

**Master in Tratamiento del Agua  
(2015/2016)**

**Bombeo solar con  
variadores de frecuencia  
para aplicaciones de  
regadío**

**Autor: Abraham González Ponce**

## Índice de contenidos

1. OBJETO Y ALCANCE DEL PRESENTE TRABAJO .....	5
2. CONTEXTO MUNDIAL DEL REGADÍO .....	6
2.1. Evolución histórica del regadío.....	6
2.2. Nuevas tendencias del sector.....	8
3. DISEÑO DE REGADÍOS .....	12
3.1. Cálculo de las necesidades de riego .....	12
3.2. Tasa de aplicación. Frecuencia y tiempo de riego .....	14
3.3. Importancia de un sistema de riego eficiente.....	16
3.4. Elección del sistema de riego más adecuado .....	16
3.5. Adecuación de los sistemas de riego al bombeo solar.....	19
4. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE REGADÍO .....	21
4.1. Riego superficial (por gravedad).....	21
4.2. Riego por aspersión .....	24
4.2.1. Tipos de aspersores .....	24
4.2.2. Sistemas de montaje de los aspersores .....	27
4.2.2.1. Sistemas de cobertura total .....	27
4.2.2.2. Pivote central.....	28
4.2.2.3. Laterales de avance frontal.....	30
4.2.2.4. Cañones móviles.....	31
4.2.2.5. Sistemas desplazables manualmente.....	32
4.2.2.6. Sistemas semi-fijos.....	33
4.2.2.7. Tuberías con ruedas.....	35
4.3. Micro-irrigación.....	37
4.3.1. Tipos de emisores.....	37
4.3.2. Filtros.....	41
4.3.3. Tuberías .....	44
4.3.4. Válvulas y accesorios .....	45
4.3.5. Control de riego .....	48
4.3.6. Fertiriego y herbiriego .....	48
5. TIPOS DE BOMBEO.....	51
5.1. Desde pozo .....	51

5.2.	Desde balsa, lago o río.....	54
6.	COMPONENTES PRINCIPALES DE UN SISTEMA DE BOMBEO SOLAR.....	55
6.1.	Motor eléctrico.....	55
6.2.	Bomba.....	57
6.3.	Generador fotovoltaico .....	58
6.4.	Controlador de bombeo .....	61
6.4.1.	Convertidores DC/DC.....	61
6.4.2.	Variadores de frecuencia.....	62
6.4.3.	Parámetros clave para seleccionar el controlador solar .....	67
6.4.3.1.	Algoritmo de control.....	67
6.4.3.2.	¿Instalación en armario o a la intemperie?.....	69
6.4.3.3.	Otros factores a tener en cuenta .....	71
6.4.4.	Principales variadores de frecuencia para bombeo solar.....	73
6.5.	Estructura soporte de los módulos. Seguidor solar.....	74
6.6.	Otros elementos: filtro de salida y protecciones DC .....	77
7.	ESTUDIO DE MERCADO DE BOMBEO SOLAR.....	82
7.1.	Situación de mercado y tendencia .....	82
7.2.	Principales actores .....	84
7.2.1.	Grundfos.....	84
7.2.2.	Franklin Electric.....	85
7.2.3.	KSB .....	85
7.2.4.	Lorentz.....	85
7.2.5.	Tata Power .....	86
7.2.6.	Bright solar.....	86
7.2.7.	SunEdison.....	86
8.	DIMENSIONADO DE BOMBEO SOLAR CON VARIADORES DE FRECUENCIA ..	87
9.	CASO PRÁCTICO .....	94
9.1.	Datos de partida .....	94
9.2.	Diseño hidráulico .....	100
9.2.1.	Finca 1 .....	100
9.2.2.	Finca 2 .....	115
9.3.	Diseño del sistema solar .....	125

9.3.1.	Finca 1 .....	125
9.3.2.	Finca 2 .....	130
9.4.	Estudio económico: solar vs grupo electrógeno o red.....	134
9.4.1.	Bombeo solar .....	134
9.4.1.1.	Inversión inicial .....	134
9.4.1.2.	Costes de operación.....	135
9.4.2.	Bombeo con grupo electrógeno.....	135
9.4.2.1.	Inversión inicial .....	135
9.4.2.2.	Costes de operación.....	139
9.4.3.	Bombeo con red eléctrica .....	139
9.4.3.1.	Inversión inicial .....	139
9.4.3.2.	Costes de operación.....	140
9.4.4.	Comparativa .....	140
10.	CONSIDERACIONES SOBRE LOS SISTEMAS HÍBRIDOS DE BOMBEO .....	143
10.1.	¿Red o grupo?.....	143
10.2.	¿Funcionamiento conmutado o simultáneo? .....	144
11.	CONCLUSIONES .....	146
12.	AGRADECIMIENTOS .....	148
13.	BIBLIOGRAFÍA .....	149

# 1. OBJETO Y ALCANCE DEL PRESENTE TRABAJO

El objeto del presente trabajo es acercar al lector al bombeo solar con variadores de frecuencia, por lo que describiremos los aspectos técnicos, económicos y de mercado principales relacionados con él, para particularizarlos posteriormente mediante el desarrollo de un caso práctico, en el que se contemplan las dos situaciones más típicas para el bombeo con variadores de frecuencia. Para ello:

Repasaremos primero el mercado del regadío, su evolución histórica y tendencias.

Posteriormente describiremos los parámetros principales del diseño de regadíos y de selección del sistema de riego más apropiado, así como la adecuación de éste al bombeo solar.

Describiremos después los distintos sistemas de riego (gravedad, aspersión, riego localizado) y los elementos principales que los componen.

Analizaremos más adelante las características específicas del riego desde pozo con bomba sumergible y desde balsa con bomba de superficie.

Describiremos también los componentes principales de un sistema de bombeo solar. Dedicaremos especial atención en este punto a la selección de variador de frecuencia en función de parámetros técnicos objetivos, más allá de los puramente económicos (su precio).

Analizaremos posteriormente el mercado actual y futuro del bombeo solar, incluyendo sus principales actores.

Nos adentraremos en el dimensionado de sistemas de bombeo solar con variadores de frecuencia, detallando el modelo propuesto en [3].

Finalmente, desarrollaremos un caso práctico en el que aplicaremos este modelo, adaptándolo a nuestras necesidades, para determinar la potencia pico de generador fotovoltaico necesaria. Para este caso práctico, diseñaremos tanto el sistema hidráulico como el solar, para dos fincas situadas en el mismo término municipal, pero con sistemas de bombeo completamente distintos: una con bombeo desde pozo y otra desde balsa.

## 2. CONTEXTO MUNDIAL DEL REGADÍO

### 2.1. Evolución histórica del regadío

La humanidad se enfrenta cada vez más a una escasez de agua dulce no contaminada, debido al cambio climático y a la presión demográfica, que conlleva un uso cada vez más intensivo de los recursos y una contaminación cada vez mayor de las fuentes de captación.

El principal uso del agua en la actualidad es el regadío. Según el *International Food Policy Research Institute (IFPRI)*, en 1995 se consumieron 1,799 km<sup>3</sup> de agua, de los cuales 1,436 km<sup>3</sup> se destinaron al riego, lo que supone alrededor de un 80% del total.

Optimizar y racionalizar los regadíos es, por tanto, de vital importancia para frenar este progresivo deterioro de nuestras reservas de agua.

Históricamente, los agricultores comenzaron a regar con el fin de incrementar y hacer más predecible la producción de las áreas cultivadas. Tradicionalmente, el único método de riego era el superficial, en el que el agua se distribuye por gravedad, mediante canales o inundación y que es muy ineficiente en el uso del agua.

Según las zonas de regadío se fueron incrementando y las fuentes superficiales de captación fueron escaseando, comenzó a bombearse agua subterránea de pozos y sondeos, primero mecánicamente y posteriormente también eléctricamente. Esto último permitió el desarrollo del riego por aspersión, ya que las bombas eléctricas pueden garantizar la presión requerida para el funcionamiento de los aspersores. La presión sobre las aguas superficiales primero y sobre las subterráneas después se fue incrementando, lo que llevó en muchos casos a sustituir bombeos superficiales por otros con bombas sumergibles y posteriormente a tener que bombear agua desde profundidades cada vez mayores mediante sistemas de bombeo cada vez de mayor potencia, lo que a medio plazo ponía en riesgo la sostenibilidad del regadío como concepto.

Para paliar este problema, en zonas de gran escasez de agua, aparecieron sistemas de riego más eficientes que la aspersión tradicional, como el goteo o

los micro-aspersores, que permiten disminuir la sobreexplotación de las fuentes de captación.

En USA, en 1998, según el *Bureau of Census Farm and Ranch Irrigation Survey 1998 USDA/ERS*, el riego superficial consumía el 63 % del agua para regadío, los sistemas tradicionales de aspersión un 33 % y los de micro-irrigación (goteo y micro-aspersores), sólo un 4 %. En otros países menos industrializados, el porcentaje de consumo del riego superficial podía llegar a ser muy superior, hasta un 90 %, o incluso más. Tanto en los países industrializados como en los menos industrializados, quedaba mucho camino por recorrer en cuanto a optimización de los recursos del agua, que garantizara la sostenibilidad a medio y largo plazo.

## 2.2. Nuevas tendencias del sector

Afortunadamente, en los últimos años, el mercado de la **micro-irrigación** se ha desarrollado espectacularmente. Según [15], el mercado habrá crecido hasta los 6,810 millones de \$ en 2021, con un crecimiento anual del 18,3 % desde 2016 a 2021.

Asimismo, existe una tendencia en el mercado hacia el “**riego inteligente**”, que tiene en cuenta los factores ambientales y las necesidades de cultivo simultáneamente, para optimizar el cuánto, dónde y cuándo regar. Así, comienzan a usarse sensores de humedad y de evo-transpiración, en combinación con el estudio del tipo de suelo y la inclinación del mismo, para determinar cuánta agua puede ser aplicada antes de saturar el suelo y provocar escorrentía. También comienzan a usarse controladores de riego que tienen en cuenta la previsión meteorológica, aparte de las necesidades del cultivo, posponiendo el riego si se prevé lluvia y programan riego extra en caso de olas de calor.

Según [15], el mercado de riego inteligente será en 2022 de 1,504.6 millones de dólares, con un crecimiento del 17.2 % anual, aunque tendrá más impacto en los riegos no relacionados con agricultura (campos de golf, jardines, ...).

También existe una tendencia en el mercado del regadío hacia la **reutilización de agua, normalmente proveniente de EDAR**, así como de la **utilización de agua desalada**, procedente de aguas salobres o marinas. En ambos casos, España está a la vanguardia mundial.

Así, según el Instituto Nacional de Estadística, INI, en 2014 el 12 % del agua de EDAR era ya reutilizada, siendo más del 70% de esta cantidad destinado para el riego de cultivos y cerca del 10 % para riego de campos de golf, en los que el uso de agua reutilizada es obligatorio por ley, aunque no todos los campos cumplan la normativa.

Por su parte, según el Ministerio de Medio Ambiente, de los 220 hm<sup>3</sup>/año de agua que se desalaron en España en el año 2000, el 28 % se utilizaron para regadío, preferentemente procedentes de aguas salobres, por el menor coste energético y por tanto económico, asociado a utilizar técnicas de desalación



cuyo consumo energético es proporcional a la salinidad del agua, como la electrodiálisis o la ósmosis inversa.

Con respecto al consumo de energía primaria, la tendencia es claramente hacia la **electrificación de los bombeos**, frente a los sistemas mecánicos. La energía eléctrica puede provenir de la red eléctrica local, de generadores diésel o de fuentes renovables. De éstas últimas, la **energía solar fotovoltaica** es claramente la más indicada, por su mayor predictibilidad y la buena correspondencia en muchos países entre las necesidades estacionales de riego y la disponibilidad de recurso solar. Además, el coste por kWh generado fotovoltaico ha disminuido considerablemente en los últimos años, alcanzado la paridad de red o siendo incluso más económico en numerosos países, como se muestra en la *Ilustración 1* para el caso de la India.

Las redes eléctricas en zonas rurales suelen ser débiles, incluso en países industrializados. Es decir, se vuelven inestables tanto en frecuencia como en tensión ante cambios rápidos en los consumos de potencia activa y reactiva en la red y se sobrecargan con mayor facilidad, lo que afecta a su fiabilidad y a su disponibilidad. Además, las zonas de cultivo están normalmente apartadas de los núcleos de población, por lo que se requieren extensiones de la red, que pueden resultar costosas económicamente e incrementar aún más la debilidad de la misma, si se quiere abastecer las necesidades de consumo eléctrico del regadío. En países en vías de desarrollo la situación es aún peor y pueden existir restricciones de horario en la red local y frecuentes apagones que pueden prolongarse durante horas.

Los grupos electrógenos han sido históricamente la principal alternativa a la red eléctrica convencional en zonas remotas por su bajo nivel de inversión inicial. Sin embargo, presentan numerosas desventajas si los comparamos con los sistemas fotovoltaicos:

- Mayor coste de operación, debido al coste del combustible y a mayores costes de mantenimiento y, por tanto, mayor coste de la electricidad producida.
- Contribuyen a la contaminación local, tanto por sus emisiones como por un mayor riesgo de vertidos accidentales de combustible o aceite.

- En muchos países, perpetúan la dependencia energética de países extranjeros y de las fluctuaciones de precio de los combustibles en el mercado global.
- Sólo cubren el mercado de bombas de corriente alterna (CA)
- Debe sobredimensionarse convenientemente para aguantar el pico de arranque de la bomba o dotar al sistema de un arrancador suave que permita un arranque en rampa.

Por todos estos motivos, la tendencia global es el empleo de los sistemas fotovoltaicos, tanto en los nuevos sistemas de bombeo instalados como en la reconversión de antiguos sistemas de bombeo alimentados de una red eléctrica muy débil o un grupo electrógeno, cuando la bomba y/o el grupo tienen que ser sustituidos. En estos dos últimos casos, también es necesario cambiar la bomba, normalmente diseñada para trabajar a la altura manométrica de la instalación y 50/60 Hz, por otra que sea capaz de bombear agua a esa altura manométrica, pero para frecuencias muy inferiores, del orden de 30 Hz, con el fin de poder bombear agua también en condiciones de baja radiación solar.

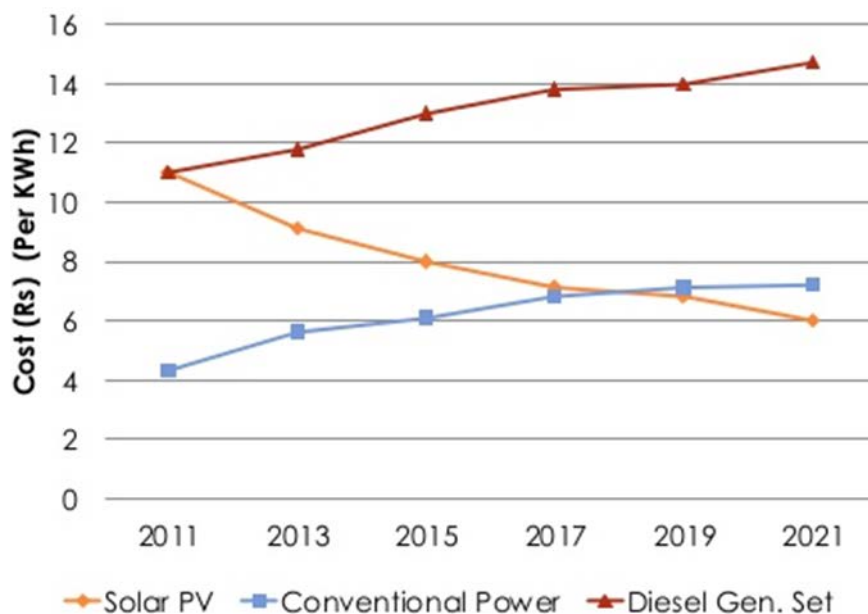
El potencial es muy grande: sólo en la India hay 21 millones de bombas para riego, de las cuales 9 millones están alimentadas por generadores diésel y el resto por la red (*Amit Jain, Stellina Jolly, 2012*). Según el *Ministry of New and Renewable Energies of India*, se instalan anualmente 700,000 bombas diésel, que podrían sustituirse por bombas solares.

En sistemas de bombeo de media y alta potencia, empiezan a utilizarse también **sistemas híbridos de bombeo**, sin acumulación, en los que la fuente preferente es la **fotovoltaica** y la **red eléctrica/grupo electrógeno** se utiliza como apoyo.

La mayoría de los modelos de variador de frecuencia para bombeo solar permiten este funcionamiento híbrido, pero, normalmente, hay que elegir en cada momento la fuente de energía, mediante un conmutador: solar o red/grupo electrógeno, pero no ambas de forma simultánea.

Sin embargo, empiezan a aparecer en el mercado soluciones que se anuncian como de **operación simultánea (solar asistido)**, por lo que parte de la

potencia proviene del generador fotovoltaico y el resto hasta cubrir las necesidades del sistema de regadío, proviene de la red/grupo electrógeno.



*Ilustración 1. Coste de la electricidad en la India (rupias por kWh) para distintas fuentes de generación. Fuente: Recogido en [11], cortesía de Headway Solar (P) Ltd.*

### 3. DISEÑO DE REGADÍOS

#### 3.1. Cálculo de las necesidades de riego

Lo primero que hay que hacer es calcular las necesidades de riego del cultivo, para la zona climática concreta donde se ubica. Recogemos a continuación la metodología propuesta por el SIAR (<http://crea.uclm.es/siar/>), que es el Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de Castilla la Mancha, donde se ubicará nuestro caso de estudio.

Las Necesidades Brutas de Riego, dadas en mm o, lo que es lo mismo, en l/m<sup>2</sup> de terreno, se obtienen mediante la siguiente ecuación, en la que se han despreciado los efectos de la escorrentía, percolación profunda y ascensión capilar:

$$N_b = (ET_c - P_e + D_w) / E_a$$

siendo

$$ET_c = ET_o \times K_c \times K_1$$

– ET<sub>c</sub>: Evapotranspiración del cultivo.

Cantidad de agua que un cultivo puede evaporar cuando se encuentra en buenas condiciones de alimentación hídrica y con el suelo próximo a la capacidad de campo.

En el caso de riego localizado habría que multiplicar la ET<sub>c</sub> por un coeficiente de localización (K<sub>1</sub>) que depende del porcentaje del suelo sombreado por el cultivo.

- ET<sub>o</sub>: Evapotranspiración de referencia, depende de la zona climática
- K<sub>c</sub>: Coeficiente de cultivo.
- K<sub>1</sub>: Coeficiente de localización, cuantificado por diversos autores en función de la fracción de área sombreada por el cultivo (A).

$$A = \frac{\pi D^2}{4 a b}$$

D: Diámetro aéreo de la planta, en m.

a: separación entre plantas consecutivas en una misma fila, en m.

b: separación entre filas de plantas, en m.

a x b: marco de plantación, en m<sup>2</sup>.

Aljiburi:  $K_1 = 1,34 A$

Decroix:  $K_1 = 0,1 + A$

Hoare et Al.:  $K_1 = A + 0,5 (1 - A)$

Keller:  $K_1 = A + 0,15 (1 - A)$

Por las diferencias entre los valores propuestos por estos autores,  $K_1$  se estimará cogiendo la media de los valores medios (eliminando los extremos).

En los cultivos con riego localizado donde  $A > 85\%$  (lechuga, tomate, cebollas, etc.), al tener que mojar todo el suelo, no se aplicará este coeficiente de localización.

- $P_e$  la precipitación efectiva, es decir, la fracción de las precipitaciones aprovechada por el cultivo
- $D_w$  = Variación de la reserva de agua en el suelo (ya sea negativa o positiva) (mm)
- $E_a$  = eficiencia en el sistema de riego. Relación entre la cantidad de agua que es efectivamente puesta a disposición del cultivo en su zona radicular y que es utilizada para el crecimiento de la planta y la cantidad de agua consumida en dar el riego. Oscila entre 0.3 para un riego por gravedad ineficiente y un 0.95 para un riego por goteo muy eficiente. Las pérdidas se deben a escorrentía, evaporación desde el suelo o desde los sistemas de distribución y percolación profunda por una inadecuada programación o una baja uniformidad del riego. Ésta última produce un déficit de infiltración en algunas partes de la parcela y un exceso en otras, lo que provoca pérdidas de producción (por exceso o déficit de agua) y de agua y fertilizantes por percolación.

### 3.2. Tasa de aplicación. Frecuencia y tiempo de riego

Una vez determinadas las necesidades de riego del cultivo, es necesario conocer la capacidad de infiltración y de retención de agua del suelo, que están relacionadas con el tamaño de las partículas que los componen. Así, según la clasificación de la FAO, se distinguen cuatro tipos de partículas:

- Arcilla:  $< 0.002$  mm
- Limo:  $0.002 - 0.063$  mm
- Arena fina:  $0.063 - 0.2$  mm
- Arena gruesa:  $0.2 - 2$  mm

El porcentaje de cada tipo de partículas dará lugar a distintas texturas de suelo, tal y como recogemos en la *Ilustración 2*.

La tasa de aplicación/pluviometría (en mm/h o lo que es lo mismo en  $l/m^2$  h) deberá ser menor que la tasa de infiltración para evitar escorrentía y erosión, con unos valores máximos reflejados en la *Tabla 1*.

Para agricultura se busca un suelo equilibrado, fácil de trabajar, permeable y con buena capacidad de acumulación de agua. Esto se denomina suelo franco que, desde el punto de vista de su textura, contendría entre 30-50% de arena, 30-50% de limo y 20-30% de arcilla y tiene una capacidad de campo de 300 litros de agua por metro cuadrado de superficie y metro de profundidad (el agua que es capaz de acumular el suelo). Del este volumen, no todo está disponible para las plantas y, del que está disponible, no todo se puede absorber con igual facilidad. El agua que requiere una presión de succión superior a 15 atmósferas, ya no puede ser utilizada por las plantas. Este límite se denomina punto de marchitez que, como norma general es alrededor de un 56 % de la capacidad de campo,  $168 l/m^3$  para suelos francos. El otro 44 % es agua útil,  $132 l/m^3$ . De ésta, una porción del agua, denominada agua fácilmente utilizable, es la que las plantas pueden extraer con presiones de succión bajas (0-5-1 atmósferas) y depende del cultivo, siendo para los cultivos/fases menos sensibles a la sequía del 50 % y para los más sensibles del 25 % ( $66 l/m^3$  y  $33 l/m^3$ , respectivamente para suelos francos) [4].

Con el fin de evitar la percolación (agua drenada a profundidades superiores a la aprovechable por las raíces del cultivo) pero sin someter al cultivo a estrés hídrico, el riego debe programarse para mantener el agua acumulada en el

**CLASES TEXTURALES**

Este diagrama ternario clasifica los suelos basándose en la proporción de sus componentes texturales: arena, limo y arcilla. El eje superior izquierdo indica el porcentaje de arcilla (de 0 a 100), el eje superior derecho el porcentaje de limo (de 0 a 100) y el eje inferior el porcentaje de arena (de 100 a 0). Las zonas de clasificación están coloreadas y etiquetadas de la siguiente manera:

- arcilla:** Zona superior central, mayoritariamente roja.
- arcillo arenoso:** Zona a la izquierda de arcilla, color rojo oscuro.
- arcillo limoso:** Zona a la derecha de arcilla, color naranja oscuro.
- franco arcilloso:** Zona central inferior, color marrón.
- franco arcillo limoso:** Zona a la derecha de franco arcilloso, color naranja.
- franco arcillo arenoso:** Zona a la izquierda de franco arcilloso, color marrón claro.
- franco:** Zona central inferior, color verde oscuro.
- franco limoso:** Zona a la derecha de franco, color naranja claro.
- franco arenoso:** Zona a la izquierda de franco, color verde claro.
- limo:** Zona inferior derecha, color amarillo.
- arenoso franco:** Zona inferior izquierda, color verde azulado.
- arena:** Zona inferior izquierda, color azul.

Perfil y textura del suelo	Tasa máxima de aplicación (mmh <sup>-1</sup> )			
	Pendiente (%)			
	0-5	5-8	8-12	12-16
Suelo arenoso, hasta 1,8 m de profundidad	50	38	25	13
Suelo superficial arenoso sobre horizontes más compactos	38	25	19	10
Suelo areno-limoso, hasta 1,8 m de profundidad	25	20	15	10
Suelo superficial areno-limoso sobre horizonte compacto	19	13	10	8
Suelo franco-limoso, hasta 1,8 m de profundidad	13	10	8	5
Suelo superficial franco-limoso sobre horizonte compacto	8	6	4	2,5
Suelos de textura pesada (limosos a arcillosos)	4	2,5	2	1,5

### 3.3. Importancia de un sistema de riego eficiente

El uso de sistemas eficientes de riego permite incrementar la eficiencia en el uso del agua desde menos del 50 % hasta más del 90 %.

Según [17], los sistemas de riego eficiente tienen múltiples ventajas, tanto para el agricultor como para el medio ambiente:

- Menos consumo de agua, energía, fertilizantes y químicos por unidad de producto cosechado (menor coste operativo)
- Reducción de la contaminación difusa por fertilizantes y químicos de las aguas superficiales y subterráneas, al reducirse la escorrentía y la percolación
- Reducción de la erosión
- Disminución de la salinidad en el suelo, manteniendo los campos de cultivo productivo por más tiempo y evitando la salinización de los acuíferos

### 3.4. Elección del sistema de riego más adecuado

La capacidad de infiltración y de almacenamiento de agua del suelo son factores limitantes a la hora de elegir el sistema de riego más adecuado, pero no son los únicos. Intervienen otros de índole económica, como el consumo de agua y de energía, el coste de inversión y de mano de obra, o técnica, como la pureza del agua. La relación que se dé entre ellos nos hará decantarnos por un sistema u otro en cada caso concreto. La *Tabla 2* muestra para cada parámetro la situación que favorece o limita la elección de un sistema u otro.

Comparado con el riego de superficie, el riego por aspersión es más adaptable a distintos tipos de terreno, permiten un ahorro de mano de obra, por su mayor capacidad de automatización y un ahorro de agua para suelos de alta permeabilidad, donde la percolación puede ser muy fuerte.

Entre sus desventajas encontramos un coste mayor de inversión y energético, tienen pérdidas por evotranspiración elevadas en climas secos y por arrastre de viento. Tampoco es adecuado para suelos con tasas de infiltración muy bajas, porque produce escorrentía y erosión.

Su uso presenta importantes limitaciones para aguas salobres, porque éstas pueden corroer los materiales de tuberías y aspersores, así como afectar a



diversos cultivos (viñas, hortícolas) que son muy sensibles a la concentración de Cloro y Sodio en sus hojas.

También presenta importantes limitaciones para riego con aguas residuales depuradas, porque el agua se aplica sobre hojas y frutos, por lo que puede transmitirse patógenos a los productos, aparte de afectar a la salud de los trabajadores.

El riego localizado, principalmente por goteo y el sub-superficial, permite reducir el consumo de agua, especialmente en plantaciones de árboles jóvenes. Para cultivos que cubren totalmente la parcela cultivada son menores. El riego localizado también permite reducir el gasto energético, por la baja presión de operación de los emisores, y el coste de mano de obra si lo comparamos con la aspersión. Es especialmente adecuado para el riego de pequeñas dosis con alta frecuencia, lo que evita el estrés hídrico del cultivo.

Otras ventajas son que no favorece la proliferación de malas hierbas, permite la aplicación de herbicidas y fertilizantes en la propia agua de riego (herbi-riego y ferti-riego), optimizando la cantidad aplicada y su eficacia. Como las entrelíneas no se riegan, se mantienen secas, lo que facilita la labor de los trabajadores y maquinaria. Por último, es adecuado para suelos poco profundos o pedregosos.

En cuanto a las desventajas, requiere mayores costes de inversión y tienen mayor riesgo de obstrucción de los emisores, afectando a la uniformidad en la distribución del agua, con el impacto que conlleva para el cultivo. Para evitarlo, se requiere un pretratamiento del agua, que incluye filtrado y, dependiendo del caso, tratamiento químico, para evitar que el agua contenga óxidos de hierro, carbonatos de calcio y algas. Todo el sistema requiere vigilancia frecuente y mantenimiento periódico: enjuague del sistema para evitar precipitados de sales en las tuberías o en los emisores, limpieza de filtros, revisión de emisores, ...

Los emisores y tuberías pueden sufrir daños por la maquinaria de labranza, roedores/pájaros y o degradarse por efecto de la radiación UV.

Son muy sensibles a las diferencias de cota en el terreno, debido a la baja presión de operación de los emisores, por lo que se requieren, para parcelas

que no sean completamente llanas, reguladores de presión y un correcto diseño hidráulico del sistema, para lograr una buena uniformidad de aplicación y evitar el drenaje por los emisores a menor cota cuando se interrumpe el riego.

El riego por goteo no es adecuado para terrenos arenosos, a no ser que tengan una buena difusión lateral, porque genera percolación. Se suele recurrir en este caso a los micro-aspersores. En terrenos salinos o cuando se utilizan aguas con cierta salinidad en el riego es necesario realizar riegos muy frecuentes, para asegurar que las sales acumuladas en capas más profundas no ascienden a la zona radicular por capilaridad, lo que puede dañar el cultivo. Asimismo, tras un episodio de lluvia, hay que regar inmediatamente para lavar las sales acumuladas en la superficie y en el borde del budo mojado, transportándolas fuera de la zona radicular. [1]

Factores	Riego de superficie	Aspersión	Riego localizado
Precio del agua	Bajo	Medio	Alto
Suministro del agua	Irregular	Regular	Continuo
Disponibilidad del agua	Abundante	Media	Limitada
Pureza del agua	No limitante	Sin sólidos	Elevada
Capacidad de infiltración del suelo	Baja a media	Media a alta	Cualquiera
Capacidad de almacenamiento del suelo	Alta	Media a baja	No limitante
Topografía	Plana y uniforme	Relieve suave	Irregular
Sensibilidad al déficit hídrico	Baja	Moderada	Alta
Valor de la producción	Bajo	Medio	Alto
Coste de la mano de obra	Bajo	Medio	Alto
Coste de la energía	Alto	Bajo	Moderado
Disponibilidad de capital	Baja	Media a alta	Alta
Exigencia en tecnología	Limitada	Media a alta	Elevada

Tabla 2. Factores que favorecen la elección de un determinado sistema de riego. Extraído de [1]. Fuente original: Pereira y Trout (1999)

### 3.5. Adecuación de los sistemas de riego al bombeo solar

El riego de superficie (por gravedad) tiene unos requerimientos energéticos muy reducidos o nulos y por tanto no es un mercado interesante para el bombeo solar.

En cuanto a la aspersión y el riego localizado, son más demandantes de energía y, por tanto, constituyen el mercado potencial del bombeo solar. Hay que tener en cuenta que el recurso solar presenta variaciones horarias, diarias y estacionales y esto puede ser un inconveniente para estos sistemas de riego, que requieren unas condiciones de trabajo definidas, por ejemplo, una presión o un caudal mínimo de operación. La variabilidad del recurso solar también dificulta el riego nocturno o en horas de baja irradiación, para minimizar las pérdidas por evo-transpiración. Históricamente, estas debilidades se han subsanado bombeando agua a depósitos sobre-elevados y realizando la distribución del agua desde los mismos. El depósito actúa como un sistema de almacenamiento de energía (energía potencial de su volumen de agua), alternativo al uso de baterías, que asegura una cierta autonomía del sistema frente a variaciones diarias/horarias de radiación, a la vez que asegura, por su elevación, una presión mínima para el sistema de regadío. Este elemento, sin embargo, encarece el sistema y requiere un mayor uso de terreno, como se aprecia en la *Ilustración 3*.

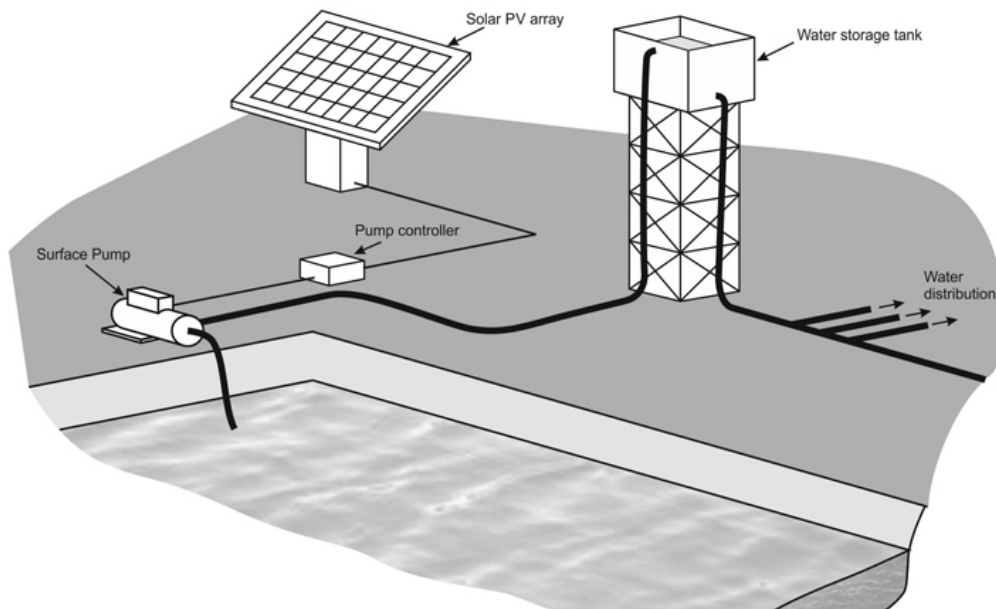
Una alternativa es el montaje del generador fotovoltaico en un seguidor solar, con el fin de aplanar la curva de potencia (dar una potencia de salida más uniforme a lo largo del día), como se muestra en la *Ilustración 4*.

De este modo se incrementan el número de horas al día en que se pueden cumplir las condiciones de operación del sistema de riego (rango de presión/caudal) y, por tanto, se flexibiliza los horarios de riego. Sin embargo, esta alternativa sigue sin permitir el riego nocturno, para el que hay que seguir recurriendo al depósito sobre-elevado o a un sistema híbrido con red/grupo electrógeno como fuente auxiliar.

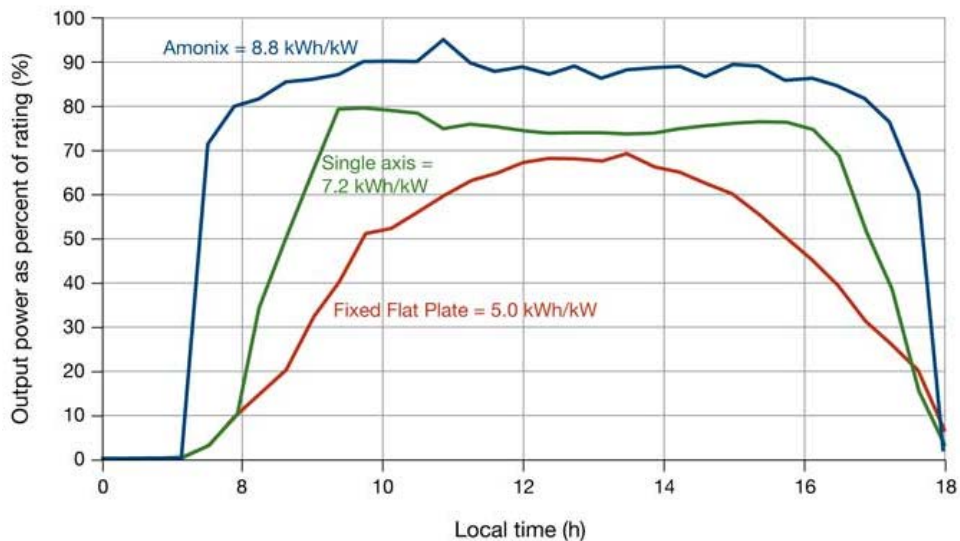
La energía solar fotovoltaica es una energía renovable, normalmente ligada a valores de respeto al medioambiente, sostenibilidad y eficiencia energética. Por esto, su desarrollo debe ir de la mano de la micro-irrigación, que reduce el

consumo de agua y de energía y, por tanto, está más acorde con dichos valores que la aspersión tradicional.

Por este motivo, se ha descartado la aspersión para el caso práctico de estudio y se han considerado métodos de micro-irrigación en su lugar.



*Ilustración 3. Sistema de bombeo con bomba superficial y depósito sobre-elevado de almacenamiento. Fuente: Groundwater Engineering Ltd, 2015*



*Ilustración 4. Comparación de la potencia de salida de un generador fotovoltaico a lo largo del día para montaje en seguidor de dos ejes (azul), de un eje (verde) y estructura fija (rojo). Fuente: Stephen J. Smith Jr. / Solvita Energy Group / Berkeley, CA*

## 4. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE REGADÍO

El contenido del presente capítulo está obtenido de [1], salvo cuando indiquemos lo contrario.

### 4.1. Riego superficial (por gravedad)

El riego superficial es el más utilizado en el mundo, con cerca del 80% de la superficie total regada y utiliza el perfil del terreno para la distribución del agua, por lo que no requiere consumo energético o éste es muy reducido. Sin embargo, presenta una eficiencia de uso del agua baja, con elevadas pérdidas por evotranspiración. Además, dependiendo del método utilizado, se produce cierta escorrentía y erosión, que hay que gestionar, para no desperdiciar demasiada agua y nutrientes. Dentro del riego superficial existen varios tipos:

- De **inundación rápida**, en los que la mayor parte de la infiltración tiene lugar después de cortar el suministro. Se trata del método más utilizado del mundo y consiste en aplicar agua a parcelas rectangulares de pequeño tamaño y pendiente casi nula, denominadas canteros, circundadas por caballones, que actúan a modo de murete que impide que el agua pase a otros campos y, por tanto, evitan la escorrentía. Los canteros se emplean para el cultivo del arroz, por inundación permanente. Se requieren suelos con tasas de infiltración bajas y capacidad de reserva de agua elevada, para que el agua cubra el cantero muy rápidamente y luego se infiltre lentamente. Como medida de mejora de la eficiencia del uso de agua, (Mao et al., 2004), se puede disminuir la altura de la lámina de agua después de completar el crecimiento vegetativo del cultivo o, en climas cálidos, donde la lámina de agua no es requerida para el control de la temperatura, sustituir la inundación por riegos muy frecuentes que mantengan el suelo en el límite de saturación.
- De **infiltración**: se aplican caudales suficientemente grandes para que el agua fluya sobre el terreno, pero suficientemente pequeños como para que se infiltre, de forma que deja de estar sobre el terreno en cuanto se corta el suministro. El agua discurre normalmente por **surcos** paralelos de pendiente suave excavados a lo largo de la parcela, sembrándose el cultivo en los caballones entre surcos. La alimentación a los surcos se realiza mediante regueras, tuberías, etc. perpendiculares a los surcos.

Los surcos están generalmente abiertos en el extremo aguas abajo para que el exceso de agua aplicada (10-40 %) pueda drenar.

El riego por surcos es un sistema complejo de diseñar y operar, por lo que en el riego tradicional muchas veces se emplea la inundación y no el riego por infiltración, aunque el terreno se prepare con surcos, como vimos en el punto anterior. En el diseño hay que buscar una combinación de parámetros que permitan maximizar la parte de la dosis ( $D$ , mm) que se infiltra y queda almacenada en la zona radicular ( $Z_{rad}$ , mm) o, lo que es lo mismo, minimizar la escorrentía ( $R$ , mm) y la percolación a profundidades superiores a la zona de las raíces ( $DP$ , mm). Asimismo, se busca minimizar el coste de nivelación del terreno, el arrastre de fertilizantes más allá de la zona radicular y el uso del agua. Los parámetros de diseño que entran en juego son la tasa de infiltración del terreno ( $f$ ), la longitud y pendiente de los surcos ( $L$  y  $S_o$ ) y el caudal ( $q$ ). Para bajos valores de  $f$ , lo adecuado será aumentar  $L$  y reducir  $S_o$  y  $q$ . Para bajos valores de  $f$  lo contrario, cuidando de que el caudal no sea erosivo. El agricultor ajustará el caudal y el tiempo de riego, según vaya variando la capacidad de infiltración del terreno a lo largo del año, ya que no puede actuar sobre  $f$ - $L$ - $S_o$ .

Para ahorrar agua se puede alternar el riego de surcos contiguos, esto es, uno sí-uno no. Este sistema requiere suelos con buena conductividad lateral, es decir, con capacidad de infiltración hacia los lados y no sólo vertical. Si no, no se lograría un grado de humedad suficiente en la zona radicular del cultivo, sometiénolo a un fuerte estrés hídrico. Además, puede construirse una red de drenaje para su utilización en otras parcelas a cota inferior o en la misma parcela mediante bombeo. De otro modo se desperdicia agua y pueden contaminarse cursos de agua cercanos por los nutrientes y sólidos en suspensión arrastrados.

- De **escurrimiento** (surcos a nivel o riego por esparcimiento): el agua fluye libremente sobre la superficie del suelo como si se tratase de un flujo superficial. Este tipo de riego se practica en zonas áridas, derivando las aguas de crecidas por redes de canales y regueras y posteriormente esparcirse por los campos de cultivo.





*Ilustración 5. Canteros tradicionales para cultivo del arroz en el Baixo Mondego, Portugal.*



*Ilustración 6. Riego de plantas de tomate por surcos alimentados con tubería de PVC. Valle del Sorraia, Portugal*

## 4.2. Riego por aspersión

Cerca del 10% de las áreas de riego de todo el mundo son por aspersión, siendo este porcentaje superior en los países desarrollados. Consta de los siguientes elementos:

- Bomba, accionada por un motor, que tiene la función de dotar al sistema de la presión suficiente para el funcionamiento de los aspersores.
- Tuberías, principal, secundarias y ramales o laterales.
- Aspersores, que se montan en los ramales y son los encargados de aplicar el agua sobre los cultivos en forma de gotas pequeñas, a modo de lluvia.

### 4.2.1. Tipos de aspersores

Para agricultura los aspersores más utilizados son:

- **Cañones aspersores:** son rotativos, donde el giro se produce por el impacto del chorro sobre el extremo de un brazo oscilante sobre un plano vertical. Un mecanismo transforma el movimiento oscilante del brazo en horizontal circular.
- **Rotativos de impacto,** donde el giro es producido por el impacto del chorro en una pala oscilante.
- **De plato rotativo,** donde el chorro impacta en un plato que rueda por acción del agua y conduce el chorro para que describa un círculo. Puede tener una boquilla de baja deriva con el viento (LDN, “low drift nozzles”). Permite una mayor uniformidad que los aspersores de impacto. Produce un chorro compacto que no se deforma con el viento, sistemáticamente interrumpido por un difusor, lo que permite rellenar los patrones de agua. Su acción de barrido distribuye suavemente gotas pequeñas de agua en el suelo, previniendo la compactación del suelo, que se produce en los de impacto en las inmediaciones del aspersor, por efecto de la salpicadura baja.
- **Aspersores de pivote,** donde el agua se dispersa en círculo al chocar el chorro contra un plato, que puede ser de muy distintos tipos y por tanto proporcionar diferentes patrones de distribución de agua, lo que permite seleccionar el patrón más adecuado en función del cultivo y del factor de infiltración del terreno.



Las diferentes tecnologías de aspersor se caracterizan por su alcance (en m), su área mojada, relacionada con el anterior, la presión, el caudal, la tasa de aplicación o pluviometría (en mm/h aplicados sobre el terreno), que debe ser menor que la de infiltración del terreno para evitar escorrentía/erosión y el ángulo del chorro sobre la horizontal.

Los cañones son los de mayor alcance/área mojada y caudal, pero también los de mayor presión (mayor consumo energético), pluviometría (con más riesgo de producir escorrentía, por lo que sus períodos de riego son más cortos) y ángulo (mayores pérdidas por evotranspiración).

Después encontraríamos los de impacto/ de plato rotativo con menor presión, caudal, alcance y ángulo.

Los de pivote son los de menor presión, caudal, alcance y ángulo de todos. Dentro de este grupo encontramos diferentes características, según el tipo de plato empleado. En la **Tabla 3** recogemos los datos técnicos principales y en la *Ilustración 10*, la pluviometría típica comparada con la curva de infiltración de varios tipos de terrenos, para tres de los tipos de aspersores de pivote de la marca Nelson. De ésta última podemos concluir que los tres permiten el riego en terrenos arenosos, pero el rotator es más adaptable a terrenos de menor infiltración sin producir escorrentía.



*Ilustración 7. Cañón aspersor de uso agrícola. Fuente: [www.novedadesagricolas.com](http://www.novedadesagricolas.com)*

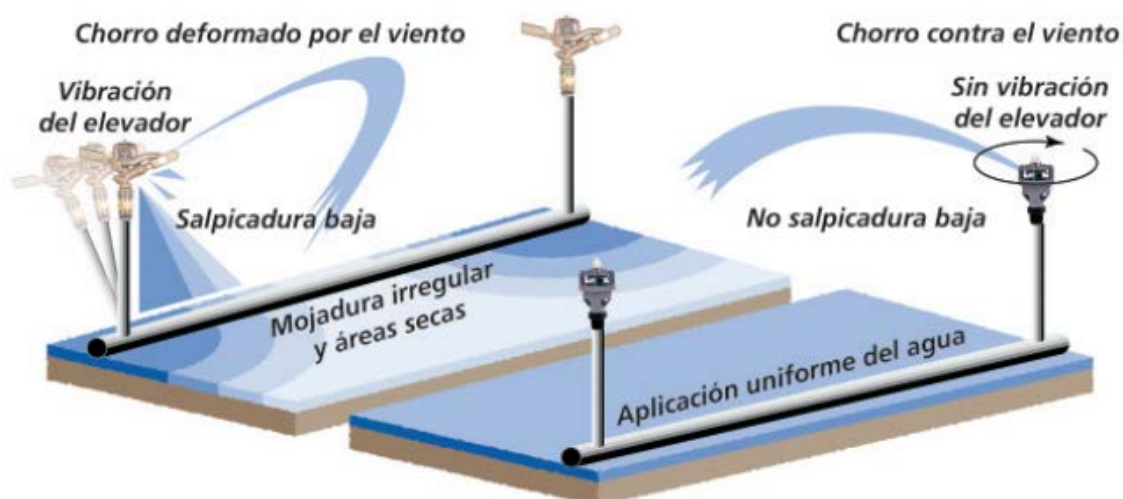


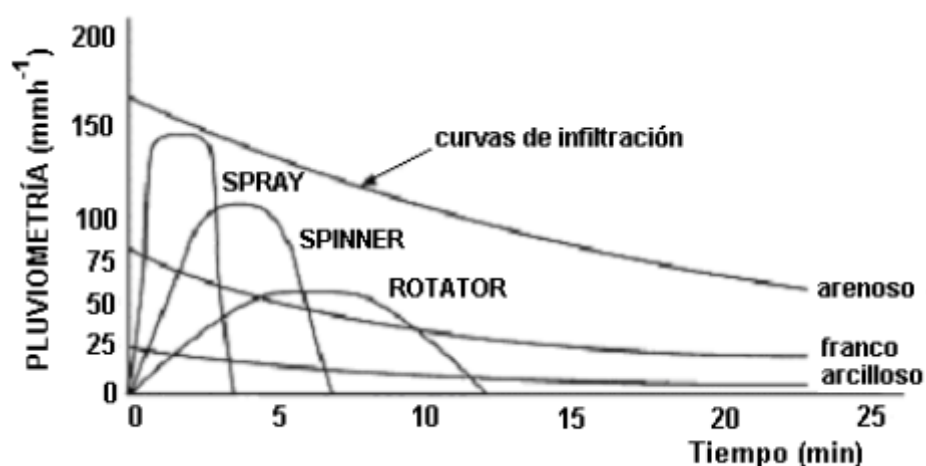
Ilustración 8. Comparativa de las características de los aspersores de impacto y de plato rotativo LDN, modelo R2000WF. Fuente: Nelson Irrigation.



Ilustración 9. Aspersor de pivote de la serie 3000 de Nelson Irrigation

Tipo	Presión	Pluviometría	Montaje	Alcance
<b>Rotator</b>	1-3.4 bar	Baja	Encima del pivote o bajantes	15.2-22 m
<b>Spinner</b>	0.7-1.4 bar	Baja-alta	Bajantes	12.8-16.5 m
<b>Spray</b>	0.41-2.8 bar	Alta	Encima del pivote o bajantes	4.9-12.2 m

Tabla 3. Características técnicas para varios tipos de aspersores de pivote de la marca Nelson. Elaboración propia a partir de catálogo del fabricante



*Ilustración 10. Pluviometría típica de diferentes tipos de aspersores de pivote comparada con la curva de infiltración de varios tipos de terrenos.*

#### 4.2.2. Sistemas de montaje de los aspersores

Pueden ser fijos en los que los elementos de riego no se mueven a lo largo de la parcela o móviles, en los que sí lo hacen. Dentro de estos últimos existen numerosas variantes.

##### 4.2.2.1. Sistemas de cobertura total

Son sistemas fijos, que cubren toda la superficie a regar, sin necesidad de desplazar ningún elemento. Normalmente se sectorizan, de forma que se riegan los sectores de uno en uno. Para cultivos anuales son temporales: se instalan tras la siembra, se retiran antes de la recolección y se almacenan hasta la campaña siguiente. Para cultivos perennes como los frutales, la instalación permanece de una estación de riego a la siguiente. Todas las tuberías se entierran para evitar daños por el paso de maquinaria y aperos agrícolas.

Necesitan menos mano de obra que los sistemas desplazables, aunque tienen mayor inversión inicial.



*Ilustración 11. Sistema de riego total temporal (nótese que la tubería lateral que da servicio a los aspersores no está enterrada). Fuente: <http://www.inforiego.org/>*

#### 4.2.2.2. Pivote central

Se utilizan para regar parcelas circulares o con forma de sector circular. En ellos, una tubería lateral de longitud muy variable (desde menos de 100 m a más de 800) en la que se montan aspersores gira alrededor de un punto fijo en el centro de la parcela regada. Los equipos más pequeños pueden ser trasladables, arrastrados por un tractor, estando en este caso el pivote central dotado de ruedas.

Pueden equiparse con aspersores rotativos de impacto o de plato rotativo LDN. En el extremo puede instalarse un cañón aspersor, en cuyo caso hay que instalar una bomba auxiliar para dar la sobrepresión necesaria para el funcionamiento del cañón. Sin embargo, las mayores presiones de operación y, por tanto, mayor consumo energético de todos ellos, hacen que la tendencia sea a instalar cada vez más aspersores específicos para pivote central, como los tipo rotator de la marca Nelson descritos en la *Tabla 3*, que trabajan a menor presión (menor consumo energético) y pluviometría (menos problemas de escorrentía).

Adicionalmente pueden montarse en tubos bajantes que los aproximan al suelo, cosa que con el resto no se puede, por lo que disminuye la evaporación y los problemas por arrastre del viento, aunque debe elegirse convenientemente la altura en función del terreno y del tipo del cultivo, porque disminuye su alcance (área mojada) y, por tanto, se incrementa la pluviometría (se aplica la misma cantidad de agua sobre una superficie más

pequeña), lo que puede incrementar la escorrentía y hacer sobrepasar la capacidad de infiltración del terreno.

Los aspersores van regando una corona circular de mayor área según nos alejamos del centro pivote, por lo que, para conseguir una distribución uniforme del riego, es necesario ir incrementando la pluviometría según nos alejamos del centro, disminuyendo el espaciamiento entre aspersores y/o aumentando el tamaño de las boquillas.

En terrenos ondulados se producen variaciones de presión entre los aspersores por la diferencia de altura, que se traducen en variaciones de caudal. Los pivotes equipados de aspersores de baja presión son más sensibles a este fenómeno y requieren en estos casos incorporar al sistema, reguladores de presión o boquillas con regulación de caudal para tener una uniformidad de distribución de agua adecuada [12].

Una de las principales desventajas de los sistemas de pivote central es la de regar sólo superficies circulares, sin alcanzar las esquinas de parcelas cuadradas o rectangulares. La solución más barata y fácil de manejar para estas zonas que quedan sin regar es instalar un sistema de riego de cobertura total.



*Ilustración 12. Sistema de pivote central con montaje de aspersores de pivote en bajante (tubos amarillos) y montaje de cañón aspersor en el extremo. Nótese que, debido a la longitud de la tubería lateral, ésta se encuentra sectorizada, apoyándose cada sector en una “torre” dotada de ruedas. Fuente: T-L Irrigation*

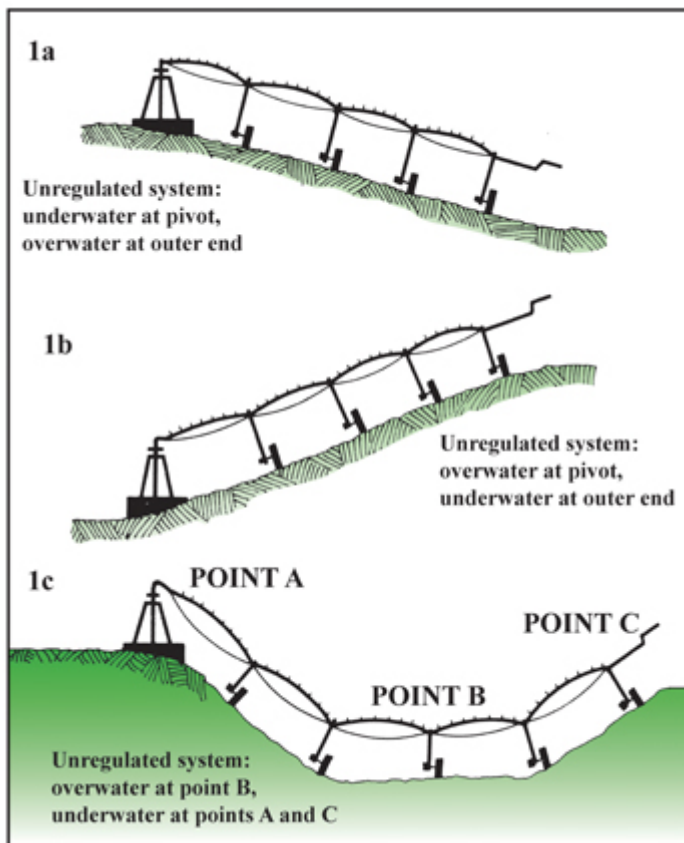


Ilustración 13. Problemas derivados de la variación de presión en sistemas de pivote central sin regulación de presión. Fuente: [12]

#### 4.2.2.3. Laterales de avance frontal

Se utilizan para regar parcelas rectangulares o cuadradas. En ellos una tubería lateral cuya longitud es la del lado corto de la parcela, se desplaza de un extremo al otro de la parcela mediante una serie de torres dotadas de ruedas y motor sobre las que va montada. El agua se suministra por un extremo de la tubería, mediante una manguera o bombeada desde un canal que discurre de un extremo al otro del lado largo de la parcela y que está situado, bien en la zona central, bien en un lateral de la parcela. En la tubería lateral se pueden montar todos los tipos de aspersores descritos para pivote central, salvo el cañón aspersor. En este caso, como el área regada no es dependiente de la ubicación del aspersor, se colocan equidistantes y usan el mismo tipo de boquilla a lo largo del lateral, para obtener una pluviometría uniforme.





*Ilustración 14. Lateral de avance frontal alimentado por manguera en un extremo y aspersores montados en bajantes. Fuente: Riegos Ruiz*

#### 4.2.2.4. Cañones móviles

Se monta un cañón aspersor sobre un carro que se desplaza continuamente durante el riego a lo largo de la parcela, arrastrado por la manguera que lo alimenta (enrollador automático) o por un cable (cañón viajero). Tiene bajo coste de inversión, pero alto de operación, por el consumo de energía del cañón.

Los cañones son rotatorios y, por tanto, riegan sectores circulares. Para definir el ángulo del sector, se utilizan topes, que cambian el sentido de giro del aspersor. Se suele trabajar con sectores circulares de 240-270°, que son los que permiten una pluviometría más uniforme. En cuanto al ángulo con respecto a la horizontal varía normalmente entre 15° y 27°, siendo mayor el alcance y menor la pluviometría cuanto mayor es el ángulo. Sin embargo, un menor ángulo es ventajoso en situaciones ventosas, para reducir el arrastre por el viento.



*Ilustración 15. Cañón móvil arrastrado por enrollador automático de manguera, al final del ciclo de riego. En estos sistemas, el ciclo de riego se inicia al fondo de la parcela, donde se ven los árboles, desenrollando la manguera completamente. Posteriormente, el enrollador irá tirando del carro poco a poco hasta la posición que vemos en la foto. Fuente: Lindsay corporation.*

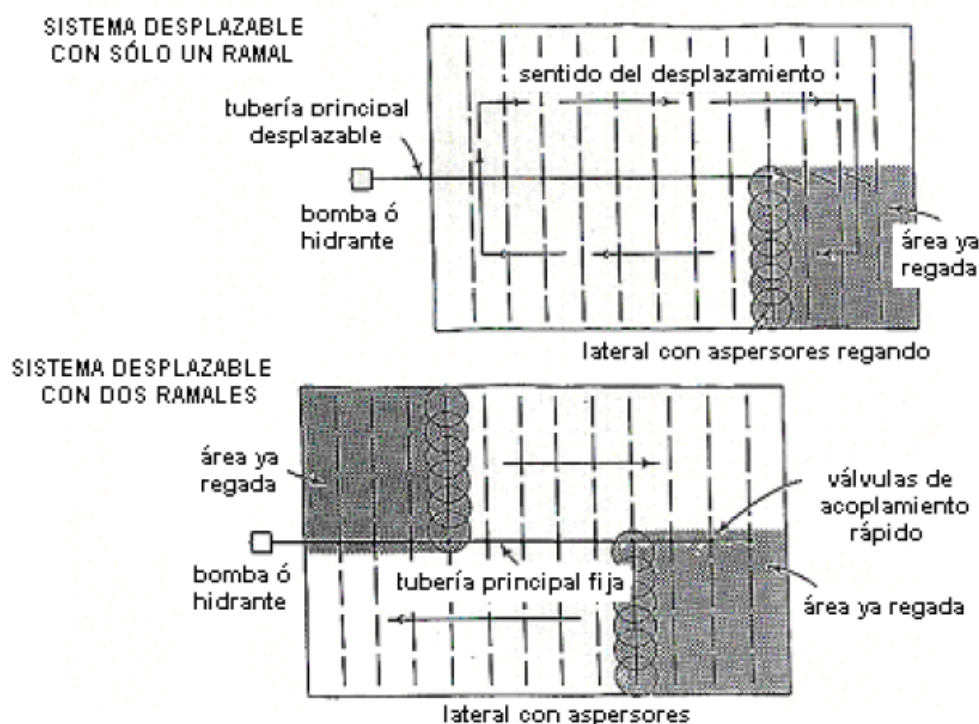
#### **4.2.2.5.      Sistemas desplazables manualmente**

Constituidos por una tubería principal y una tubería lateral dotada de aspersores. Una vez que el riego se completa en una posición, el lateral se separa de la tubería principal, se drena y se traslada a la siguiente posición, donde se conecta, accionándose posteriormente la bomba para iniciar el siguiente ciclo de riego. Si el sistema se dota de una segunda tubería lateral, el riego puede continuar mientras una de las tuberías está siendo desplazada.

Una vez regada la parcela, el sistema completo puede trasladarse para regar otra parcela.

Los sistemas desplazables manualmente tienen bajo coste de inversión, pero alto de operación, porque requieren bastante mano de obra.





*Ilustración 16. Sistemas desplazables manualmente con una o dos tuberías laterales*

#### 4.2.2.6. Sistemas semi-fijos

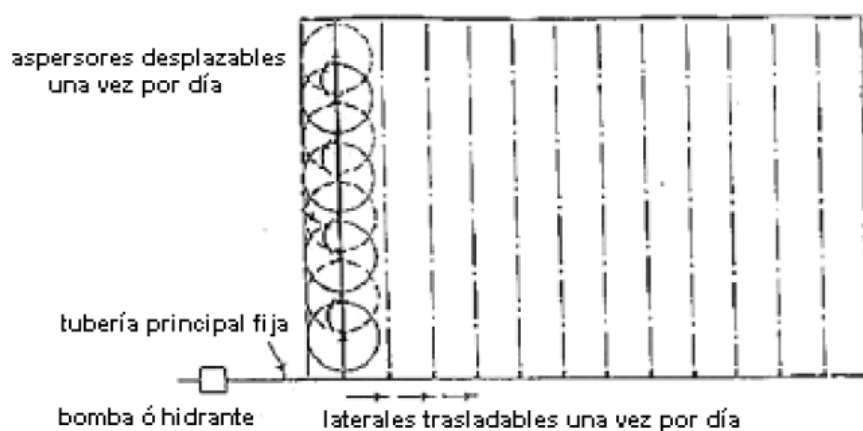
En ellos los aspersores se colocan a lo largo de los laterales en posiciones alternas. Cuando termina la aplicación de la dosis de riego en la primera posición, se desconectan y se trasladan a la posición siguiente, donde riegan el mismo tiempo. La tubería lateral es entonces desplazada a la siguiente posición.

No es necesario interrumpir el flujo en la tubería lateral, ya que los aspersores están conectados a ella mediante una válvula que interrumpe la salida de agua cuando el aspersor se retira.

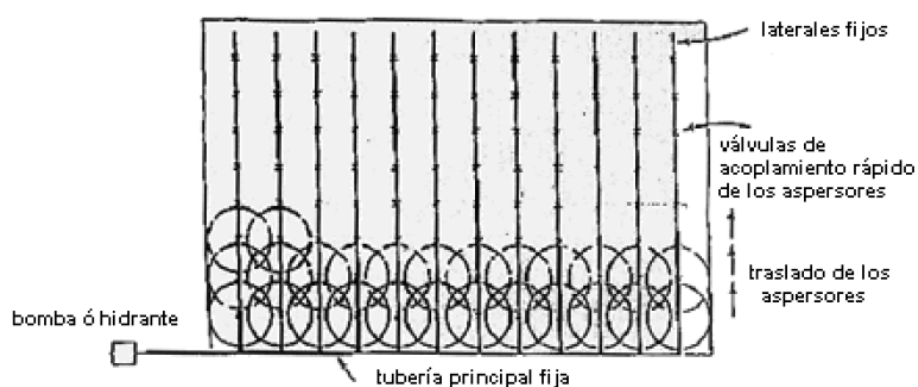
En cultivos de porte elevado, donde el traslado de la tubería puede ser una tarea complicada, se utiliza un sistema donde se instalan laterales en todas las posiciones de riego y uno o dos aspersores por lateral, que se van desplazando de una posición de riego a la siguiente dentro del lateral según se va aplicando la dosis de riego en cada posición.

Otra opción es instalar permanentemente la tubería principal y una tubería lateral, a la que se conecta una o varias mangueras en cuyo extremo hay un

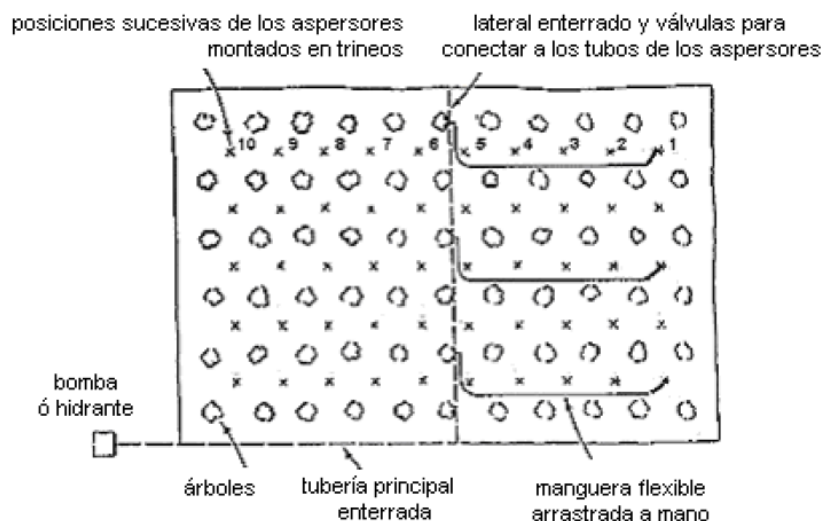
aspersor montado en un trineo que se va moviendo de una posición de riego a la siguiente según se va aplicando la dosis de riego. Este sistema se utiliza para regar frutales por debajo de las copas.



*Ilustración 17. Sistema de riego con laterales y aspersores trasladables*



*Ilustración 18. Sistema de riego con laterales fijos y un aspersor trasladable por lateral*



*Ilustración 19. Sistema de riego con tubería principal y lateral fijas (enterradas), aspersor montado en trineo arrastrable, conectado al lateral mediante manguera flexible*

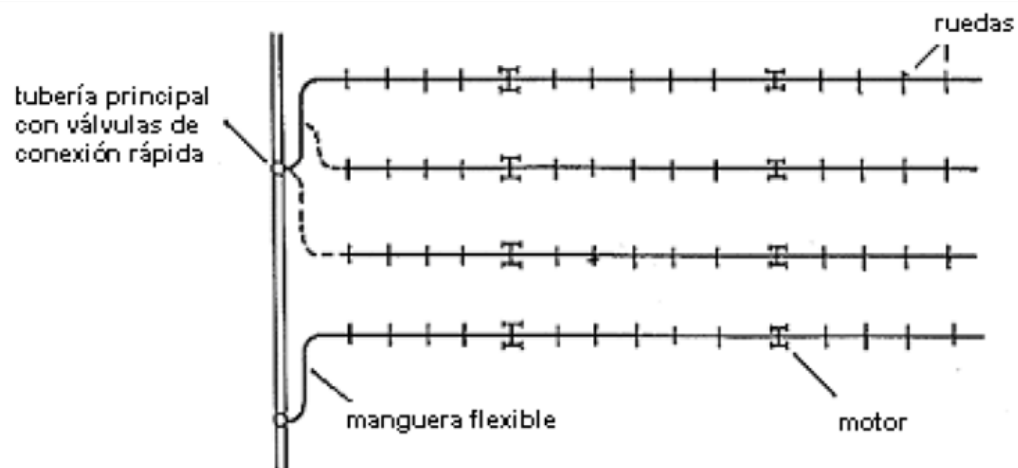
#### 4.2.2.7. Tuberías con ruedas

Se utilizan para cultivos de porte bajo. Las tuberías laterales se montan sobre ruedas y cuentan con pequeños aspersores rotativos. En el centro de la tubería se monta un motor de gasolina, actuando la tubería como un eje y haciendo que todas las ruedas giren a la vez.

La conexión a la tubería principal, que se coloca a lo largo de uno de los lados de la parcela, se realiza mediante manguera flexible a un hidrante, que permite abastecer a 3-5 posiciones de riego. El paso de una posición de riego a la siguiente requiere interrumpir el riego y, en muchos casos, el drenaje de parte del agua de la tubería, para aligerarla de peso y de esta forma el motor que la desplaza pueda realizar su labor.



*Ilustración 20. Tubería lateral con ruedas. Fuente: América equipos mecanizados*

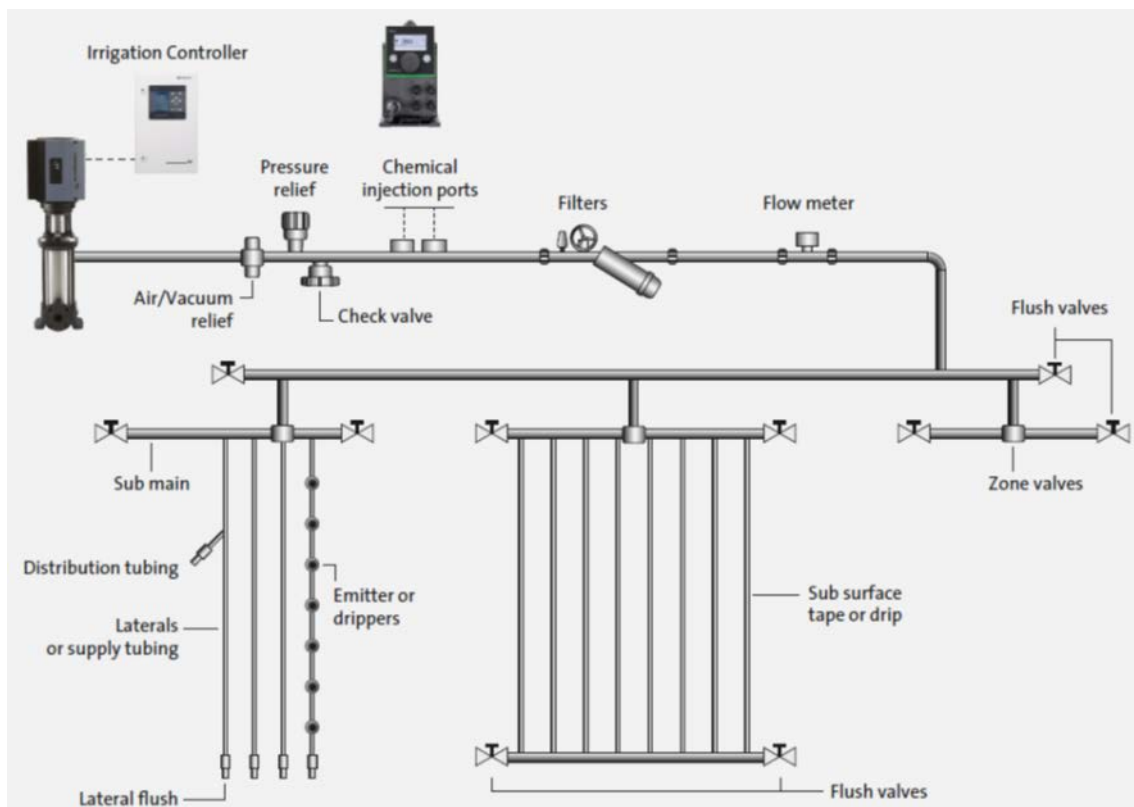


*Ilustración 21. Esquema de sistema de riego con tuberías sobre ruedas, que permite el riego en 3 posiciones por hidrante*

### 4.3. Micro-irrigación

Se denomina riego localizado o micro-riego a los sistemas de riego a presión (aunque inferiores a las utilizadas para riego por aspersión) que aplican el agua solo en las zonas donde se desarrollan las raíces de la planta, mediante unos dispositivos denominados emisores. Constan de emisores y de una red de tuberías, normalmente enterradas, salvo los ramales porta-emisores. El sistema además contendrá normalmente filtros, válvulas de zona, bombas dosificadoras y otros elementos.

En los siguientes sub-capítulos se detallan un poco más cada uno de los elementos principales de los sistemas.



*Ilustración 22. Representación esquemática de los componentes de un sistema de micro-irrigación con goteros e irrigación sub-superficial. Fuente: [2]*

#### 4.3.1. Tipos de emisores

Según el tipo de emisor, distinguimos cuatro tipos de micro-irrigación:

- Riego por goteo: los emisores se llaman en este caso también goteros y aplican pequeños caudales 2-8 l/h. Los emisores de vórtice, de flujo laminar y de flujo turbulento no cuentan con compensación de presión. Estos últimos son los que menos tendencia tienen a obstruirse. Existen también emisores con compensación de presión, más caros, pero cuyo caudal es constante para un amplio rango de presiones, lo que permite su uso en parcelas de perfil irregular. En general son menos susceptibles a la obstrucción que otros goteros del mismo diámetro. Pueden ser insertados en la tubería, actualmente en su mayoría durante la fabricación de los ramales portagoteros, con variedad de espaciamientos de 0.15 m a 1.2 m. También pueden colocarse exteriormente, lo que permite su limpieza manual, en un macho que se inserta en la tubería, en un pequeño tubo-mástil o en una derivación, como se muestra en la *Ilustración 24*.
- Micro-aspersión: los emisores son micro-aspersores que pulverizan agua en una superficie pequeña (1-5 m de alcance) con caudales de 50-150 l/h.  

Los micro-aspersores pueden conectarse en derivación de tubo flexible montados en un mini-mástil, montados en un tubo-mástil sobre la tubería o suspendidos de ella para trazados aéreos, como muestra la *Ilustración 26*. Los micro-aspersores permiten diferentes tipos de chorro en función del plato difusor escogido.
- Riego a chorros: se utiliza para árboles frutales y cuenta con un tipo especial de emisores llamados “bubblers”, que impulsan 100-150 l/h de agua y permiten aplicar el agua en pequeñas balsillas adyacentes a los árboles.
- Riego sub-superficial: en este caso los emisores se encuentran también por debajo de la superficie o bien se utilizan tubos porosos o de doble cámara con orificios.





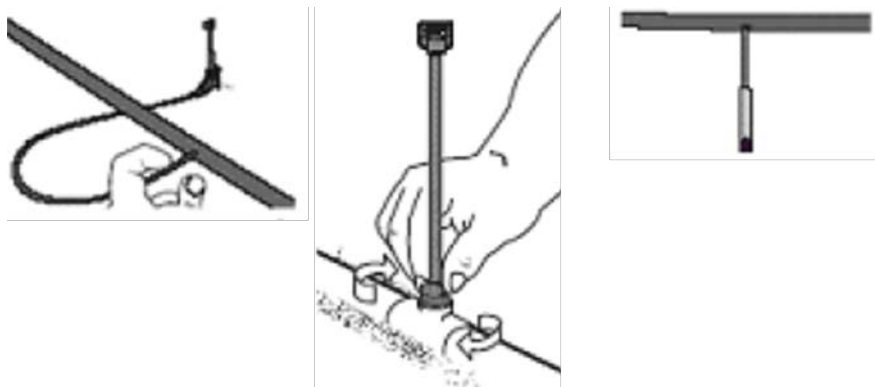
*Ilustración 23. De izquierda a derecha gotero de flujo laminar, de flujo turbulento, de vórtice y compensado en presión. Fuente [2]*



*Ilustración 24. Goteros colocados exteriormente a la tubería en mástil (izquierda) y en macho (derecha). Fuente: [18]*



*Ilustración 25. Microaspersor en acción. Fuente: Irrigaciones Ltda.*



*Ilustración 26. Montaje de microaspersores. De izquierda a derecha: en derivación, en tubo-mástil y suspendidos. Fuente: Bowsmith (2003)*



*Ilustración 27. Bubbler en acción. Fuente: landscapeonline.com*



*Ilustración 28. Riego sub-superficial. Fuente: Dayu Irrigation*



### 4.3.2. Filtros

Existen cuatro tipos de filtros, cuyas características recogemos en la **Tabla 4**.

Para los filtros, la susceptibilidad a la obstrucción de los emisores determina el tamaño de partícula mínima para la que debe ser efectivo el filtro. Esto se da en unidades US mesh o en micrones (micras), como se muestra en la **Tabla 5** y la **Tabla 6**.

En los filtros de disco, la susceptibilidad a la obstrucción de los emisores determina, en su lugar, el número de discos.

Si el agua proviene de un pozo, al no recibir el agua luz solar, no contiene algas, por lo que no es necesario un filtro de arena. Sin embargo, normalmente lleva partículas de arena o limo, por lo que se debe colocar un hidrociclón a la entrada del cabezal de riego.

Si el agua procede de una balsa, al tener contacto con la luz solar, tendrá un cierto grado de eutrofización y, por tanto, tendrá algas, bacterias y materia orgánica en suspensión, pero no arenas ni limos, que se depositarán en el fondo. Por tanto, no es necesario incluir un hidrociclón, pero sí un filtro de arena a la entrada del cabezal.

Tipo	Ventajas	Inconvenientes
<b>Malla</b>	Precio. Filtra arena y partículas grandes. Puede lavarse a mano o mediante enjuague	No remueve materia orgánica
<b>Discos (anillas)</b>	Filtra arena y partículas grandes. Filtra materia orgánica Se lava fácilmente a mano	
<b>Arena y gravilla</b>	Excelente para remover microorganismos, algas y partículas coloidales. Para aguas superficiales con problemas de eutrofización	No remueven partículas grandes ni la arena. Requieren lavado con flujo invertido
<b>Centrífugos (hidro-ciclones)</b>	Filtra arena y partículas grandes. Pérdida de carga independiente del nivel de ensuciamiento	No remueve materia orgánica

Tabla 4. Comparativa de los tipos de filtro. Elaboración propia con datos de [2] y [1].

U.S. mesh	Micrones (micras)
70	210
80	177
100	149
120	125
140	105
170	88
200	74

*Tabla 5. Conversión de US mesh a micras. Elaboración propia con datos de Nelson irrigation*

Susceptibilidad a la obstrucción	Filtro (micras)
Extremadamente susceptible	< 80
Muy susceptible	80
susceptible	100
Poco susceptible	125
Muy poco susceptible	150

*Tabla 6. Relación entre la susceptibilidad al atascamiento y el tamaño de partícula mínimo de filtro. Elaboración propia, con datos de Rieul y Ruelle (2003)*



*Ilustración 29. Arriba, de izquierda a derecha: Filtro de malla y de discos. Abajo: sistema combinado con filtro centrífugo (primer plano) y filtros de arena (segundo plano). Fuente: [2]*

### 4.3.3. Tuberías

En riego se utilizan normalmente tuberías de poli-cloruro de vinilo (PVC) o polietileno (PE). El PVC es rígido y debería instalarse enterrado o protegido contra los rayos UV, porque estos lo atacan y lo vuelven frágil al cabo de los años. El polietileno no tiene este problema, es flexible y resistente a la congelación y a los impactos, pero es más caro y puede sufrir el ataque de los roedores. Se utiliza, normalmente, para tuberías de hasta 50 mm de diámetro interior. En este caso, utilizaremos PVC para la tubería principal, secundarias y porta-ramales y PE para los ramales porta-goteros y porta-aspersores.

Las tuberías introducen pérdidas de carga (pérdidas de presión por efecto de la fricción del agua), que tienen que tenerse en cuenta en el diseño del sistema. Como norma general, deben seleccionarse las tuberías de tal modo que las pérdidas totales de carga sean inferiores al 10 % y que la velocidad de agua a través de la tubería debe ser inferior a 1.5 m/s para minimizar el riesgo de golpe de ariete cuando se cierran válvulas. En la *Tabla 7*, se recogen las pérdidas para distintos diámetros de tubería y caudales. El “triángulo” inferior de casillas sin valores, son combinaciones que no cumplirían este último requisito. El triángulo superior de casillas sin valores, son combinaciones no justificables económicamente.

Q(l/h)	Diámetro interior de la tubería en mm.											
	14	19	25	32	38	50	63	75	89	100	125	150
	Metros de columna de agua por 100 m de recorrido recto											
500	8,9	2,1	0,6									
800	20,2	4,7	1,3	0,4								
1000	29,8	7	1,9	0,6								
1500		14,2	3,9	1,2	0,5							
2000		23,5	6,4	2	0,9							
2500			9,4	2,9	1,3	0,4						
3000			13	4	1,8	0,5	0,2					
3500			17	5,3	2,3	0,6	0,2					
4000			21,5	6,6	2,9	0,8	0,3	0,1				
4500				8,2	3,6	1	0,3	0,1				
5000				9,8	4,3	1,2	0,4	0,2				
5500				11,6	5,1	1,4	0,5	0,2				
6000				13,5	6	1,6	0,5	0,2				
6500				15,5	6,9	1,9	0,6	0,3				
7000				17,7	7,8	2,1	0,7	0,3				
8000				22,4	9,9	2,7	0,9	0,4	0,2			
9000					12,1	3,3	1,1	0,5	0,2			
10000					14,6	4	1,3	0,6	0,3	0,1		
12000					20,1	5,5	1,8	0,8	0,4	0,2		
15000					29,7	8,1	2,7	1,2	0,5	0,3		
18000						11,1	3,7	1,6	0,7	0,4	0,1	
20000						13,3	4,5	1,9	0,9	0,5	0,2	
25000						19,7	6,6	2,9	1,3	0,7	0,3	
30000							9	4	1,8	1	0,3	9,1
35000							11,8	5,2	2,3	1,3	0,5	0,2
40000							15	6,5	2,9	1,7	0,6	0,2
45000							18,4	8	3,6	2	0,7	0,3
50000								9,7	4,3	2,5	0,9	0,4
60000								13,3	5,9	3,4	1,2	0,5
70000									7,7	4,4	1,5	0,6
80000									10,4	5,6	1,9	0,8
90000									12,9	7,3	2,4	1
100000										8,9	2,9	1,2
125000											4,5	1,8
150000											6,3	2,6
175000											8,4	3,5
200000											10,7	4,4
250000												6,7
300000												9,3

Para otras tuberías recomendamos multiplicar los valores obtenidos en la tabla por los siguientes coeficientes:  
Tuberías de fibrocemento: 1,2  
Tuberías de hierro galvanizado: 1,5

Tabla 7. Pérdidas de carga en tuberías de PVC/PE, en función del diámetro interior de tubería y del caudal. Fuente: [25]

#### 4.3.4. Válvulas y accesorios

Debe instalarse una **válvula anti-retorno** en el extremo aguas arriba de la red para evitar que el agua vuelva a la bomba cuando se detiene el riego, lo que

impide el vaciado de la tubería hacia el pozo (ténganse en cuenta que esta agua puede contener fertilizantes y químicos), permite que la puesta en marcha del sistema sea más rápida y segura y protege a la bomba de sobre presiones.

Para bombas superficiales, se utilizan **válvulas de pie**, que es un tipo de anti-retorno instalada en el extremo de la línea de succión de la de las bombas. Tienen la función de mantener la línea de succión cebada cuando la bomba está sobre el nivel del agua para permitir que la bomba funcione correctamente. La entrada de la válvula suele estar protegida con un filtro para impedir la entrada de elementos extraños que puedan existir en agua aspirada.

En los lugares más elevados de la instalación (a la entrada de los filtros de arena, por ejemplo) deben instalarse **válvulas de purga** de aire, para extraer el aire que se acumula en las tuberías, lo que puede producir perturbaciones en el caudal o dañar las tuberías.

Para realizar riego por sectores, es necesario instalar **válvulas de sector**, que son electroválvulas (válvulas de solenoide). Cuando recibe corriente eléctrica, la válvula se abre y deja pasar el caudal para alimentar los aparatos de riego que componen un sector. Una vez acabado el tiempo de riego, el programador interrumpe la alimentación, la válvula deja de funcionar y se cierra, dejando de funcionar el sector.

Las electroválvulas pueden ser de 4 tipos [37], según su alimentación, que se realiza desde el programador de riego:

- 24 Vac: no tienen polaridad. Las electroválvulas se conectan entre la salida correspondiente del programador y el común de salidas. Son las utilizadas en instalaciones donde hay red eléctrica, empleándose un transformador de 230 Vac a 24 Vac para su alimentación. Consumen durante todo el tiempo en que están abiertas.
- 12 Vdc: tienen polaridad y, en este caso, el común de las salidas es el positivo. Consumen durante todo el tiempo en que están abiertas.
- 12 Vdc, “*latch*”: tienen polaridad. Este tipo de solenoide necesita tres cables de conexión: activación, desactivación y común (positivo). Tienen un consumo muy inferior a los dos casos anteriores, porque no importa el tiempo que están abiertas, sino sólo el número de maniobras (durante el

riego no consumen, pues son de enclavamiento), ya que reciben un pulso corto (80-500 ms) para la apertura/cierre. Esto es una ventaja para su alimentación solar, porque permite la instalación de una batería de menor capacidad y un generador fotovoltaico de menor potencia. Hay una distancia máxima que depende del modelo entre las válvulas y el programador, como se muestra en la *Tabla 8*.

- 9 Vdc: para funcionamiento con pila.

Antes de cada válvula de sector, es aconsejable instalar una **válvula de paso**, de tal forma, que no solo sirva para una posible regulación del caudal, sino también para condenar el paso de agua cuando exista una avería en la válvula automática o en el sector.

Las tuberías secundarias, los porta-ramales e incluso los ramales, aparte de los filtros, pueden contar con **válvulas de descarga**, con el fin de verter el agua de limpieza (con alguicidas y químicos), que tiene por objeto remover los sedimentos y prevenir el crecimiento de microorganismos en los elementos del sistema.

El sistema se completa con sondas de presión (después de la bomba, antes y después de cada filtro y antes del campo de riego) y caudalímetro/s.

El cálculo de las pérdidas de carga de las válvulas y resto de elementos hidráulicos (caudalímetros, codos, sondas, ...) del sistema es un tema muy complejo, porque se producen no sólo pérdidas por fricción, sino también por turbulencias que se originan al paso de líquidos por estos puntos singulares.

Para válvulas, suele tomarse como equivalente la pérdida de carga por rozamiento en una tubería recta de 10 m de longitud y de igual diámetro que el accesorio [8].

En ocasiones, puede tomarse una longitud total de tubería incrementada en un 5 – 20 %, dependiendo de la longitud y el mayor o menor número de puntos singulares. Seguiremos esta aproximación en el presente trabajo.



Calibre del cable (awg)	diámetro (mm)	Sección transversal (mm <sup>2</sup> )	Máxima distancia (m)
20	0.8	0.5	150
17	1.1	1.0	240

Tabla 8. Máxima distancia entre las válvulas Aquanet Plus CD, del tipo 12V-latch y el programador de riego (13.5 V<sub>DC</sub>, 80 ms, condensador de 4700  $\mu$ F). Fuente: catálogo del fabricante

#### 4.3.5. Control de riego

Los programadores permiten programar ciclos de riego con varios días de anticipación. Accionan sucesivamente sectores independientes (hasta más de 45 sectores/estaciones de riego) que corresponden a diversas válvulas automáticas, a las que proporcionan alimentación eléctrica. El tiempo de apertura de cada sector es regulable, desde un minuto a varias horas, lo que permite ajustar la cantidad de agua aplicada a cada sector. También pueden funcionar por volumen de agua aplicada por sector, contar con programas de riego diferenciados para cada sector e incorporar sensores de lluvia o humedad para modificar los programas de riego, así como controlar el fertiriego, el lavado de filtros y otras funciones.



Ilustración 30. Programador de riego marca Galcon. Fuente: turiego.com

#### 4.3.6. Fertiriego y herbiriego

El equipo de fertiriego consta de un tanque para el fertilizante / herbicida y un sistema dosificador, eléctrico o hidráulico, de alguno de los tipos siguientes, que introduce o inyecta la disolución del fertilizante/herbicida a la red de riego:

- **Bomba dosificadora**, que inyecta un caudal continuo de disolución gracias a una presión superior a la de la red de riego en ese punto.
- **Inyectores que funcionan por efecto Venturi**, por el que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión cuando aumenta la velocidad al pasar por una zona de sección menor. Esto permite en el inyector la aspiración de la disolución fertilizante y su mezcla con el agua de riego. Después la sección se incrementa otra vez y con ella la presión, pero hasta un valor más bajo que el de la entrada del inyector. Aunque puede ser montado directamente en la tubería, normalmente se monta en derivación, porque normalmente el tiempo de fertiriego es inferior al de riego (para que agua limpia sin fertilizante pueda ir limpiando posibles depósitos de éste en la tubería periódicamente). En este montaje en derivación, para que se incorpore la disolución de fertilizante al flujo principal es necesario crear en éste una pérdida de carga, para que la presión a la salida del inyector sea superior a la de la tubería principal en ese punto.
- **Tanque de fertilizante con derivación de flujo**. Tampoco consume energía externa. En este sistema el tanque de fertilizante se coloca en una derivación de la tubería de riego entre cuyas conexiones, de entrada y salida, se instala una válvula de compuerta. La cantidad de solución inyectada aumenta con la diferencia de presión entre las conexiones de entrada y salida de la derivación, la cual se controla por el operador del riego cerrando más o menos la válvula de compuerta.

La *Tabla 9* recoge las ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas de dosificación que hemos visto:

Sistema	Ventajas	Inconvenientes
<b>Bomba dosificadora eléctrica</b>	Dosis constante Permite un control sencillo de la dosis y del tiempo de aplicación, siendo fácil de automatizar Es portátil	Coste, ya que los elementos de la bomba en contacto con el fertilizante han de ser resistentes a la presión y a la corrosión. Requieren fuente adicional de energía eléctrica
<b>Inyector Venturi</b>	Sistema simple y barato	Para que funcione hay que

	Fácil de instalar No consume energía eléctrica	producir una pérdida de carga (hasta 10 m.c.a) El caudal inyectado es muy sensible a la variación de presión en el sistema
<b>Tanque con derivación de flujo</b>	Sistema simple y barato No consume energía eléctrica	Para que funcione hay que producir una pérdida de carga  Dosis muy irregular, el fertilizante cada vez se encuentra más diluido en el depósito

Tabla 9. Ventajas e inconvenientes de los principales sistemas de fertiriego

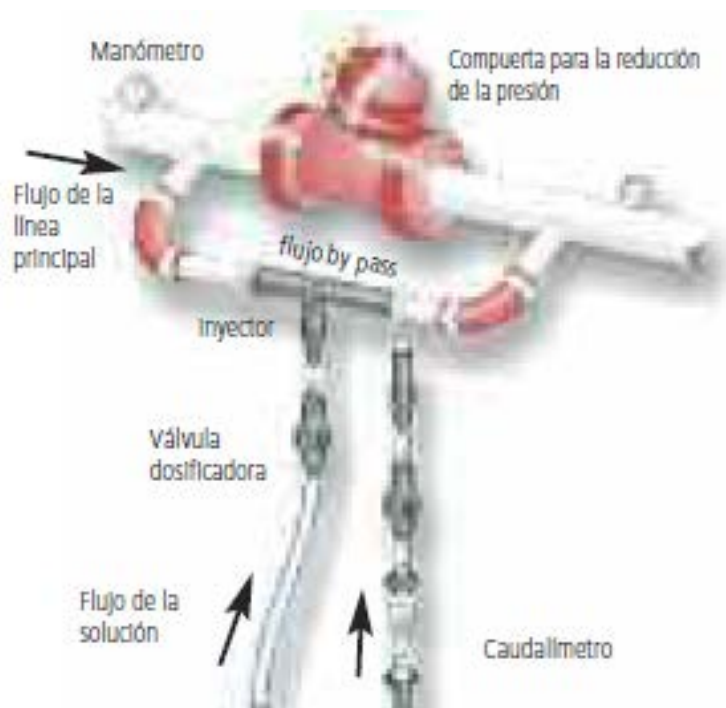


Ilustración 31. Montaje de inyector Venturi con by-pass. Fuente: [18].

## 5. TIPOS DE BOMBEO

### 5.1. Desde pozo

Se utiliza una bomba sumergible, que tiene que estar siempre por debajo del nivel del agua en el pozo. El agua puede bombearse a un depósito sobre-elevado lo suficiente como para que la presión estática sea suficiente para distribuirla desde ahí por gravedad o directamente hasta los elementos de riego (aspersores, goteros), en cuyo caso debe asegurar la presión de agua que éstos requieran.

En caso de utilización de depósito sobre-elevado, la alimentación al depósito puede ser [13]:

- Alimentación superior: salida libre por la parte superior del depósito. Es lo más habitual.
- Alimentación inferior: salida a la parte inferior del depósito, lo que requiere la instalación de una válvula anti-retorno. Tiene como ventaja que evita la caída desde la parte superior del depósito hasta el nivel real de agua en el depósito, lo que incrementa ligeramente la eficiencia del sistema, ya que el nivel de altura manométrica en cada momento es hasta el nivel de agua en el tanque y no hasta la parte superior del mismo.

La bomba tiene que salvar una altura manométrica total, en m.c.a. (metros de columna de agua), que se calcula con la fórmula siguiente, según [13] y [2]:

$$H_T = H_S + H_G + H_F + H_D + H_A$$

donde:

$H_S$  = nivel estático del pozo. Profundidad de la superficie del agua en el pozo, en ausencia de bombeo.

$H_G$  = diferencia de cota desde la boca del pozo hasta el punto de vertido, ya sea en el depósito o en el punto de aplicación. En el primer caso se asume que la presión de salida es despreciable. En el segundo, será  $H_A$ .

$H_F$  = pérdidas de fricción, que dependen del caudal y las secciones, y accesorios (válvulas, codos, filtros)

$H_A$  = presión requerida en los elementos de riego, en caso de bombeo directo (sin depósito de agua)

$H_D$  = nivel dinámico del pozo. En un pozo, la profundidad de la superficie del agua se incrementa dinámicamente por el propio hecho de extraer agua. Si fuera impermeable, este incremento sería el caudal  $Q$  entre la sección del pozo  $A_w$ , pero en realidad existe un rellenado natural del mismo por difusión, desde el medio circundante poroso, proporcional al incremento dinámico de profundidad. En condiciones estacionarias, se llega a que el nivel dinámico es proporcional al caudal [13]:

$$\frac{dH_D}{dt} = 0 = \frac{-1}{\tau} H_D + \frac{Q(t)}{A_w}$$

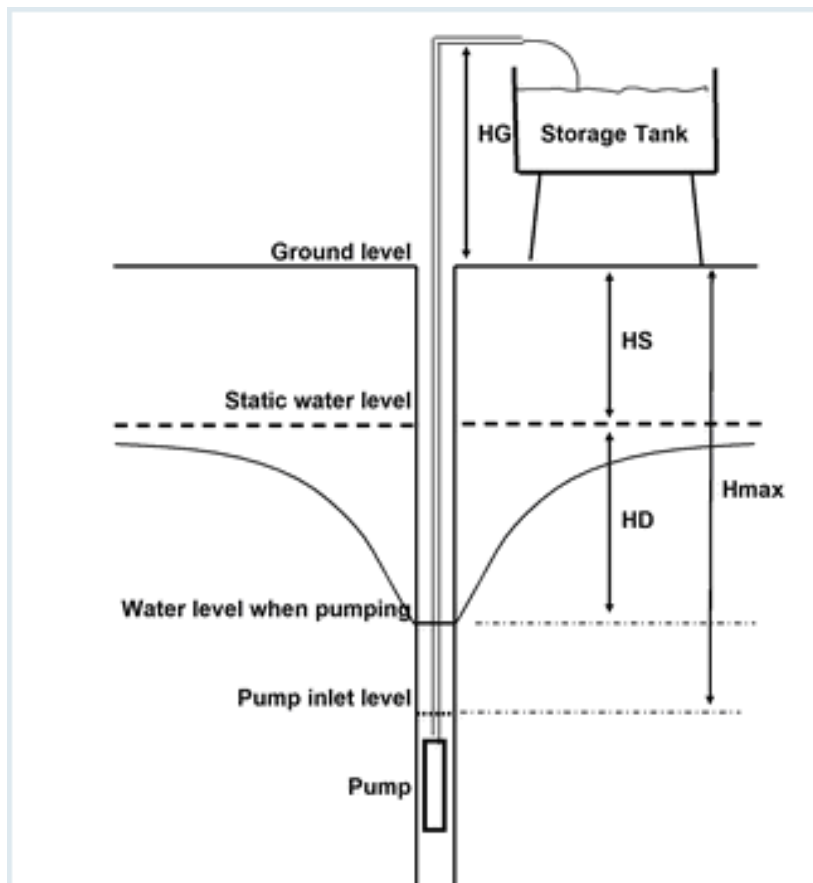
$$H_D = \tau \frac{Q(t)}{A_w}$$

En relación a un caso de referencia:

$$H_D = Q \frac{H_{D,ref}}{Q_{ref}}$$

Siendo la ratio  $H_{D,ref} / Q_{ref}$  una característica del pozo, expresada en (m/m<sup>3</sup>/h). Este parámetro está relacionado con las propiedades geológicas del suelo circundante (permeabilidad, capacidad de almacenamiento) y de la técnica de construcción del orificio de perforación. Puede ser determinado fácilmente, usando una bomba portátil y midiendo el nivel de agua y el caudal en condiciones estacionarias.

Adicionalmente, se producen variaciones estacionales en el nivel estático del pozo, debido a variaciones en el nivel de la capa freática, que deben ser consideradas en el cálculo.



*Ilustración 32. Esquema de las distintas contribuciones a la altura manométrica total de un bombeo desde pozo. Fuente: [13]*

## 5.2. Desde balsa, lago o río

Es un caso más simple. La bomba no es necesariamente de tipo sumergible, por lo que puede reducirse el coste y facilitarse el mantenimiento. Pueden emplearse bombas de superficie auto-aspirantes. En teoría, podría ser posible succionar desde una altura de 10.2 m, pero esto requeriría un vacío absoluto y las bombas de succión tienen una presión mínima en el lado de aspiración. Esto implica una altura máxima de succión inferior, dada en m.c.a. por la fórmula [32]:

$$H = p_b * 10.2 - NPSH - H_f - H_v - H_s$$

donde

$p_b$  = Presión barométrica en bar (puede considerarse 1 bar)

NPSH = **N**et **P**ositive **S**uction **H**ead en metros de altura, leída de la curva NPSH de la bomba al caudal más alto que vaya a dar la bomba

$H_f$  = Pérdida por fricción en la tubería de aspiración (normalmente despreciable)

$H_v$  = Presión de vapor en m.c.a. Depende de la temperatura del fluido, para nuestro caso, agua a 30° C o menos, inferior a 0.4 m

$H_s$  = Margen de seguridad = mínimo 0.5 metros de altura.

La fórmula de altura manométrica total sería en este caso:

$$H_T = H_S + H_G + H_F + H_A$$

Se aplica en este caso también, todo lo que hemos dicho sobre distribución de agua directa o a través de depósito sobre-elevado.

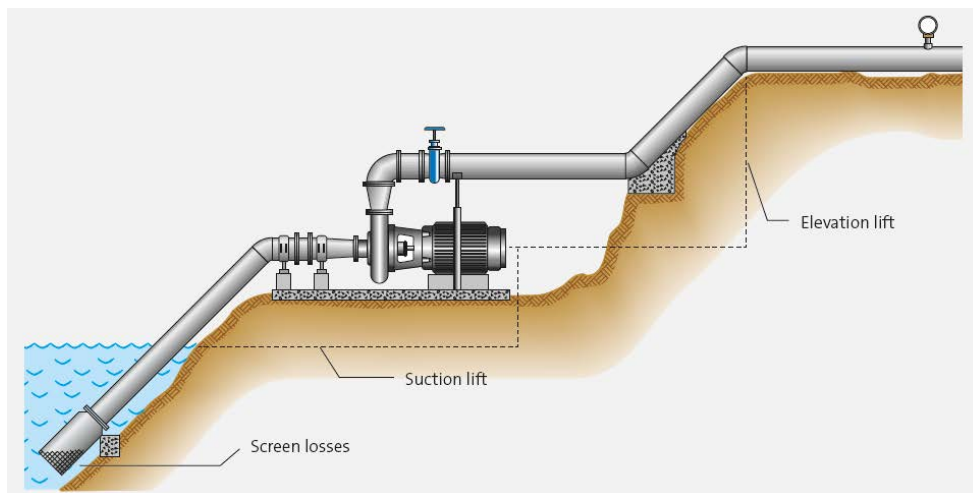


Ilustración 33. Esquema de las distintas contribuciones a la altura manométrica total de un bombeo desde balsa, lago, río. Fuente: [2]



## 6. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN SISTEMA DE BOMBEO SOLAR

### 6.1. Motor eléctrico

Es el encargado de suministrar energía mecánica a la bomba. Hay motores de corriente alterna (AC) y de corriente continua (DC). El proceso por el cual cada uno de estos tipos de motores transforma la energía eléctrica en mecánica escapa al objetivo del presente trabajo, por lo que nos centraremos sólo en comparar las ventajas e inconvenientes de los motores AC y DC.

El rango de potencia de los **motores AC** es mucho más grande que los motores DC, por lo que son la opción elegida si la profundidad de bombeo es grande, el caudal es elevado o concurren ambas circunstancias. Son más baratos que los motores DC a partir de potencias en torno a 300 W, lo que hace que alrededor del 90 % de los motores eléctricos que se fabrican en el mundo sean AC. Sin embargo, para sistema de bombeo fotovoltaico la tendencia se invierte, porque la mayor parte de los bombeos son de pequeña potencia y el acoplo con corriente continua de los módulos fotovoltaicos es más directo en el caso de los motores de DC.

Los motores AC pueden ser asíncronos o síncronos y, entre estos últimos de imanes permanentes y de reluctancia. Los asíncronos pueden funcionar directamente conectados a la red, pero los de imanes permanentes requieren un variador de frecuencia. Los de reluctancia normalmente también, salvo algunos diseños específicos para operación directa a red.

Para bombeo solar generalmente se usan motores asíncronos que son más económicos, aunque empiezan a utilizarse también motores de imanes permanentes por su mayor eficiencia, como se aprecia en la *Ilustración 34* para motores de bombas de la marca KSB, lo que permite incrementar el caudal de agua bombeada, para la misma potencia del campo fotovoltaico.

Los motores se suministran en diversas tensiones de funcionamiento (115 V, 230 V, 400 V, 500 V, 575 V, ...) y pueden ser monofásicos y trifásicos. El variador de frecuencia debe seleccionarse con una tensión de salida ajustada a la nominal del motor. Así, un motor de 400 Vac, requerirá un modelo de

variador de 380-480 Vac y uno de 575 V un variador de 525-600 Vac o de 525-690 Vac.

Los **motores DC** pueden ser con o sin escobillas y son más caros que los de corriente alterna. Los de escobillas no requieren una electrónica de control compleja, pero requieren reposición periódica de las escobillas, lo que los hace inapropiados para la aplicación de bombeo solar, por las dificultades para encontrar repuestos y realizar el mantenimiento en las zonas remotas donde generalmente se instalan estos bombeos. Los sin escobillas requieren una electrónica de control más compleja que encarece el coste. En ambos casos, el rango de potencias es limitado. En la industria, los motores DC se utilizan principalmente en aplicaciones de posicionamiento y sincronización (servomotores) por su mejor desempeño en estos campos.

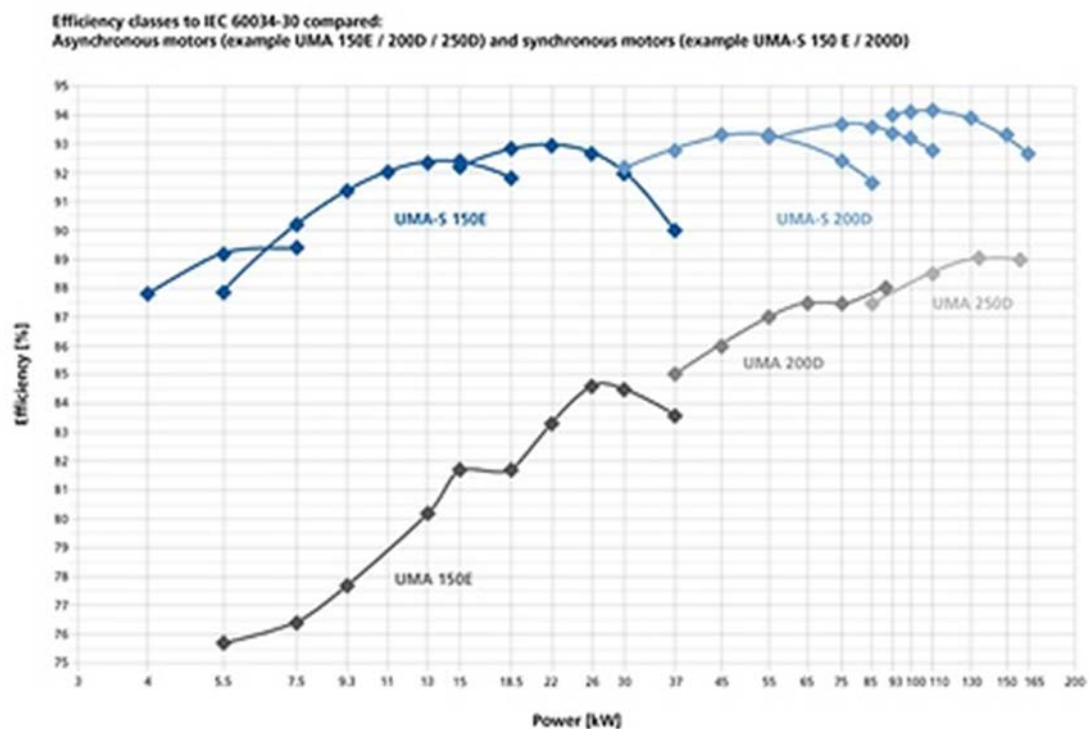


Ilustración 34. Comparativa de la eficiencia de motores para bombas sumergibles de la marca KSB. En azul, los modelos síncronos de imanes permanentes y en gris los asíncronos convencionales de “jaula de ardilla”. Fuente: KSB

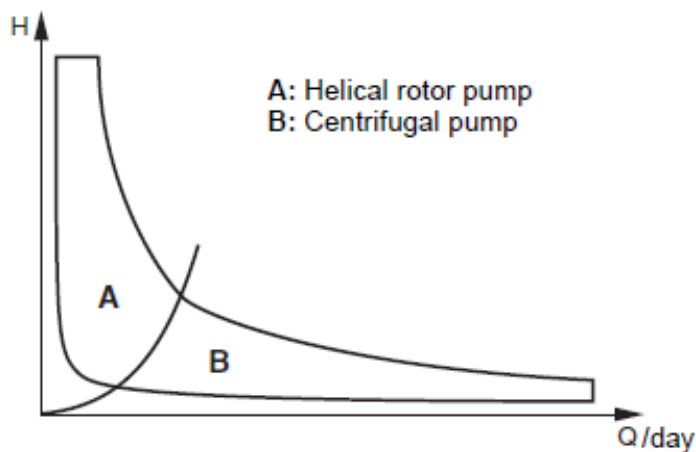
## 6.2. Bomba

En este caso es la fuente de captación de agua la que determina el tipo de bomba.

Las **bombas superficiales** se emplean para captación de agua de una balsa, río, lago o de pozos poco profundos.

Las **bombas sumergibles** se emplean para la captación de agua de pozos más profundos. Como inconveniente es necesario la extracción completa de la tubería para su mantenimiento. Pueden ser centrífugas o helicoidales. Estas últimas son de desplazamiento positivo y bombean un caudal que es casi independiente de la altura dinámica del bombeo, como se muestra en *Ilustración 35*.

Para igual potencia, las helicoidales bombean a una altura manométrica total mayor, pero menos caudal.



*Ilustración 35. Rango de funcionamiento de las bombas helicoidales (A) y centrífugas (B). Fuente: [33]*

### 6.3. Generador fotovoltaico

Los módulos fotovoltaicos producen corriente continua y su comportamiento eléctrico está dado por su curva característica I-V y P-V, con los siguientes puntos característicos, según se muestra en la *Ilustración 36*:

- Isc: corriente de cortocircuito.
- Voc: tensión de circuito abierto
- Pmp: punto de máxima potencia, dado por una corriente y una tensión del punto de máxima potencia: Imp y Vmp, respectivamente.

Aunque existen otras tecnologías, el mercado está dominado por los módulos de silicio mono/multi-cristalino, de 60 o 72 células, con potencias a partir de los 250 Wp y 300 Wp, respectivamente.

Isc e Imp son proporcionales a la irradiación y aumentan ligeramente con la temperatura de célula (coeficiente en torno a  $+0.05\ \%/^{\circ}\text{C}$  para Isc). Sin embargo, Voc y Vmp disminuyen apreciablemente según aumenta la temperatura de célula (coeficiente en torno a  $-0.32\%/^{\circ}\text{C}$  para Voc), por lo que el resultado total es que, para la misma radiación, a mayor temperatura de célula, menor Pmp. Voc y Vmp aumentan ligeramente con la irradiancia de forma no uniforme (más al pasar de valores bajos a medios que de medios a altos). Estos comportamientos se muestran en la *Ilustración 37* y la *Ilustración 38*.

El generador fotovoltaico está compuesto por una o varias ramas en paralelo ( $N_p$ ). Cada rama está compuesta por el mismo número de módulos fotovoltaicos conectados en serie ( $N_s$ ). Todos los módulos del generador fotovoltaico deben ser del mismo modelo. Sus curvas I-V y P-V tienen una forma similar a la de un módulo, pero la corriente es mayor (la del módulo  $\times$  número de ramas en paralelo) y también la tensión es mayor (la del módulo  $\times$  número de módulos en serie de la rama). Está caracterizado por su potencia pico, que es la suma de los Pmp de los módulos en condiciones estándar:  $1000\ \text{W}/\text{m}^2$  de irradiancia solar y  $T_{\text{cel}} = 25^{\circ}\text{C}$ . En condiciones reales, raramente se alcanza esta potencia pico ya que, aunque los  $1000\ \text{W}/\text{m}^2$  pueden alcanzarse, e incluso sobrepasarse en condiciones reales, estos valores de irradiancia suelen llevar pareja una elevada temperatura ambiente y, por tanto, de célula, lo que penaliza fuertemente la producción, por el descenso de Vmp. Por eso se definen las condiciones nominales de operación, mediante la TONC

(Temperatura de Operación Nominal de Célula), que es la temperatura de equilibrio de una célula en circuito abierto, expuesta a una irradiancia de  $800 \text{ W/m}^2$ , una temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$  y una velocidad de viento de  $1\text{m/s}$ . Suele estar en torno a  $45^\circ\text{C}$ . Los fabricantes de módulos suelen dar los datos eléctricos también en condiciones TONC.

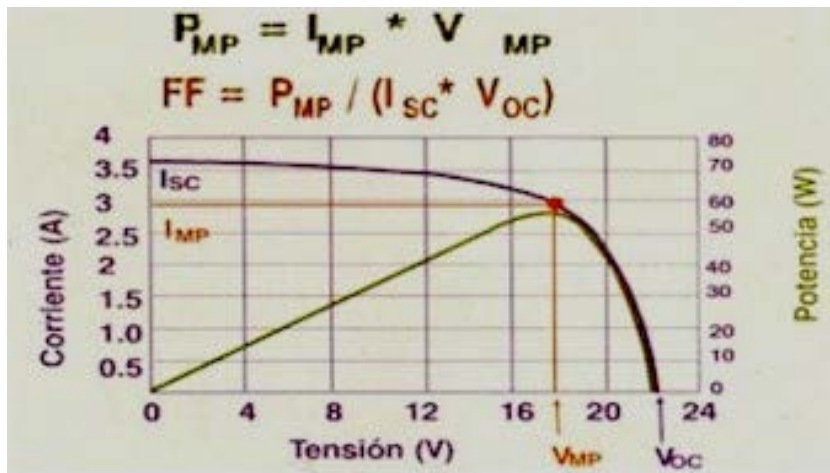


Ilustración 36. Curva I-V y P-V de un módulo fotovoltaico de  $55 \text{ Wp}$ . Fuente: Universidad de Jaén

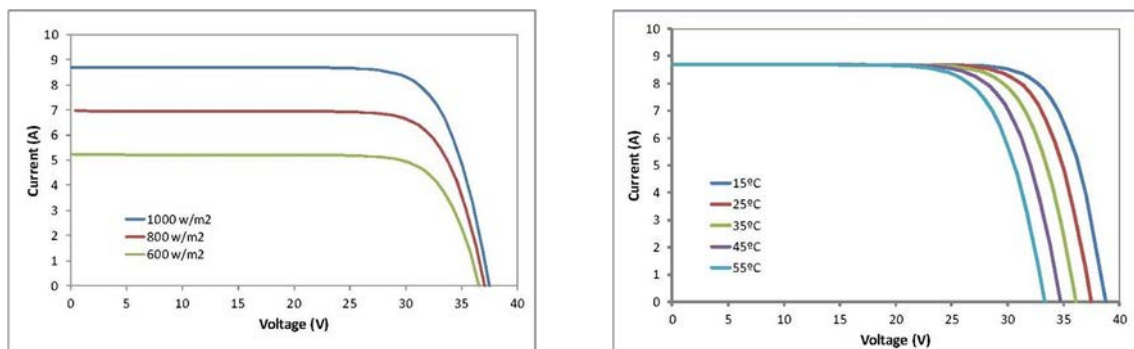


Ilustración 37. Izquierda: Curvas I-V de un módulo FV para distintos valores de irradiancia solar y  $T_{cel} = 25^\circ \text{C}$ . Derecha: Curvas I-V para distintos valores de  $T_{cel}$  e irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Fuente: Ingemecánica

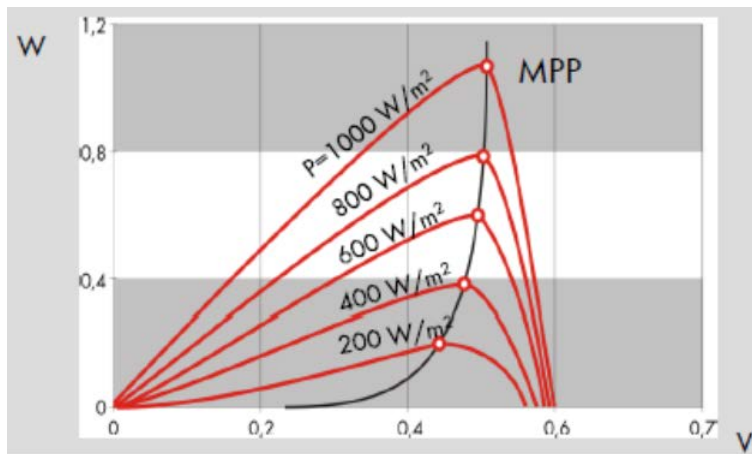


Ilustración 38. Curva P-V para una célula fotovoltaica para distintos valores de irradiancia. Se marca  $V_{mp}$ , que aumenta con la irradiancia. Fuente: SMA, Solar Academy.

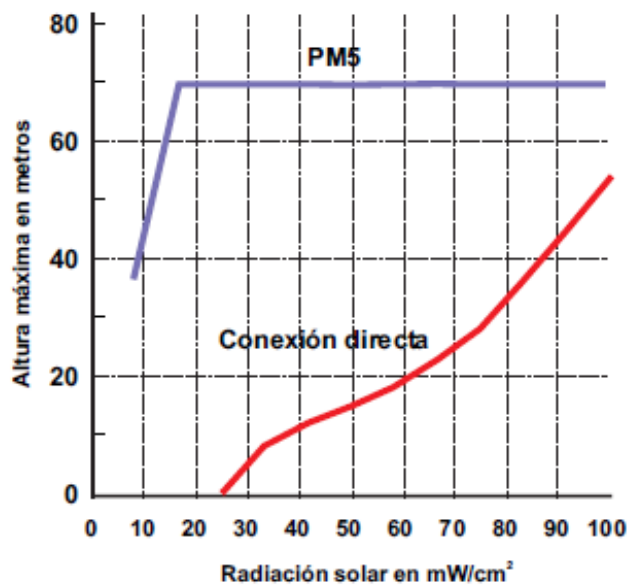
## 6.4. Controlador de bombeo

Equipo electrónico cuya finalidad es optimizar la potencia extraída del generador fotovoltaico y ajustar la velocidad de la bomba en función de ella, con el fin de optimizar el caudal de agua bombeado. Puede incorporar funciones adicionales, como la detección de funcionamiento en vacío de la bomba, mediante sonda de nivel de pozo o electrónicamente (detección de embalamiento de la bomba). También puede permitir la conexión de sondas de nivel de pozo.

### 6.4.1. Convertidores DC/DC

Para motores DC, se utilizan convertidores DC/DC en lugar de un acoplo directo de los módulos al motor. Estos convertidores fijan la tensión de trabajo del generador fotovoltaico y convierten los incrementos de corriente debidos al incremento de irradiancia en el lado del generador fotovoltaico, en incrementos de tensión aplicada al motor. Esto permite arrancar con una irradiancia muy inferior a la necesaria en caso de un acoplo directo del motor al generador fotovoltaico, tal y como se muestra en la *Ilustración 39*, ya que permite transformar la intensidad baja y tensión moderada que caracterizan a las condiciones de baja irradiancia, en intensidad elevada y tensión baja en el lado del motor, lo que permite el funcionamiento del motor a baja velocidad.





*Ilustración 39. Irradiancia solar mínima para arrancar el motor, dependiendo de la altura manométrica total, para bombeo DC con convertidor DC/DC (morado) y sin él (rojo). Fuente: Manual del convertidor DC/DC PM5 para bombeo solar de Atersa.*

#### 6.4.2. Variadores de frecuencia

Para motores AC, se utilizan normalmente variadores de frecuencia, muy utilizados en la industria para controlar la velocidad y realizar un arranque de los motores en rampa, sin picos de corriente y así reducir el consumo energético de numerosas aplicaciones: bombas, ventiladores, compresores, cintas transportadoras, etc. Los variadores se pueden emplear también para controlar otras bombas auxiliares, como las dosificadoras de fertilizantes/herbicidas.

Al estar diseñados inicialmente para alimentación desde la red eléctrica, los variadores de frecuencia cuentan normalmente con un rectificador, que puede ser de dos tipos:

- “Non-Regenerative Front End” (NFE). Está formado por diodos, en cuyo caso es de tipo “no controlado” o, para potencias mayores por una combinación de diodos y tiristores (también denominados SCR, Silicon Controlled Rectifiers), en cuyo caso es de tipo “semi-controlado”.
- “Active Front End” (AFE). Formado por IGBTs. Entre sus puntos fuertes está que permite la regeneración de la energía de inercia de la carga a la red cuando ésta se para e introduce una tasa baja de armónicos en la

red. Entre sus desventajas está un mayor precio y unas pérdidas energéticas muy superiores a los de tipo NFE, lo que afecta significativamente al rendimiento del variador.

Los variadores cuentan también con un circuito intermedio DC con condensadores, que sirve de almacenamiento de energía, en el que se pueden incluir también bobinas para la reducción de armónicos (DC-chokes) en caso de que el rectificador sea de tipo NFE. A este circuito intermedio es al que se conecta el generador fotovoltaico, mediante terminales específicos presentes en muchos modelos de variador.

Por último, cuentan con un puente inversor formado por IGBTs, que transforma la DC del circuito intermedio, mediante PWM, en una salida AC al motor, de tensión y frecuencia variables.

El rectificador se utiliza en sistemas híbridos con conexión a red/grupo electrógeno como sistema auxiliar/complementario, pero no en bombeo solar puro, por lo que en este último caso pueden utilizarse modelos sin rectificador.

El variador modifica continuamente la frecuencia de salida y, por tanto, la velocidad de la bomba, según la potencia disponible en el generador fotovoltaico. Esta variación de la velocidad de la bomba, normalmente de 30-50 Hz para bombas sumergibles, permite bombear agua con irradiancias bajas. Por debajo de 30 Hz, las bombas sumergibles no están suficientemente refrigeradas y sus rodamientos pueden dañarse, por lo que su funcionamiento en este rango está desaconsejado por los fabricantes.

Según las leyes de afinidad para bombas centrífugas, el caudal es proporcional a la velocidad de la bomba, la presión estática al cuadrado de la velocidad y la potencia al cubo de la velocidad, por lo que la variación de 30-50 Hz permite un rango de funcionamiento en potencia muy amplio, como muestra la *Ilustración 41*.

Existen en el mercado variadores de frecuencia en baja tensión en un enorme rango de potencias, desde 0.18 kW hasta varios MW, por lo que puede cubrir cualquier bombeo con motores AC.

Pueden ser monofásicos o trifásicos y su tensión de salida puede ser 105-120 Vac, 200(208)-240 Vac, 380-480(500) Vac y 525-600(690) Vac. Debe seleccionarse un variador cuyo rango de tensión englobe la tensión nominal de la bomba.

La tensión AC de salida del variador se relaciona con la del bus intermedio DC, según la fórmula:

$$V_{AC,max} \approx 1.1 \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}}$$

Esto implica que el rango de tensión de salida del variador lleva parejo un rango de tensión en el bus intermedio DC y, por tanto, de la  $V_{mp}$  del generador fotovoltaico. Hay también un  $V_{oc}$  máximo de la rama que debe respetarse a la hora de dimensionar, con el fin de no sobrepasar la máxima tensión de bus DC del variador. Todos estos puntos se muestran en la *Tabla 10*.

Para un variador de frecuencia determinado, la eficiencia varía con los siguientes parámetros, según se muestra en la *Ilustración 42* y la *Ilustración 43*:

- Carga: hasta el 75% de la carga, la eficiencia aumenta con la carga; a partir de ahí, la carga no tiene casi influencia
- Frecuencia de salida: hasta la frecuencia nominal, la eficiencia se incrementa con la frecuencia, a partir de ahí la frecuencia no tiene casi influencia
- Frecuencia de conmutación de los IGBTs: a mayor frecuencia de conmutación, menor eficiencia.
- Tensión de la bomba

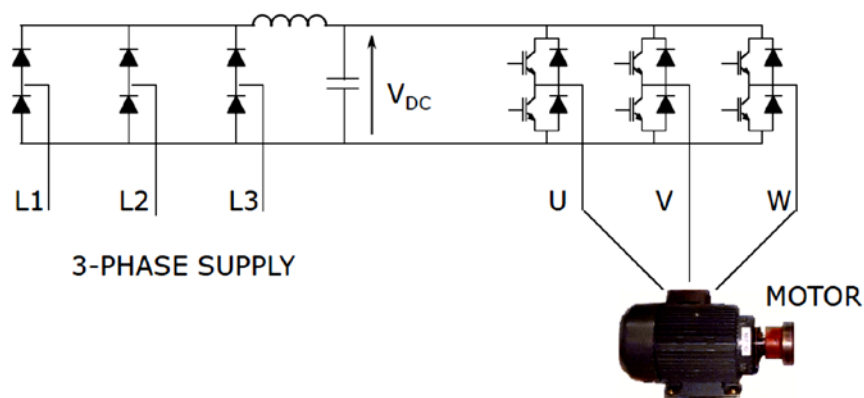


Ilustración 40. Estructura básica de un variador de frecuencia con rectificador de diodos (6-pulsos). Fuente: Danfoss Drives

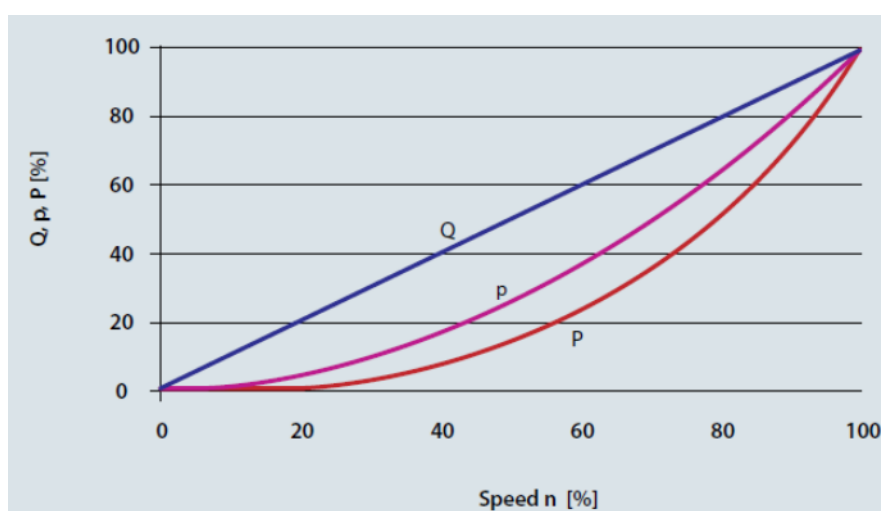


Ilustración 41. Variación del caudal ( $Q$ ), presión ( $p$ ) y potencia ( $P$ ) con la velocidad, para bombas centrífugas. Fuente: [20]

Variador	Bomba	Voc,max	Potencia típica de rama
200-240 Vac	230 Vac	400 V	2.4 kW <sub>p</sub>
380-480 Vac	400 Vac	800 V	4.8 kW <sub>p</sub>
525-600 Vac	575 Vac	1000 V	6 kW <sub>p</sub>

Tabla 10. Relación entre la selección de tensión de funcionamiento de variador y bomba, con el campo generador. Elaboración propia

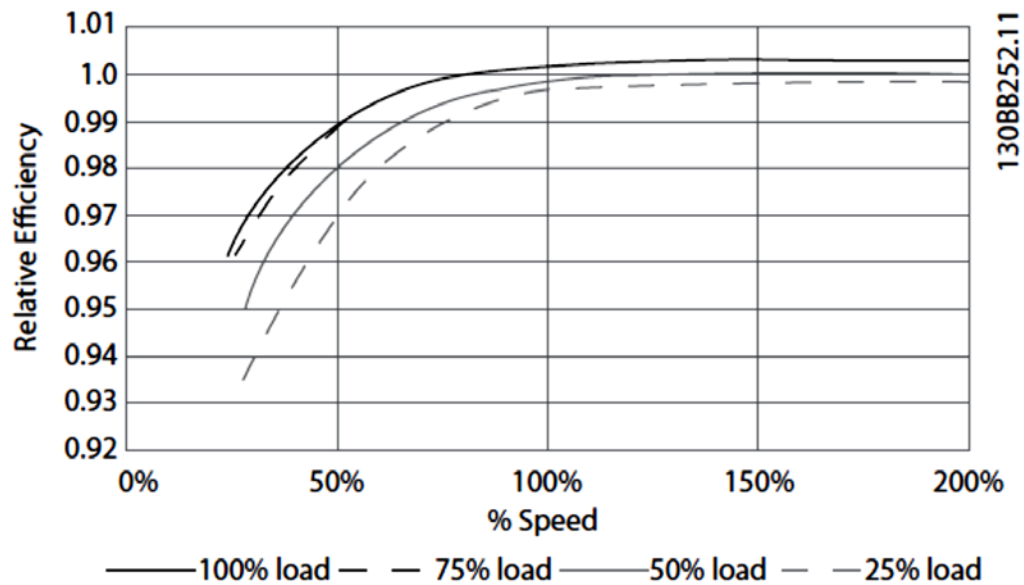


Ilustración 42. Curvas de eficiencia relativa (respecto a la máxima) para variador FC 202. Fuente: [21]

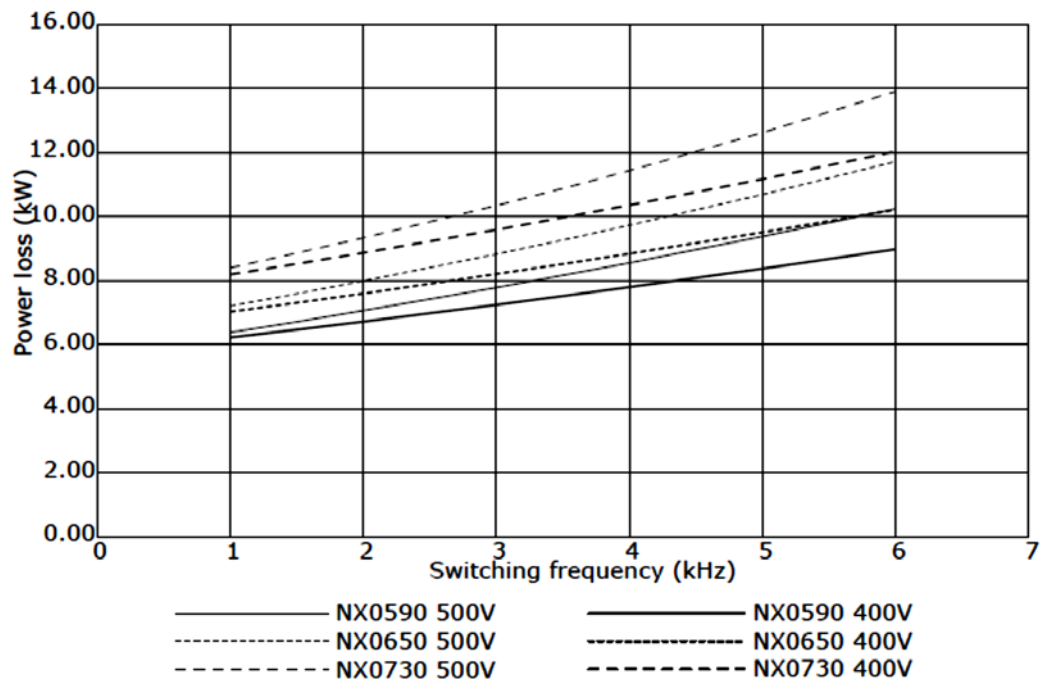


Ilustración 43. Pérdidas en variador Vacon NXP dependiendo de la frecuencia de conmutación y la tensión nominal del motor. Fuente: [21]

### 6.4.3. Parámetros clave para seleccionar el controlador solar

#### 6.4.3.1. Algoritmo de control

El primer factor que hay que tener en cuenta es el algoritmo de control.

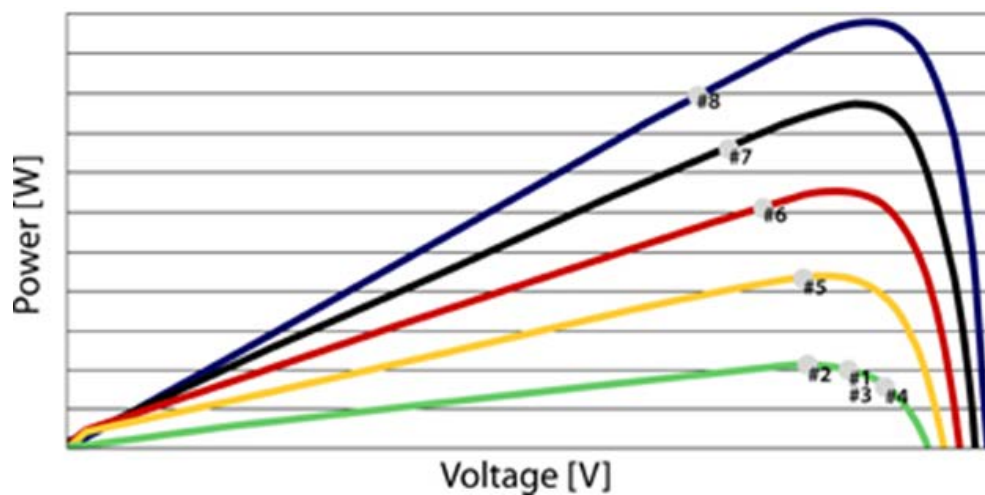
Hay controladores en el mercado que hacen trabajar al generador fotovoltaico a tensión DC constante, mediante un PID, variando la tensión y frecuencia aplicada a la bomba. El punto de consigna para la tensión DC constante puede corregirse en algunos modelos de variador según la temperatura de célula, conectando un sensor de temperatura de célula al variador. De esta forma se incrementa la eficiencia de bombeo del sistema.

Aún más eficiente, al menos en teoría, es un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), porque realmente busca  $V_{mp}$  y puede, por tanto, tener en cuenta sus variaciones no sólo debidas a la temperatura, sino también a la radiación. Además, se aplica a la curva I-V real del campo generador, que se ve afectada por el “mismatch” (tolerancia de los módulos en sus valores I, V y P).

Pero no es oro todo lo que reluce, ya que no todos los algoritmos MPPT son igual de buenos. Para empezar, algunos de los modelos que se promocionan como MPPT, como el Altivar 312 Solar de Schneider Electric, utilizan en realidad el PID anteriormente descrito para tensión DC constante. Y muchos de los que sí implementan un algoritmo MPPT, no son capaces de seguir convenientemente variaciones bruscas de irradiancia (debidas a condiciones de nubes y claros) y se produce lo que se denomina “side tracking”, en el que el punto de funcionamiento se va alejando de  $V_{mp}$  progresivamente en condiciones cambiantes de irradiancia, como se muestra en la *Ilustración 44*. Supongamos que el MPPT ha encontrado #1 y quiere determinar si es el punto correcto. Se mueve a #2 y encuentra menor potencia. Vuelve a #1, que ahora es #3. Para confirmar que el punto MPP es realmente correcto, se desplaza a #4. Ve que es inferior y decide volver atrás. Si el nivel de irradiancia cambia, el seguidor pasa a #5 y considera que esta dirección de seguimiento es perfecta. Seguirá moviéndose así, creyendo que está en el camino correcto. Al aumentar los niveles de irradiancia, el MPPT pasa a #6, #7 y #8 y se aleja de  $V_{mp}$  rápidamente.

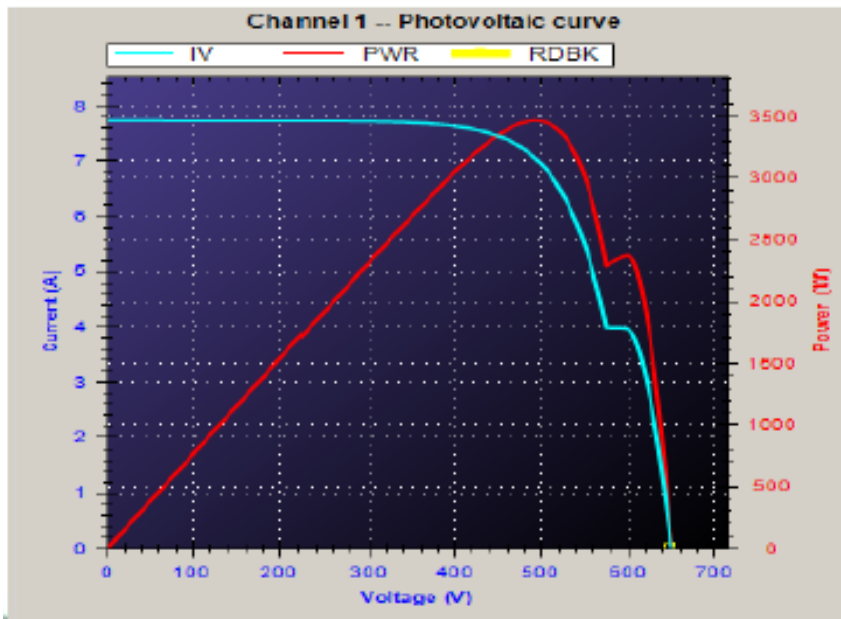
Otro problema ocurre en caso de sombreado parcial del generador fotovoltaico: las curvas características se modifican, apareciendo lo que se denominan máximos locales, tal y como se muestra en la *Ilustración 45*. La mayoría de los algoritmos MPPT no son capaces de detectar que están trabajando en un mínimo local y esto puede suponer pérdidas importantes de potencia mientras dure el sombreado parcial con respecto al valor  $P_{mp}$  (y con respecto a un funcionamiento a tensión DC constante).

El único caso que he encontrado de algoritmo implementado en variador de frecuencia que evite tanto el “side-tracking” como operar en un máximo local es el usado por Vacon en su portfolio solar, llamado MPPT4.



*Ilustración 44. Efecto de “side tracking” de un algoritmo MPPT. Fuente: Danfoss Solar Inverters*





*Ilustración 45. Características I-V y P-V para un generador fotovoltaico sombreado parcialmente, donde se aprecia un mínimo local en torno a 600 V y uno global en torno a 500 V. Fuente: Vacon*

#### 6.4.3.2. ¿Instalación en armario o a la intemperie?

Cuando se utilizan variadores con IP 20/21, se instalan dentro de un armario para exteriores, en el que pueden instalarse también las protecciones DC del sistema (ver capítulo 6.6) y elementos adicionales relacionados con el control del bombeo. Este enfoque requiere un armario de tipo ventilado para evitar el sobrecalentamiento de los componentes que, para el caso del variador, produciría pérdida de potencia (“derating”) y reducción en su vida útil. El flujo de aire en el armario debe ser filtrado para evitar acumulación de polvo en el armario y estos filtros requieren mantenimiento que, en muchos casos, no van a recibir, por lo remoto de la ubicación del bombeo.

Los bombeos solares se montan en regiones donde normalmente se alcanzan altas temperaturas, lo que puede ser un problema especialmente en el caso de variadores de IP 20/21, porque la temperatura dentro del armario va a ser siempre superior a la temperatura ambiente exterior, incluso si la ventilación del armario está correctamente diseñada y mantenida, lo que incrementa el riesgo de sobrecalentamiento.

El bombeo solar es una aplicación de uso solo diurno lo que, unido a la diferencia de temperatura entre el día y la noche, promueve un proceso cíclico de condensación-evaporación dentro del armario, al que un variador de IP 20/21 es especialmente sensible. Por eso el armario debe contar con medidas anti-condensación apropiadas, lo que no siempre es sencillo de conseguir.

Una posible solución es utilizar un montaje tipo “panel through” para el variador de IP 20/21. Esta solución requiere el mecanizado del armario para que el disipador del variador quede fuera del armario y un montaje sobre brida con una junta de sellado, para obtener una IP alta (IP 54 o 55), que proteja la electrónica del variador, que queda dentro del armario. Al disipar la mayor parte del calor fuera del armario, la ventilación y el riesgo de sobrecalentamiento y condensación no son tan críticos.

La solución técnicamente mejor es, sin embargo, utilizar variadores IP 66/NEMA 4X, para su instalación a la intemperie, montados en la propia estructura del generador fotovoltaico, a la sombra de los paneles, para evitar sobrecalentamiento por incidencia directa de la luz solar sobre el variador. El resto de componentes se podrían instalar en un armario de exteriores más pequeño y, en muchas ocasiones, sin ventilación, lo que puede compensar parte del sobre coste del variador, debido a la envolvente IP 66. Incluso una envolvente IP 66 no está libre del riesgo de condensación, por lo que es recomendable que tenga válvulas de gore-tex, como los variadores Vacon 100X y 20X, que permiten expulsar la condensación interna, mantener a raya a los contaminantes exteriores e igualar las presiones interna y externa, lo que evita que, a la larga pueda producirse una pérdida de la IP original de la envolvente.



*Ilustración 46. Solución “panel through”, en la que el disipador sobresale del armario y la parte de electrónica del variador se encuentra dentro del armario. Fuente: [35]*

#### 6.4.3.3. Otros factores a tener en cuenta

Cada modelo de variador está diseñado para una **distancia máxima de cableado de motor**, que hay que tener en cuenta, sobre todo con bombas sumergibles, que tienen cables de motor de mayor longitud.

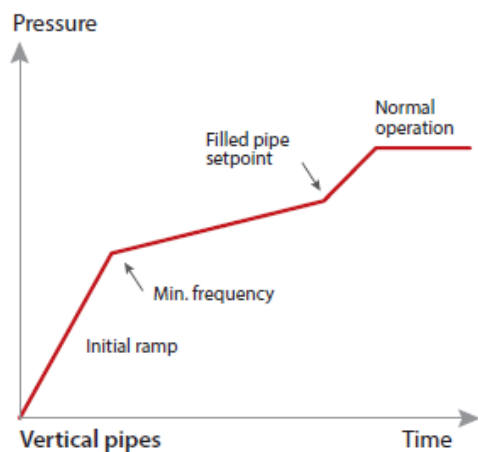
Hay que asegurarse de que el variador de frecuencia elegido es **válido para el tipo de motor** utilizado por la bomba: no todos los variadores permiten operar motores síncronos, por ejemplo.

Es muy recomendable que cuente con **funciones avanzadas para bombas**:

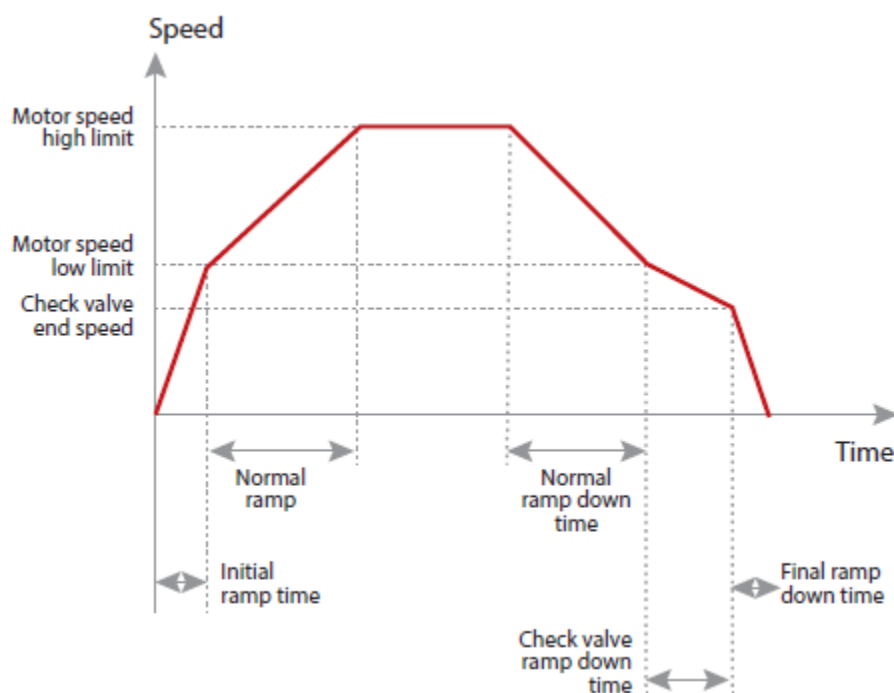
- Control por lazo cerrado de presión o caudal, esencial para los sistemas de riego que requieren condiciones de presión bien definidas.
- Detección de funcionamiento en seco, con el fin evitar daños en la bomba por sobrecalentamiento.
- Detección de final de curva, con el fin de evitar la cavitación.
- Modo “despertar” e “ir a dormir” automático, en función de la irradiancia.
- Rampas de arranque y parada de la bomba programables en varios tramos. Esto permite el relleno de tuberías (horizontales o verticales) de forma

suave y la programación de una rampa de parada lenta hasta que la válvula anti-retorno ha cerrado, con el fin de evitar golpes de ariete en ambos casos y la programación de rampas de corta duración hasta/desde la velocidad mínima para bombas sumergibles para proteger sus rodamientos y asegurar una refrigeración adecuada.

También es importante que el variador cuente con funciones de optimización del consumo del motor y de “auto-tuning” de su parametrización a los parámetros reales de motor.



*Ilustración 47. Funcionamiento del modo de llenado de tuberías para el variador de frecuencia FC 202 de Danfoss. Fuente: [35]*



*Ilustración 47. Rampas de arranque y parada para el variador de frecuencia FC 202 de Danfoss. Puede apreciarse una rampa de arranque de fuerte pendiente hasta llegar a la velocidad mínima de la bomba y luego más suave, también una “ralentización” de la parada para asegurar que la válvula anti-retorno ha cerrado y de ahí una rampa de fuerte pendiente para que el tiempo por debajo de la velocidad mínima sea el menor posible. Fuente: [35]*

#### 6.4.4. Principales variadores de frecuencia para bombeo solar

Muchos de los principales fabricantes de variadores de frecuencia para el sector del agua cuentan con modelos adaptados para bombeo solar.

- Danfoss Drives (marcas Vacon y VLT): Vacon 100 X, Vacon 20 X, Vacon NXP, FC 202, FC 51
- ABB: ACS355 y ACSM1
- Schneider electric: ATV312 Solar
- Siemens: Sinamics V20 y Sinamics S120
- Fuji: Frenic-Mega y Frenic-Ace
- Power electronics: SD700SP
- Invt: Goodrive BPD y Goodrive100-PV

Adicionalmente encontramos algunos fabricantes chinos de segundo orden como Powtran, Istech-electric, Setec power o Frecon Electric, con modelos de variador adaptados a bombeo solar.

## 6.5. Estructura soporte de los módulos. Seguidor solar

Los módulos fotovoltaicos pueden montarse en una estructura soporte fija o en un seguidor solar en uno o dos ejes.

En el caso de estructura fija, se orienta el generador fotovoltaico hacia el Sur en el hemisferio Norte y hacia el Norte en el hemisferio Sur y se inclina con respecto a la horizontal para favorecer la auto-limpieza de los módulos e incrementar su producción energética. El ángulo depende de si se busca una optimización de la producción anual o estacional (verano, para el caso del bombeo solar).

Ya hemos indicado en el capítulo 3.5 que, para dar una potencia de salida más uniforme a lo largo del día, es relativamente común para bombeos fotovoltaicos utilizar estructuras soporte con seguimiento solar. Este tipo de estructuras permiten además incrementar la producción energética diaria y, por tanto, la cantidad de agua bombeada para una potencia pico dada de generador fotovoltaico, aunque encarecen la instalación y mantenimiento.

Este hecho tiene una ventaja añadida, que es el incremento de la flexibilidad en el dimensionado del generador fotovoltaico, tal y como explicaremos a continuación. Los variadores de frecuencia tienen un rango de tensión DC limitado, lo que conlleva, para un modelo de módulo FV definido, un rango de número de módulos por rama bastante limitado. Por ejemplo, para un módulo estándar multicristalino de 255 Wp y un variador de frecuencia de 3 x 380-480 Vac, entre 16 y 19 módulos por rama, 20 a lo sumo si el sistema de bombeo no está expuesto a heladas. Las configuraciones del generador fotovoltaico son por tanto muy limitadas: 16, 17, 18, 19, 20, 32, 34, 36, 38, 40 etc., sin posibilidades intermedias. La posibilidad de dotar o no al sistema de seguimiento, así como de incorporar o no un motor de imanes permanentes de mayor eficiencia, incrementan la flexibilidad de diseño que no da el campo fotovoltaico por sí mismo.

Existen 4 tipos de seguimiento solar:

- En dos ejes: la superficie de los módulos se mantiene siempre perpendicular al sol mediante el giro con respecto a dos ejes. Esto se

consigue mediante la adaptación de la inclinación y el azimut de los módulos a lo largo del día.

- Seguimiento polar: los módulos giran con respecto a un eje orientado al sur e inclinado un ángulo igual a la latitud del lugar (solidario con el plano de los módulos). De esta forma, el eje de rotación del sistema es paralelo al eje de la tierra. La captación se reduce en un 3-4 % con respecto al seguimiento en dos ejes. La velocidad de giro es de  $15^\circ$  por hora, como la del reloj. Es una buena opción para seguidores de pequeño tamaño, pero presenta problemas estructurales para seguidores de mediano y gran tamaño.
- Seguimiento horizontal: los módulos giran con respecto a un eje horizontal orientado en dirección N-S o bien E-O. La captación se reduce en un 12 % con respecto al seguimiento en dos ejes, aunque su mecánica es muy sencilla. Es un sistema atractivo para latitudes pequeñas o cuando la superficie unitaria del seguidor es muy grande.
- Seguimiento azimutal: los módulos giran con respecto a un eje vertical, con una velocidad variable a lo largo del día. La inclinación se mantiene constante. La captación se reduce en un 7 % con respecto al seguimiento en dos ejes. Sin embargo, el tener un solo eje de giro y que éste sea vertical, hacen que la mecánica de los seguidores sea robusta y sencilla.

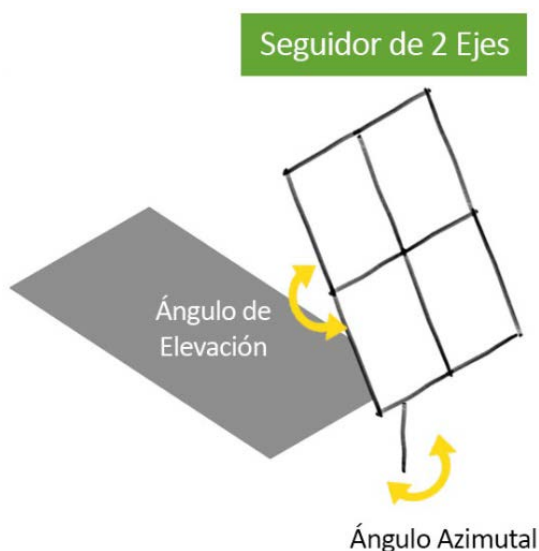


Ilustración 48. Seguimiento solar en dos ejes. Fuente: Valldoreix Greenpower





*Ilustración 49. Seguidores polares. Fuente: Salix Solar*



*Ilustración 50. Seguimiento con eje horizontal E-O en concentradores cilindro-parabólicos de energía solar térmica de alta temperatura. Fuente: Plataforma solar de Almería*

## 6.6. Otros elementos: filtro de salida y protecciones DC

Los variadores de frecuencia, debido a la modulación PWM en la salida de motor, producen picos de tensión y elevados valores instantáneos de variación de la tensión ( $dU/dt$ ) cuando conmutan los IGBTs, como se muestra en la *Ilustración 51*. Ello puede producir un estrés relevante en el aislamiento de los bobinados del motor, especialmente en el caso de bombas sumergibles.

Por este motivo, los fabricantes de bombas sumergibles y variadores recomiendan la instalación de un filtro a la salida del variador, que puede ser de tipo  $dU/dt$  (más económico y pequeño) o senoidal (mejores características). Sus formas de onda pueden verse en la *Ilustración 52* e *Ilustración 53*.

Son elementos voluminosos y que generan calor, por lo que puede ser interesante montar modelos para exteriores con IP 54 o superior, como se muestra en *Ilustración 54*.

En la parte DC, debería instalarse un interruptor de DC con capacidad de corte en carga, con el fin de poder desconectar el generador fotovoltaico del variador de frecuencia de forma segura.

Aunque las instalaciones fotovoltaicas de bombeo se instalan normalmente con configuración flotante (ningún polo puesto a tierra), lo que las hace seguras ante un primer defecto a tierra, la tensión DC a la que operan, sobre todo aquellas con  $V_{oc}$  hasta 800 o 1,000 Vdc, resulta muy peligrosa en caso de un segundo defecto si la instalación no dispone de ningún tipo de elemento de protección específica. Como los diferenciales utilizados para corriente alterna no funcionan con corriente continua, es necesario incorporar a la instalación un vigilante de aislamiento que mide constantemente la resistencia de aislamiento entre el generador fotovoltaico y tierra. Cuando el nivel de aislamiento decrece a unos valores peligrosos, el control desconecta el variador del generador fotovoltaico y cortocircuita y pone a tierra éste, para que la tensión se reduzca a cero, hasta subsanar el defecto.

Adicionalmente se puede instalar protección contra sobretensiones, ya que, por su disposición y cableado, el generador fotovoltaico puede actuar de antena receptora de sobretensiones de origen atmosférico.

Cuando hay 3 ramas en paralelo o más, es necesario instalar también un fusible en cada polo de cada rama, para evitar daños en caso de cortocircuito en una de las ramas, lo cual puede producir una corriente inversa elevada en esa rama dañando los módulos y conductores y poniendo en riesgo la seguridad de las personas [36].

Tras estos fusibles se haría el paralelo de las ramas y se instalaría el resto de protecciones: el protector de sobretensiones, el interruptor DC y el vigilante de aislamiento.

La tendencia en el mercado de plantas fotovoltaicas conectadas a red en los últimos años ha sido operar a tensiones DC cada vez más grandes. El estándar actual es de 1000 Voc, aunque existen ya componentes y plantas en operación hasta 1500 Vdc.

Esta tendencia no existe en el bombeo solar, porque la potencia unitaria de las instalaciones es, en general, pequeña. La operación a 1000 Voc es, sin embargo, una opción interesante para bombeos de mediana y gran potencia, con el fin de reducir costes en protecciones DC y cableado de rama y reducir además las pérdidas de cableado.

Por ejemplo: un generador de 12 kWp formado por 2 ramas de 6 kWp (que es el estándar para 1000 Voc con módulos de silicio cristalino) no requiere fusibles de rama. Sin embargo, si está formado por ramas de 2.5 kWp (que es el estándar para 400 Voc), requeriría 5 ramas en paralelo, con su correspondiente cuadro combinador de strings y fusibles.

La máxima tensión Voc del generador fotovoltaico determina la tensión de salida del variador y la bomba. Así, en el primer caso se emplearía un variador de 525-600 (690) Vac y una bomba de, por ejemplo, 575 Vac y en el segundo un variador de 200-240 Vac y una bomba de, por ejemplo 230 Vac.

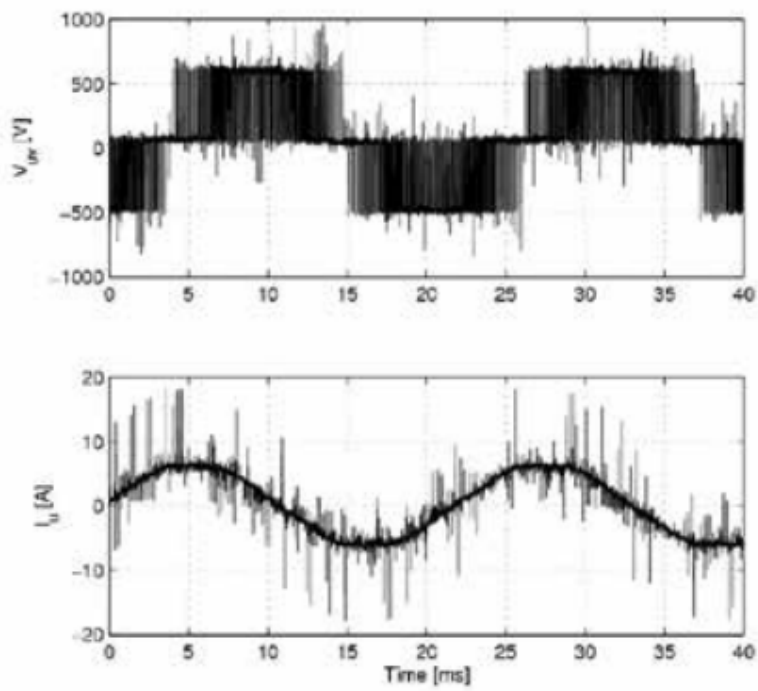


Ilustración 51. Forma de onda de tensión y corriente a la salida del variador de frecuencia (sin filtro). Fuente: [22]

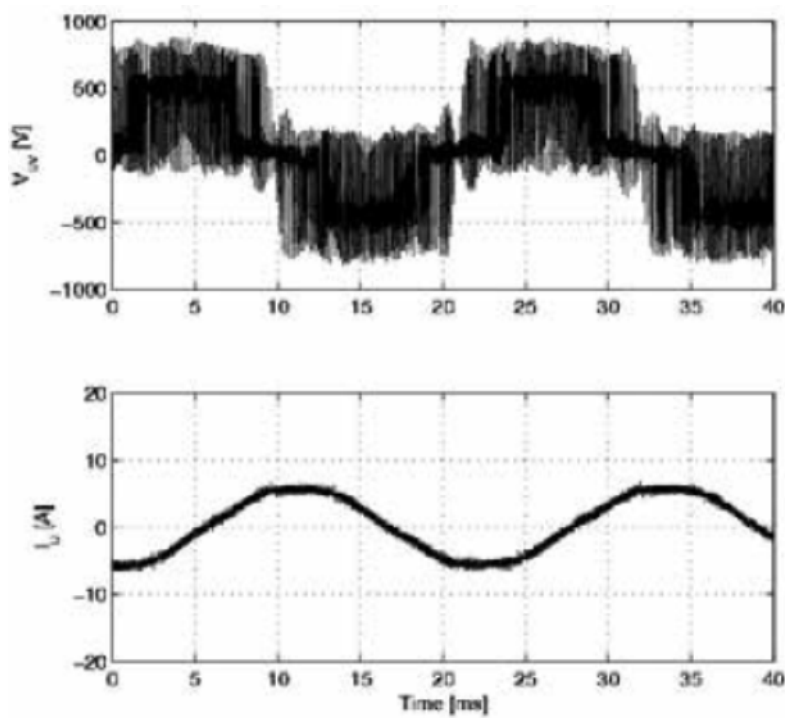
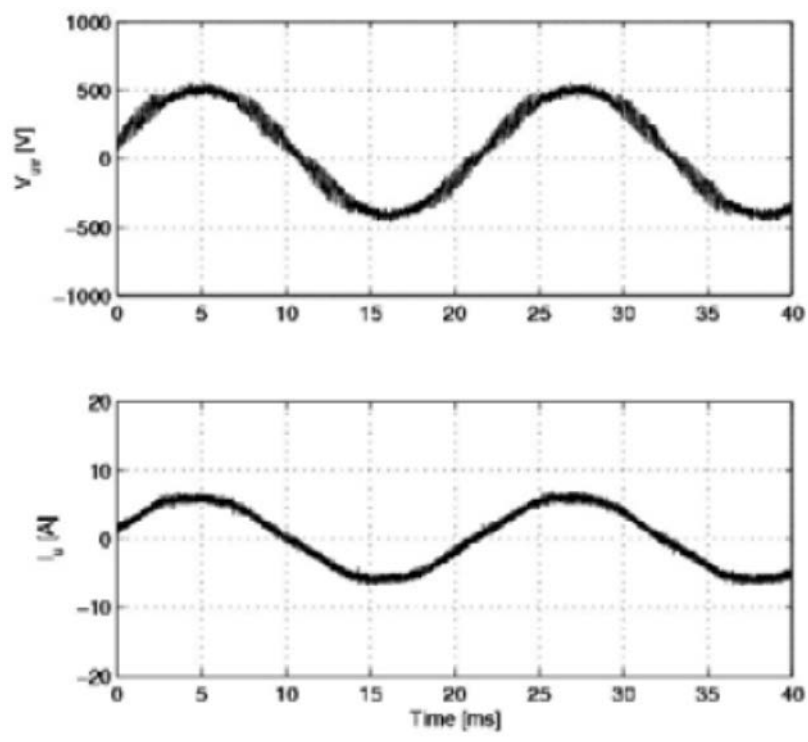


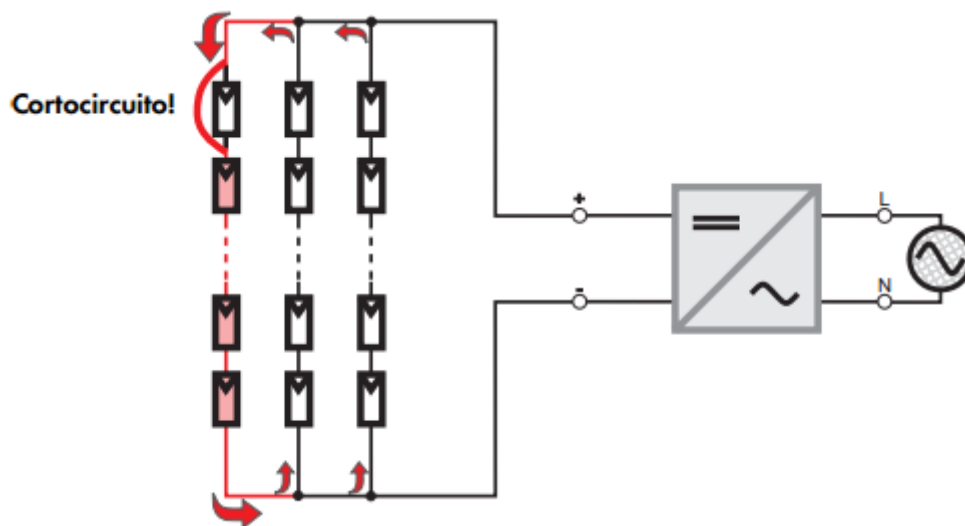
Ilustración 52. Forma de onda de tensión y corriente a la salida del variador de frecuencia (con filtro  $dU/dt$ ). Fuente: [22]



*Ilustración 53 Forma de onda de tensión y corriente a la salida del variador de frecuencia (con filtro senoidal). Fuente: [23]*



*Ilustración 54. Filtro  $dU/dt$  en envoltente IP 54. Fuente: Franklin Electric*



*Ilustración 55. Corriente inversa en generador fotovoltaico provocada por cortocircuito en una de las ramas.  
Fuente [36]*

## 7. ESTUDIO DE MERCADO DE BOMBEO SOLAR

### 7.1. Situación de mercado y tendencia

Según [14], el mercado global de bombas solares pasará de las 102,188 unidades de 2013 a más de 1,500,000 en 2022, con una distribución entre las distintas tecnologías que se recoge en la *Ilustración 56*

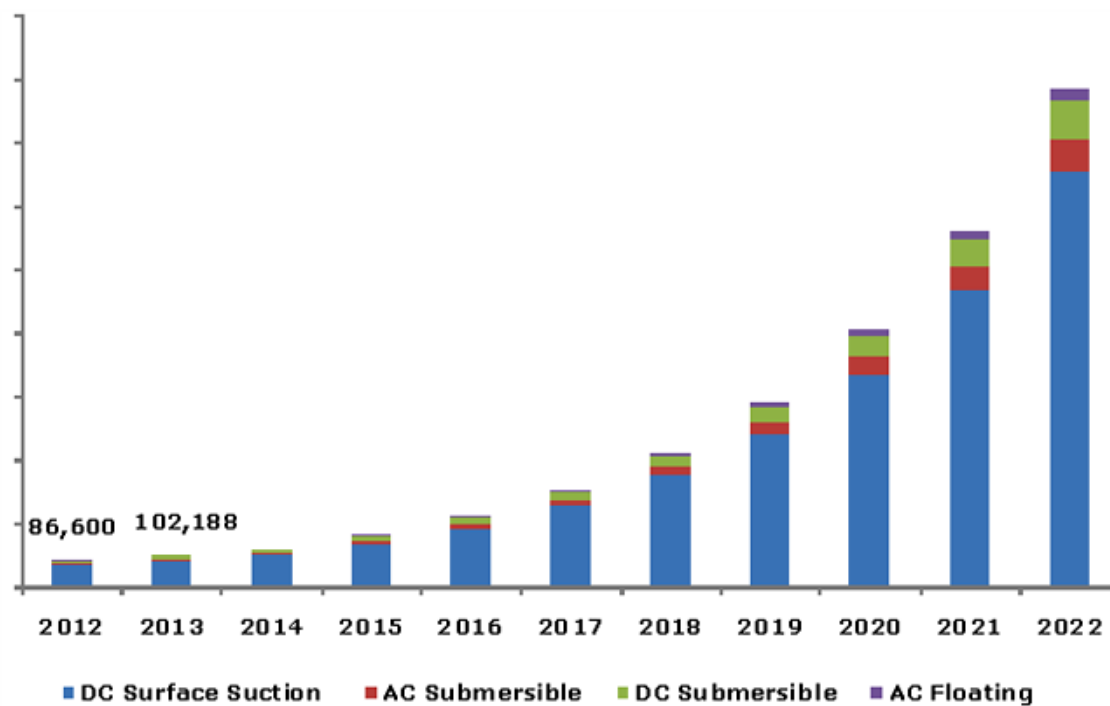
Aunque la tecnología de bombas superficiales de succión operadas en corriente continua sigue siendo con mucho la más frecuente (en torno al 80 %), se ve una tendencia progresiva a un mayor peso de las bombas sumergibles, sobre todo de las de corriente alterna, que permiten bombear aguas subterráneas desde mayor profundidad y, por tanto, se adaptan mejor al escenario de escasez progresiva de agua que vivimos.

De la *Ilustración 56* se desprende que el mercado potencial para el bombeo solar a 2022 con variadores de frecuencia estará en torno a las 150,000 unidades/año (si sumamos las bombas de corriente alterna sumergibles y de superficie).

Entre las causas citadas por [14] para prever una expansión tan grande del mercado, recogemos las siguientes:

- Incremento de las actividades agrícolas y de riego en numerosos países de Asia-Pacífico, Medio Oriente y África.
- Establecimiento de objetivos de reducción de las importaciones de crudo y de la huella de carbono en diversos países.
- Incremento de los subsidios e incentivos a agricultores y granjeros para la instalación de bombeo solar en distintos países, como China, India, Bangladesh y Pakistán.





*Ilustración 56. Mercado global de bombas solares por producto, 2012 - 2022 (Unidades). Fuente: [14]*

## 7.2. Principales actores

En el mercado de bombeo solar encontramos fabricantes internacionales generalistas de motores y bombas como Grundfos, Franklin o KSB, o específicos para bombeo solar, como Lorentz o Shurflo. Todos incluyen en su paquete también el controlador de bombeo (DC/DC o variador) y en muchos casos los módulos FV.

También encontramos integradores de sistemas, como SunEdison, Tata Power o Bright Solar

Por último, encontramos fabricantes de controladores de bombeo, normalmente de variadores de frecuencia, como ya vimos en el capítulo 6.4.4, que ofrecen sus productos tanto a los fabricantes como a los integradores de sistemas anteriormente citados, así como a instaladores locales, a través de distribuidores de material eléctrico.

### 7.2.1. Grundfos

Multinacional danesa fabricante de bombas de todo tipo.

Cuenta con el sistema SQFlex, único en el mercado, que es un sistema de bombeo híbrido que puede alimentarse tanto de DC como de AC, con un amplio rango de entrada en ambos casos (30-300 Vdc, 90-240 Vac), lo que permite una combinación de diversas fuentes de generación: paneles solares, aerogenerador, batería, red y grupo electrógeno. Este sistema utiliza bombas sumergibles helicoidales (para pozos de 3”) o centrífugas (para pozos de 4”), ambas con motores de imanes permanentes de 1.4 kW y cuenta con un controlador de bombeo específico, el CU 200.

También cuenta con un sistema similar con bomba de superficie, denominado CRFlex, con motor de 1250 W y alimentación solar, de red o de grupo electrógeno: 110 – 415 Vdc, 1 x 220 – 240Vac.

Adicionalmente, Grundfos vende bombeos solares de mayor potencia “tradicionales”, con bombas tanto sumergibles como de superficie y variadores de frecuencia fabricados por Danfoss Drives, en un amplio rango de potencias y tensiones de alimentación de la bomba. Adicionalmente suministran bombas para ferti-riego y herbi-riego.

### 7.2.2. Franklin Electric

Multinacional estadounidense fabricante de bombas de todo tipo. Cuenta con diferentes sistemas de bombeo, que resumimos en la *Tabla 11*. Los sistemas de 6" y 8" cuentan con variadores de Danfoss Drives, marca Vacon.

Sistema	Motor	Bomba	Potencia (kW)	Altura manométrica total máxima (m)	Caudal máximo (m <sup>3</sup> /h)	Voc máxima (V)
SubDrive SOLARPAK	AC asíncrono (PM opcional)	Sumergible, pozo 4"	0.55-2.2 según modelo	25-340 según modelo	1.08-16.2 según modelo	410
FHOTON SOLARPAK	AC asíncrono	Sumergible, pozo 4"	0.55-1.1 según modelo	25-240 según modelo	1.08-16.2 según modelo	300 o 420 según modelo
HES	Motor PM	Sumergible, pozo 6"	4-37 según modelo	150-650 según modelo	50-80 según modelo	800
HES	Motor PM	Sumergible, pozo 8"	75-150 según modelo	450	100-120 según modelo	800

*Tabla 11. Resumen de características de sistemas de bombeo de la marca Franklin Electric. Elaboración propia sobre datos de catálogo*

### 7.2.3. KSB

Fabricante de bombas. Cuenta con el sistema KSBsol con bombas sumergibles, potencia de motor de 1.5-3.7 kW, altura manométrica total máxima de 45-75 m y caudales diarios máximos de 180-126 m<sup>3</sup>/día.

### 7.2.4. Lorentz

Fabricante especializado en bombeo solar. Cuenta con diferentes opciones de bombeo solar, que resumimos en la *Tabla 12*. Los sistemas AC cuentan con variador de frecuencia y permiten el funcionamiento simultáneo de generador fotovoltaico y red/grupo electrógeno mediante HW adicional.

Sistema	Motor	Bomba	Potencia (kW)	Altura manométrica total máxima (m)	Caudal máximo (m <sup>3</sup> /h)	Voc máxima (V)
PS	DC sin escobillas	Superficial	0.15 a 4 según modelo	40-150 según modelo	1.3-8.3 según modelo	50-375 según modelo
PS	DC sin escobillas	Sumergible helicoidal	0.2 a 4 según modelo	50- 450 según modelo	2.5-3.9 según modelo	100-375 según modelo
PS	DC sin escobillas	Centrífuga sumergible	0.15-4 según modelo	20-160 según modelo	4-79 según modelo	50-375 según modelo
PSk2	AC	Centrífuga sumergible	7.2-40 según modelo	80-200 según modelo	128-241 según modelo	850
PSk2	AC	Centrífuga superficial	7.2-40 según modelo	40-90 según modelo	114-499 según modelo	850

Tabla 12. Resumen de características de sistemas de bombeo de la marca Lorentz. Elaboración propia sobre datos de catálogo

#### 7.2.5. Tata Power

Gigante industrial, centrado en el mercado de la India. Vende el sistema Saawan con potencias de motor de 1.5-3.4 kW, potencias de generador fotovoltaico de 1.8-3 kWp y montaje en seguidor solar manual o automático opcional.

#### 7.2.6. Bright solar

También centrado en el mercado indio, ofrece bombas solares sumergibles tanto DC, con potencias de 0.75 a 3.9 kW, como AC, con potencias de 0.75 a 22 kW y tensiones de motor de 230 o 380 Vac, según modelo.

#### 7.2.7. SunEdison

Para el mercado indio cuenta con sistemas de bombeo de 2.2 a 7.5 kW.

## 8. DIMENSIONADO DE BOMBEO SOLAR CON VARIADORES DE FRECUENCIA

Para hacer una pre-selección de la bomba, puede realizarse lo siguiente:

Paso 1: obtener el caudal horario de la bomba como  $Q_d/G_d$ , introduciendo  $G_d$  en horas de sol pico, HSP ( $1 \text{ HSP} = 1 \text{ kWh/m}^2$ ).

Paso 2: para el caudal obtenido en el paso 1, elegir una bomba que a frecuencia nominal (50 o 60 Hz) bombee ese caudal de agua desde una altura manométrica superior, en un porcentaje que dependerá del tipo de bomba, con el fin de garantizar que el sistema de bombeo es capaz de bombear agua a frecuencias inferiores a la nominal (y extender, por tanto, el número diario de horas de operación) pero, intentando, a la vez, que no entre en zona de cavitación (puntos fuera de sus curvas para caudales altos) en su rango de funcionamiento.

Diferentes bombas cumplirán este requerimiento, pero no todas van a tener la misma eficiencia para ese punto de operación, como se muestra en la *Ilustración 57*, por lo que hay que considerar siempre varias alternativas, con el fin de seleccionar la que requiera menor potencia de generador fotovoltaico.

Los proveedores de sistemas solares tienen herramientas SW de dimensionado para determinar la potencia del generador fotovoltaico y la bomba más adecuada a partir del caudal diario, la radiación diaria y la altura manométrica total.

Esta información también puede darse en mediante un gráfico de doble entrada, como se muestra en la *Ilustración 58*. Se traza una línea horizontal desde el caudal diario requerido hasta cortar a la línea de altura manométrica total de la instalación y desde ahí una línea vertical hasta cortar a la de radiación solar diaria correspondiente y desde este punto otra horizontal para obtener la potencia pico de generador fotovoltaico necesario. Para el ejemplo, para un caudal de  $10 \text{ m}^3/\text{día}$ , una altura manométrica total de 17 m y una radiación diaria de 6 HSP, requerimos 500 Wp.

Estas curvas pueden obtenerse con el siguiente proceso de cálculo, propuesto en [3]:

Paso 1: Obtener el perfil de irradiancia  $G(t)$  a lo largo del día, según el método descrito en la IEC 61725, a partir de  $G_d$ , de la irradiancia máxima  $G_{max}$  y del número de horas de luz solar  $S_d$ .

Paso 2: Determinar la potencia DC entregada por el generador fotovoltaico a lo largo del día, mediante la fórmula:

$$P_{DC}(t) = \frac{G(t)}{G^*} P^* [1 - \beta (T_a(t) + K G(t) - 25)]$$

donde

$T_a(t)$  = temperatura ambiente

$K$  = coeficiente de irradiancia para la estimación de  $T_{cel}$ ,  $0.03^\circ \text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$  para módulos cristalinos

$B$  = coeficiente de temperatura,  $0.004/^\circ\text{C}$  para módulos cristalinos

$G^*$  = irradiancia en condiciones estándar,  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$

$P^*$  = potencia del generador en condiciones estándar (STC)

Paso 3: obtener una relación entre el caudal instantáneo y la potencia DC, para la altura manométrica del sistema.

Para ello obtendremos de la documentación técnica del fabricante, para la velocidad nominal, la relación entre la altura manométrica total, el caudal y la eficiencia de la bomba  $H_N$ ,  $Q_N$  y  $\eta_{p,N}$

Como hemos visto, las bombas centrífugas están gobernadas por las leyes de afinidad, cuando variamos la velocidad de la bomba por una curva de iso-eficiencia, de un punto  $(Q_N, H_N)$  a otro  $(Q_T, H_T)$ . Las leyes de afinidad se plasman en las ecuaciones siguientes:

$$\frac{Q_N}{Q_T} = \frac{n_N}{n_T}$$

$$\frac{H_N}{H_T} = \frac{n_N^2}{n_T^2}$$

$$\frac{P_N}{P_T} = \frac{n_N^3}{n_T^3}$$

De las dos primeras leyes podemos derivar fácilmente la siguiente ecuación, para calcular  $Q_T$  para cada  $Q_N$ , para la altura manométrica de la instalación  $H_T$ :

$$Q_T = Q_N \sqrt{\frac{H_T}{H_N}}$$

De las leyes de afinidad se derivan las curvas (Q,H) a diferentes frecuencias, que resultan prácticamente paralelas a la curva a frecuencia nominal, como se muestra en la *Ilustración 60*. Las bombas sumergibles tienen rodamientos axiales que se dañan cuando operan por debajo de una velocidad mínima, que corresponde normalmente a una frecuencia de 30 Hz. Por este motivo el fabricante no dibuja las curvas por debajo de esta frecuencia.

Paso 4: la eficiencia de la bomba se define como la ratio entre la potencia hidráulica y la potencia en el eje de la bomba:

$$\eta_p = \frac{\rho g H Q}{P_p}$$

Podemos obtener la potencia de la bomba para los puntos (H<sub>T</sub>,Q<sub>T</sub>), considerando la eficiencia de bomba la correspondiente a los puntos Q<sub>N</sub> relacionados:

$$P_{p,T} = \frac{\rho g H_T Q_T}{\eta_p}$$

Paso 5: la potencia DC que tiene que entregar el generador fotovoltaico para trabajar en el punto T, se obtiene a partir de P<sub>p,T</sub>, teniendo en cuenta los rendimientos del motor  $\eta_{m,n_T}$  y del variador de frecuencia  $\eta_{FC}$ :

$$P_{DC} = \frac{P_{p,T}}{\eta_{m,n_T} \eta_{FC}}$$

La eficiencia del motor depende de la ratio de potencia con respecto a la nominal, pero como la potencia del motor varía linealmente con la frecuencia de la tensión de alimentación, también lo hace la potencia considerada “nominal” para cada frecuencia, según la fórmula siguiente:

$$P_{m,f} = P_{m,f_0} \frac{f}{f_0}$$



Esto se traduce en que, para la misma magnitud de potencia, la eficiencia de motor se incrementa según disminuye la frecuencia.

Así, la eficiencia de motor a una frecuencia distinta de la nominal  $\eta_{m,n_T}$ , es equivalente a la de la frecuencia nominal  $\eta_{m,n_N}$ , correspondiente a una potencia corregida  $P'_{p,T} = P_{p,T} \times f_m/f_0$ , donde  $f_0$  es la frecuencia nominal del motor (50 Hz), y  $f_m$  es la frecuencia del motor, que se obtiene a partir de la frecuencia rotacional de la bomba  $f_T$ , corregida teniendo en cuenta el deslizamiento del motor, s:  $f_m = f_T \cdot (1-s)$ . El deslizamiento es del orden del 4% para motores asíncronos.

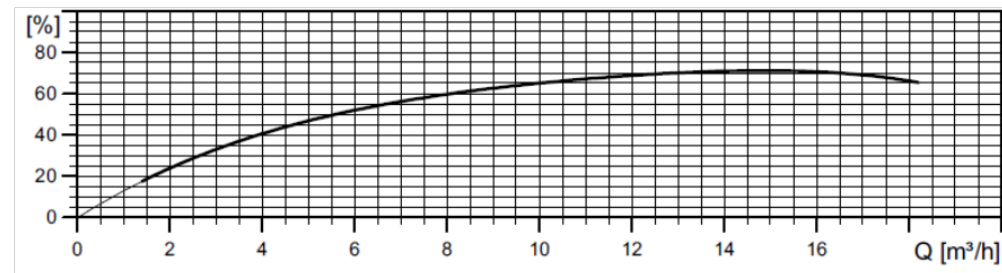
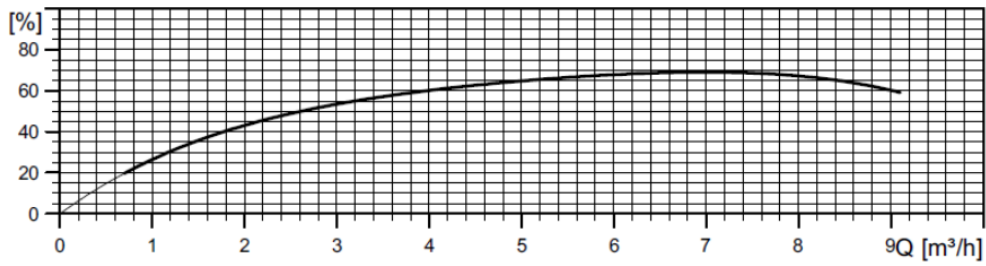
Hemos visto en el capítulo 6.4.2 que la eficiencia del variador, por su parte, depende de la potencia de salida, de la frecuencia de salida y de la frecuencia de conmutación, incluso de la tensión de la bomba, por lo que obtener un perfil de eficiencia a lo largo del día puede ser una labor demasiado compleja. Normalmente se utiliza un valor fijo para la misma, que dependa del modelo a utilizar. En [3] se propone un valor de 0.95.

Paso 6: el  $P_{DC}$  así calculado nos permite relacionar el perfil diario de potencia del generador fotovoltaico del paso 2 con su caudal instantáneo correspondiente y, por tanto, obtener el perfil de caudal instantáneo a lo largo del día.

Paso 7: determinar el volumen diario bombeado  $Q_d$ , integrando el perfil de caudal instantáneo a lo largo del día.

Paso 8: repetir los pasos 1-7 para diferentes valores de  $G_d$ ,  $P^*$  y  $H_T$ . Así iremos obteniendo los diferentes puntos para construir la gráfica de doble entrada. Este paso no lo realizaremos en nuestro caso práctico, porque nuestro objetivo es sólo modelizar dos sistemas concretos y no obtener dichas curvas.

En [3] se recomienda un factor de seguridad de 1.15 en la potencia pico calculada por este método para tener en cuenta otros efectos: ángulo de incidencia, polvo, perfiles reales de irradiancia y temperatura, etc.



*Ilustración 57. Rendimiento de bomba, para las series de bombas sumergibles de Grundfos SP 7 y SP 11. Podemos ver que, para un caudal horario de  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ , aunque las dos pueden operar, el rendimiento es superior para bombas de la serie SP 7.*

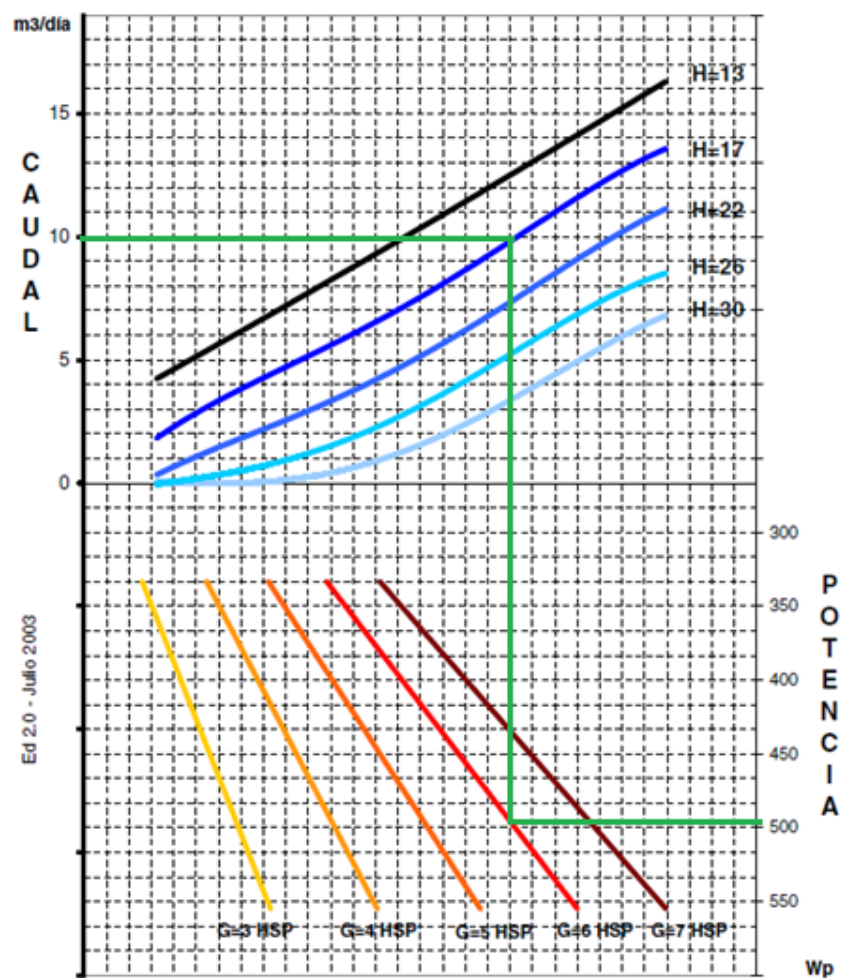


Ilustración 58. Gráfico de doble entrada para la bomba SP 2A6 de Grundfos, para determinar la potencia pico de generador fotovoltaico necesario. Fuente: Isofoton

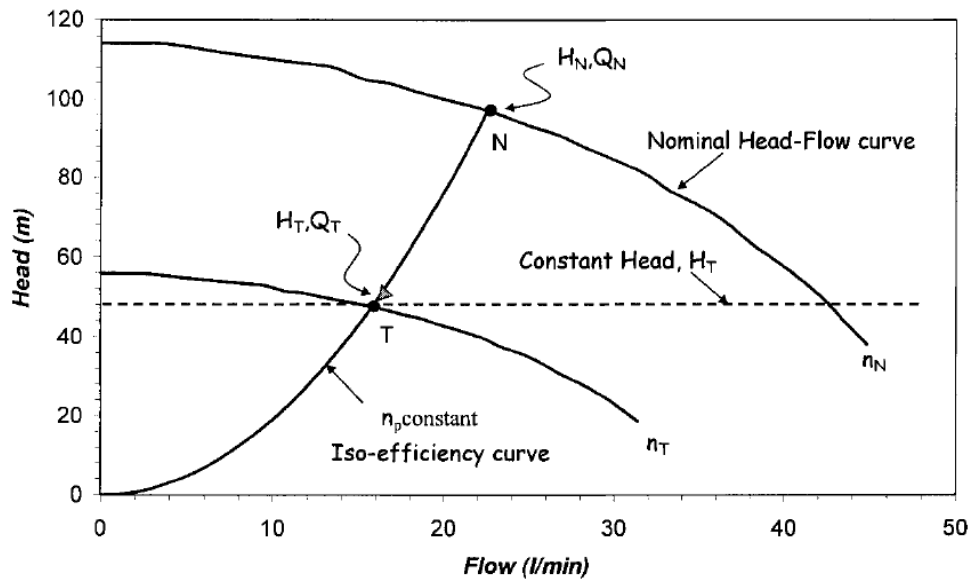


Ilustración 59. Obtención del punto de trabajo ( $H_T, Q_T$ ) para una velocidad  $n_T$  en una bomba centrífuga, mediante las leyes de afinidad, a partir del punto de trabajo a velocidad nominal. Fuente: [3]

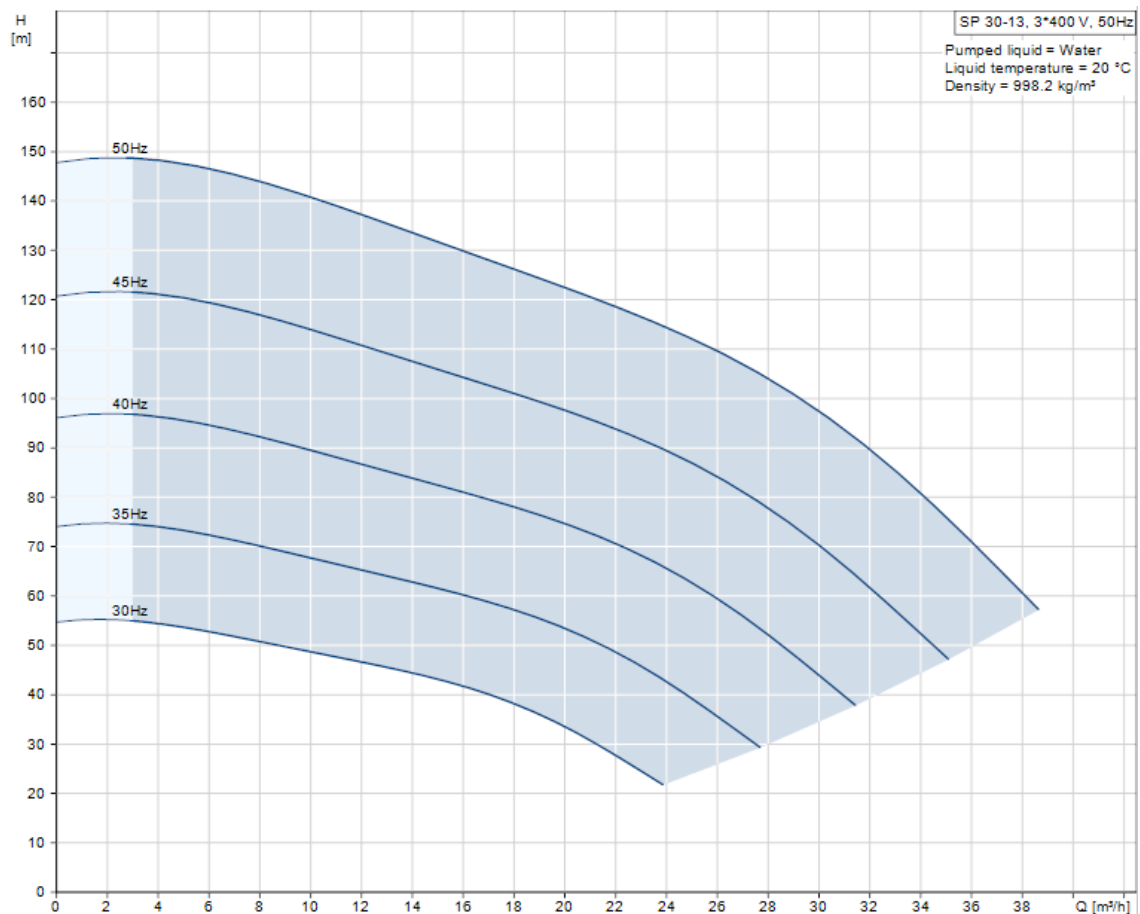


Ilustración 60. Curvas altura-caudal para la bomba SP 30-13, 3  $\times$  400 Vac, 50 Hz a diferentes frecuencias. Fuente: [28]

## 9. CASO PRÁCTICO

### 9.1. Datos de partida

Se plantea el diseño del sistema de riego de dos parcelas ficticias en la zona de Tobarra, provincia de Albacete, España. Ambas tienen suelo franco y son completamente planas y se encuentran en un emplazamiento sin acceso a la red eléctrica, por lo que se plantea un sistema de bombeo alimentado exclusivamente por energía solar.

La **parcela 1** tiene 3 hectáreas destinadas al cultivo de pimiento, con marco de plantación 1.6 x 0.25 m. Tiene también 3 hectáreas destinadas al cultivo de lechuga iceberg 2ª quincena marzo. Ambas zonas son rectangulares, de 300 x 100 m y están separadas por una franja sin cultivar, como se muestra en la *Ilustración 61*.

El riego se realizará mediante bomba sumergible, ya que la parcela cuenta con un pozo de agua con las características siguientes:

– Nivel estático:

Mes	Nivel estático (m)
Abril	25
Mayo	28
Junio	31
Julio	34
Agosto	37
Septiembre	40

- Coeficiente de nivel dinámico: 0.3 m/m<sup>3</sup>/h
- Profundidad de la bomba: 60 m
- Profundidad del pozo: 65 m

El pozo se encuentra a un lado de ambas parcelas, a pocos metros de ellas. Junto al pozo se ubicará el generador fotovoltaico y todos los elementos necesarios de la instalación solar (variador, cuadros de protecciones y control, etc.)

La **parcela 2**, de aproximadamente 10 hectáreas (330 x 330 m), está destinada al cultivo de albaricoque, variedad búlida, con un marco de plantación de 6 x 6 m. El riego se realizará mediante bomba de superficie, desde una balsa de almacenamiento de agua, que se encuentra a una cota de -8 m con respecto al terreno a regar. Se utilizará una bomba de superficie auto-aspirante, situada 3 m por encima de la cota de la balsa. La balsa se encuentra a 100 m de la parcela, a un lado de la misma y centrada con respecto a ella, tal y como se muestra en la *Ilustración 62*.

Se han elegido el pimiento y el albaricoque porque ambos cuentan con un período de riego prolongado en la época del final de primavera y verano (4 meses y una semana para el pimiento y 5 meses para el albaricoque), que es cuando mayor irradiación solar hay, lo que permite una optimización económica del sistema solar. Adicionalmente, la lechuga iceberg 2ª quincena marzo es un cultivo cuyas necesidades de riego son complementarias a la del pimiento, lo que permite optimizar el rendimiento económico del sistema solar de la finca 1.

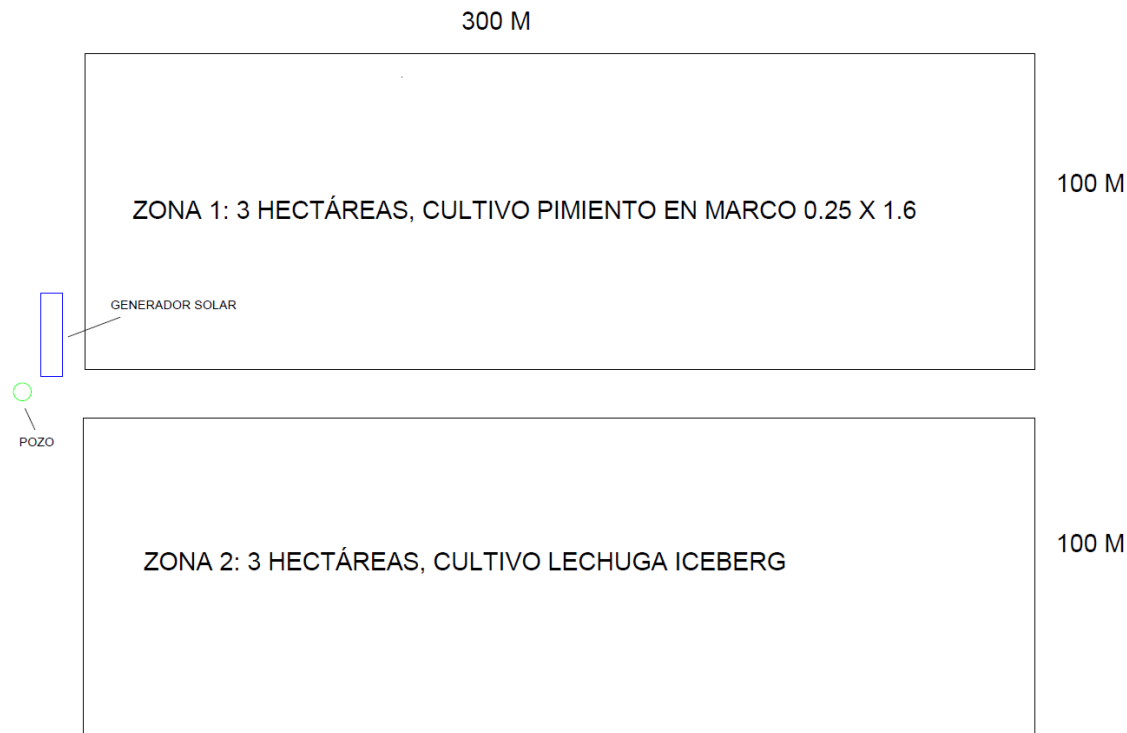
Para todos estos cultivos, tenemos datos en [27] de recomendaciones de riego, que recogemos en las siguientes tablas: *Tabla 13*, *Tabla 14* y *Tabla 15*. Sobre las mismas se indica:

- Las necesidades hídricas netas de los cultivos leñosos corresponden a las estimadas mediante la aplicación de tratamientos de Riego Deficitario Controlado (RDC).
- En cultivos leñosos, para obtener los litros/planta se debe multiplicar el valor recomendado (en "mm") por el marco de plantación (m<sup>2</sup>).

Ambos comentarios son aplicables para nuestro cultivo de albaricoque.

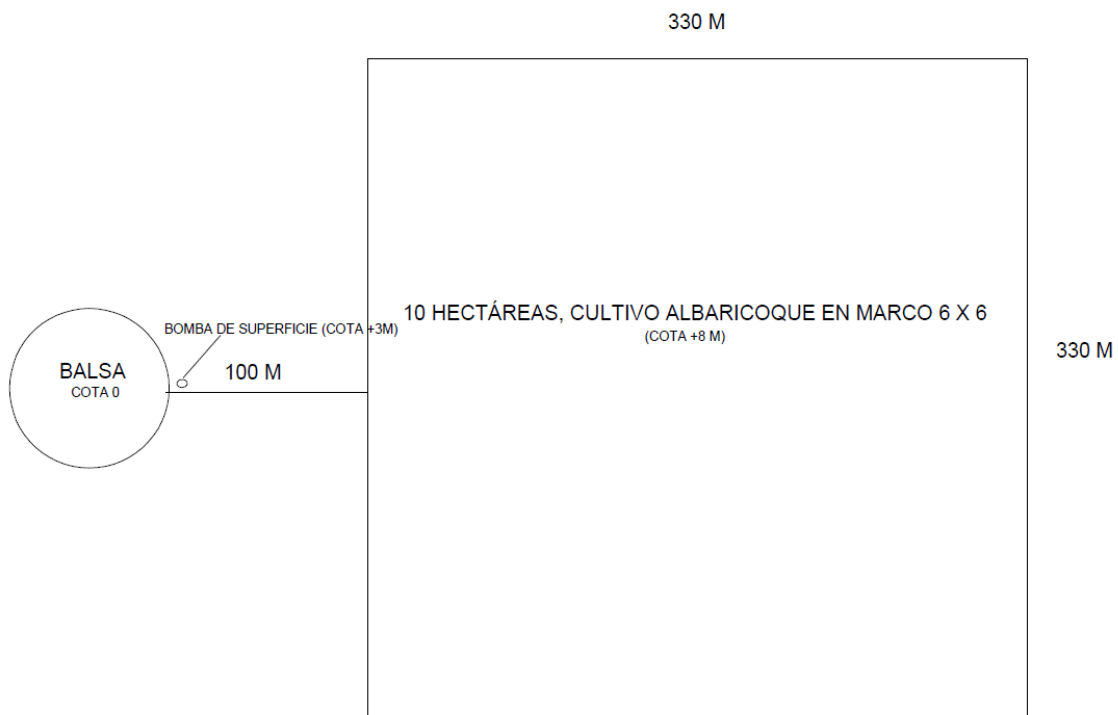
- La recomendación de pimiento se refiere a una plantación con marco de 1,6 m x 0,25 m y riego localizado, por este motivo elegiremos riego por goteo para este cultivo.
- Las necesidades hídricas netas de los cultivos herbáceos corresponden a sistemas de riego por aspersión, por este motivo elegiremos aspersión para el riego de la lechuga.

Nota: El Riego Deficitario Controlado es una estrategia de aplicación de agua que se basa en la idea de reducir los aportes hídricos en aquellos periodos fenológicos en los que un déficit hídrico controlado no afecta sensiblemente a la producción y calidad de la cosecha y de cubrir plenamente la demanda de la planta durante el resto del ciclo de cultivo (Sanchez-Blanco, M<sup>a</sup>. J. Torrecillas, A. 1995)



*Ilustración 61. Esquema de la parcela 1 del caso práctico. Elaboración propia*





*Ilustración 62. Esquema de la parcela 2 del caso práctico. Elaboración propia*

FECHA	ET <sub>o</sub>	TOMATE 1° QUINC MAYO	PIMIENTO 1° QUINC MAYO
Semana (04/04-10/04)	32,3	-	-
Semana (11/04-17/04)	30,7	-	-
Semana (18/04-24/04)	35,0	-	-
Semana (25/04-01/05)	41,9	-	-
Semana (02/05-08/05)	39,0	0,4	0,6
Semana (09/05-15/05)	35,5	3,2	4,3
Semana (16/05-22/05)	34,1	3,3	4,9
Semana (23/05-29/05)	34,5	4,0	5,8
Semana (30/05-05/06)	32,8	5,1	8,0
Semana (06/06-12/06)	43,3	11,1	15,0
Semana (13/06-19/06)	40,0	17,1	19,1
Semana (20/06-26/06)	34,2	20,8	20,2
Semana (27/06-03/07)	45,5	36,6	32,3
Semana (04/07-10/07)	44,9	44,5	38,7
Semana (11/07-17/07)	44,5	46,7	44,6
Semana (18/07-24/07)	46,3	48,6	48,4
Semana (25/07-31/07)	42,8	45,0	44,7
Semana (01/08-07/08)	44,9	47,1	46,9
Semana (08/08-14/08)	42,5	41,4	44,5
Semana (15/08-21/08)	36,3	30,3	38,0
Semana (22/08-28/08)	38,9	15,3	40,5
Semana (29/08-04/09)	36,3	-	32,6
Semana (05/09-11/09)	33,7	-	14,1
Semana (12/09-18/09)	32,0	-	-
Semana (19/09-25/09)	23,6	-	-
<b>Total acumulado</b>	<b>945,7</b>	<b>420,5</b>	<b>503,3</b>

Tabla 13. Necesidades netas de agua, en mm ( $l/m^2$ ), según la semana de riego, para cultivo de pimiento y tomate. Fuente: [27]

FECHA	ET <sub>o</sub>	LECHUGA ICEBERG 2 <sup>a</sup> QUINC MARZO
Semana (04/04-10/04)	32,3	12,6
Semana (11/04-17/04)	30,7	15,4
Semana (18/04-24/04)	35,0	24,7
Semana (25/04-01/05)	41,9	37,7
Semana (02/05-08/05)	39,0	38,7
Semana (09/05-15/05)	35,5	35,5
Semana (16/05-22/05)	34,1	34,1
Semana (23/05-29/05)	34,5	33,2
Semana (30/05-05/06)	32,8	28,5
Semana (06/06-12/06)	43,3	15,8
Semana (13/06-19/06)	40,0	-

Tabla 14. Necesidades netas de agua, en mm ( $l/m^2$ ), según la semana de riego, para cultivo de lechuga iceberg. Fuente: [27]

FECHA	ET <sub>o</sub>	ALBARICOQUERO BÚLIDA 6X6
Semana (04/04-10/04)	32,3	-
Semana (11/04-17/04)	30,7	-
Semana (18/04-24/04)	35,0	-
Semana (25/04-01/05)	41,9	21,4
Semana (02/05-08/05)	39,0	20,3
Semana (09/05-15/05)	35,5	18,7
Semana (16/05-22/05)	34,1	18,2
Semana (23/05-29/05)	34,5	18,4
Semana (30/05-05/06)	32,8	17,5
Semana (06/06-12/06)	43,3	23,1
Semana (13/06-19/06)	40,0	21,0
Semana (20/06-26/06)	34,2	17,6
Semana (27/06-03/07)	45,5	22,9
Semana (04/07-10/07)	44,9	22,1
Semana (11/07-17/07)	44,5	21,4
Semana (18/07-24/07)	46,3	21,8
Semana (25/07-31/07)	42,8	19,7
Semana (01/08-07/08)	44,9	20,2
Semana (08/08-14/08)	42,5	18,6
Semana (15/08-21/08)	36,3	15,5
Semana (22/08-28/08)	38,9	16,2
Semana (29/08-04/09)	36,3	14,7
Semana (05/09-11/09)	33,7	13,3
Semana (12/09-18/09)	32,0	12,3
Semana (19/09-25/09)	23,6	8,8
<b>Total acumulado</b>	<b>945,7</b>	<b>404,0</b>

Tabla 15. Necesidades netas de agua, en mm ( $l/m^2$ ), según la semana de riego, para albaricoquero búlida con marco de plantación 6 x 6. Fuente: [27]

## 9.2. Diseño hidráulico

Nuestra primera elección es el sistema de riego. El riego por gravedad no es factible técnicamente en nuestro caso. El riego por aspersión tradicional es factible, pero no medioambientalmente responsable para este tipo de cultivos en una zona seca y con escasez de agua, como la de Hellín/Tobarra en Albacete. Nos decantaremos, por tanto, por la micro irrigación en ambos casos. Emplearemos como elementos de riego goteros o micro-aspersores según el caso, ambos con compensación de presión, para que el caudal emitido sea constante en el rango de operación, lo que permite un mejor control de las dosis de riego aplicadas y se ajustan mejor tanto a la variabilidad del recurso solar a lo largo del día como a las variaciones en la altura manométrica debidas a la variación del nivel estático y dinámico del pozo.

### 9.2.1. Finca 1

Para el caso del pimiento emplearemos riego por goteo, que encaja bien en cultivos en línea. El objetivo es crear un bulbo continuamente mojado a lo largo de la línea.

Utilizaremos goteros auto-compensados de flujo turbulento Turbo-SC Plus de la marca Toro. Su laberinto amplio de flujo turbulento proporciona mayor resistencia al taponamiento. Además, la característica del gotero de ser desarmable facilita el mantenimiento y la limpieza. Es resistente a productos químicos y a la degradación causada por rayos ultravioleta. El modelo seleccionado, DPJ04-A, tiene un caudal nominal de 4 l/h y un rango de presión recomendada de 0.7-3.5 bar, para el que permite un caudal casi constante (de 3.6 a 3.82 l/h). [18]

Según [5], en parcelas llanas los laterales de riego nunca deben superar los 140 metros de longitud (100 metros en pendientes ascendentes), ya que las pérdidas de carga serían excesivas y se producirían diferencias de presión excesivas entre el primer gotero y el último.

Al ser las dosis de riego variables con la semana (y por tanto los tiempos de aplicación) y ser variable también el recurso solar a lo largo del día, es conveniente sectorizar el riego, de forma que se rieguen a la vez un número controlable de sectores/subsectores, dependiendo de las necesidades de riego y del recurso solar.

Para la zona de riego por goteo, es necesario determinar la separación entre goteros en el ramal. Para ello utilizaremos la *Tabla 16*, tomando siempre una superficie de suelo mojado a 30 cm de profundidad entre el 80% y el 100 %. La entrada en dicha tabla que más se aproxima a nuestras condiciones es: 1.5 m distancia entre líneas, 4 l/h de caudal, suelo de textura media (franco). Para **1 m de separación entre goteros**, nos da un 80 %, así que es la opción que elegiremos.

Para el cultivo de lechuga, las necesidades de agua del SIAR se refieren, como en el caso del resto de herbáceos que no son ni el tomate ni el pimiento, a riego por aspersión, porque se riega toda la superficie de la parcela.

Emplearemos micro-aspersores R5 de Nelson con el plato AZUL para baja presión, que tienen un alcance (radio mojado) de 3.4 a 4.9 m. Los dotaremos de boquillas de compensación de caudal 5FC Azul de 11 gph, que regulan el caudal dentro de un margen del 3% por encima y 5% por debajo del caudal nominal (41 l/h) como máximo, para el rango de presiones de 1 a 2.8 bar. Utilizaremos sistema de montaje FT-01, con tubo flexible de PVC de 4 mm y 61 cm de longitud. Este sistema introduce una pérdida de carga de unos 0.05 bar (0.5 m, aprox.) para 41 l/h, según se muestra en la *Ilustración 63*.

Plantaremos un sistema de cobertura total, regando toda la superficie de cultivo. Para conseguir una buena uniformidad de riego es necesario que varios aspersores se solapen, por eso se instalan en los vértices de un cuadrado cuyo lado oscila entre 1.2 y 1.5 veces el radio del círculo mojado. [4]

El radio mojado depende de la boquilla, siendo de 3.4 m para la de menor caudal (naranja) y 4.9 m para la de mayor caudal (roja). El fabricante no aporta datos en su catálogo de las intermedias. Como la seleccionada (azul), es la segunda de una serie de 5, asumiremos que el incremento de cada una a la siguiente es uniforme, tomando un valor de 3.78 m. Esto nos da un marco entre 4.54 y 5.67 m. Tomaremos un marco de 5 x 5 m.

NOTA: la uniformidad de distribución (DU) se calcula a partir de la relación entre la media de todas las precipitaciones y la media de las precipitaciones más bajas (escogiendo las 25 más bajas de 100). Este valor indica la mayor o menor uniformidad de riego. Se considera un índice de buena uniformidad un valor igual o superior al 75%. Un valor inferior al 65% no se considera aceptable. [18]

Con todos estos datos proponemos la siguiente distribución, que puede verse en la *Ilustración 65* :

- Una tubería principal (en rojo) que cruza la parcela de Sur a Norte.
- Tramos de tuberías secundarias (en verde) que unen la principal con las tuberías porta-ramales (en naranja). En cada una de las tuberías secundarias se instalará una válvula de sectorización.
- A las tuberías porta-ramales se conectarán 15 ramales (en azul) con 99 goteros cada uno para la zona de cultivo de pimiento o 5 ramales con 19 micro-aspersores cada uno para la zona de cultivo de lechuga. La zona de cultivo de pimiento cuenta con 3 sectores de 4 sub-sectores cada uno y la de cultivo de lechuga con 4 sectores de 3 sub-sectores cada uno.

El siguiente paso será determinar las secciones necesarias de tubería para cada uno de los tramos. Consideraremos el trazado del lateral más alejado del pozo, determinando las longitudes de tubería de cada sector y el caudal máximo que pueden llevar estas tuberías. Con estos datos, consultaremos la *Tabla 7*, donde se recogen las pérdidas de carga para diferentes secciones de tubería de PVC/PE, para seleccionar la más adecuada en cada tramo, que mantenga las pérdidas de carga en un nivel razonable, sin encarecer excesivamente el coste de la instalación.

A continuación, calculamos las pérdidas de carga para los diferentes tramos, considerando la aproximación detallada en el capítulo 4.3.4 para elementos hidráulicos singulares.

#### Zona 1, cultivo pimiento

##### - **Ramales porta-goteros:**

Longitud: 100 m. Sin elementos singulares.

Caudal máximo:  $99 \text{ goteros/ramal} \times 3.82 \text{ l/h/gotero} = 378.2 \text{ l/h/ramal}$

##### Tubería:

19 mm, pérdidas de carga  $< 100 \text{ m de tubería} \times 2.1 \text{ m de pérdida de carga} / 100 \text{ m de tubería} = 2.1 \text{ m.c.a.}$  (valores tabla: 500 l/h)

Este valor es una cota superior de las pérdidas porque, a medida que avanzamos a lo largo del ramal, el caudal se va reduciendo en la medida que los diferentes goteros van descargando agua. Un cálculo más exacto sería demasiado tedioso en la práctica. Esto mismo ocurre en las tuberías porta-ramales e, incluso en la principal hasta cierto punto.

- **Secundarias y porta-ramales (goteo):**

Longitud máxima: 12.5 m. Incremento por elementos singulares: 20%

Caudal máximo: 15 ramales x 378.2 l/h/ramal = 5,672.5 l/h

Tubería:

38 mm, pérdidas de carga <  $1.2 * 12.5 \text{ m de tubería} * 6 \text{ m de pérdida de carga} / 100 \text{ m de tubería} = 0.9 \text{ m.c.a.}$  (valores tabla: 6,000 l/h)

Zona 2, cultivo lechuga

- **Ramales porta-aspersores:**

Longitud: 100 m. Sin elementos singulares.

Caudal máximo: 19 micro-aspersores/ramal \* 1.03 \* 41 l/h = 802.37 l/h/ramal

Tubería:

25 mm, pérdidas de carga <  $100 \text{ m de tubería} * 1.3 \text{ m de pérdida de carga} / 100 \text{ m de tubería} = 1.3 \text{ m.c.a.}$  (valores tabla: 800 l/h)

- **Secundarias y porta-ramales (aspersión):**

Longitud máxima: 12.5 m. Incremento por elementos singulares: 20%

Caudal máximo: 5 ramales \* 802.37 l/h/ramal = 4,011.85 l/h

Tubería:

38 mm, pérdidas de carga =  $1.2 * 12.5 \text{ m de tubería} * 2.9 \text{ m de pérdida de carga} / 100 \text{ m de tubería} = 0.44 \text{ m.c.a.}$  (valores tabla: 4,000 l/h)

### - Tubería principal:

Longitud máxima: 325 m. Incremento por elementos singulares: 20%

Caudal máximo: en este caso, al estar el riego sectorizado, el caudal va a ser siempre muy inferior a  $n^{\circ}$  de sub-sectores \* caudal del subsector =  $12 * 5,672.5 \text{ l/h} + 12 * 9,000 \text{ l/h} = 176,070 \text{ l/h}$ . En realidad, está, en primer lugar, limitado por el máximo caudal que puede dar la bomba, que para el modelo que seleccionaremos posteriormente, la SP 30-13 de Grundfos, es de  $38 \text{ m}^3/\text{h}$ . Para la altura manométrica de proyecto y el generador fotovoltaico seleccionado, este caudal va a ser todavía inferior, unos  $28 \text{ m}^3/\text{h}$ , pero aun así tomaremos un valor superior para tener en cuenta la combinación de irradiancia excepcionalmente alta y altura manométrica excepcionalmente baja.

### Tubería:

125 mm, pérdidas de carga  $< 1.2 * 325 \text{ m de tubería} * 0.5 \text{ m de pérdida de carga} / 100 \text{ m de tubería} = 1.95 \text{ m.c.a.}$  (valores tabla: 35.000 l/h)

En cuanto al filtrado, nos fijaremos en el elemento de riego más restrictivo, que es el gotero. Para el modelo elegido, el fabricante recomienda filtrado de 140 US mesh o superior, que equivale a 105 micras o inferior. Elegiremos el filtro de la marca Toro, modelo XD 3" de anillas (discos) de 150 mesh, de caudal nominal  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ , que tiene una pérdida de carga de unos 0.8 m.c.a., para  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ , según se muestra en la *Ilustración 66*. Se instalará aguas abajo del equipo de fertirrigación, para que retenga los precipitados o impurezas del abono. Este filtro es de limpieza manual, que se hará fuera de los horarios de riego. Se colocará un manómetro a la entrada y otro a la salida para determinar el nivel de ensuciamiento, en función de la presión diferencial y determinar el momento en que requiere ser limpiado.

Adicionalmente, al ser agua de pozo, colocaremos un hidrociclón a la entrada del cabezal de riego, aguas arriba del equipo de fertirrigación para eliminar arenas y limos. No debe sobredimensionarse para que el agua alcance la velocidad adecuada y la limpieza se realice correctamente. Seleccionaremos el modelo Alfa turbo 2", para un caudal máximo recomendado de  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  y una presión máxima de 5 bar. Este modelo, para  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ , tiene una pérdida



de carga de unos 0.3 bar (3.06 m.c.a). Su rango recomendado comienza en unos 15 m<sup>3</sup>/h, por debajo del cual su eficacia de limpieza disminuye (durante las primeras horas y últimas horas de bombeo del día).

El sistema de fertiriego se realizará con bomba dosificadora, con el fin de no introducir en el sistema pérdidas de carga relevantes y optimizar la aplicación de los fertilizantes.

Para la selección de los componentes del sistema de bombeo solar es necesario fijar el caudal y la altura manométrica de diseño. Esta última se calcula según lo descrito en el capítulo 5.1. Hemos considerado para el diseño el mes de Julio, obteniendo una altura manométrica total para el diseño de 65 m. Resumimos los resultados en la **Tabla 18** y la **Tabla 19**:

En cuanto al caudal nominal de la bomba es necesario tener en cuenta las necesidades netas de agua de los cultivos a lo largo de la temporada de riego. Como hay 2 cultivos, obtendremos la dosis semanal conjunta y la traduciremos a volumen de agua diario (m<sup>3</sup>/día). Con el artificio matemático de considerar la radiación solar diaria en HSP para el generador fotovoltaico (orientación Sur y aproximadamente 10° de inclinación, para optimizar la producción energética en verano), obtendremos el caudal nominal de la bomba, según lo indicado en el capítulo 8, como cociente de los m<sup>3</sup>/día y las HSP. Obtenemos un caudal nominal máximo de la bomba en torno a 28 m<sup>3</sup>/h, marcado en negrita en la última columna de la **Tabla 20**.

Hemos elegido la bomba SP 30-13 de Grundfos, con motor asíncrono de clase de eficiencia IE2, caudal nominal de 30 m<sup>3</sup>/h, porque permite bombear agua a 65 m de altura manométrica total para frecuencias de unos 32 Hz y porque la curva a 50 Hz tiene punto de trabajo a 65 m, sin entrar en cavitación (65 m, 37 m<sup>3</sup>/h), tal y como se muestra en la *Ilustración 60*.

El sistema hidráulico se completará con las válvulas y resto de elementos indicados en el capítulo 4.3.4 y en el capítulo 4.3.5.

Se instalará una válvula de sector en cada tubería secundaria, esto es, 24 en total, por lo que el programador deberá ser, al menos de 24 sectores. Hay que considerar que no existe acceso a la red eléctrica en la parcela, por lo que tanto el programador, como las electroválvulas, como las bombas dosificadoras se alimentarán con un sistema solar con baterías a 12 Vdc, independiente del de

bombeo solar, objeto del presente trabajo. Con el fin de reducir el consumo, se utilizarán válvulas tipo “*latch*”.

El siguiente paso será modelizar el comportamiento del conjunto generador fotovoltaico-variador de frecuencia-motor-bomba, con el procedimiento detallado en el capítulo 8. Los datos del motor y la bomba los obtenemos de [28], que muestra curvas configurables en cuanto a la información a mostrar, e interactivas, pudiéndose obtener los diferentes datos necesarios para cada punto de trabajo. En nuestro caso nos hacen falta los valores a 50 Hz de la curva H-Q con su correspondiente eficiencia de bomba, por una parte y los puntos de la curva de eficiencia de motor en función de la potencia, por otra, que se muestran en la *Ilustración 67* y la *Ilustración 68*.

Realizaremos los cálculos descritos en los pasos 3-5 del método descrito en el capítulo 8, que se muestran en la *Tabla 21*, para la que se ha considerado un rendimiento del variador de frecuencia del 95 %. Para el cálculo de  $\eta_{m,n_T}$ , es necesario ajustar los datos de eficiencia de motor  $\eta_{m,n}$  a una curva en función de la potencia, con el fin de aplicar una fórmula (sólo tenemos valores discretos). Éstos ajustan con mucha precisión a una polinómica de sexto grado:

$$y = m_6 x^6 + m_5 x^5 + m_4 x^4 + m_3 x^3 + m_2 x^2 + m_1 x + m_0$$

Para tener cierta precisión es necesario utilizar un gran número de decimales para funciones polinómicas, por los que hemos utilizado los 14 que nos permite Excel. Para la modelización del generador fotovoltaico es necesario tener también una curva (fórmula) del caudal  $Q_t$  en función de  $P_{dc}$ . En este caso podemos aproximar a una polinómica de grado 3 bastante bien. La *Tabla 22* muestra los valores  $m_x$  para ambas curvas.

DISTANCIA ENTRE LAS LÍNEAS PORTEMISORES EN M.	CAUDAL DE EMISORES														
	Menos de 1,5 l/h			2 l/h			4 l/h			8 l/h			más de 12 l/h		
	SEPARACIÓN DE LOS EMISORES EN DISTINTOS TIPOS DE SUELOS, EXPRESADOS														
	C	M	F	C	M	F	C	M	F	C	M	F	C	M	F
	0,2	0,5	0,9	0,3	0,7	1,0	0,6	1,0	1,3	1,0	1,3	1,7	1,3	1,6	2,0
PORCENTAJE DE SUELO MOJADO A 30 cm DE PROFUNDIDAD															
0,8	38	88	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1	33	70	100	40	80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1,2	25	58	92	33	67	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1,5	20	47	73	26	53	80	100	80	100	80	100	100	100	100	100
2	15	35	55	20	40	60	80	60	80	60	80	100	80	100	100
2,5	12	28	44	16	32	48	64	48	64	48	64	80	64	80	100
3	10	23	37	13	26	40	53	53	53	40	53	67	53	67	80
3,5	9	20	31	11	23	34	46	46	46	34	46	57	46	57	68
4	8	18	28	10	20	30	40	40	40	30	40	50	40	50	60
4,5	7	16	24	9	18	26	36	36	36	26	36	44	36	44	53
5	6	14	22	8	16	24	32	32	32	24	32	40	32	40	48
6	5	12	18	7	14	20	27	27	27	20	27	34	27	34	40

Tabla 16. Tabla de Karmeli y Keller para determinación de la separación entre goteros. Consultado en: [30]

donde:

C = Suelo de textura gruesa (Arenoso)

F = Suelo de textura fina (Arcilloso)

M = Suelo de textura media (Franco)

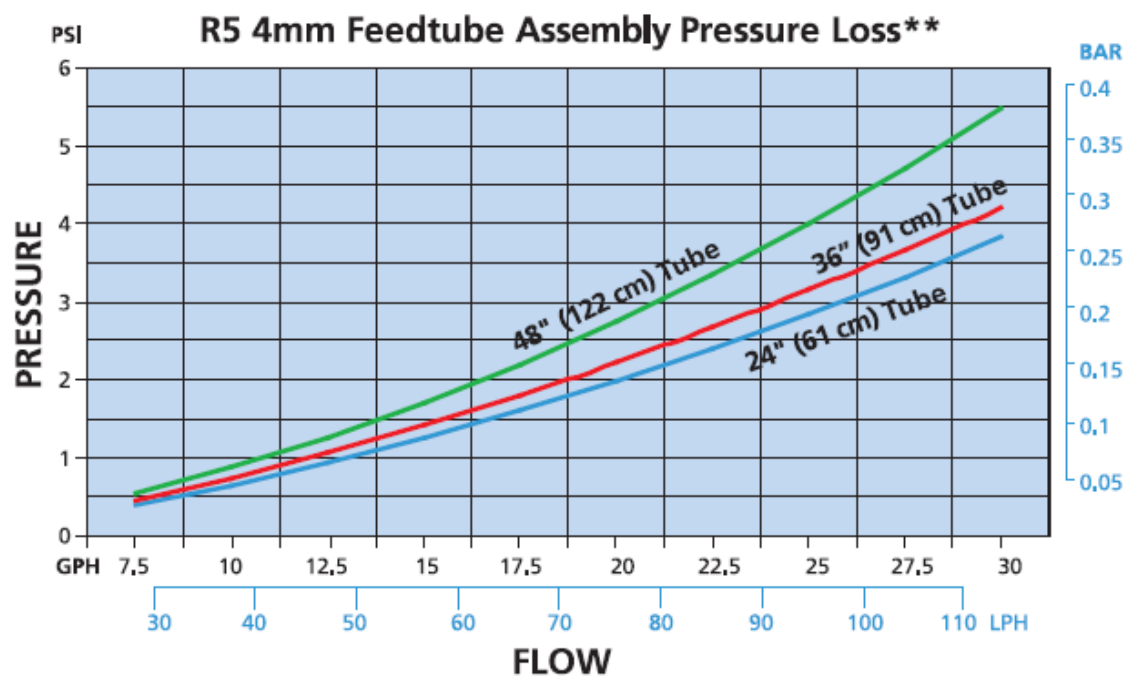


Ilustración 63. Pérdida de carga en función del caudal debida al elemento de montaje del aspersor R5 de Nelson. Fuente: catálogo del fabricante.

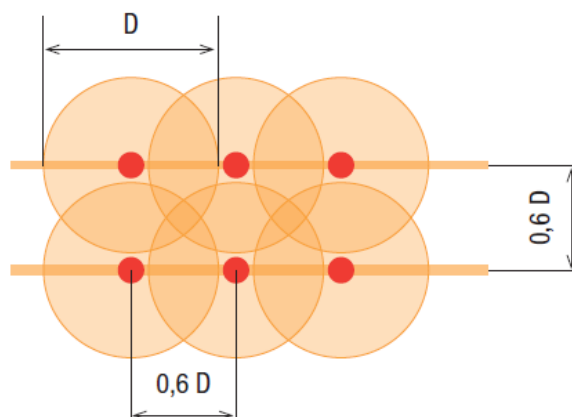


Ilustración 64. Separación entre aspersores y ramales de aspersión en marco cuadrado. Fuente: [4]

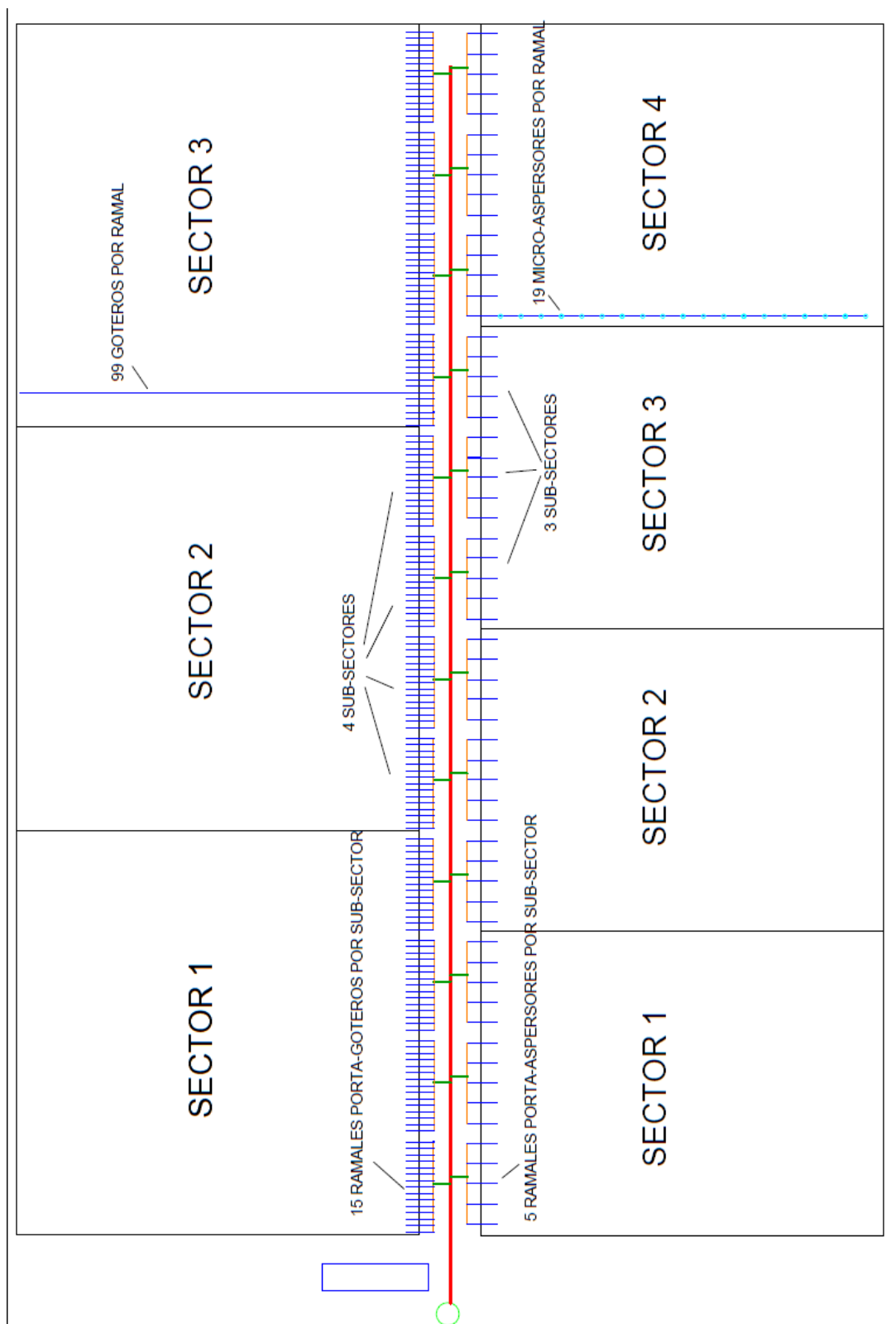


Ilustración 65. Distribución del riego propuesta para la parcela 1. Elaboración propia

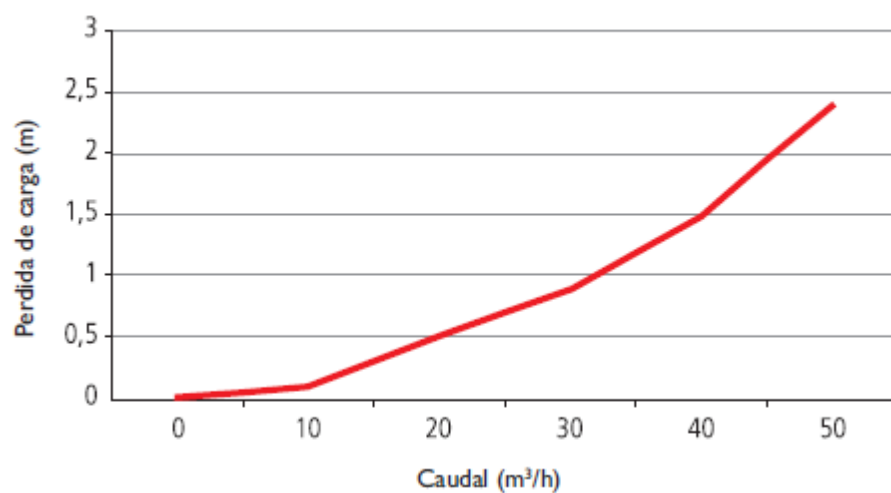


Ilustración 66. Pérdida de carga en función del caudal para el filtro de la marca Toro, modelo XD 3'' de anillas (discos). Fuente: catálogo del fabricante

Flow lt./sec	Pressure Loss	
	bar	mt
1.7	0.05	0.51
3.3	0.07	0.71
3.8	0.08	0.82
4.3	0.09	0.92
4.8	0.10	1.02
5.3	0.11	1.12
5.8	0.13	1.33
6.3	0.15	1.53
6.8	0.18	1.84
7.3	0.22	2.24
7.8	0.26	2.65
8.3	0.30	3.06
8.8	0.36	3.67
9.3	0.42	4.28
9.8	0.48	4.90
10.3	0.54	5.51
10.8	0.60	6.12
11.3	0.66	6.73

Tabla 17. Pérdidas de carga según el caudal, para el hidrociclón Alfa turbo 2''. Fuente: catálogo del fabricante

Componente	Valor (m.c.a.)
Nivel estático del pozo	34
Nivel dinámico del pozo	8.4
Diferencia de cota entre boca de pozo y parcela	0
Pérdida de carga hidrociclón	3.06
Pérdida de carga filtro discos	0.8
Pérdida de carga tubería principal	1.95
Pérdida de carga porta-ramales	0.44
Pérdida de carga ramales	1.3
Pérdida de carga porta-aspersor	0.5
Presión en los aspersores	15.3 (1.5 bar)
<b>TOTAL</b>	<b>65.75 m</b>

Tabla 18. Desglose de la altura manométrica total para la parcela 1, zona de riego por aspersión

Componente	Valor (m.c.a.)
Nivel estático del pozo	34
Nivel dinámico del pozo	8.4
Diferencia de cota entre boca de pozo y parcela	0
Pérdida de carga hidrociclón	3.06
Pérdida de carga filtro discos	0.8
Pérdida de carga tubería principal	1.95
Pérdida de carga porta-ramales	0.9
Pérdida de carga ramales	2.1
Presión en los goteros	14.28 (1.4 bar)
<b>TOTAL</b>	<b>65.49 m</b>

Tabla 19. Desglose de la altura manométrica total para la parcela 1, zona de riego por aspersión

Necesidades netas de agua en mm/semana						
Semana	Pimiento	Lechuga iceberg	Total	Total (m3/día)	Radiación diaria (HSP)	Caudal nominal horario (m3/h)
Semana (04/04-10/04)		12.6	12.6	54.00	5.92	9.12
Semana (11/04-17/04)		15.4	15.4	66.00	5.92	11.15
Semana (18/04-24/04)		24.7	24.7	105.86	5.92	17.88
Semana (25/04-01/05)		37.7	37.7	161.57	5.92	27.29
Semana (02/05-08/05)	0.6	38.7	39.3	168.43	6.71	25.10
Semana (09/05-15/05)	4.3	35.5	39.8	170.57	6.71	25.41
Semana (16/05-22/05)	4.9	34.1	39	167.14	6.71	24.90
Semana (23/05-29/05)	5.8	33.2	39	167.14	6.71	24.90
Semana (30/05-05/06)	8	28.5	36.5	156.43	7.73	20.25
Semana (06/06-12/06)	15	15.8	30.8	132.00	7.73	17.09
Semana (13/06-19/06)	19.1		19.1	81.86	7.73	10.60
Semana (20/06-26/06)	20.2		20.2	86.57	7.73	11.21
Semana (27/06-03/07)	32.3		32.3	138.43	8.07	17.15
Semana (04/07-10/07)	38.7		38.7	165.86	8.07	20.55
Semana (11/07-17/07)	44.6		44.6	191.14	8.07	23.69
Semana (18/07-24/07)	48.4		48.4	207.43	8.07	25.70
Semana (25/07-31/07)	44.7		44.7	191.57	8.07	23.74
Semana (01/08-07/08)	46.9		46.9	201.00	7.12	<b>28.22</b>
Semana (08/08-14/08)	44.5		44.5	190.71	7.12	26.78
Semana (15/08-21/08)	38		38	162.86	7.12	22.87
Semana (22/08-28/08)	40.5		40.5	173.57	7.12	24.37
Semana (29/08-04/09)	32.6		32.6	139.71	5.64	24.77
Semana (05/09-11/09)	14.1		14.1	60.43	5.64	10.71
<b>Total</b>	<b>503.2</b>	<b>276.2</b>	<b>779.4</b>			

Tabla 20. Determinación del caudal nominal de la bomba para la parcela 1, a partir de las dosis de riego y de la radiación diaria. Elaboración propia, a partir de datos de [26] y [27]



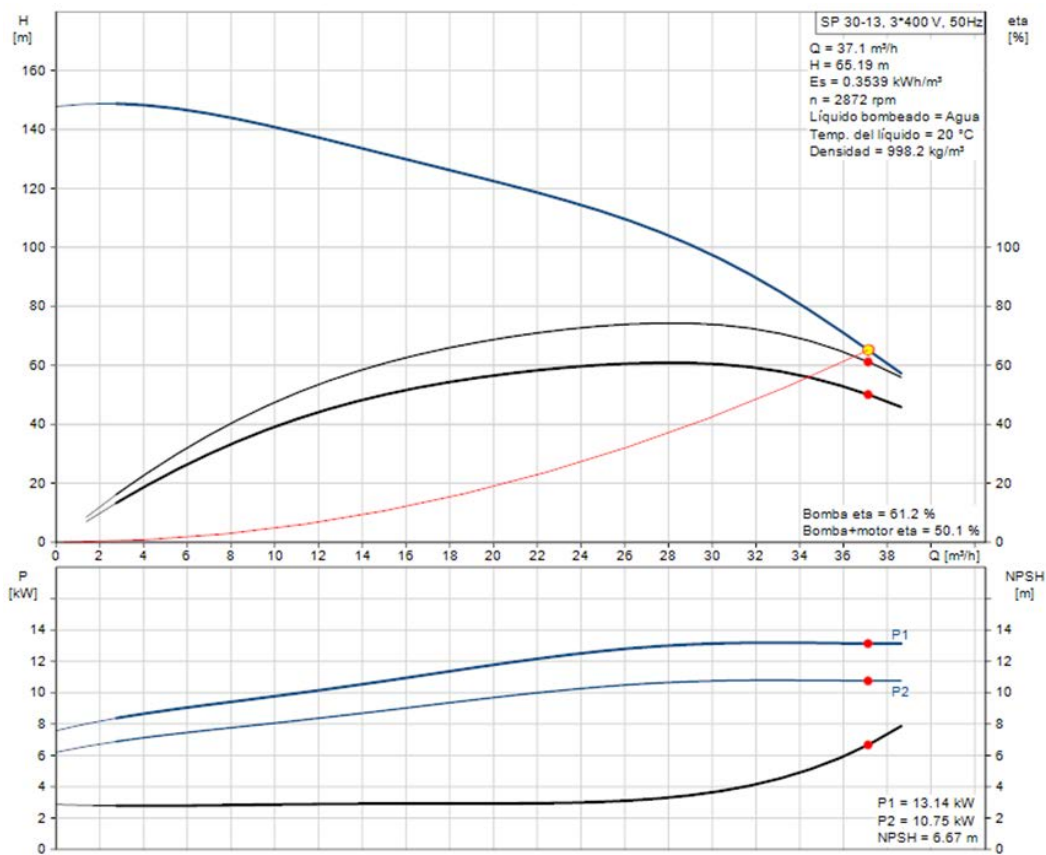


Ilustración 67. Curvas de la altura manométrica y potencia de la bomba (P2) y el motor (P1) en función del caudal, para funcionamiento a 50 Hz, para la bomba sumergible SP 30-13 de Grundfos. Se muestra el punto de trabajo para la altura manométrica total de diseño de la instalación. Fuente [28]

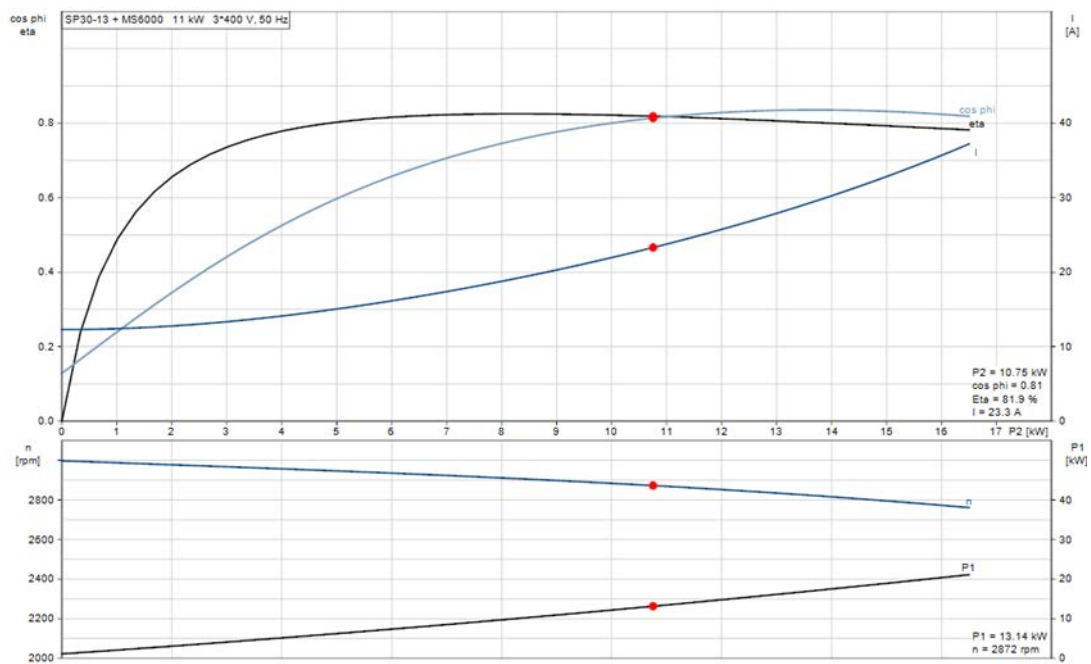


Ilustración 68. Curva de eficiencia del motor ( $\eta$ ) en función de la potencia, para el motor MS6000 de 11 kW, asociado a la bomba SP 30-13 de Grundfos. Se muestra también curva de corriente y de  $\cos \phi$ . Se muestra el punto de trabajo para la altura manométrica total de diseño de la instalación. Fuente [28]

Datos de motor		Datos de bomba			Resultados del modelo						
$\eta_{m,n}$ (%)	Pp(W)	Qn(m3/h)	Hn(m)	$\eta_p$ (%)	Qt (m3/h)	Ht (m)	Pp,t (W)	fm (Hz)	P'p,t (W)	$\eta_{m,T}$ (%)	Pdc(W)
31.6	476	3.9	148.3	22.2	2.6	65.0	2060.05	34.5	2987.19	74.0	2931.08
40.8	708	5.91	146.7	31.6	3.9	65.0	2205.07	34.7	3180.18	74.9	3098.34
50.8	1056	7.92	144.1	40	5.3	65.0	2355.43	35.0	3366.79	75.7	3274.65
61	1597	9.89	141	47.1	6.7	65.0	2525.24	35.4	3570.48	76.5	3474.90
65.7	1965	12.1	137.2	53.7	8.3	65.0	2747.08	35.8	3831.44	77.4	3736.73
70.7	2506	14.1	133.4	58.8	9.8	65.0	2964.83	36.4	4077.49	78.1	3994.22
73.8	2971	16.2	129.4	63.1	11.5	65.0	3222.96	36.9	4365.53	78.9	4298.23
78.2	3976	18.2	125.9	66.2	13.1	65.0	3498.94	37.4	4674.82	79.7	4620.99
80.7	5001	20.2	122.1	69	14.7	65.0	3783.39	38.0	4977.98	80.4	4953.76
82.1	5987	22.2	118.2	71.2	16.5	65.0	4095.44	38.6	5301.81	81.1	5318.28
82.9	6993	24	114.3	72.7	18.1	65.0	4409.51	39.3	5613.43	81.6	5686.12
83.3	7960	26.2	109.1	74	20.2	65.0	4840.54	40.2	6020.34	82.3	6193.99
83.4	8966	28.1	103.8	74.4	22.2	65.0	5293.85	41.2	6422.21	82.8	6734.03
83.3	9971	30	97.46	73.9	24.5	65.0	5872.19	42.5	6902.84	83.2	7433.82
83	10920	32	89.88	72.3	27.2	65.0	6666.79	44.3	7525.98	83.4	8416.32
82.6	11900	34.2	80.06	68.9	30.8	65.0	7922.01	46.9	8440.30	83.3	10011.39
		36	70.82	64.4	34.5	65.0	9485.83	49.9	9505.34	83.1	12019.24
		37.7	61.94	59.1	38.6	65.0	11574.57	53.4	10846.88	83.3	14627.11

Tabla 21. Resultados de los cálculos de los pasos 3-5 del método descrito en el capítulo 8, para la bomba SP 30-13 y el motor MS6000. Las 5 primeras columnas son los datos de motor y bomba extraídos de las gráficas del fabricante y el resto los cálculos.

	m6	m5	m4	m3	m2	m1	m0
$\eta_{m,n}$ (Pp)	-6.59704001426978E-22	2.80608152903514E-17	-4.78257135923754E-13	4.19992315759031E-09	-2.04980207375527E-05	5.59485087787951E-02	9.68748442365751E+00
Qt (Pdc)				1.95165048144792E-11	-7.30315065913334E-07	1.07001919847228E-02	-2.26621352599892E+01

Tabla 22. Valores de las aproximaciones polinómicas del rendimiento del motor y del caudal Qt para la bomba SP 30-13 y el motor MS6000

### 9.2.2. Finca 2

Para el albaricoque emplearemos micro-aspersión, porque las necesidades de riego por árbol son elevadas y tendríamos que utilizar un número grande de goteros por árbol para garantizar un porcentaje de área mojada cercano al área ocupada por las raíces y evitar el estrés hídrico. Los micro-aspersores, sin embargo, tienen un diámetro mojado muy superior, permitiendo 1 micro-aspersor por árbol, lo que los hace más apropiados en este caso. Se recomienda mayorar las necesidades de agua entre un 10% y un 15% con respecto al riego por goteo, por la menor uniformidad y mayor evaporación y arrastre por viento de la micro-aspersión.

Al ser las necesidades de presión más restrictivas para los micro-aspersores, optaremos por montaje del generador fotovoltaico sobre seguidor a 2 ejes, para tener una potencia de salida lo más uniforme posible a lo largo del día.

Con todos estos datos proponemos la siguiente distribución, que puede verse en la *Ilustración 69*:

- Una tubería de aspiración de la balsa a la bomba de superficie (en rojo)
- Una tubería principal desde la bomba de superficie (en rojo) que cruza la parcela de Oeste a Este.
- 6 tuberías secundarias (en verde) que unen la principal con las tuberías porta-ramales (en naranja), 4 por tubería secundaria. En cada una de las tuberías secundarias y porta-ramales se instalará una válvula de sectorización.
- A las tuberías porta-ramales se conectarán 7 ramales (en azul oscuro) con 18 micro-aspersores cada uno (en azul claro, mostrados en un único ramal en la ilustración, a modo de ejemplo).

En total hay 6 sectores, con 4 sub-sectores cada uno.

Emplearemos los mismos micro-aspersores utilizados en la finca 1, los R5 re Nelson.

A continuación, calculamos las pérdidas de carga para los diferentes tramos, considerando la aproximación detallada en el capítulo 4.3.4 para elementos hidráulicos singulares.

- **Ramales porta-aspersores:**

Longitud: 110 m. Sin elementos hidráulicos singulares

Caudal máximo:  $19 \text{ micro-aspersores/ramal} \times 1.03 \times 41 \text{ l/h/aspersor} = 802.37 \text{ l/h/ramal}$

Tubería:

25 mm, pérdidas de carga =  $110 \text{ m de tubería} \times 1.3 \text{ m de pérdida de carga} / 100 \text{ m de tubería} = 1.43 \text{ m.c.a. (valores tabla: 800 l/h)}$

#### – **Porta-ramales**

Longitud: 20 m. Incremento por elementos singulares: 20%

Caudal máximo:  $7 \text{ ramales/porta-ramales} \times 802.37 \text{ l/h/ramal} = 5,616.59 \text{ l/h/porta-ramales}$

Tubería:

38 mm, pérdidas de carga =  $1.2 \times 20 \text{ m de tubería} \times 5.1 \text{ m de pérdida de carga} / 100 \text{ m de tubería} = 1.22 \text{ m.c.a. (valores tabla: 5,500 l/h)}$

#### – **Secundarias:**

Longitud máxima: 145 m. Incremento por elementos singulares: 20%

Caudal máximo:  $4 \text{ porta-ramales/secundaria} \times 5,616.59 \text{ l/h/porta-ramales} = 22,466.36 \text{ l/h/secundaria}$

Tubería:

89 mm, pérdidas de carga  $< 1.2 \times 145 \text{ m de tubería} \times 1.3 \text{ m de pérdida de carga} / 100 \text{ m de tubería} = 2.26 \text{ m.c.a. (valores tabla: 25,000 l/h)}$

#### – **Tubería principal:**

Longitud máxima: 320 m Incremento por elementos singulares: 20%

Caudal máximo: en este caso, al estar el riego sectorizado, el caudal va a ser siempre muy inferior a  $n^\circ \text{ de sub-sectores} \times \text{caudal del subsector} = 130,000 \text{ l/h}$ , aproximadamente. En realidad, está, en primer lugar, limitado por el máximo caudal que puede dar la bomba, que para el modelo que seleccionaremos posteriormente, la NK 40-200 206 de Grundfos, es de unos

61.5 m<sup>3</sup>/h. Para la altura manométrica de proyecto y el generador fotovoltaico seleccionado, este caudal va a ser todavía inferior, unos 44 m<sup>3</sup>/h, pero aun así tomaremos un valor superior para tener en cuenta la combinación de irradiancia excepcionalmente alta y altura manométrica excepcionalmente baja.

#### Tubería:

125 mm, pérdidas de carga  $< 1.2 * 320 \text{ m de tubería} * 0.9 \text{ m de pérdida de carga} / 100 \text{ m de tubería} = 3.46 \text{ m.c.a.}$  (valores tabla: 50.000 l/h)

En cuanto al filtrado, para el modelo elegido, el fabricante recomienda filtrado de 75 US mesh o superior. Elegiremos el filtro Filtro XD 3" de anillas (discos) de 120 mesh, de caudal nominal 50 m<sup>3</sup>/h, que tiene una pérdida de carga de unos 2 m, para 45 m<sup>3</sup>/h. Se instalará aguas abajo del equipo de fertirrigación, para que retenga los precipitados o impurezas del abono. Este filtro es de limpieza manual, que se hará fuera de los horarios de riego. Se colocará un manómetro a la entrada y otro a la salida para determinar el nivel de ensuciamiento, en función de la presión diferencial y determinar el momento en que requiere ser limpiado.

Adicionalmente es necesaria la inclusión de un filtro de arena, aguas arriba del equipo de fertirrigación, para evitar la proliferación de micro-organismos en la arena, ya que las aguas de la balsa tendrán muy probablemente cierto grado de eutrofización. Elegiremos el modelo de 36" de la marca Regaber, con una pérdida de carga, para 50 m<sup>3</sup>/h de 2 m.c.a.

Hay que tener en cuenta que estos filtros requieren lavado por flujo inverso. Con el fin de poder realizarlo sin detener el riego, dispondremos dos filtros iguales en paralelo, para que uno pueda seguir operando mientras el otro es lavado. De esta forma, el agua filtrada por uno de los filtros se utiliza para limpiar el otro. El incremento de pérdida de carga en esta operación puede ser asumido por el sistema que, como veremos en capítulo 9.3, es excedentario en lo que a producción energética se refiere. Se colocará un manómetro a la entrada y otro a la salida de cada uno de los filtros para determinar el nivel de ensuciamiento, en función de la presión diferencial y decidir el momento en que requiere ser limpiado. Este sistema puede automatizarse, desde el programador de riego, tal como se muestra en la *Ilustración 70*.

Para la selección de los componentes del sistema de bombeo solar es necesario fijar el caudal y la altura manométrica de diseño. Esta última se calcula según lo descrito en el capítulo 5.1. Hemos considerado para el diseño el mes de Julio, obteniendo una altura manométrica total para el diseño de 40 m. Resumimos los resultados en la *Tabla 23*.

En cuanto al caudal nominal de la bomba es necesario tener en cuenta las necesidades netas de agua del cultivo a lo largo de la temporada de riego. Traduciremos la dosis semanal conjunta a volumen de agua diario ( $\text{m}^3/\text{día}$ ). Con el artificio matemático de considerar la radiación solar diaria en HSP (para seguimiento a dos ejes), obtendremos el caudal nominal de la bomba, según lo indicado en el capítulo 8, como cociente de los  $\text{m}^3/\text{día}$  y las HSP. Obtenemos un caudal nominal máximo de la bomba superior a  $40 \text{ m}^3/\text{h}$ , marcado en negrita en la última columna de la *Tabla 24*.

Hemos elegido la bomba de superficie de aspiración axial NK 40-200 206 de Grundfos, con motor síncrono de clase de eficiencia IE3, caudal nominal de  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  y caudal máximo de unos  $62 \text{ m}^3/\text{h}$ . En este tipo de bombas el rango de frecuencias de funcionamiento es mucho más limitado porque la pendiente de la curva H-Q es mucho menos acusada. Esto lo compensaremos mediante el seguimiento solar a 2 ejes, que permite una potencia de salida del generador fotovoltaico mucho más uniforme. Esta bomba nos permite bombear agua a 40 m de altura manométrica total para frecuencias de 42 Hz hasta casi 49 Hz sin entrar en cavitación, como se muestra en la *Ilustración 71*.

Como es una bomba de superficie, la altura de aspiración tiene que ser inferior a la máxima, como vimos en el capítulo 5.2. En nuestro caso:

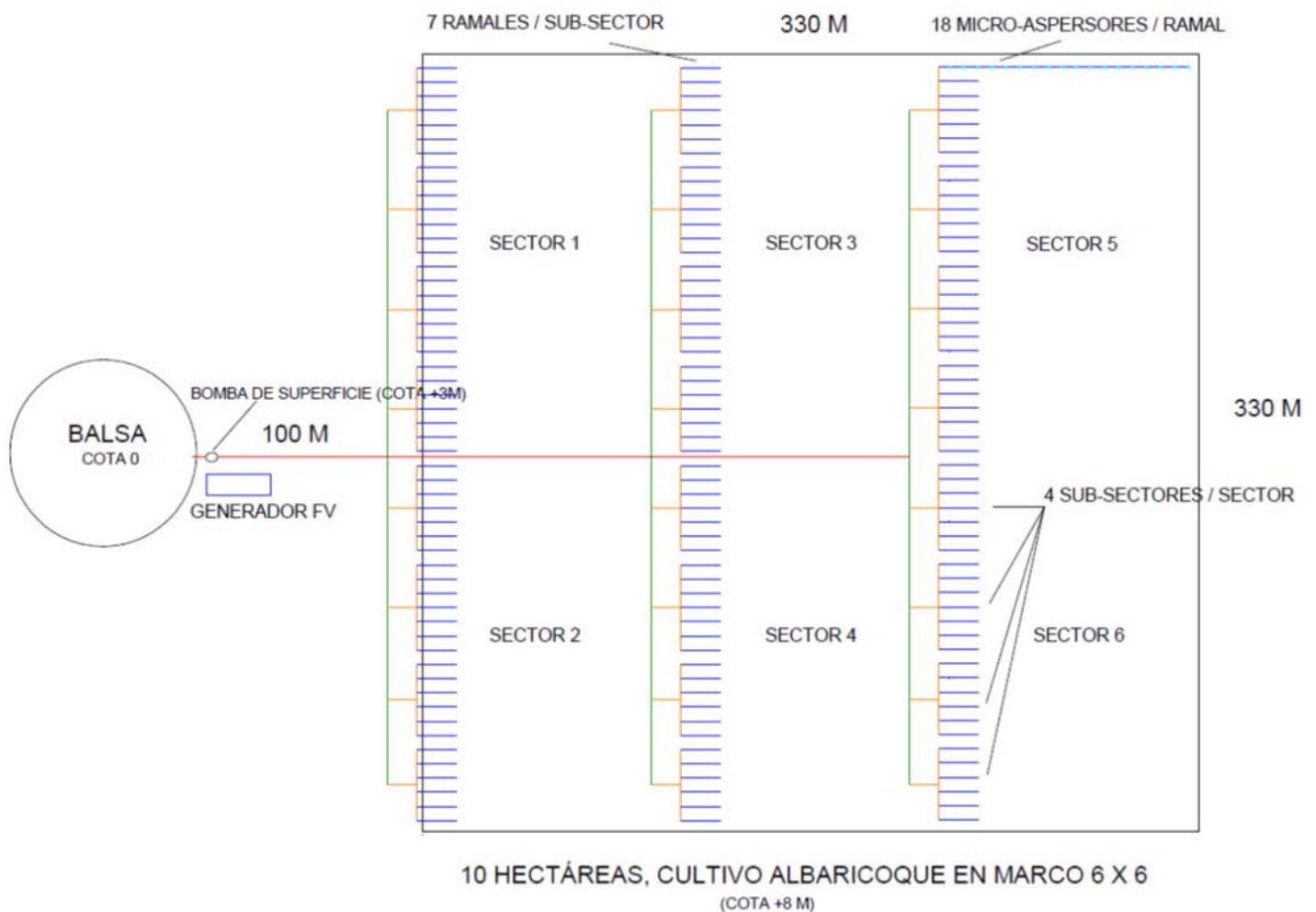
$$3 < 1 * 10.2 - 2 - 0 - 0.4 - 0.5 = 7.3 \text{ m} \Rightarrow \text{se cumple}$$

El sistema hidráulico se completará con las válvulas y resto de elementos indicados en el capítulo 4.3.4 y en el capítulo 4.3.5.

En cada una de las tuberías secundarias y porta-ramales se instalará una válvula de sectorización, esto es, 30 en total (6 + 24), por lo que el programador deberá ser, al menos de 30 sectores. Hay que considerar que no existe acceso a la red eléctrica en la parcela, por lo que tanto el programador, como las electroválvulas, como las bombas dosificadoras se alimentarán con

un sistema solar con baterías a 12 Vdc, independiente del de bombeo solar, objeto del presente trabajo. Con el fin de reducir el consumo, se utilizarán válvulas tipo “*latch*”.

El siguiente paso será modelizar el comportamiento del conjunto generador fotovoltaico-variador de frecuencia-motor-bomba, siguiendo los mismos pasos de modelización explicados para la finca 1. Los resultados se muestran en las siguientes ilustraciones y tablas: *Ilustración 72*, *Ilustración 73*, *Tabla 25*, *Tabla 26*.



*Ilustración 69. Distribución del riego propuesta para la parcela 2. Elaboración propia*



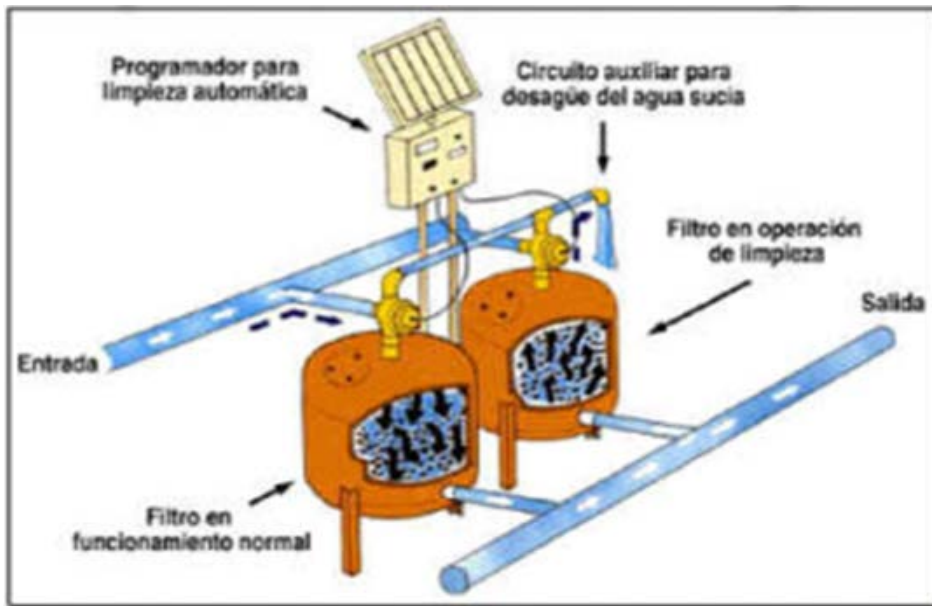


Ilustración 70. Filtros de arena en paralelo. Operación de limpieza por flujo inverso de uno de ellos mientras el otro opera normalmente, controlada por el programador de riego. Fuente: [34]

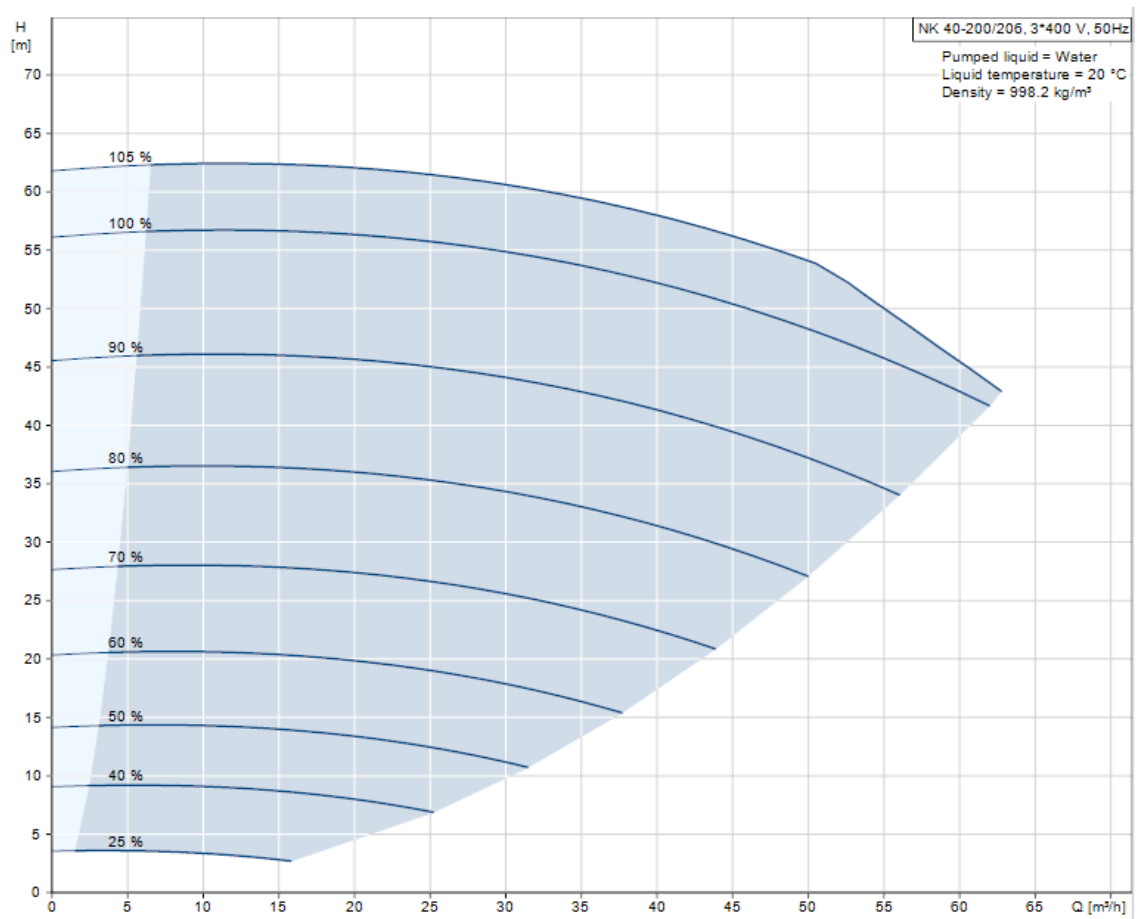
Componente	Valor (m.c.a.)
Altura de aspiración	3
Diferencia de cota entre la bomba de superficie y la parcela	5
Pérdida de carga filtro de arena	2
Pérdida de carga filtro de discos	2
Pérdida de carga tubería principal	3.46
Pérdida de carga tuberías secundarias	2.26
Pérdida de carga porta-ramales	1.22
Pérdida de carga ramales	1.43
Pérdida de carga porta-aspersor	0.5
Presión en los aspersores	18.36 (1.8 bar)
<b>TOTAL</b>	<b>39.23</b>

Tabla 23. Desglose de la altura manométrica total para la parcela 2. Elaboración propia

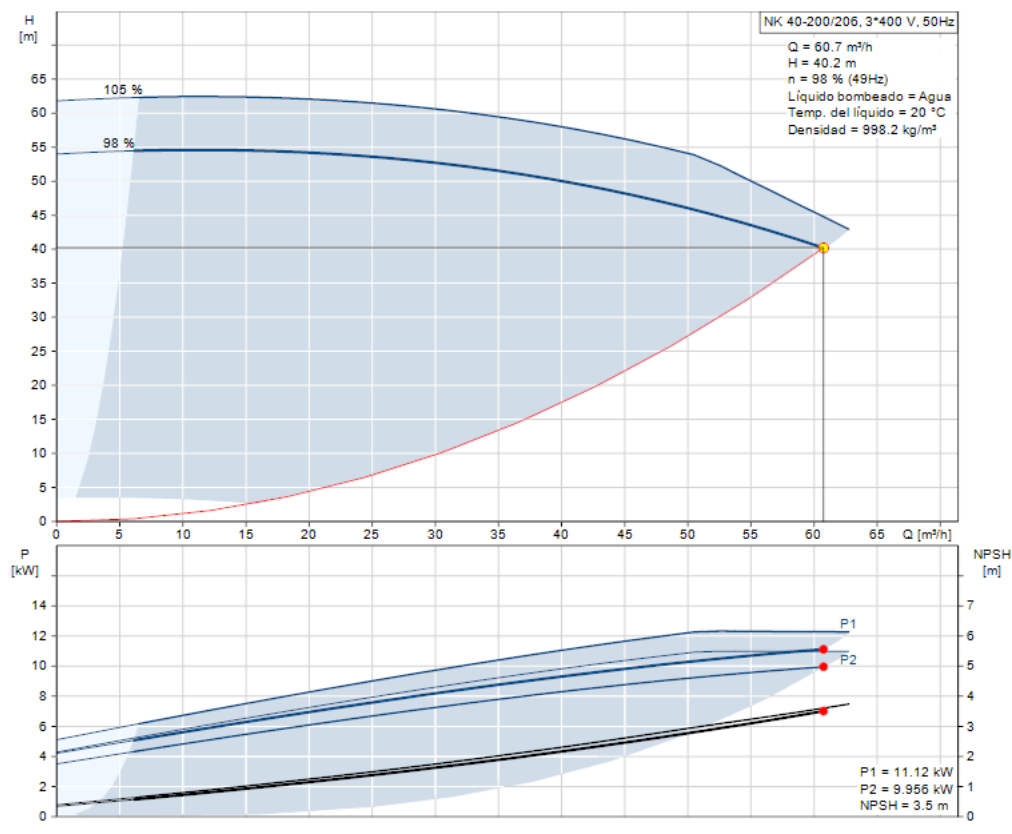


Semana	Albaricoquero 6 x 6 Dosis (mm/semana)	Albaricoquero 6 x 6 Dosis mayorada (mm/semana)	Total mayorado (m3/día)	Radiación diaria (HSP)	Caudal nominal horario (m3/h)
Semana (04/04-10/04)			0.00	8.32	0.00
Semana (11/04-17/04)			0.00	8.32	0.00
Semana (18/04-24/04)			0.00	8.32	0.00
Semana (25/04-01/05)	21.4	23.54	336.29	8.32	<b>40.42</b>
Semana (02/05-08/05)	20.3	22.33	319.00	9.25	34.48
Semana (09/05-15/05)	18.7	20.57	293.86	9.25	31.76
Semana (16/05-22/05)	18.2	20.02	286.00	9.25	30.91
Semana (23/05-29/05)	18.4	20.24	289.14	9.25	31.25
Semana (30/05-05/06)	17.5	19.25	275.00	10.81	25.43
Semana (06/06-12/06)	23.1	25.41	363.00	10.81	33.57
Semana (13/06-19/06)	21	23.1	330.00	10.81	30.52
Semana (20/06-26/06)	17.6	19.36	276.57	10.81	25.58
Semana (27/06-03/07)	22.9	25.19	359.86	11.10	32.43
Semana (04/07-10/07)	22.1	24.31	347.29	11.10	31.29
Semana (11/07-17/07)	21.4	23.54	336.29	11.10	30.30
Semana (18/07-24/07)	21.8	23.98	342.57	11.10	30.87
Semana (25/07-31/07)	19.7	21.67	309.57	11.10	27.89
Semana (01/08-07/08)	20.2	22.22	317.43	10.05	31.58
Semana (08/08-14/08)	18.6	20.46	292.29	10.05	29.08
Semana (15/08-21/08)	15.5	17.05	243.57	10.05	24.23
Semana (22/08-28/08)	16.2	17.82	254.57	10.05	25.33
Semana (29/08-04/09)	14.7	16.17	231.00	8.21	28.15
Semana (05/09-11/09)	13.3	14.63	209.00	8.21	25.47
Semana (12/09-18/09)	12.3	13.53	193.29	8.21	23.56
Semana (19/09-25/09)	8.8	9.68	138.29	8.21	16.85
<b>Total</b>	<b>403.7</b>	<b>444.07</b>			

Tabla 24. Determinación del caudal nominal de la bomba para la parcela 2, a partir de las dosis de riego y de la radiación diaria. Elaboración propia, a partir de datos de [26] y [27]



*Ilustración 71. Curvas altura-caudal para la bomba NK 40-200/206, 3 x 400 Vac, 50 Hz, a diferentes frecuencias, expresadas como porcentaje con respecto a la nominal (50 Hz). Fuente: [28]*



*Ilustración 72. Curvas de la altura manométrica y potencia de la bomba (P2) y el motor (P1) en función del caudal, para funcionamiento a 49 Hz (98 %), que es la máxima frecuencia sin cavitación para la altura manométrica de diseño de la instalación (40 m), para la bomba de superficie NK 40 200/206 de Grundfos. Se muestra el punto de trabajo para la altura manométrica total de diseño. Fuente [28]*

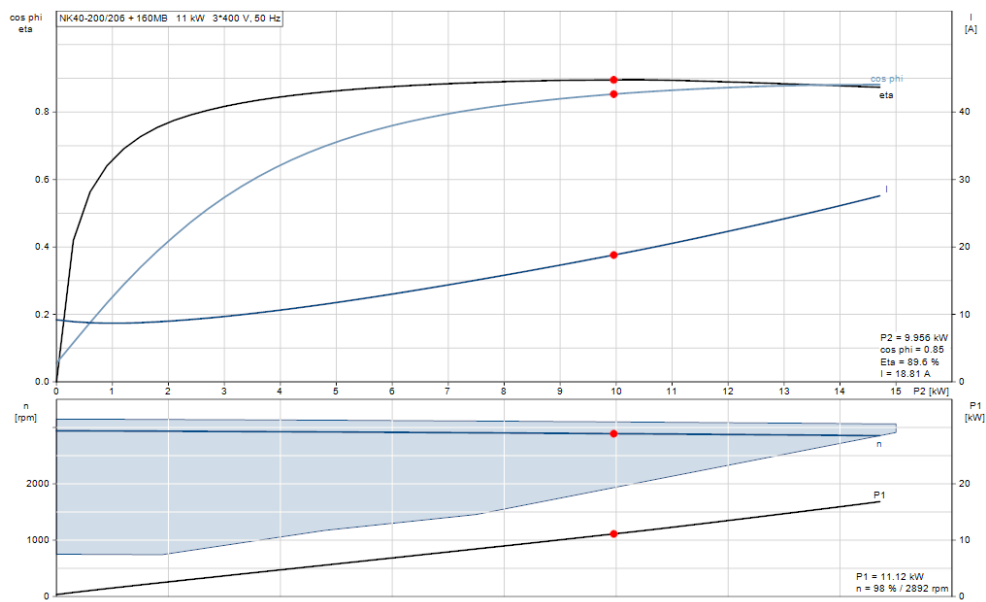


Ilustración 73. Curva de eficiencia del motor ( $\eta$ ) en función de la potencia, para el motor 160MB de 11 kW, asociado a la bomba NK 40 200/206 de Grundfos. Se muestra también curva de corriente y de  $\cos \phi$ . Se muestra el punto de trabajo para la altura manométrica total de diseño de la instalación. Nótese la mejor eficiencia de este motor respecto a la del motor de la finca 1, que se muestra en la Ilustración 68. Fuente [28]

Datos de motor		Datos de bomba			Resultados del modelo						
$\eta_{m,n}$ (%)	Pp(W)	Qn(m3/h)	Hn(m)	$\eta_p$ (%)	Qt (m3/h)	Ht (m)	Pp,t (W)	fm (Hz)	P'p,t (W)	$\eta_{m,T}$ (%)	Pdc(W)
50	350	6.57	56.62	21.9	5.5	40.0	2748.481	43.8	3139.2	85.62	3379.19
60	610	9.93	56.99	30.1	8.3	40.0	3012.589	43.6	3452.077	86.15	3681.07
70	1000	15	56.8	40.1	12.6	40.0	3421.6	43.7	3914.214	86.59	4159.24
80	2000	20	56.62	47.8	16.8	40.0	3833.308	43.8	4378.243	86.83	4647.33
84	3000	25.2	55.7	54.2	21.4	40.0	4294.673	44.1	4865.181	86.99	5196.56
86	4000	30	54.87	58.8	25.6	40.0	4748.243	44.5	5338.776	87.19	5732.64
87.5	5000	35.2	53.64	62.6	30.4	40.0	5292.739	45.0	5883.911	87.51	6366.29
88.5	6000	40.1	52.19	65.2	35.1	40.0	5868.939	45.6	6435.681	87.97	7022.53
89	7000	45	50.41	67	40.1	40.0	6521.325	46.4	7028.06	88.58	7749.43
90	8000	50.1	48.19	68	45.6	40.0	7316.558	47.5	7709.506	89.35	8619.93
90	9000	55.2	45.69	68.1	51.6	40.0	8266.809	48.7	8481.833	90.14	9653.25
90	10000	60.1	42.85	67.2	58.1	40.0	9418.598	50.3	9358.429	90.76	10924
90	12000	61.9	41.76	66.7	60.6	40.0	9900.134	51.0	9710.969	90.88	11467.2
90	14000										
90	16000										
90	18000										

Tabla 25. Resultados de los cálculos de los pasos 3-5 del método descrito en el capítulo 8, para la bomba NK 40 200/206 y el motor 160MB. Elaboración propia

	m6	m5	m4	m3	m2	m1	m0
$\eta_{mn}$ (Pp)	-1.26764716481222E-22	7.61868996007865E-18	-1.79095881475359E-13	2.08801791751692E-09	-1.26741497477214E-05	3.86338083180998E-02	3.98328444365483E+01
Qt (Pdc)				1.06734402546680E-12	-3.20797992488610E-07	1.13726225949775E-02	-2.92537984676736E+01

Tabla 26. Valores de las aproximaciones polinómica del rendimiento del motor y del caudal  $Q_t$  para la bomba NK 40 200/206 y el motor 160MB. Elaboración propia

### 9.3. Diseño del sistema solar

#### 9.3.1. Finca 1

La bomba instalada en la finca 1 permite un amplio rango de funcionamiento en frecuencia. Por ello, el generador fotovoltaico se montará sobre estructura fija orientada al sur. Se seleccionará una inclinación de 10°-15° sobre la horizontal, con el fin de optimizar la captación durante los meses de verano, que son los que tiene mayores necesidades de bombeo. La **Tabla 27** muestra el ángulo óptimo en cuanto a captación para cada mes del período de riego.

Después seguiremos los pasos 1 y 2 del método descrito en el capítulo 8: para cada uno de los meses de riego construiremos una tabla, similar a la **Tabla 29**, donde se recogen los perfiles diarios de G y T (en nuestro caso obtenidos de PVGIS) y donde se calcula el perfil diario tanto de la potencia del generador fotovoltaico, para una potencia pico de generador determinada, como el caudal instantáneo  $Q_T$  en m<sup>3</sup>/h, en cuyo cálculo hemos empleado la aproximación polinómica que recogíamos en la **Tabla 22**.

Para calcular el caudal producido a lo largo del día, utilizamos el ajuste de los datos discretos de  $Q_T(t)$  así obtenidos a una función polinómica de orden 4 en t (similar a la de la **Tabla 28**), e integramos cada uno de sus sumandos de la función polinómica desde el momento del día de arranque de la bomba (a) y hasta el de parada (b), según la fórmula siguiente:

$$\int_a^b m_n t^n dt = m_n \left( \frac{b^{n+1}}{n+1} - \frac{a^{n+1}}{n+1} \right)$$

El caudal diario así calculado se compara con las necesidades de riego diarias. Si es inferior, se prueba una potencia pico de generador superior, modificando  $N_s$ ,  $N_p$  o la potencia pico del módulo FV elegido, en un proceso iterativo hasta encontrar una configuración que permita cubrir las necesidades de riego en todas las semanas de riego (o en su mayor parte). El proceso de iteración nos llevó a seleccionar un generador fotovoltaico de **10,200 W<sub>p</sub>**.

La **Tabla 30** compara las necesidades de riego y el caudal bombeable por el generador fotovoltaico seleccionado en cada semana de la temporada de riego. El sistema permite un superávit de agua bombeada, importante en algunas

semanas, y sólo muestra un pequeño déficit en dos semanas, que puede subsanarse con una buena planificación de riego (adelantando parte del riego, por ejemplo, en semanas previas con superávit). Esto, junto con el hecho de que la altura manométrica real va a ser en muchos momentos inferior a la considerada para los cálculos, nos permite obviar la recomendación de [3] de un factor de seguridad de 1.15 para la potencia del generador fotovoltaico.

La selección del variador de frecuencia se rige por los criterios descritos en los capítulos 6.4.2 y 6.4.3. Elegiremos el modelo Vacon 100X, 11 kW, 3 x 380-480 Vac por sus óptimas características para instalaciones a la intemperie (IP 66/NEMA 4X, válvulas de gore-tex, funcionamiento hasta 40°C de temperatura ambiente sin “derating” y hasta 60° C con “derating”), el algoritmo optimizado de control MPPT4, la elevada longitud de cableado de motor que permite (150 m de cable apantallado), sus funciones avanzadas de control de bombas, la posibilidad de implementar un control por lazo cerrado de presión (añadido al control MPPT) y su función de optimización del consumo del motor. Este modelo tiene una corriente máxima en operación continua de 23 A, en línea con las necesidades de la bomba SP 30-13 en el punto de diseño de altura manométrica a 50 Hz de operación.

El generador fotovoltaico se debe configurar para trabajar dentro de los márgenes de operación del variador en cuanto a tensión en el bus de continua.

La configuración elegida será 2 ramas en paralelo de 20 módulos en serie de 255 W<sub>p</sub> (N<sub>s</sub>= 20; N<sub>p</sub>=2), modelo JKM255P de Jinko Solar, con los siguientes valores de catálogo, para STC, recogidos en la *Tabla 31*:

La primera condición a cumplir, según [24], será la siguiente:

$$V_{dc, \max \text{ del variador}} > N_s * V_{oc} * (1 - (\frac{C_T}{100} * (25 - T_{min})))$$

donde:

V<sub>oc</sub> es la tensión de circuito abierto para un único módulo en STC

C<sub>T</sub> es el coeficiente de temperatura de V<sub>oc</sub>

T<sub>min</sub> es la temperatura mínima de célula. En nuestro caso tomaremos 5° C, porque el variador sólo funcionará de abril a septiembre y estará desconectado del generador fotovoltaico el resto del año

En nuestro caso:

$$840 > 20 * 38.0 * (1 - (-0.31/100 * (25 - 5))) = 807.12 \text{ V} \Rightarrow \text{se cumple}$$

La segunda condición a cumplir será la siguiente:

$$V_{dc, \text{min del variador}} < N_s * V_{mp} * (1 - (\frac{C_T}{100} * (25 - T_{max})))$$

En nuestro caso:

$$400 < 20 * 30.8 * (1 - (-0.31/100 * (25 - 65))) = 539.62 \text{ V} \Rightarrow \text{se cumple}$$

Mes	Ángulo óptimo (°)
Mayo	15
Junio	6
Julio	10
Agosto	22
Septiembre	38

Tabla 27. Ángulo que optimiza la captación solar en los meses de riego, para la localización de la instalación: Latitud 38°35'28" Norte, Longitud 1°41'36" Oeste. Elaboración propia sobre datos de [26].

	m4	m3	m2	m1	m0
Q <sub>T</sub> (t)	-4.48515306661287E+03	9.16933677120974E+03	-7.40691718806286E+03	2.77814041534491E+03	-3.79647118558143E+02

Tabla 28. Valores de las aproximaciones polinómica de orden 4 del caudal  $Q_t(t)$ , para el mes de abril y generador fotovoltaico de 10.2 kWp.

Hora	G (W/m²)	T (°C)	P <sub>DC</sub> (W)	Q <sub>T</sub> (t)
5:52	28	7.9	304.18	0.00
6:07	47	8.2	508.91	0.00
6:22	84	8.5	904.71	0.00
6:37	122	8.9	1306.32	0.00
6:52	162	9.3	1724.05	0.00
7:07	204	9.8	2156.37	0.00
7:22	247	10.4	2591.86	0.50
7:37	290	10.9	3021.89	3.54
7:52	332	11.5	3434.35	6.26
8:07	373	12	3832.15	8.72
8:22	413	12.6	4212.77	10.91
8:37	452	13.1	4579.79	12.90
8:52	489	13.6	4922.56	14.64
9:07	523	14	5234.52	16.14
9:22	556	14.4	5533.28	17.49

9:37	586	14.8	5800.75	18.64
9:52	613	15.1	6040.26	19.63
10:07	638	15.4	6259.27	20.49
10:22	661	15.7	6458.22	21.24
10:37	680	15.9	6622.49	21.84
10:52	697	16.2	6765.02	22.34
11:07	711	16.4	6882.92	22.75
11:22	723	16.5	6985.52	23.10
11:37	731	16.7	7049.69	23.31
11:52	737	16.9	7096.12	23.47
12:07	740	17.1	7116.25	23.53
12:22	740	17.3	7110.22	23.51
12:37	737	17.4	7081.09	23.42
12:52	731	17.6	7022.85	23.22
13:07	723	17.8	6947.17	22.97
13:22	711	17.9	6839.40	22.60
13:37	697	18.1	6710.99	22.15
13:52	680	18.2	6558.68	21.61
14:07	661	18.3	6388.10	20.98
14:22	638	18.3	6183.78	20.19
14:37	613	18.4	5957.73	19.29
14:52	586	18.4	5714.68	18.28
15:07	556	18.4	5442.54	17.09
15:22	523	18.4	5140.63	15.70
15:37	489	18.3	4828.79	14.18
15:52	452	18.2	4485.73	12.40
16:07	413	18	4121.78	10.40
16:22	373	17.9	3742.36	8.18
16:37	332	17.7	3350.37	5.72
16:52	290	17.4	2944.98	3.01
17:07	247	17.2	2523.33	0.00
17:22	204	16.9	2097.28	0.00
17:37	162	16.6	1675.80	0.00
17:52	122	16.2	1269.98	0.00
18:07	84	15.9	879.35	0.00
18:22	47	15.5	494.91	0.00
18:37	28	15.1	295.95	0.00

*Tabla 29. Perfil diario de irradiancia y temperatura para el mes de abril obtenidos de PVGIS y cálculo de la potencia instantánea del generador fotovoltaico y del caudal de bombeo producido por éste para el sistema de la finca 1, para un generador fotovoltaico de 10.2 kWp. El umbral de irradiancia para iniciar el bombeo es de, aproximadamente 250 W/m<sup>2</sup>.*



Semana	Necesidades de agua (m3/día)	Caudal diario bombeable (m3/día)	Déficit o superavit (%)
Semana (04/04-10/04)	54.00	164.19	204.06%
Semana (11/04-17/04)	66.00	164.19	148.78%
Semana (18/04-24/04)	105.86	164.19	55.11%
Semana (25/04-01/05)	161.57	164.19	1.62%
Semana (02/05-08/05)	168.43	184.60	9.60%
Semana (09/05-15/05)	170.57	184.60	8.23%
Semana (16/05-22/05)	167.14	184.60	10.45%
Semana (23/05-29/05)	167.14	184.60	10.45%
Semana (30/05-05/06)	156.43	209.28	33.79%
Semana (06/06-12/06)	132.00	209.28	58.55%
Semana (13/06-19/06)	81.86	209.28	155.67%
Semana (20/06-26/06)	86.57	209.28	141.75%
Semana (27/06-03/07)	138.43	215.26	55.50%
Semana (04/07-10/07)	165.86	215.26	29.79%
Semana (11/07-17/07)	191.14	215.26	12.62%
Semana (18/07-24/07)	207.43	215.26	3.78%
Semana (25/07-31/07)	191.57	215.26	12.37%
Semana (01/08-07/08)	201.00	190.04	-5.45%
Semana (08/08-14/08)	190.71	190.04	-0.35%
Semana (15/08-21/08)	162.86	190.04	16.69%
Semana (22/08-28/08)	173.57	190.04	9.49%
Semana (29/08-04/09)	139.71	150.17	7.48%
Semana (05/09-11/09)	60.43	150.17	148.51%

Tabla 30. Comparación de las necesidades de agua diarias del regadío y el caudal bombeable, mostrando el superávit o déficit para cada semana. Elaboración propia

Datos JKM255P de Jinko Solar	
$P_{max}$	255 W <sub>p</sub>
$V_{mp}$	30.8 V
$V_{oc}$	38.0 V
$I_{mp}$	8.28 A
$I_{sc}$	8.92 A
TONC	45+/-2 ° C
Coeficiente de temperatura de $P_{max}$	-0.41%/K
Coeficiente de temperatura de $V_{oc}$	-0.31 %/K
Coeficiente de temperatura de $I_{sc}$	+0.06 %/K

Tabla 31. Valores de catálogo del módulo JKM255P de Jinko Solar

### 9.3.2. Finca 2

La bomba instalada no tiene un rango amplio de frecuencia de funcionamiento, para la altura manométrica de diseño, por lo que es necesario considerar un generador fotovoltaico con seguimiento a dos ejes.

Siguiendo un proceso de iteración similar al explicado para la finca 1, seleccionamos finalmente el generador fotovoltaico siguiente: **9,690 W<sub>p</sub>**, formado por 2 ramas en paralelo de 19 módulos en serie de 255 W<sub>p</sub> (N<sub>s</sub>= 19; N<sub>p</sub> =2). Mostramos, a modo de ejemplo, los resultados de perfil de caudal y Pdc durante el mes de abril para este sistema en la *Tabla 32*.

La *Tabla 33* compara las necesidades de riego y el caudal bombeable por el generador fotovoltaico seleccionado en cada semana de la temporada de riego. El sistema permite un superávit de agua bombeada todas las semanas menos una y sólo muestra un pequeño déficit la primera semana que puede subsanarse con una buena planificación de riego, adelantando parte del riego en la semana anterior, por lo que puede plantearse una ligera disminución de la potencia pico del generador fotovoltaico utilizando, por ejemplo, módulos de 250 W<sub>p</sub> en lugar de los de 255 W<sub>p</sub> considerados.

En este caso elegiremos también el modelo de variador Vacon 100X, 11 kW, 3 x 380-480 Vac, además de por todos los motivos esgrimidos en el capítulo 9.3.1, por su compatibilidad con motores de imanes permanentes, como el empleado por la bomba de este sistema. En este caso, los requerimientos de la bomba en corriente son aún inferiores a los del caso de la finca 1 (en torno a 20 A en lugar de 23 A), por lo que este variador sigue siendo válido.

La configuración de generador fotovoltaico será 2 ramas en paralelo de 19 módulos en serie de 255 W<sub>p</sub> (N<sub>s</sub>= 20; N<sub>p</sub> =2), modelo JKM255P de Jinko Solar.

Las condiciones descritas en el capítulo 9.3.1, son también aplicables en este caso:

$$840 > 19 * 38.0 * (1 - (-0.31/100 * (25-5))) = 766.76 \text{ V} \Rightarrow \text{se cumple}$$

$$400 < 19 * 30.8 * (1 - (-0.31/100 * (25-65))) = 512.64 \text{ V} \Rightarrow \text{se cumple}$$

Los módulos se instalarán en 2 seguidores solares a 2 ejes ETATRACK active 1500-A de Lorentz, para 12 módulos cada uno y en 1 seguidor solar a 2 ejes ETATRACK active 2000-A, para 18 módulos. El sistema de seguimiento funciona en DC, con un rango de 12 a 50 V, lo que permite ser alimentado desde uno de los paneles. El consumo es muy reducido, inferior a 1.5 kWh/año por seguidor, por lo que podemos despreciar su impacto a efectos de cálculo.

Hora	G (W/m <sup>2</sup> )	T (°C)	P <sub>DC</sub> (W)	Q <sub>T</sub> (t)
5:52	121	7.9	1235.66	0.00
6:07	231	8.2	2326.76	0.00
6:22	332	8.5	3301.24	4.83
6:37	408	8.9	4014.56	11.30
6:52	471	9.3	4592.65	16.31
7:07	523	9.8	5057.94	20.20
7:22	567	10.4	5441.27	23.30
7:37	604	10.9	5758.65	25.80
7:52	636	11.5	6025.29	27.86
8:07	663	12	6247.41	29.54
8:22	685	12.6	6421.26	30.83
8:37	704	13.1	6570.17	31.92
8:52	720	13.6	6692.15	32.81
9:07	733	14	6790.53	33.51
9:22	744	14.4	6871.39	34.09
9:37	753	14.8	6934.95	34.54
9:52	760	15.1	6984.40	34.89
10:07	766	15.4	7025.29	35.18
10:22	770	15.7	7049.44	35.35
10:37	773	15.9	7068.21	35.48
10:52	776	16.2	7083.91	35.59
11:07	778	16.4	7094.33	35.66
11:22	779	16.5	7099.52	35.70
11:37	780	16.7	7101.68	35.71
11:52	781	16.9	7103.83	35.73
12:07	781	17.1	7097.77	35.69
12:22	781	17.3	7091.72	35.64
12:37	781	17.4	7088.69	35.62
12:52	780	17.6	7074.48	35.52
13:07	779	17.8	7060.27	35.42
13:22	778	17.9	7049.10	35.35
13:37	776	18.1	7026.77	35.19

13:52	773	18.2	6999.30	35.00
14:07	770	18.3	6971.84	34.80
14:22	766	18.3	6939.18	34.57
14:37	760	18.4	6887.19	34.20
14:52	753	18.4	6829.88	33.80
15:07	744	18.4	6756.04	33.27
15:22	733	18.4	6665.52	32.61
15:37	720	18.3	6560.98	31.85
15:52	704	18.2	6431.01	30.90
16:07	685	18	6277.89	29.76
16:22	663	17.9	6095.79	28.39
16:37	636	17.7	5872.45	26.68
16:52	604	17.4	5606.48	24.61
17:07	567	17.2	5291.82	22.10
17:22	523	16.9	4914.01	19.01
17:37	471	16.6	4459.38	15.18
17:52	408	16.2	3899.12	10.28
18:07	332	15.9	3206.01	3.94
18:22	231	15.5	2261.40	0.00
18:37	121	15.1	1201.90	0.00

*Tabla 32. Perfil diario de irradiancia y temperatura para el mes de abril obtenidos de [26] y cálculo de la potencia instantánea del generador FV y del caudal de bombeo producido por éste para el sistema de la finca 2, para un generador fotovoltaico de 9.69 kWp. El umbral de irradiancia para iniciar el bombeo es de, aproximadamente 330 W/m<sup>2</sup>. Elaboración propia*

Semana	Necesidades de agua (m3/día)	Caudal diario bombeable (m3/día)	Déficit o superavit (%)
Semana (04/04-10/04)	0.00	320.85	
Semana (11/04-17/04)	0.00	320.85	
Semana (18/04-24/04)	0.00	320.85	
Semana (25/04-01/05)	336.29	320.85	-4.59%
Semana (02/05-08/05)	319.00	348.47	9.24%
Semana (09/05-15/05)	293.86	348.47	18.58%
Semana (16/05-22/05)	286.00	348.47	21.84%
Semana (23/05-29/05)	289.14	348.47	20.52%
Semana (30/05-05/06)	275.00	411.62	49.68%
Semana (06/06-12/06)	363.00	411.62	13.39%
Semana (13/06-19/06)	330.00	411.62	24.73%
Semana (20/06-26/06)	276.57	411.62	48.83%
Semana (27/06-03/07)	359.86	421.66	17.17%
Semana (04/07-10/07)	347.29	421.66	21.42%
Semana (11/07-17/07)	336.29	421.66	25.39%
Semana (18/07-24/07)	342.57	421.66	23.09%
Semana (25/07-31/07)	309.57	421.66	36.21%
Semana (01/08-07/08)	317.43	373.37	17.62%
Semana (08/08-14/08)	292.29	373.37	27.74%
Semana (15/08-21/08)	243.57	373.37	53.29%
Semana (22/08-28/08)	254.57	373.37	46.67%
Semana (29/08-04/09)	231.00	304.38	31.77%
Semana (05/09-11/09)	209.00	304.38	45.64%
Semana (12/09-18/09)	193.29	304.38	57.48%
Semana (19/09-25/09)	138.29	304.38	120.11%

Tabla 33. Comparación de las necesidades de agua diarias del regadío y el caudal bombeable para la finca 2, mostrando el superávit o déficit para cada semana. Elaboración propia

## 9.4. Estudio económico: solar vs grupo electrógeno o red

A continuación, calcularemos los costes para el sistema solar y sus equivalentes para alimentación de red o con grupo electrógeno, con el fin de obtener posteriormente el coste de la energía producida en €/kWh y comparar estas tres opciones.

### 9.4.1. Bombeo solar

#### 9.4.1.1. Inversión inicial

El bombeo solar requiere una inversión inicial relevante, por lo que algunos países en los que se quiere promover, cuentan con ayudas estatales de algún tipo. Recogemos a continuación los costes para los sistemas de nuestro caso práctico. Comentar que, aunque el coste/Wp de los módulos está en continua reducción, constituye menos del 40% del coste total del sistema y el resto son productos “*commodity*”, por lo que no se esperan reducciones de costes muy significativas de estos sistemas en los próximos años.

Descripción	Unidades	Precio unitario (€)	Precio total (€)
Modulo policristalino Jinko 255Wp 60 Cel. (1650x992x40)	40	204.00	8,160.00
Estructura Al suelo para 20 modulos 1600x1000. 2 filas de 10 modulos en vertical	2	920.00	1,840.00
Bomba SP 30-13 de Grundfos. 3 x 400	1	4,338.00	4,338.00
Sistema de bombeo solar directo SumSol, 11 kW llx400 mediante Variador Vacon. Incluye Filtro Senoidal IP 54, caja auxiliar de protecciones fusibles, seccionador y sobretensiones CC, funcionamiento en seco por software	1	3,143.00	3,143.00
Instalacion energia solar y bomba a pie de pozo	1	3,850.00	3,850.00
		<b>Total</b>	<b>21,331.00</b>
		<b>IVA (21%)</b>	<b>4,479.51</b>
		<b>Total con IVA</b>	<b>25,810.51</b>

Tabla 34. Desglose de costes del sistema solar para la finca 1. Datos cortesía de la empresa SUMSOL

Descripción	Unidades	Precio unitario (€)	Precio total (€)
Modulo policristalino Jinko 255Wp 60 Cel. (1650x992x40)	38	204.00	7,752.00
Estructura Etatrak Active 2000A de Lorentz (para 16 módulos)	1	2,680.00	2,680.00
Estructura Etatrak Active 1500A de Lorentz (para 12 módulos)	2	2,200.00	4,400.00
Bomba NK 40-200 206 de Grundfos. 3 x 400	1	4,129.00	4,129.00
Sistema de bombeo solar directo SumSol, 11 kW llx400 mediante Variador Vacon. Incluye Filtro Senoidal IP 54, caja auxiliar de protecciones fusibles, seccionador y sobretensiones CC, funcionamiento en seco por software	1	3,143.00	3,143.00
Instalacion energia solar y bomba a pie de depósito	1	4,650.00	4,650.00
		<b>Total</b>	<b>26,754.00</b>
		<b>IVA (21%)</b>	<b>5,618.34</b>
		<b>Total con IVA</b>	<b>32,372.34</b>

Tabla 35. Desglose de costes del sistema solar para la finca 2. Datos cortesía de la empresa SUMSOL y de *Suenergiasolar.com*

#### 9.4.1.2. Costes de operación

El coste de operación del bombeo solar es muy reducido: sólo un pequeño coste anual de mantenimiento preventivo/correctivo (consideraremos 0.5% del coste inicial para el sistema fijo y 1 % para el sistema con seguimiento) y la reposición del variador de frecuencia y de la bomba tras 10 años de funcionamiento.

#### 9.4.2. Bombeo con grupo electrógeno

##### 9.4.2.1. Inversión inicial

El bombeo con grupo electrógeno requiere una bomba de menor potencia que la necesaria para un sistema solar, ya que puede trabajar siempre a frecuencia nominal. Para el bombeo de la finca 1, las necesidades máximas de agua son 207 m<sup>3</sup>/día. Suponiendo una operación de 12 horas/día del grupo esto supone 17 m<sup>3</sup>/h para la bomba. Una bomba SP 17-8 de Grundfos, de 5.5 kW valdría, con un consumo eléctrico de 5.3 kW para este punto de operación.

Esta bomba puede arrancarse DOL (“*direct on line*”) en cuyo caso el grupo electrógeno tiene que aguantar el pico de corriente de arranque, lo que lleva a utilizar un grupo sobre-dimensionado (de 12.5 kW según [31] para bomba de 5.5 kW), que va a consumir más combustible durante la operación, lo cual no es recomendable. Por este motivo es mejor utilizar un arrancador suave con by-pass, para que quede conectada la bomba directamente al grupo una vez arrancada y no se añadan las pérdidas del arrancador durante la operación, y un grupo electrógeno para el que los 5.3 kW de la bomba sean un 75 % de carga nominal, con el fin de optimizar el consumo de combustible y no producir sobrecarga térmica del grupo por operación continuada a elevada temperatura ambiente.

El coste de un arrancador suave de este rango está en torno a 500 €, montado en cuadro en campo unos 700 €, el de un grupo diésel trifásico 3 x 400 Vac de 7 u 8 kVA de buena calidad en torno a 3500 € y el de la bomba en torno a 2600 €. La instalación de la bomba unos 600 € más. En total, incluyendo el IVA, 8300 €.

Para el bombeo de la finca 2, las necesidades máximas de agua son 363 m<sup>3</sup>/día. Suponiendo una operación de 12 horas/día del grupo esto supone 30 m<sup>3</sup>/h para la bomba. Una bomba NK 40-160/172 de Grundfos, de 7.5 kW valdría, que bombea 40 m<sup>3</sup>/h con un consumo eléctrico de 6.5 kW. En este caso es necesario operar la bomba con un variador de frecuencia, por tener ésta un motor de imanes permanentes, lo que introduce pérdidas adicionales de forma continuada. Si suponemos un rendimiento del 97% para el variador en este punto de operación, el consumo eléctrico ascenderá a 6.7 kW.

El coste de un variador de frecuencia de 7.5 kW con filtro senoidal, ambos para exteriores, está en torno a 2500 €. Hemos incluido filtro, porque, aunque no es requisito Grundos para una bomba de superficie, también lo habíamos incluido en el sistema solar. El coste de un grupo diésel trifásico 3 x 400 Vac de 10 kVA de calidad en torno a 4500 € y el de la bomba en torno a 3300 €. La instalación de la bomba unos 600 € más. En total, incluyendo el IVA, 13,189 €.



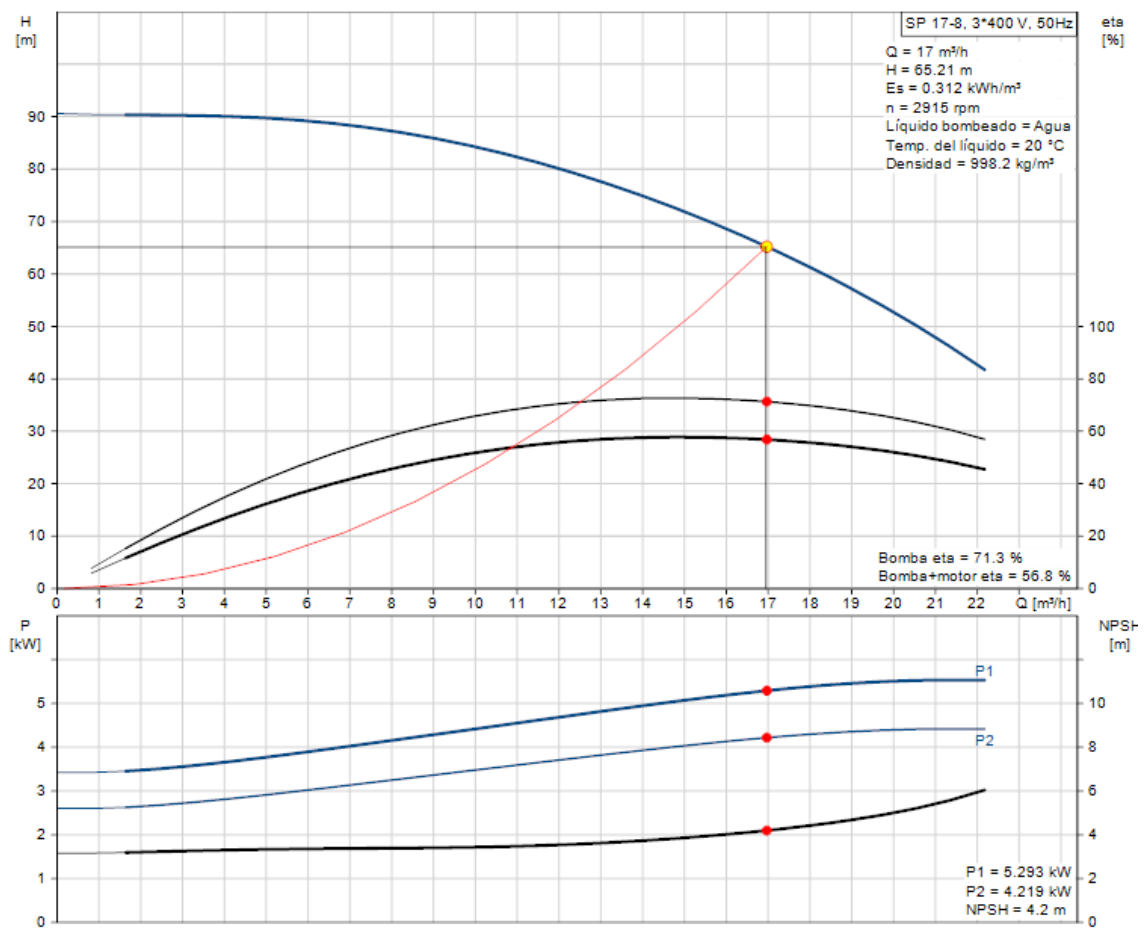


Ilustración 74. Curvas de la bomba SP 17-8 de Grundfos, para operación con grupo electrógeno. Fuente: [28]

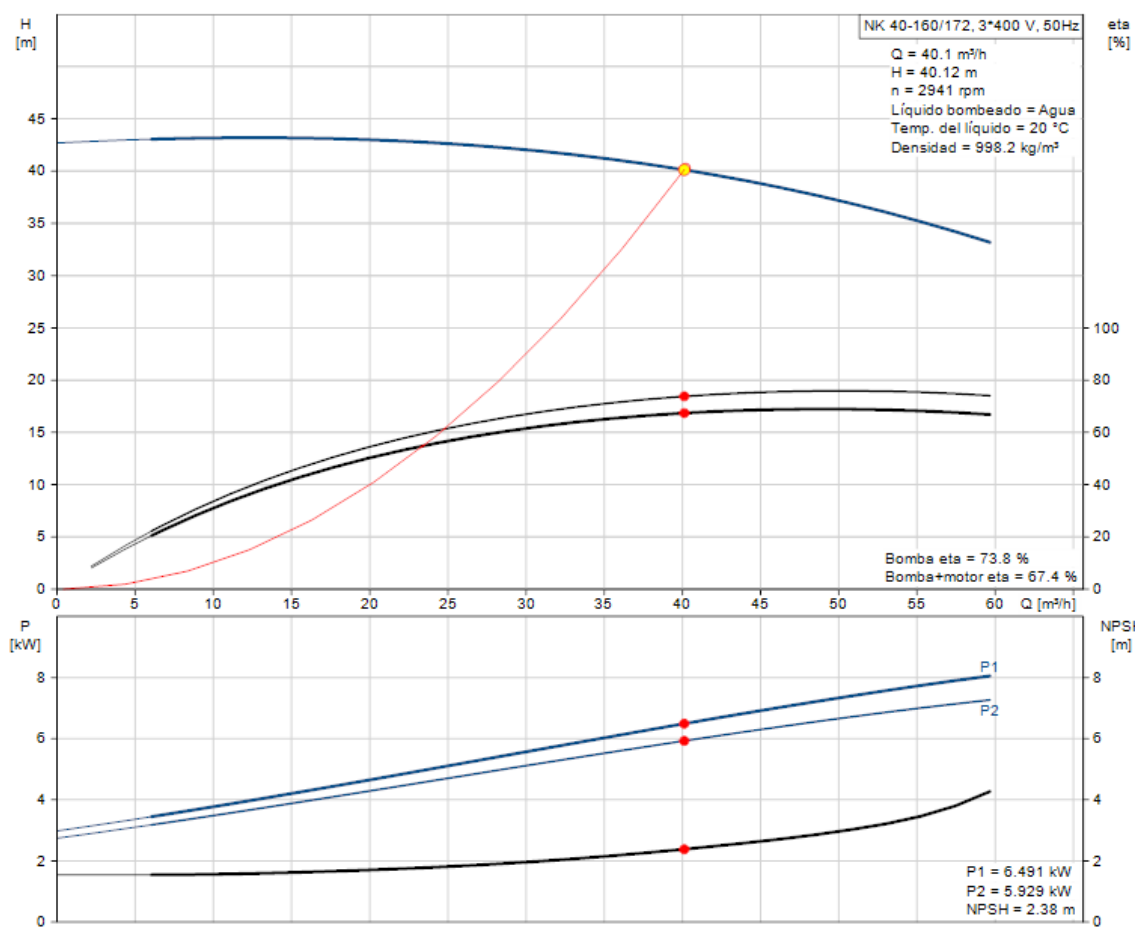


Ilustración 75. Curvas de la bomba NK 40-160/172 de Grundfos, para operación con grupo electrógeno.  
Fuente [28]

#### 9.4.2.2. Costes de operación

El consumo de combustible para grupos diésel de este rango de potencia está en torno a 0.35 l/kWh (para funcionamiento del grupo al 75 % de su potencia nominal, que es su óptimo). Esto supone un coste de combustible, si se utiliza gasóleo B (agrícola), a razón de 0.77 €/l al precio actual, en torno a 0.27 €/kWh. Consideraremos un incremento anual del precio del combustible de 5 %, por la tendencia actual al alza del mismo.

Las necesidades de riego de la finca 1 son, según la *Tabla 20*, de 503.2 mm para las 3 hectáreas de riego por goteo y de 276.2 para las 3 hectáreas de riego por aspersión. Esto hace un total de 23,400 m<sup>3</sup>/año de agua que, a razón de 17 m<sup>3</sup>/h suponen 1,376.5 horas de funcionamiento de la bomba. Estas horas de funcionamiento a razón de 5.3 kW de consumo eléctrico (ver *Ilustración 74*) suponen 7295.5 kWh/año y un coste de combustible de 1970 €/año.

Las necesidades de riego de la finca 2 son, según la *Tabla 24*, de 444.07 mm para las 10 hectáreas de riego por aspersión. Esto hace un total de 44,407 m<sup>3</sup>/año de agua que, a razón de 40 m<sup>3</sup>/h suponen 1,110.2 horas de funcionamiento de la bomba. Estas horas de funcionamiento a razón de 6.7 kW de consumo eléctrico, suponen 7,438.3 kWh/año y un coste de combustible de 2,008.4 €/año.

A esto hay que añadirle los costes de mantenimiento (aceite, filtros) y de reparación, que no son desdeñables en absoluto. Consideraremos un 10% anual del coste inicial del grupo electrógeno, en concepto de mantenimiento y reparaciones, en nuestros cálculos. La vida útil de un grupo diésel de calidad es de 5,000 horas si está bien cuidado, por lo que consideraremos su reemplazo cada 4 años. Adicionalmente consideraremos la reposición de la bomba sumergible, del arrancador suave/variador a los 10 años de operación.

#### 9.4.3. Bombeo con red eléctrica

##### 9.4.3.1. Inversión inicial

Si hay acceso a la misma no hay costes de inversión inicial. Si no la hay, los costes de extensión de la red son relevantes. Para una red aérea de 13.2 kV, por ejemplo, estos costes son, según [16], de 25,000 \$/km, lo que hace en muchas ocasiones inviable esta opción.

#### 9.4.3.2. Costes de operación

Son los propios de la facturación eléctrica. Existen, al menos en España, gastos dependientes del consumo, otros sólo dependientes de la potencia contratada y, adicionalmente impuestos, lo que hace que el coste de generación eléctrica (unos 6c€/kWh) no sea lo que realmente paga el consumidor, sino en torno a tres veces más. Consultando mi propia factura eléctrica he construido la *Tabla 36*, donde se recoge la facturación que tendrían que hacer frente los sistemas de bombeo de las fincas 1 y 2 si tuvieran las bombas y el consumo indicados para alimentación con grupo electrógeno en el capítulo 9.4.2, pero alimentados desde la red eléctrica.

	FINCA 1	FINCA 2	Unidad
Potencia contratada	5,50	7,50	kW
Consumo anual	7.295,50	7.438,30	kWh
<b>Facturación por potencia contratada</b>			
Importe peaje de acceso (38.04 €/kW)	209,22	285,30	€/año
Importe margen comercialización fijo (4 €/kW)	22,00	30,00	€/año
<b>Facturación por consumo</b>			
Importe por peaje de acceso (0.044 €/kWh)	321,00	327,29	€/año
Importe por coste de la energía (0.0619 €/kWh)	451,59	460,43	€/año
<b>Subtotal 1</b>	<b>1.003,81</b>	<b>1.103,02</b>	€/año
<b>Impuestos (sobre Subtotal 1)</b>			
Impuesto electricidad (5.1127 %)	51,32	56,39	€/año
Alquiler equipos de medida (0.026557 €/día)	9,69	9,69	€/año
<b>Subtotal 2</b>	<b>61,02</b>	<b>66,09</b>	€/año
<b>Total (Subtotal 1 + Subtotal 2)</b>	<b>1.064,83</b>	<b>1.169,10</b>	€/año
IVA (21 %)	223,61	245,51	€/año
<b>Total factura</b>	<b>1.288,44</b>	<b>1.414,61</b>	€/año
<b>Coste real energía (€/kWh)</b>	<b>0,18</b>	<b>0,19</b>	€/kWh

*Tabla 36. Coste real de la energía para alimentación del bombeo de la finca 1 y 2 desde la red eléctrica. Elaboración propia con datos obtenidos de factura eléctrica real de Unión Fenosa.*

#### 9.4.4. Comparativa

Para el cálculo de la ratio €/kWh, descontaremos a las otras opciones, los costes de inversión inicial de la opción más barata que es el bombeo con red: el coste de la bomba que se utilizaría para bombeo con red/grupo (que es de menor potencia que para el bombeo solar), incluyendo su instalación, el coste del arrancador suave/variador de frecuencia y las futuras reposiciones de ambos.

En la *Ilustración 76* y la *Ilustración 77* recogemos el coste acumulado de la opción solar y la opción con grupo diésel para un plazo de 20 años, así como el coste de la energía €/kWh para dicho periodo en ambos casos.

En ellas se aprecia que el bombeo solar, aunque tiene unos costes de inversión inicial superiores, presenta costes de operación y mantenimiento muy inferiores, con un umbral de rentabilidad (*“break even point”*) inferior en torno a 6 años.

Puede apreciarse que el coste de la energía es muy inferior para el caso solar (0.18 €/kWh y 0.22 €/kWh, respectivamente, frente a 0.64 €/kWh y 0.70 €/kWh del diésel) y similares a los de suministro desde la red eléctrica si no hay que realizar extensión de red, que hemos visto que eran de 0.18 y 0.19 €/kWh, respectivamente.

Los valores de 0.18 €/kWh y 0.22 €/kWh están, de todas formas, alejados de los valores que uno tiene en mente para sistemas fotovoltaicos conectados a red, en torno a 0.1 €/kWh, pero esta discrepancia se entiende bien si tenemos en cuenta que, en nuestro caso práctico:

- El bombeo solar sólo se utiliza 5 meses al año (la energía que podría producirse los otros 7 meses se desaprovecha)
- Existe un umbral de arranque superior al de un sistema conectado a red, por lo que la energía de primera hora de la mañana y la de la última hora de la tarde también se desaprovecha.
- Los sistemas son excedentarios durante muchas semanas, por lo que esta energía adicional que podría producirse también se desaprovecha.

Esta ratio €/kWh sería sensiblemente mejor para bombeos solares que operen la mayor parte del año, por ejemplo, para riego de invernaderos que tengan diferentes cultivos con necesidades de riego complementarias a lo largo del año. En este caso el bombeo solar sería más rentable que la alimentación de red. También sería más rentable en aquellos países con ratios €/kWh para consumo de red superiores al español y buen recurso solar, como Chipre, Australia, Italia o Sudáfrica.

Finca 1

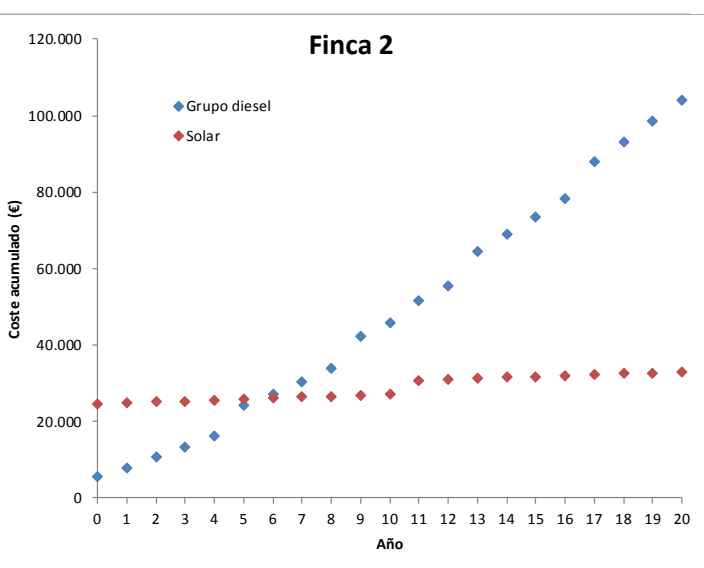
El gráfico muestra el coste acumulado en euros (€) a lo largo de 20 años para dos tipos de energía: Grupo diesel y Solar.

El Grupo diesel (línea azul con diamantes) muestra un coste que aumenta exponencialmente, partiendo de unos 3.000 € en el año 0 y alcanzando unos 93.000 € en el año 20.

El Grupo Solar (línea roja con diamantes) muestra un coste constante de unos 21.000 € durante todos los años.

Año	Grupo diesel (€)	Solar (€)
0	3.000	21.000
1	5.500	21.000
2	8.500	21.000
3	11.000	21.000
4	14.000	21.000
5	20.000	21.000
6	24.000	21.000
7	26.000	21.000
8	29.000	21.000
9	36.000	21.000
10	40.000	21.000
11	45.000	26.000
12	48.000	26.000
13	56.000	26.000
14	60.000	26.000
15	65.000	26.000
16	69.000	26.000
17	77.000	26.000
18	82.000	26.000
19	87.000	26.000
20	93.000	26.000

Finca 2				
	Con grupo		Solar	
Año	Coste	Acumulado	Coste	Acumulado
0	5.445,00	5.445,00	24.628,00	24.628,00
1	2.552,90	7.997,90	246,28	24.874,28
2	2.653,32	10.651,22	246,28	25.120,56
3	2.758,76	13.409,98	246,28	25.366,84
4	2.869,47	16.279,46	246,28	25.613,12
5	7.886,22	24.165,68	246,28	25.859,40
6	3.107,78	27.273,46	246,28	26.105,68
7	3.235,95	30.509,41	246,28	26.351,96
8	3.370,52	33.879,93	246,28	26.598,24
9	8.412,32	42.292,25	246,28	26.844,52
10	3.660,19	45.952,44	246,28	27.090,80
11	5.630,97	51.583,41	3.669,37	30.760,17
12	3.979,55	55.562,96	246,28	31.006,45
13	9.051,80	64.614,75	246,28	31.252,73
14	4.331,64	68.946,39	246,28	31.499,01
15	4.520,99	73.467,39	246,28	31.745,29
16	4.719,82	78.187,21	246,28	31.991,57
17	9.829,09	88.016,29	246,28	32.237,85
18	5.147,79	93.164,08	246,28	32.484,13
19	5.377,95	98.542,04	246,28	32.730,41
20	5.619,63	104.161,66	246,28	32.976,69
Energía generada (kWh/año)		7438,3	Energía ahorrada (kWh/año)	
		7438,3		
Coste de la energía para 20 años de funcionamiento (€/kWh)				
		0.70	0.22	



BOMBEO SOLAR CON VARIADORES DE FRECUENCIA PARA APLICACIONES DE REGADÍO  
ABRAHAM GONZÁLEZ PONCE

## 10. CONSIDERACIONES SOBRE LOS SISTEMAS HÍBRIDOS DE BOMBEO

### 10.1. ¿Red o grupo?

Los sistemas híbridos de bombeo (solar + red/grupo) incrementan la flexibilidad del regadío. El apoyo de red/grupo permite continuar el riego durante la noche o durante los períodos de irradiancia por debajo del umbral de arranque del bombeo solar, así como cubrir la demanda durante las operaciones de mantenimiento o averías del sistema solar.

Para estos sistemas, el generador fotovoltaico no se dimensiona para cubrir las necesidades de riego, sino desde la óptica del ahorro de costes de generación eléctrica, estando garantizada la fiabilidad de suministro por la hibridación de fuentes de generación. Esto permite considerar un generador fotovoltaico de menor potencia pico, sin superávit en ninguna semana, al contrario de lo que ocurría en nuestro caso práctico (recordar la *Tabla 30* y la *Tabla 33*), ya que la red/grupo permiten cubrir los posibles déficits en otras semanas.

Un sistema híbrido puede permitir instalar una bomba, un variador y un campo fotovoltaico de menor potencia, ya que la bomba puede estar funcionando de forma continuada a su frecuencia nominal durante más tiempo (para el caso práctico, podrían haberse utilizado las mostradas en la *Ilustración 74* y la *Ilustración 75*).

La hibridación con red es mucho más rentable que con grupo electrógeno, por tener una ratio €/kWh muy inferior. De hecho, el coste de cubrir los déficits de riego con un grupo electrógeno (tanto por la inversión económica en el mismo como por el consumo de combustible) podría no compensar en absoluto la reducción de coste de inversión inicial en bomba, variador y generador fotovoltaico, aunque esta afirmación requeriría de un análisis más detallado, que podría ser realizado en un futuro trabajo.

Para hibridación solar con red hay que tener en cuenta que el coste €/kWh es superior al calculado en la *Tabla 36*, porque parte de la facturación es independiente del consumo. Así, por ejemplo, los mismos sistemas de dicha tabla, con un 60% menos de consumo, tendrían unas ratios de 0.24 y 0.28 €/kWh para consumo de red, respectivamente.

La respuesta a la pregunta del título sería, según lo expuesto: Mejor red.

## 10.2. ¿Funcionamiento conmutado o simultáneo?

Ambos funcionamientos comparten las ventajas que hemos expuesto en el capítulo 10.1. El funcionamiento simultáneo (solar asistido) añade además estabilidad del proceso de riego en caso de, por ejemplo, condiciones de nubes y claros, y permite operar en todo momento en las condiciones óptimas del sistema de riego, desligando la operación de las condiciones de recurso solar.

Sin embargo, el modo solar asistido tiene inconvenientes importantes. En primer lugar, requiere incorporar un diodo (y sus pérdidas asociadas de forma continua) entre el generador fotovoltaico y el variador de frecuencia para evitar el flujo inverso de energía hacia los paneles (por ejemplo, durante la noche).

Más importante aún es que el generador fotovoltaico no puede operarse con un control MPPT, ya que la tensión del bus DC la va a determinar la tensión AC de red/grupo electrógeno. La consecuencia va a ser un punto de operación en tensión del generador fotovoltaico alejado de  $V_{mp}$  en muchos momentos. Esto va a introducir unas pérdidas de eficiencia en el funcionamiento de la parte solar apreciables, aunque diseñemos el generador fotovoltaico convenientemente para minimizarlo, instalando un generador fotovoltaico cuya  $V_{mp}$  a una temperatura determinada (la  $T_{ONC}$ , por ejemplo) coincida con la tensión DC esperada para la tensión de red/grupo nominal. El cálculo de las pérdidas energéticas en el generador fotovoltaico asociadas a este modo de operación requeriría una modelización del mismo más compleja que la descrita en el capítulo 8, que tuviera en cuenta la variación de la curva P-V en su conjunto a lo largo del día, que podría ser parte de un futuro trabajo.

Esta forma de operación es menos eficiente que la obtenida con cualquiera de los algoritmos de control que hemos explicado en el capítulo 6.4.3.1, incluso que el de tensión DC fija mediante PID sin corrección de temperatura, ya que a la variación de  $V_{mp}$  con la temperatura y con la irradiancia, le añadimos en este caso la variación incontrolada del punto de trabajo por la propia variación tensión de red/grupo electrógeno.



En el caso de solar asistido por grupo electrógeno añadimos el inconveniente de una menor eficiencia del grupo (mayor consumo de combustible por kWh), por operar a potencias inferiores al 75 % de su nominal, en muchos momentos. Esto, unido al elevado coste €/kWh de la generación diésel y al menor rendimiento del generador fotovoltaico, hacen que el funcionamiento solar asistido por diésel no sea en absoluto rentable desde el punto de vista económico.

La respuesta a la pregunta del título de este segundo capítulo sería: Mejor conmutado que simultáneo, salvo que la estabilidad del punto de operación del sistema de riego sea crítica.

## 11. CONCLUSIONES

El bombeo solar para riego agrícola es un mercado en fuerte expansión, por unas necesidades cada vez mayores de bombeo de agua para regadío (por la presión sobre las aguas superficiales y la pérdida de calidad de las mismas) y por un coste muy inferior de la energía producida (€/kWh) comparado con la generación diésel. Este menor coste de la energía le hace ser la opción más atractiva a la hora de instalar nuevos sistemas en emplazamientos sin acceso a la red eléctrica y también a la hora de sustituir sistemas de bombeo existentes con grupo electrógeno que hayan llegado al final de su vida útil, como promueven planes gubernamentales en países como la India.

Aunque la mayor cuota de mercado en número de sistemas sigue siendo el bombeo DC, el bombeo AC con variadores de frecuencia va ganando cuota de mercado, ya que los bombeos son cada vez de mayor potencia para compensar el descenso del nivel freático por la explotación de los acuíferos.

El desarrollo del bombeo solar debería combinarse con un uso más racional del agua y los fertilizantes y, por tanto, ir de la mano del desarrollo de la micro-irrigación.

El hecho de que, para muchas localizaciones, los sistemas de bombeo solar para regadío se utilicen sólo durante la época estival, juega en contra de su rentabilidad, aunque aun así tienen un coste/kWh muy similar al de la red eléctrica. El bombeo solar es más competitivo que la red en los casos siguientes:

- Uso del bombeo durante todo el año: consumo humano/animal o cultivos combinados en invernadero con necesidades de riego complementarias.
- Necesidad de extensión de la red eléctrica o falta de fiabilidad de la misma.
- Costes de red €/kWh superiores a los de España (Chipre, Australia, Italia, Sudáfrica)

En el capítulo 10 hemos visto que la hibridación solar con grupo electrógeno podría no estar justificada porque, a todos los inconvenientes de los grupos electrógenos detallados en el capítulo 2.2, se une una más que dudosa rentabilidad económica (incluso para funcionamiento conmutado), por sus elevados costes de generación. La hibridación con red puede estar justificada en muchos casos, sobre todo cuando la redundancia y garantía de suministro

son relevantes, permitiendo cierta reducción en los costes de inversión inicial. Hemos visto también que esta hibridación con red es mejor realizarla con funcionamiento conmutado, reservando el funcionamiento simultáneo para los casos en que la estabilidad del punto de operación del sistema de riego sea crítica.

## 12. AGRADECIMIENTOS

A Ángel Martínez Romero, de la Universidad de Castilla la Mancha, no sólo por su ayuda en la interpretación de los datos del SIAR utilizados para la elaboración del caso práctico, sino también por sus valiosos consejos a la hora de plantear el caso práctico de una forma lo más realista posible en cuanto a cultivos y sistemas de regadío.

A David Manso López, de la empresa SUMSOL, por su ayuda en el estudio económico y de amortización de los sistemas solares planteados.

A Miguel Alonso Abella, del CIEMAT, pionero en el campo del bombeo solar con variadores de frecuencia, no sólo por haber construido el modelo usado en el presente trabajo para el cálculo del caudal de agua diario, sino también por ayudarme a interpretarlo y entenderlo en aquellos puntos que no me quedaban claros.

A mis compañeros de Danfoss Drives:

Jesús de Porres, David Saiz, Mads Warming y Finn Flugt Jonasson por sus interesantes puntos de vista sobre el mercado del bombeo solar: necesidades de los clientes, actuales y futuras, nuevas tendencias, productos, etc.

Fernando Rejas, Antonio Mohedano y Joan Rubiralta, siempre dispuestos a darme soporte sobre aspectos técnicos de los variadores de frecuencia y otros productos asociados, cuando me ha sido necesario.

A mi mujer, Cristina y a mi hijo David, por su paciencia y tolerancia durante el largo proceso de elaboración de este trabajo.

### 13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] SANTOS PEREIRA, L.; DE JUAN VALERO, J.A.; PIRCONELL BUENDÍA, M.R.; TARJUELO MARTÍN-BENITO, J.M. (2010). *El riego y sus tecnologías*, Centro Regional de Estudios del Agua, Universidad de Castilla-La Mancha.
- [2] GRUNDFOS. *Irrigation pump handbook*
- [3] ALONSO ABELLA, M.; LORENZO, E; CHENLO, F. *PV Water Pumping Systems Based on Standard Frequency Converters*. Artículo en Progress in Photovoltaics Research and Applications. Mayo 2003
- [4] (Coord.) LOP, A. F.; PEITEADO, C.; BODAS, V. (2005) *Curso de riego para agricultores*. WWF/Adena.
- [5] BERMEJO, J. (2011). *Diseño paso a paso de un sistema de riego por goteo en una parcela real, partes 1 y 2*. Posts publicados en Agrológica: <http://blog.agrolologica.es/disenio-paso-a-paso-de-un-sistema-de-riego-por-goteo-en-una-parcela-real/>
- [6] NEIBLING, H.; ROBBINS, J.A. *Equipment Selection and Sizing for Sprinkler and Drip Irrigation*
- [7] RECHE MÁRMOL, J. (1994): *Limpieza y mantenimiento de las instalaciones de riego por goteo*, Hojas divulgadoras 8-9/93 HD, Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.
- [8] LÓPEZ PERALES, J.A. et al. *Pérdidas de carga localizadas o accidentales*. Tema de la Asignatura de Hidráulica, Escuela de Ingenieros Agrónomos. Universidad de Castilla-La-Mancha
- [9] SIAR CASTILLA-LA MANCHA (2005). *Fertirrigación*. Hoja informativa nº 11
- [10] US DEPARTMENT OF AGRICULTURE. NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (2010). *Variable Speed Drive (VSD) for Irrigation Pumping*. Engineering Technical Note No. MT-14.
- [11] KOVADIA, K. (2014). *Market potential for solar water pumping system and cost benefit analysis of diesel vs. solar pump*.
- [12] KRANZ, W. L.; IRMAK, S.; MARTIN D. L., YONTS C.D. (2007). *Flow Control Devices for Center Pivot Irrigation Systems*

- [13] PVSYST. Ayuda del SW. Apartados: *Pumping: Borehole modelling. Pumping: Deep well system. Pumping: Lake or River to Storage.*
- [14] GRAN VIEW RESEARCH (2016). *Solar pumps market analysis and segment forecasts to 2022.*
- [15] MARKETSANDMARKETS (2016). *Microirrigation systems market report*
- [16] CHUECO FERNÁNDEZ, F. J.; BAYOD RÚJULA, A.A. *Comparación de soluciones para suministrar energía a sistemas de bombeo en el norte de Chile: extensión de la red eléctrica, generadores diésel y fotovoltaica.*
- [17] THE IRRIGATION ASSOCIATION, US. *Watching every drop. The irrigation industry.*
- [18] TORO AG IRRIGATION. *Catálogo riego agrícola 2014.*
- [19] BARGMEYER J., BURGHARDT M., HANIGOVSKI N., HANSEN M. L., JENSEN A.H., JENSEN J.W., SEEKJAR H., TATARU-KJAR A.M., ZARE F. (2014). *Facts Worth Knowing about Frequency Converters. Editado por DANFOSS DRIVES.*
- [20] DANFOSS DRIVES (2014). *Engineering Guide VLT® AQUA Drive FC 200*
- [21] DANFOSS DRIVES (2014). *Design Guide VLT® AQUA Drive FC 202, 0.25-90 kW.*
- [22] DANFOSS DRIVES (2015). *Fact Sheet VLT® dU/dt Filter MCC 102*
- [23] DANFOSS DRIVES (2015). *Fact Sheet VLT® Sine-wave Filter MCC 101*
- [24] MOHEDANO, A.; REJAS, F. (2015). *Ficha de aplicación–Bombeo solar empleando convertidores de frecuencia VLT. Danfoss Drives*
- [25] *Pérdidas de carga en tuberías de PVC/PE.*  
<http://www.gruposdepresion.info/documents/perdidas-de-carga-en-tuberia-pcv-pe-gal.pdf>
- [26] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS)  
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

- [27] CENTRO REGIONAL DE ESTUDIOS DEL AGUA (CREA), SERVICIO INTEGRADO DE ASESORAMIENTO AL REGANTE (SIAR), UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA-MANCHA (UCLM). *Resumen necesidades netas de agua desde 04/04. Campaña 2014. Zona regable de Hellín-Tobarra*
- [28] GRUNDFOS PRODUCT CENTER  
<https://product-selection.grundfos.com>
- [29] <http://edafologia.net/>
- [30] <http://elriego.com/informacion-tecnica/tablas/>
- [31] GRUNDFOS. *SP Engineering manual*
- [32] GRUNDFOS. *Catálogo bombas Monobloc de aspiración axial NB, NBE, NK, NKE*
- [33] GRUNDFOS. *Data booklet. SQFlex. Renewable-energy-based water supply systems*
- [34] UNIVERSIDAD DE SEVILLA, OPENCOURSEWARE. *Curso de Ingeniería agroforestal » hidráulica y riegos » tema 10: riego por goteo » tutorial\_06*
- [35] DANFOSS DRIVES (2015). *Selection guide VLT® AQUA Drive FC 202.*
- [36] SMA. *Corriente inversa. Indicaciones para el dimensionamiento de generadores en instalaciones fotovoltaicas con Sunny Mini Central*
- [37] RUIZ CANALES, A.; MOLINA MARTÍNES, J.M.; CANCELA BARRIO, J.J.F.; FANDIÑO BEIRO, M. *Empleo de programadores para la gestión del riego.*