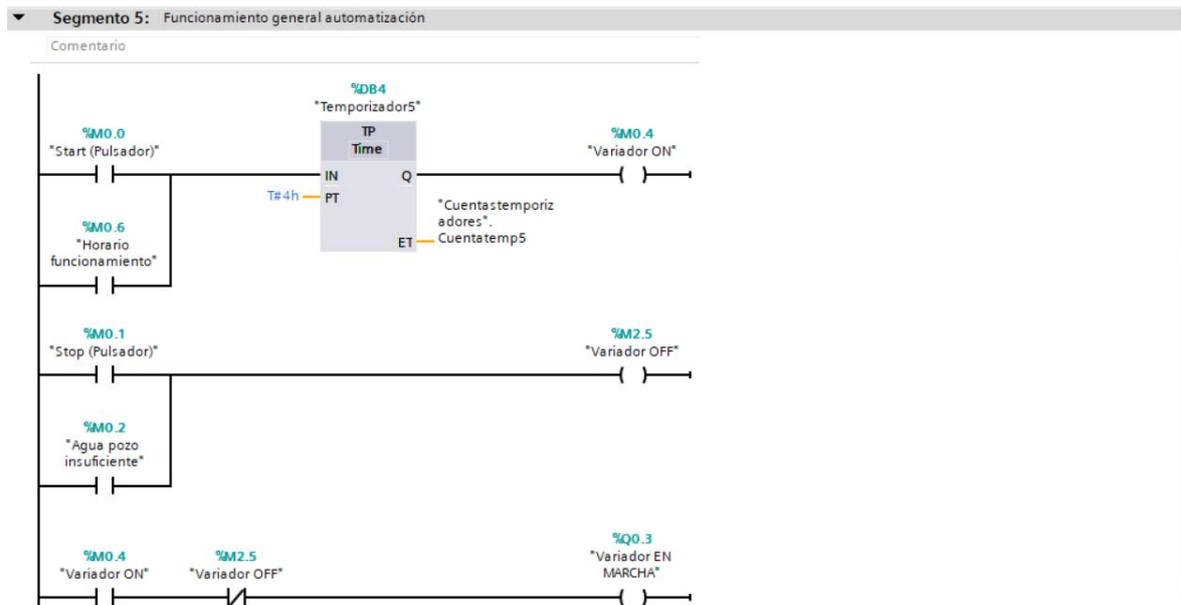


Figura 3.9.2.8. Funcionamiento general. (Fuente: TIA Portal)

En este segmento se incluyen varias funciones del programa:

- La bobina “Variador ON” se pondrá a 1 durante 4 horas (el tiempo necesario para regar la finca como se ha explicado en otros apartados del estudio) mediante la activación manual del pulsador Start o mediante la activación automática por parte del controlador cuando sea la hora programada. Para esto se utilizan contactos normalmente abiertos, los cuales dejan pasar la corriente cuando pasan de 0 a 1. Es necesario recalcar que las variables “Start(Pulsador)” y “Stop(Pulsador)” deberían de ser de tipo I porque son entradas en vez de memorias (Tipo M). Sin embargo, se han utilizado variables tipo M para poder forzar sus valores en la simulación del programa, lo cual no se permite con variables tipo I a menos que sean forzadas permanentemente. De esta forma, se ha podido comprobar sencillamente durante la creación del programa si el funcionamiento de los segmentos era correcto.
- Por otra parte, la bobina “Variador OFF” se activará cuando se utilice el pulsador de Stop o la variable “Agua del pozo insuficiente” se ponga a 1. Con esto se busca que el agricultor pueda parar el sistema si lo ve necesario o que se pare automáticamente para preservar la seguridad de la bomba centrífuga en caso de que esta no pueda absorber agua.

- La última línea del segmento incluye un contacto normalmente abierto para la variable “Variador ON” y un contacto normalmente cerrado para la variable “Variador OFF”. Esto hace que, si la bobina “Variador ON” está a 1, el contacto normalmente abierto se cierra y se activa la salida “Variador EN MARCHA”, siempre y cuando no se active la bobina “Variador OFF”, cuya función es detener el sistema independientemente de si se han dado las condiciones que activan la bobina “Variador ON”.

Ahora que se han incluido las condiciones que deben parar y arrancar el variador de frecuencia, el cual a su vez pone en marcha la bomba, se deben configurar las electroválvulas para que el riego de la finca se realice por sectores, regando una hora cada sector.

Para ello, se han elaborado los siguientes segmentos:

- Sector A:

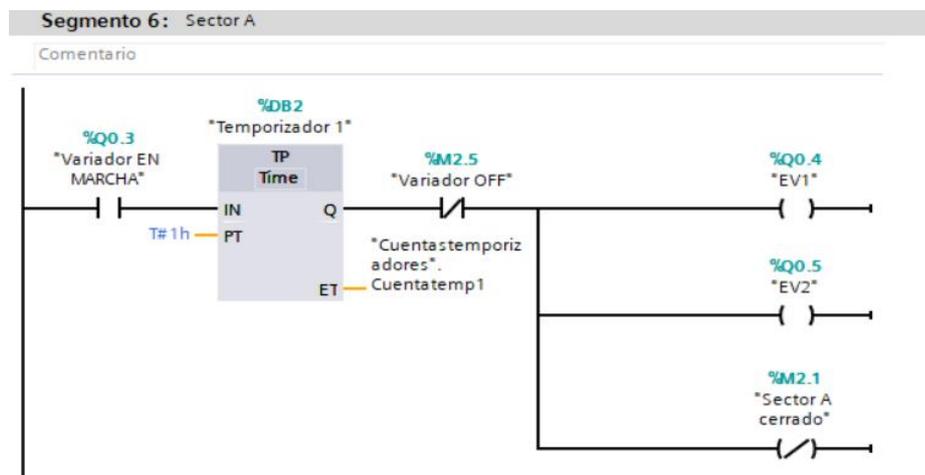


Figura 3.9.2.9. Sector A. (Fuente: TIA Portal)

Este segmento se enfoca en el sector A del terreno, el cual será el primero en ser regado. Es importante recordar que las electroválvulas son normalmente cerradas, por lo que se abrirán y dejarán pasar el agua cuando su estado pase de 0 a 1. Para este sector, sólo se necesita como condición de activación que el variador esté en marcha. Una vez lo esté, el temporizador arrancará y durante una hora abrirá las válvulas 1 y 2. Se ha incluido el contacto normalmente cerrado “Variador OFF” para que las válvulas

se cierran si el sistema se para, ya que como el temporizador se activa en cuanto su condición se pone a 1, no se detiene a pesar de que la condición pase a 0 hasta que ha acabado el tiempo configurado. Con esto se evita que, por ejemplo, el sistema se pare a los 5 minutos de comenzar a regar el sector, pero las válvulas se mantengan abiertas de forma inútil otros 55 minutos porque el temporizador se activó previamente.

Por último, se incluye la bobina normalmente cerrada "Sector A cerrado", la cual estará activa si no le llega corriente y viceversa. Será útil para activar el sector B cuando el sector A acabe.

- Sector B:

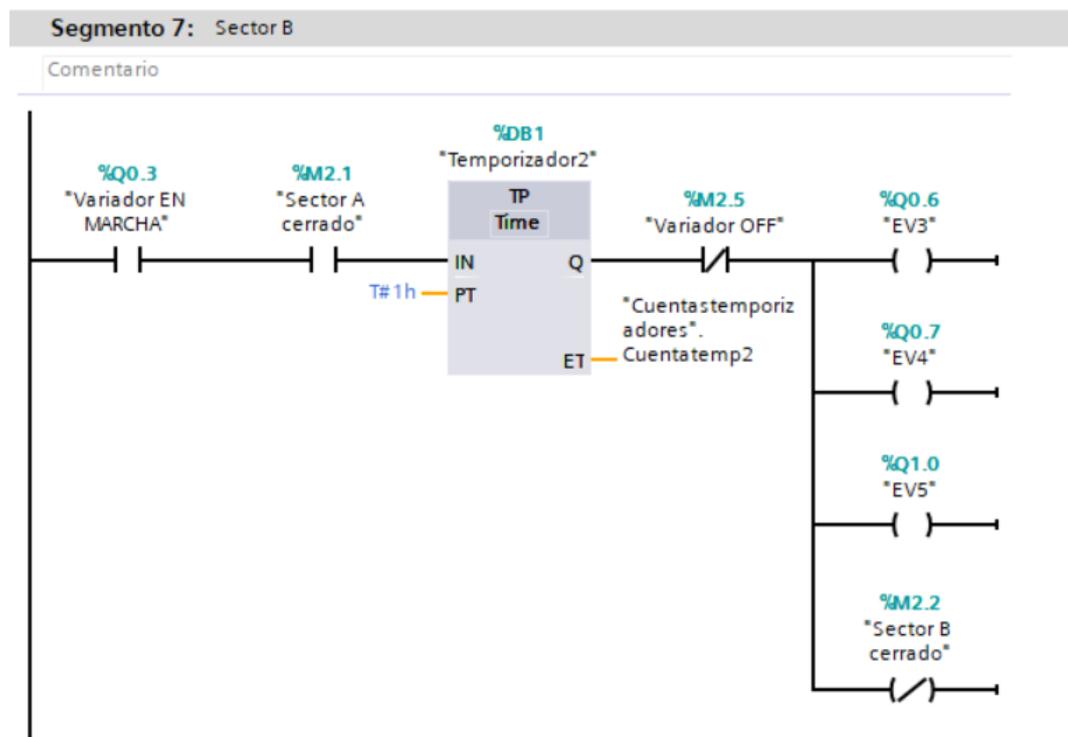


Figura 3.9.2.10. Sector B. (Fuente: TIA Portal)

El funcionamiento de este sector es igual que el sector A con la diferencia de que se activan las electroválvulas 3,4 y 5, y que se activa con la condición de que el variador esté en marcha y el sector A haya acabado. Los sectores C y D están igual configurados abriendo sus válvulas respectivas.

- Sector C

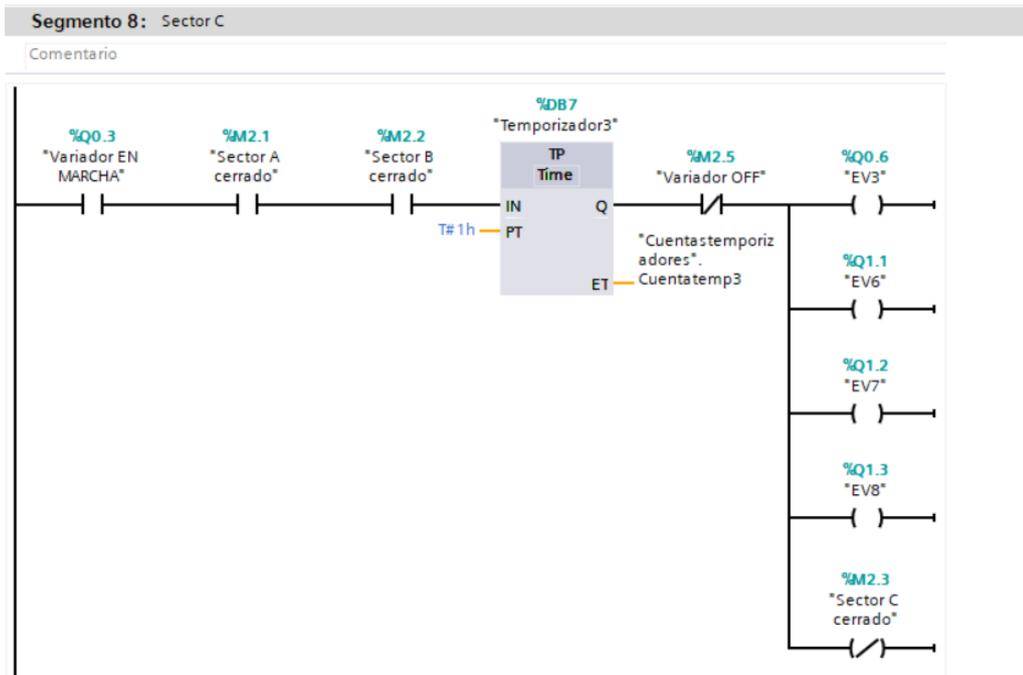


Figura 3.9.2.11. Sector C. (Fuente: TIA Portal)

- Sector D

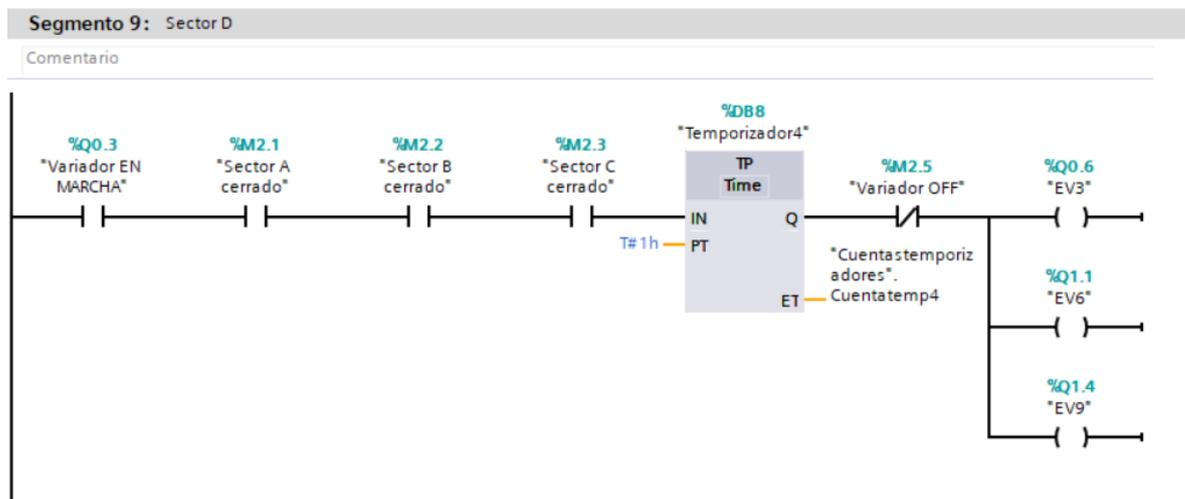


Figura 3.9.2.12. Sector D. (Fuente: TIA Portal)

Es imprescindible también apuntar la importancia de indicar al PLC que recuerde ciertas variables en caso de un apagón repentino por falta de energía o por un fallo en las conexiones. Esto permitirá que cuando vuelva el PLC a tener la suficiente energía para encenderse y, por tanto, cargar de nuevo el programa, continúe el riego en el punto en el que lo había dejado y así no vuelva a iniciarlo desde el principio. Esto se hace a través del

botón de “remanencia” de cada variable. En la siguiente imagen se muestra su utilización en las variables que almacenan las cuentas de los temporizadores:

Cuentas temporizadores				
	Nombre	Tipo de datos	Valor de arranq...	Remanencia
Static				<input type="checkbox"/>
	Cuentatemp1	Tíme	T#0ms	<input checked="" type="checkbox"/>
	Cuentatemp2	Tíme	T#0ms	<input checked="" type="checkbox"/>
	Cuentatemp3	Tíme	T#0ms	<input checked="" type="checkbox"/>
	Cuentatemp4	Tíme	T#0ms	<input checked="" type="checkbox"/>
	Cuentatemp5	Tíme	T#0ms	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 3.9.2.13. Remanencia de variables. (Fuente: TIA Portal)

En las siguientes ilustraciones se muestra el flujo del agua (línea roja) dependiendo de las electroválvulas que están abiertas (en verde) según este programa:

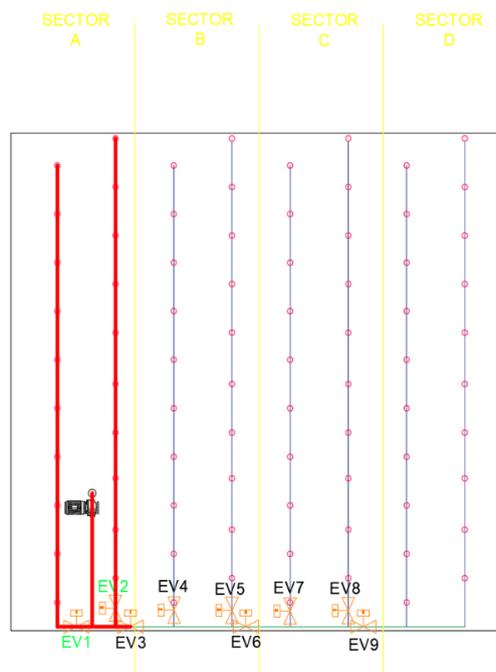


Figura 3.9.2.14. Recorrido agua sector A. (Fuente: Elaboración propia)

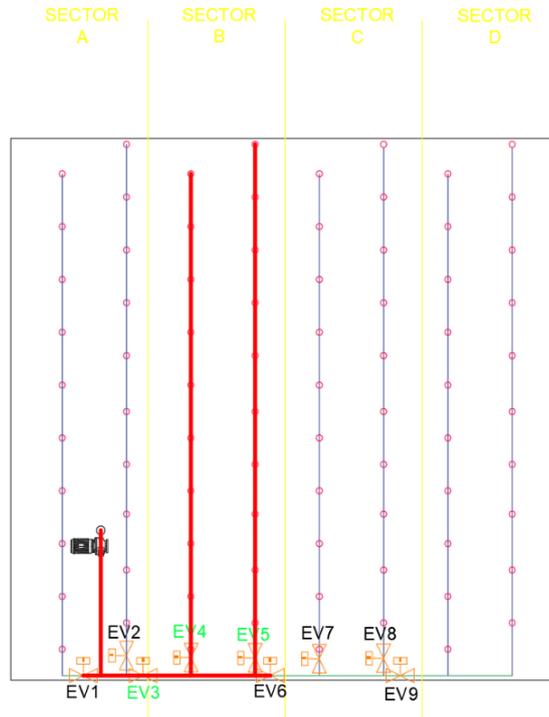


Figura 3.9.2.15. Recorrido agua sector B. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 3.9.2.16. Recorrido agua sector C. (Fuente: Elaboración propia)

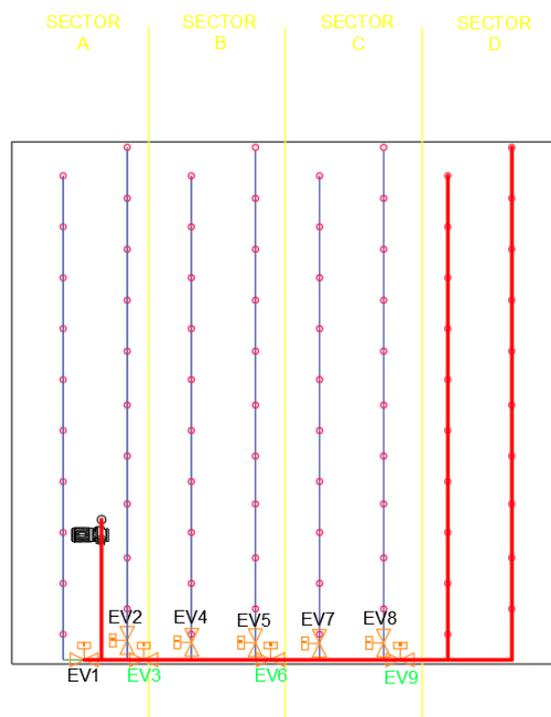


Figura 3.9.2.17. Recorrido agua sector D. (Fuente: Elaboración propia)

## 4. Presupuesto

Con el objetivo de dimensionar el coste de la instalación planteada, se han de tener en cuenta tanto los materiales como el coste de su instalación. Ambos se recogen en las siguientes tablas enfocadas en cada parte del sistema de riego:

### 4.1. Sistema hidráulico

Elemento	Cantidad	Precio unitario (€)	Importe total (€)
<b>Codo de 90º y 3" de diámetro</b>	3	15,30	45,9
<b>Tubo sin toma de agua de 6 m de longitud y 3" de diámetro</b>	18	32	576

<b>Tubo sin toma de agua de 3 m de longitud y 3" de diámetro</b>	8	23,50	188
<b>Reducción de 3" a 2"</b>	13	8	104
<b>Ampliación de 2 a 3"</b>	4	16,5	66
<b>Macho con brida de 2"</b>	1	20,50	20,50
<b>Macho con rosca de 2"</b>	9	7,95	71,55
<b>Hembra con rosca de 2"</b>	9	5,25	47,25
<b>Codo con brida a medida hecho en taller</b>	1	20	20
<b>T de 3"</b>	7	19,70	137,9
<b>Tubo sin toma de agua de 6 m de longitud y 2" de diámetro</b>	76	23,05	1751,8
<b>Tubo con toma de agua de 6 m de longitud y 2" de diámetro</b>	80	23,40	1872
<b>Tapón de 2"</b>	8	3,95	31,6
<b>Tubería porta-aspersor de 1 m de longitud y 3/4" de diámetro</b>	80	9,35	748
<b>Alargadera de 2 m de longitud y 3/4" de diámetro</b>	80	7,50	600
<b>Aspersores 5035 SD NaanDanJain</b>	80	9,29	743,2
<b>Bomba IR32-250C</b>	1	2180,18	2180,18
<b>Coste total sistema hidráulico</b>		9143.83 €	

Tabla 4.1.1. Presupuesto sistema hidráulico. (Fuente: Elaboración propia)

Esta tabla no incluye el coste de montaje de la instalación porque se entiende que el agricultor es capaz de realizarla por sí mismo.

## 4.2. Sistema fotovoltaico

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario (€)</b>	<b>Importe total (€)</b>
<b>Panel solar JINKO Monocristalino 545W</b>	42	219,95	9237,9
<b>Inversor híbrido Deye 12kW</b>	1	3250	3250
<b>Variador de frecuencia SINAMICS G120C</b>	1	2211,63	2211,63
<b>Filtro dv/dt EBE 3064</b>	1	85,18	85,18
<b>Pack 24 baterías de gel 2V BAE</b>	1	24456,91	24456,91
<b>Soporte para 14 paneles solares regulable</b>	3	535	535
<b>Cables unipolares de cobre de 6mm<sup>2</sup> XLPE</b>	(11+8+5)m=24 m	2,02 €/m	48,48

<b>Cables unipolares de cobre de 16mm<sup>2</sup> XLPE</b>	(0,5+0,5+0,5+1)m=2,5m	4,78 €/m	11,95
<b>Cables tetrapolares de cobre de 6mm<sup>2</sup> XLPE</b>	(0,5+0,5+0,5)m=1,5 m	4,48 €/m	6,72
<b>Cable tetrapolar de cobre de 25mm<sup>2</sup> XLPE</b>	120 m+1m=121m	16,87 €/m	2041,27
<b>Caja de protecciones</b>	1	775,88	775,88
<b>Pica de tierra</b>	1	51,98	51,98
<b>Caseta</b>	1	200	200
<b>Gestiones administrativas y certificados</b>	1	800	800
<b>Montaje y puesta en marcha de la instalación</b>	40 horas	25 €/h	1000
<b>Coste total sistema fotovoltaico</b>	44712,9 €		

Tabla 4.2.1. Presupuesto sistema fotovoltaico. (Fuente: Elaboración propia)

Se trata de una inversión considerable pero no desmesurada debido a que el sistema de bombeo tiene una gran potencia y por tanto, se necesita una instalación de gran tamaño para alimentarlo energéticamente.

### 4.3. Automatización

Elemento	Cantidad	Precio unitario (€)	Importe total (€)
<b>Electroválvula Tameson ST-IA 2"</b>	9	306,98	2762,82
<b>Controlador PLC Siemens S7-1200</b>	1	450	450
<b>Fuente de alimentación Siemens</b>	1	275	275
<b>Módulo de salidas SIMATIC S7-1200</b>	1	110,27	110,27
<b>Sensor de nivel</b>	1	20,89	20,89
<b>Pulsador Start/Stop</b>	1	11	11
<b>Cables de cobre RV-K de 1.5 mm<sup>2</sup> con aislamiento PVC (2 cables por electroválvula)</b>	Distancias a las que se encuentran las electroválvulas de la caseta: (88+97+82*2+67+52*2+37+22*2)m*2=1202m	1,4 €/m	1682.8
<b>Coste total automatización</b>	5312.78 €		

Tabla 4.3.1 Presupuesto automatización del proceso. (Fuente: Elaboración propia)

En este presupuesto específico de la automatización no se ha incluido el coste de la licencia del TIA Portal debido a que el programa que ejecutará el PLC se ha creado a través de una licencia facilitada por pertenecer a la Universidad de León.

En total, el gasto de todas las partes que constituyen la instalación es de:

$$9143,83 + 44712,9 + 5312,78 = \mathbf{59,169\text{€}}$$

## 5. Conclusiones

Este estudio se enfoca en tres puntos clave de un sistema de riego: viabilidad económica, sostenibilidad y respeto al medioambiente, y eficiencia del uso de agua.

En cuanto a la viabilidad económica, se requiere una inversión inicial considerable principalmente causada por la parte del sistema de riego que corresponde al generador fotovoltaico y sus equipos acordes a él, constituyendo el 75,56% de los costes totales. De estos costes, el gasto más significativo es el de las baterías de gel que almacenan la energía solar excedente y la utilizan para mantener el PLC encendido las 24 horas del día y para abastecer la bomba en días lluviosos o nublados. Por tanto, son un elemento difícilmente reemplazable ya que de la manera en la que está planteado el sistema de riego, son necesarias. Algunas opciones para sustituir las baterías podrían ser conectar la instalación a la red eléctrica o utilizar un grupo electrógeno.

La conexión a red no se ha contemplado en este estudio debido a que la finca está situada lejos de cualquier línea eléctrica convencional. Por tanto, sería necesario crear una nueva línea eléctrica junto con los aparatos correspondientes, lo cual supondría una gran inversión y dañaría el medioambiente puesto que se estropearía el paisaje de la zona rural y las aves podrían tener accidentes con la instalación. No se puede olvidar tampoco que, con la situación socioeconómica actual, el precio de la luz presenta una gran incertidumbre y puede provocar sobrecostes inesperados en la instalación.

Por otra parte, el grupo electrógeno podría ser una solución viable en términos económicos, pero su gran impacto en el medioambiente debido a las emisiones emitidas a la atmósfera, sumado a los variables y cada vez más altos precios del combustible, han hecho que se desestime esta opción en este estudio.

A mayores, las baterías suponen un coste fijo y en concreto las seleccionadas tienen una larga vida útil si se emplean adecuadamente. Esto supone que, al igual que el resto de la instalación fotovoltaica, el desembolso inicial será alto, pero prácticamente único durante un gran período de tiempo, lo que supone una gran ventaja con respecto al resto de alternativas mencionadas.

En términos de sostenibilidad y respeto al medioambiente, este sistema de riego cumple con todos los requisitos ya que, gracias a la utilización de energía renovable para suministrar electricidad a los equipos, se reduce el impacto ambiental y se asegura la obtención de energía durante muchos años.

Por último, el hecho de utilizar un sistema de aspersión en lugar del sistema de riego a manta empleado en dicha finca supone una gran cantidad de ventajas [37]:

- Puede haber escorrentía excesiva en el riego por surcos, lo que supone un poco de infiltración del agua en el terreno y por tanto en las raíces, y una mayor erosión del suelo. Sin embargo, en el riego por aspersión es imposible debido a que el agua es rociada sobre la planta
- La erosión del suelo es bastante alta, lo que provoca que se pierdan nutrientes esenciales, pesticidas, fertilizantes, etc. Además del problema que supone no disponer de ellos en el terreno, los productos químicos al ser arrastrados por el agua pueden infiltrarse en las aguas subterráneas y causar daños ambientales. En el riego por aspersión, la erosión es casi nula debido a que el agua cae sobre la superficie, no discurre por ella.
- Menor eficiencia de agua en el riego por surcos que por aspersión. Esto supone que se necesitará más agua para obtener los mismos resultados.

- En el caso de esta parcela, la pendiente es despreciable, pero si fuera otra parcela se debería de considerar que el riego por surcos necesita que la parcela esté nivelada mientras que en el riego por aspersión no.
- El riego por surcos es muy complicado de programar y automatizar debido a que es muy complicado aplicar dosis bajas de agua, todo lo contrario al riego por aspersión.
- Se requiere una elevada mano de obra para preparar los surcos mientras que el sistema de riego por aspersión solo requiere del montaje.

A mayores de todas estas ventajas, hay que tener en cuenta que el hecho de que el sistema de aspersión esté programado automáticamente reduce en gran medida el trabajo que tiene que realizar el agricultor, lo que le permitirá cultivar más tierras a la vez ya que dispondrá de más tiempo y, por tanto, aumentar sus beneficios al final de la campaña.

#### Líneas futuras de mejora

- Instalación subterránea de la red de aspersión. Se evitaría así que el agricultor tuviera que desmontar y montar la red hidráulica todos los años para poder realizar otras tareas en el terreno como sembrar o cosechar.
- Mover la instalación de las placas solares sobre la acequia paralela a la finca. Esto supondría que no se utilizaría la parcela secundaria para colocar los módulos. Se perdería eficiencia en la generación de energía debido a que no estarían colocados a 0º de azimut pero se dispondría de más superficie cultivable y el agua que discurre por ese tramo de la acequia estaría a la sombra por lo que se evaporaría menos y se aprovecharía más.
- Utilizar un soporte con seguimiento del Sol para las placas solares. Aumentaría el coste pero haría que se generase más luz solar, lo que por otro lado provocaría que se necesitasen menos módulos.
- HMI con el PLC. Permitiría al agricultor modificar el programa y los parámetros de riego cómodamente en caso de necesitarlo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, «Política Agraria Común,» [En línea]. Available: <https://pac.jcyl.es/web/es/normativa/PAC-2015-2020.html>. [Último acceso: Febrero 2023].
- [2] J. Á. Carpio, «Los mapas de la sequía en España,» *Datos RTVE*, 2022.
- [3] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Boletín hidrológico peninsular,» 2023.
- [4] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, «Informe anual de indicadores de agricultura, pesca y alimentación 2022,» 2022.
- [5] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, *La Energía en España 2019*, 2019.
- [6] Gobierno de España, «Sig Pac,» [En línea]. Available: <https://sigpac.mapama.gob.es/fega/visor/>. [Último acceso: Febrero 2023].
- [7] J. F. González, «Caracterización de las comarcas agrarias de España, provincia de Zamora,» Madrid, 2013.
- [8] N. Abbas, «Qué es el clima templado mediterráneo,» *Ecología Verde*, 2021.
- [9] L. C. Marcela Sánchez, «Estimación de evapotranspiración potencial, ETP, a partir de imágenes NOAAVHRR en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins,» *Norte Grande*, nº 36, pp. 49-60, 2006.
- [10] I. S. Ortega, «Maíz I,» *Reduca*, vol. 7, nº 2, pp. 151-171, 2014.
- [11] Gobierno de España, «La fertilización del maíz,» *Dossier Técnico*, nº 1, pp. 8-10, 2010.
- [12] «Sistemas de riego y necesidades hídricas del maíz,» Wikifarmer, [En línea]. Available: <https://wikifarmer.com/es/sistemas-de-riego-y-necesidades-hidricas-del->



- [20] «Electroválvula ST-IA,» Tameson, [En línea]. Available: <https://tameson.es/products/electrovalvula-st-ia-2-laton-epdm-0p5-16bar-24v-ac-st-ia200b500e-024ac>. [Último acceso: Abril 2023].
- [21] La Tienda Del Jardín, «Aspersor 5035SD,» [En línea]. Available: [https://latiendadeljardin.com/aspersores-agricolas/6019-aspersor-5035sd-riego-34-agricola-sectorial-8441000585678.html?gclid=Cj0KCQjwocShBhCOARIsAFVYq0iABAoO51DC6EHtLT6ULwHoA5K24Bo0A2i5KbAPqDdc0tC7JPLxmFQaAiOYEALw\\_wcB](https://latiendadeljardin.com/aspersores-agricolas/6019-aspersor-5035sd-riego-34-agricola-sectorial-8441000585678.html?gclid=Cj0KCQjwocShBhCOARIsAFVYq0iABAoO51DC6EHtLT6ULwHoA5K24Bo0A2i5KbAPqDdc0tC7JPLxmFQaAiOYEALw_wcB). [Último acceso: Marzo 2023].
- [22] Junta de Andalucía, «Configuración de redes de agua de instalaciones de refrigeración y climatización,» [En línea]. Available: [https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700502/moodle/file.php/76/2\\_Curso/0039.\\_Configuracion\\_de\\_instalaciones\\_de\\_frio\\_y\\_climatizacion/Capitulo\\_II/Cap\\_II\\_Ud\\_3\\_0039c.pdf](https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700502/moodle/file.php/76/2_Curso/0039._Configuracion_de_instalaciones_de_frio_y_climatizacion/Capitulo_II/Cap_II_Ud_3_0039c.pdf). [Último acceso: Abril 2023].
- [23] M. F. Raga, «Fluidodinámica. Pérdidas de carga».
- [24] J. L. G. D. J. L. D. O. F. G. M. Yanán Camazara Medina, «Ecuación explícita para el cálculo de factores de fricción en la zona de transición del régimen turbulento,» *Tecnología Química*, Vols. %1 de %2ISSN: 0041-8420, nº 1, pp. 76-83, 2010.
- [25] M. F. Raga, «Guiones prácticas Ingeniería Fluidomecánica,» 2023.
- [26] SAER, «Elettropompe centrifughe normalizzate EN733».
- [27] IDAE, «Pliego de condiciones técnicas de instalaciones aisladas de red,» Madrid, 2009.
- [28] «PVGIS,» Comisión Europea, [En línea]. Available: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/es/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/). [Último acceso: Mayo 2023].
- [29] Jinko Solar Co., «Tiger Pro 72 HC Datasheet».

- [30] SunDeye, «Hybrid inverter 12k Datasheet».
- [31] Siemens, «G120 Range Datasheet,» 2016.
- [32] «EBE3064 Filtro dV/dT 64A,» EURA Drives Online, [En línea]. Available: <https://euradrivestienda.com/es/tienda/filtrar-accesorios/filtros-dv-dt-salida/ebe3064-filtro-dv-dt-64a/>. [Último acceso: Junio 2023].
- [33] ReguLed, «Cálculo De Baterías Para Instalación Solar Aislada,» Regu-led, [En línea]. Available: <https://reguled.com/calculo-de-baterias-para-instalacion-solar-aislada/>. [Último acceso: Mayo 2023].
- [34] IDAE, «Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red,» Madrid, 2011.
- [35] AENOR, «UNE-HD 60364-5-52.Instalaciones eléctricas de baja tensión,» Madrid, 2022.
- [36] Gobierno de España, «Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.,» [En línea]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2002/08/02/842>. [Último acceso: Mayo 2023].
- [37] Ministerio de Agricultura, pesca y alimentación, «Riego por gravedad,» Gobierno de España, [En línea]. Available: <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de-conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/observatorio-de-tecnologias-probadas/material-de-riego/riego-gravedad.aspx>. [Último acceso: 2 Julio 2023].