

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA
Master en Ingeniería Agronómica



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE BOMBEO DE INYECCIÓN DIRECTA A REDES COLECTIVAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Septiembre 2016

Autora: Yolanda Rocamora Mora

Tutores: Ricardo Abadía Sánchez

Carmen Rocamora Osorio

REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

Título: Optimización energética de bombes de inyección directa a redes colectivas de distribución de agua.

Title: Energy optimization of direct injection pumps collective water distribution networks.

Modalidad (proyecto/experimental): Experimental

Type (project/research): research

Autor/Author: Yolanda Rocamora Mora

Director/es/Advisor: Ricardo Abadía Sánchez y Carmen Rocamora Osorio.

Convocatoria: 1^º convocatoria

Month and year: Septiembre de 2016

Número de referencias bibliográficas/number of references: 17

Número de tablas/Number of tables: 23

Número de figuras/Number of figures: 74

Número de planos/Number of maps: 0

Palabras clave (5 palabras): bombas; distribución de caudales; riego; energía; presión; potencia.

Key words (5 words): pumps; flow distribution; irrigation; energy; pressure; power.

RESUMEN:

En este trabajo se ha realizado un estudio de optimización energética de bombeos de inyección directa a redes colectivas de distribución del agua. Para ello, se ha utilizado tres sistemas de regulación de bombeo y dos curvas de frecuencias de caudales de tiempos de riego para cultivos hortícolas y arbóreos. Con estos parámetros se ha realizado una simulación en un banco de ensayos y se ha realizado un análisis comparativo tanto de los sistemas de regulación de bombeo como de las curvas de frecuencias de caudales, para ver la combinación que optimiza el consumo energético de bombeo de inyección directa a redes colectivas de distribución del agua. El sistema de regulación de bombeo más eficiente es el compuesto por tres bombas de velocidad variable, en comparación con los sistemas de regulación de dos bombas de velocidad variable y una bomba de velocidad fija y el de una bomba de velocidad variable y dos bombas de velocidad fija tanto para caudales de tiempo de riego para cultivos hortícolas como para cultivos arbóreos. Además, la distribución de caudales también es un factor que influye en la optimización del consumo energético, siendo los caudales de tiempo de riego más largo los más eficientes.

ABSTRACT:

This paper has conducted a study of energy optimization of direct injection pumps collective water distribution networks. To do this, we used three control systems and two curves pumping frequency flows runtimes for horticultural and tree crops. With these parameters was performed a simulation on a test bench and performed a comparative analysis of both regulatory systems pumping as the frequency curves flow, to see the combination that optimizes the energy consumption of pumping injection direct collective water distribution networks. The most efficiency regulation pumping system is composed of three variable speed pumps, compared to other two control systems, two variable speed pump and a constant speed pump and one variable speed pump and two constant speed pumps. for both flow discharge pattern, horticultural crops and tree crops. Furthermore, the distribution of flow is also a factor in the optimization of energy consumption, with the flow of time longer more efficient irrigation.

TRABAJO FIN DE MÁSTER. MÁSTER INGENIERÍA AGRONÓMICA

TÍTULO: OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE BOMBEO DE INYECCIÓN DIRECTA A REDES
COLECTIVAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA MODERNIZACIÓN DE REGADÍO.....	1
1.3. INFRAESTRUCTURA DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA	4
1.3.1. Esquema general.....	4
1.3.2. Obras de captación.....	4
1.3.3. Balsas de almacenamiento y/o regulación.....	4
1.3.4. Estaciones de bombeo.....	5
1.3.5. Estaciones de filtrado.....	5
1.3.6. Red de Tuberías.....	5
1.3.7. Válvulas.....	5
1.3.8. Ventosas.....	6
1.3.9. Accesorios.....	6
1.3.10. Tomas riego en parcela.....	6
1.3.11. Medidores de consumo de los regantes.....	6
1.3.12. Medidores de presión y de caudal.....	6
1.3.13. Equipos de control automático del sistema.....	6
1.3.14. Sistemas de transmisión de señales.....	6
1.3.15. Centro de control.....	6

1.4. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUAS EN REDES COLECTIVAS DE RIEGO	7
1.4.1. Distribución por turnos	7
1.4.2. Distribución a la demanda restringida	7
1.4.3. Distribución a la demanda	7
1.4.4. Curvas de consigna de redes de riego.....	8
1.5. FUNCIONAMIENTO DE ESTACIONES DE BOMBEO.....	11
1.5.1. Curvas características.....	12
1.5.2. Asociación de bombas.....	14
1.5.3. Sistemas de regulación de bombeos.....	16
1.5.4. Diseño y cálculo de estaciones de bombeo.....	17
1.6. AUTOMATIZACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCION.....	23
1.6.1. Características de los autómatas programables.....	24
1.6.2. Automatizaciones de inyecciones directas a red.....	26
1.7. COSTE ENERGÉTICO EN REGADÍO	29
1.7.1. Tarifas eléctricas.....	29
1.7.2. Tarifa de acceso.....	30
1.7.3. Peaje de acceso	35
1.7.4. Causas del incremento del coste energético.....	37
1.7.5. El ahorro energético en las comunidades de regantes	38
2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO.....	40
2.1. PLAN DE TRABAJO	41
3. METODOLOGÍA.....	44
3.1. BANCO DE ENSAYOS	44
3.1.1. Sistema de bombeo.....	45
3.1.2. Tuberías	50
3.1.3. Válvulas	51
3.1.4. Accesorios.....	55
3.1.5. Automatización	56
3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS	58
3.2.1. Contador chorro múltiple	58
3.2.2. Transductores de presión	60

3.2.3.	<i>Caudalímetro electromagnético.....</i>	<i>61</i>
3.2.4.	<i>Variadores de frecuencias.....</i>	<i>61</i>
3.3.	<i>DISEÑO DE LOS ENSAYOS REALIZADOS</i>	<i>64</i>
3.3.1.	<i>Programación de apertura y cierre de tomas</i>	<i>64</i>
3.3.2.	<i>Curvas características.....</i>	<i>65</i>
3.3.3.	<i>Presión consigna.....</i>	<i>66</i>
3.3.4.	<i>Sistema de regulación de la estación de bombeos</i>	<i>67</i>
3.3.5.	<i>Introducción y recogida de datos con el PLC.....</i>	<i>70</i>
3.3.6.	<i>Energía consumida y coste energético.....</i>	<i>75</i>
3.4.	<i>ANÁLISIS DE RESULTADOS</i>	<i>76</i>
4.	<i>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i>	<i>81</i>
4.1.	<i>CURVAS DE FRECUENCIA DE CAUDAL DIARIO DISTRIBUIDO y HORARIO DE APERTURA Y CIERRE DE TOMAS.....</i>	<i>81</i>
4.1.1.	<i>Curvas de frecuencia de caudal diario distribuido</i>	<i>81</i>
4.1.2.	<i>Horario de apertura y cierre de tomas.....</i>	<i>82</i>
4.2.	<i>CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS</i>	<i>86</i>
4.3.	<i>PRESION DE CONSIGNA Y CURVA DE CONSIGNA DE LA RED.....</i>	<i>89</i>
4.4.	<i>RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS</i>	<i>91</i>
4.4.1.	<i>Curvas altura caudal y rendimiento caudal</i>	<i>91</i>
4.4.2.	<i>Distribución de caudal.....</i>	<i>94</i>
4.4.3.	<i>Gráficos de curvas potencia-caudal</i>	<i>97</i>
4.4.4.	<i>Gráficos de curvas rendimiento-caudal.....</i>	<i>99</i>
4.4.5.	<i>Gráficos de curva potencia-tiempo</i>	<i>101</i>
4.4.6.	<i>Gráficos de curva de energía acumulada-tiempo.....</i>	<i>103</i>
5.	<i>CONCLUSIONES.....</i>	<i>109</i>
6.	<i>BIBLIOGRAFÍA.....</i>	<i>111</i>



1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El consumo energético en regadío ha se ha incrementado en los últimos 8 años de forma significativa, por lo que es uno de los puntos críticos en la viabilidad de los regadíos modernizados, en los que se distribuye el agua a presión. Este consumo se centra en las instalaciones de bombeo que abastecen a los sistemas de riego a presión, siendo más relevante por su magnitud, en las redes colectivas de distribución de agua a de riego presión.

En este trabajo se aborda la optimización del consumo energético de estaciones de bombeo de redes colectivas de distribución de agua a presión.

El trabajo se presenta como Trabajo Fin de Master, necesario para la obtención del título de Master en Ingeniería Agronómica.

1.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA MODERNIZACIÓN DE REGADÍO

La modernización de regadíos es un instrumento fundamental para conseguir un uso más racional y eficiente del agua. España presenta un régimen de precipitaciones irregular en el tiempo y en el espacio por lo que la introducción de las tecnologías de riego presurizado permite disminuir las pérdidas en las conducciones, aseguran una detección precoz de las fugas y contribuyen a mejorar la planificación de la distribución de los recursos hídricos por lo que, se consigue aumentar la eficiencia en la distribución y aplicación del agua.

En los últimos años, los planes de modernización de los regadíos estatales se trazaron como parte de un cambio desde una política de ofrecer agua (más embalses, más canales) hacia una política de gestión de la demanda, basada en un uso del recurso más eficiente, ya regulado. Estos planes de ayuda son los siguientes:

- Plan Nacional de Regadíos horizonte 2008.
- Plan de Choque de Modernización de Regadíos 2006-2008.
- Plan de Regadíos Sostenibles 2008-2013. (PRS).
- Estrategia de Modernización Sostenible, horizonte 2015

El Plan nacional de regadíos con horizonte 2008 (MARM, 2008) y el Plan de Choque 2006 (PC, 2006), han tenido como objetivo la modernización de la tecnología de riego en unos 1,3 millones de hectáreas, con el fin último de ahorrar unos 3.100 hm³ de agua. En total estos dos planes han contado con un presupuesto del orden de unos 7.000 millones de euros durante los últimos 10 años (*López-Gunn et al., 2012*).

El plan (PNR, 2008) se centró en modernizar los sistemas de riego desde el embalse hasta la parcela, para mejorar el control sobre el agua utilizada. Durante la sequía de 2005-2008 se aprobó el Plan de Choque para la modernización de regadíos, añadiendo el incremento de los recursos hídricos para el medio ambiente a los objetivos de la modernización. Ambos planes fueron desarrollados mayoritariamente con fondos públicos y por agencias estatales (SEIASA).

El Plan de Regadíos Sostenibles 2008-2013 (PRS) surgió como instrumento de gestión y planificación de los regadíos en el periodo 2008-2013, cuyos principales objetivos eran la modernización y el ahorro de agua en el marco de sostenibilidad definido por las directrices de tipo medioambiental, social y económicas.

Horizonte 2015 (ENMSRH 2015), ampliándose ligeramente en los objetivos fijados en el PRS pero con el mismo objetivo de dar respuesta a las necesidades de modernización del regadío, optimizando el ahorro de agua, la transferencia de tecnología, el fomento de la utilización de recursos hídricos alternativos y la eficiencia energética, así como posibilitando los mecanismos de adaptación de la actividad a la actual realidad ambiental, social y económica.

La modernización ha seguido un cambio paulatino pero sostenido de las técnicas de riego. En la tabla 1 y Figura 1, se muestra la situación actual de los tipos de regadío en España. En esta tabla la superficie de riego localizado incluye la superficie bajo invernadero y en la superficie regada total, se han excluido las superficies regadas de chopo y prados.

Tabla 1. Tipos de regadío en España. Año 2015. Fuente: ESYRCE Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Tipos de Regadío	Superficie ha	Superficie %
Gravedad	978125	26,89728831
Aspersión	558834	15,36727843
Automotriz	306272	8,422120165
Localizado	1792911	49,30294603
Sin información y otros	377	0,010367057
	3636519	100

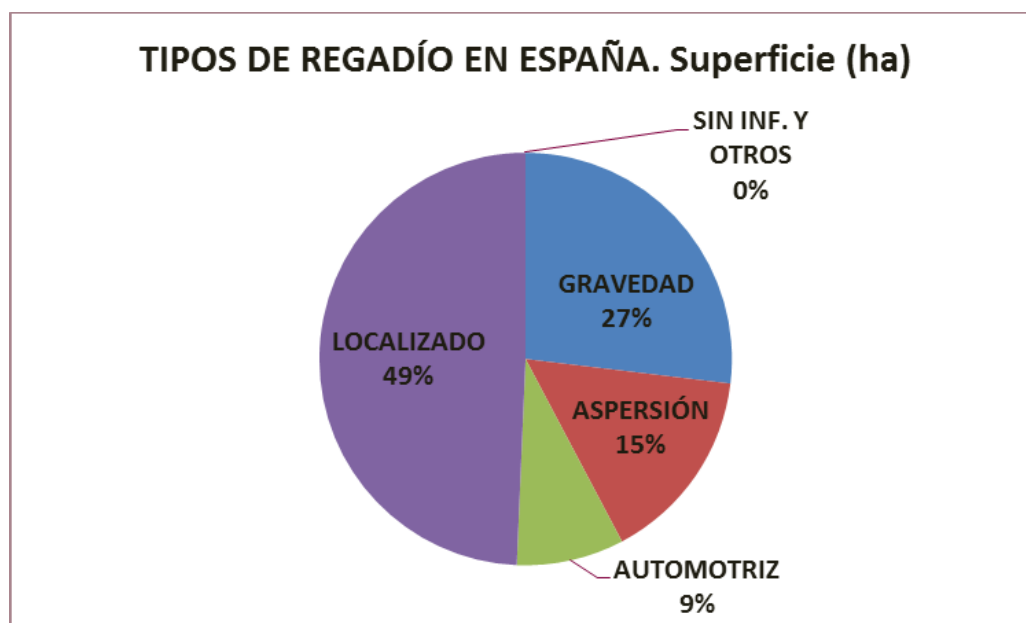


Figura 1. Tipos de regadío en España. Fuente: propia, a partir de datos oficiales de Magrama, año 2015.

Fruto de los planes de modernización de regadíos y el uso eficiente del agua, se muestra en los datos recopilados del ministerio (MAGRAMA, 2012), un incremento continuo en la superficie regada en España, que pasa de 3.367.486 hectáreas en 2002 a 3.605.121 hectáreas en 2014, mientras que el volumen de agua de riego utilizado en el sector agrario muestra una marcada tendencia a la baja, al descender de 17.681 hectómetros cúbicos en 1999 a 15.833 en 2012.

Estos datos son el resultado de las actuaciones de los diferentes tipos de planes de modernización de regadíos a lo largo de esta última década y la eficiencia del uso del agua, tanto por la mejora de la gestión de los recursos hídricos a través de las obras realizadas, como por la tendencia de sistemas de riego más eficientes.

1.3. INFRAESTRUCTURA DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA

1.3.1. Esquema general

En la Figura 2, se puede observar el esquema general de las obras e instalaciones que componen un regadío modernizado. A continuación, se detalla cada uno de los componentes de los sistemas de distribución del agua.

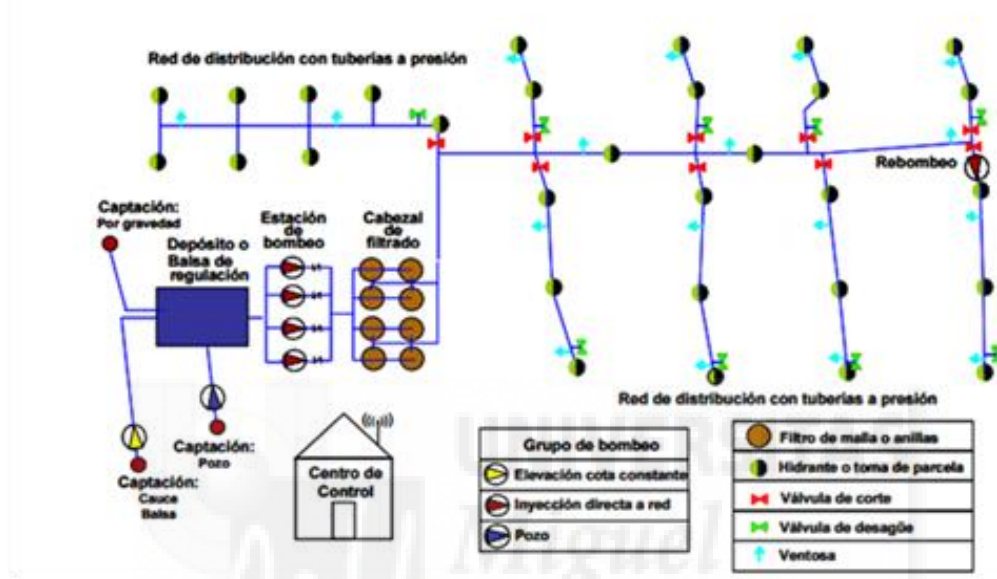


Figura 2. Esquema general de la infraestructura de un regadío modernizado. Fuente: Abadía Sánchez, R. (2015).

1.3.2. Obras de captación

Pueden ser canales de derivación, pozos, estaciones de bombeo, tuberías, etc., sirven para derivar el agua desde el punto de suministro hasta las balsas de almacenamiento y/o regulación.

1.3.3. Balsas de almacenamiento y/o regulación

Sirven para regular los volúmenes de agua suministrados a la zona regable, adecuándolos a las demandas de riego. Las balsas de almacenamiento almacenan el agua en los meses de baja demanda hídrica poder disponer de ella en los meses de máxima demanda. Las balsas de regulación sirven para adecuar el consumo energético a las tarifas más económicas, almacenando agua en las horas valle, para que sea distribuida desde la balsa por gravedad en horas punta.

1.3.4. Estaciones de bombeo

Sirven para suministrar la presión demandada en los puntos de consumo para abastecer a los sistemas de riego en parcela (aspersión y goteo). En caso de zonas con desniveles topográficos favorables, no son necesarias.

1.3.5. Estaciones de filtrado

Se emplean sobre todo en redes que alimentan a sistemas de riego por goteo, para suministrar el agua filtrada a los regantes. No obstante, es conveniente que cada regante instale un filtro de seguridad a la entrada a su parcela, para evitar posibles impurezas que puedan entrar a la red en caso de averías.

1.3.6. Red de Tuberías

Unen los puntos de almacenamiento con los puntos de consumo. Los materiales más empleados son el PVC, el polietileno y el fibrocemento. Este último ha sido ampliamente utilizado en tuberías de gran diámetro, aunque está siendo sustituido por tuberías de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), ya que su comercialización ha sido prohibida desde el 15 de junio de 2002, mediante la orden ministerial de 7 de diciembre de 2001 por la que se modifica el anexo I del Real Decreto 1406/1989, de 10 de noviembre.

1.3.7. Válvulas

Las más comunes son válvulas de regulación, de control y operación, y válvulas de protección. Las válvulas de regulación pueden ser: a) limitadoras de caudal, que se instalan en los hidrantes; b) reductoras de presión, que se instalan en puntos con elevada presión en redes cuya presión provenga del desnivel topográfico, así como en los hidrantes con exceso de presión; c) sostenedoras de presión que se instalan en puntos altos de la red que se queden sin presión cuando el caudal de la red es elevado. Las válvulas de control suelen ser válvulas de mariposa que se instalan al inicio de cada una de las ramas principales de la red, y sirven para aislar el tramo de la red que protegen en caso de avería. Asociada a cada una de estas válvulas deben instalarse en el ramal que protegen, una válvula de desagüe en el punto más bajo del ramal. Las válvulas de protección suelen ser válvulas antiarriete, como válvulas de alivio rápido o anticipadoras de onda y se instalan aguas debajo de las estaciones de bombeo.

1.3.8. Ventosas

Empleadas para la eliminación de aire en el interior de las conducciones. Se deben instalar en todos los puntos de las redes de distribución en los que hay un máximo relativo en el perfil de la tubería, o al menos cada 600 metros de tramo de tubería.

1.3.9. Accesorios

Tes, codos, reducciones, ampliaciones, juntas, etc.

1.3.10. Tomas riego en parcela

Suministran el caudal y la presión demandada por los sistemas de riego instalados en las parcelas de cultivo y están formadas por hidrantes que suelen incorporar, además, un reductor de presión y un limitador de caudal.

1.3.11. Medidores de consumo de los regantes

Se utilizan contadores que están incorporados en los hidrantes.

1.3.12. Medidores de presión y de caudal

Equipos de medida en diferentes puntos de la red.

1.3.13. Equipos de control automático del sistema

Empleado normalmente para la apertura y cierre de válvulas e hidrantes, así como para la lectura de los contadores. Está formado por autómatas programables.

1.3.14. Sistemas de transmisión de señales

Vía cable telefónico, vía cable propio, vía radio o vía telefonía móvil GSM.

1.3.15. Centro de control

Es el centro operativo desde donde se albergan los ordenadores de gestión y control de todo el sistema.

1.4. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUAS EN REDES COLECTIVAS DE RIEGO

1.4.1. Distribución por turnos

La distribución por turnos, con duración del turno igual al tiempo disponible para regar, da lugar a la red más económica en cuando a dimensionado, pero por otro lado es la que tiene menores prestaciones, ya que exige al regante a realizar su riego en el turno fijado, y en caso de no realizarlo, no tiene posibilidad de realizarlo a otra hora. El horario de riego es más restringido.

1.4.2. Distribución a la demanda restringida

Un caso intermedio de organización es la demanda restringida. En este tipo de organización se asigna a unos hidrantes a un turno (días pares o días impares; mañanas o tardes, etc.) de una duración mucho mayor que su tiempo de riego, es decir, con un grado de libertad, dentro del turno superior a 1. De esta forma el regante tiene una libertad de riego aceptable, y al mismo tiempo el caudal de diseño se reduce considerablemente. Esta es la opción que más se está empleando en el diseño de redes del levante y sureste español.

1.4.3. Distribución a la demanda

El método más conocido del cálculo de caudales a la demanda, es el método de Clement.

En este caso, estarían las redes con una distribución a la demanda con una garantía de suministro del 100%, es decir, capaces de abastecer a todos los usuarios al mismo tiempo. Este tipo de organización daría lugar a la red más cara y con mayores diámetros de tuberías, pero es la de máximas prestaciones ya que permitiría que los regantes regasen cuando ellos decidieran. No obstante, basándose en las leyes de la probabilidad, en redes que alimentan a un gran número de usuarios, en las que el tiempo real de riego es mucho menor que el tiempo disponible para regar (es decir con varios grados de libertad), la probabilidad de que todos los usuarios abran su toma al mismo tiempo es muy baja, y será tanto menor cuanto mayor número de usuarios y grados de libertad tenga la red. Por tanto, el caudal de diseño de una red a la demanda puede ser mucho menor que el caudal total demandado, garantizando al mismo tiempo una elevada garantía de suministro. A pesar de ello, el diámetro final de este tipo de redes es mucho mayor que el que se podría conseguir si las redes funcionasen por turnos, o a la demanda restringida.

1.4.4. Curvas de consigna de redes de riego

Para diseñar correctamente una estación de bombeo es necesario llevar un análisis exhaustivo del comportamiento de la red y su gestión.

Los parámetros importantes en la optimización del sistema de bombeo es la distribución de descarga a lo largo de una temporada de riego, el diseño de flujo y la carga de presión en cada momento (Moreno et al., 2008).

La curva de demanda o consigna de una red, relaciona la presión necesaria en cabecera con el caudal inyectado a la red, de forma que se garantice la presión de diseño en todos los hidrantes de la red. Matemáticamente adopta la ecuación (1) de la curva resistente de una impulsión:

$$H = H_g + K Q^2 \quad (1)$$

H= Presión en cabecera (m.c.a)

H_g= Presión de diseño (m.c.a)

K= constante

Q= Caudal inyectado a la red (m³/s)

La diferencia con respecto a una impulsión simple radica en que una red de distribución, para un mismo caudal inyectado puede haber múltiples presiones demandadas en cabecera para poder garantizar la presión mínima de diseño en los hidrantes abiertos que generan esa demanda. Esto se debe a que la presión demandada en cabecera dependerá de la configuración de hidrantes abiertos para ese caudal, es decir, de donde se localicen dichos hidrantes. Si los hidrantes abiertos se localizan en zonas desfavorables de la red (es decir en zonas alejadas del bombeo y a la máxima cota posible), obtendremos la curva resistente máxima. Por el contrario, si el consumo se localiza en zonas favorables de la red (es decir próximas al bombeo o a la menor cota posible), obtendremos la curva resistente mínima.

Si representamos los valores posibles de presión en cabecera para cada caudal demandado, nos encontramos con una nube de puntos (H,Q), como se muestra en la

Figura 3. Esta nube de puntos estará contenida entre una curva envolvente superior y otra inferior. La curva envolvente superior corresponde con la curva resistente máxima que satisface las restricciones de presión mínima en los hidrantes para cualquier configuración de hidrantes abiertos, mientras que la curva envolvente mínima corresponde con la curva resistente mínima donde habrá diferentes configuraciones de hidrantes abiertos cuya presión de servicio sea inferior a la presión mínima de

funcionamiento. Entre estas dos curvas, existen modelos para obtener otras curvas que representan el porcentaje de configuraciones de hidrantes abiertos que satisfacen las restricciones de presión (Lamaddalena y Sagardoy, 2000).

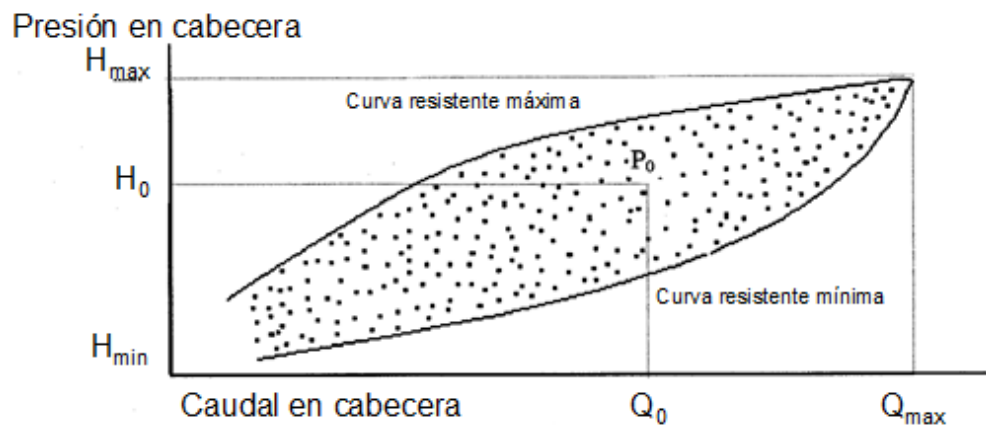


Figura 3. Puntos de funcionamiento de una red de distribución. Fuente: Lamaddalena y Sagardoy, (2000).

1.4.4.1. Frecuencia de caudales en las redes

La frecuencia de caudales demandados de una red es otro dato importante de cara al diseño de la estación de bombeo. Dado que a lo largo de la campaña de riego hay caudales demandados mucho más frecuentes que otros, es importante que el rendimiento de la estación de bombeo para esos caudales más frecuentes, sea el máximo posible. Esto contribuirá a que el consumo energético anual sea menor.

En general, la estación de bombeo se diseña para situaciones de demanda elevada de agua, capaz de abastecer las demandas del mes de máxima demanda. Sin embargo, estos caudales de diseño pueden ser muy poco frecuentes a lo largo del año, siendo más habituales caudales mucho más pequeños.

A efectos de diseño de la estación de bombeo, dado que no se conoce a priori cuales van a ser los caudales más demandados, se pueden utilizar diferentes distribuciones estándar. De acuerdo con (Moreno et al., 2009), se pueden considerar cuatro tipos de distribuciones de Poisson para simular la demanda de caudal durante una campaña de riegos. Las cuatro distribuciones se corresponden con valores de λ en la ecuación de Poisson (ecuación 2) de $\lambda = 2,5$, 3 , 4 y $7,5$. La representación de la distribución se puede ver en la Figura 4.

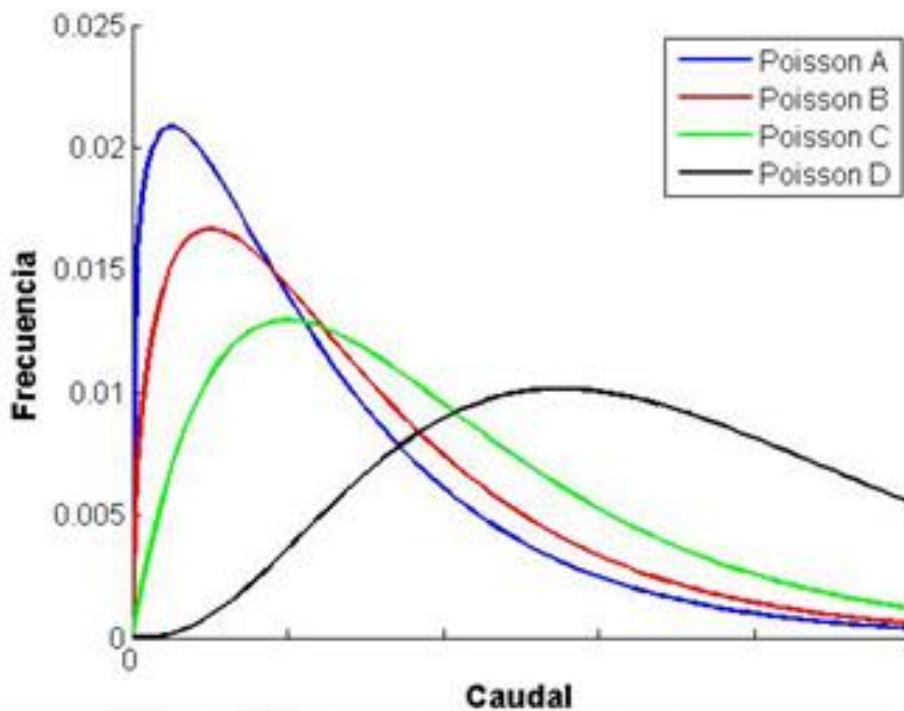


Figura 4. Distribuciones estándar de Poisson de la demanda de caudal. Fuente: Moreno et al. (2009).

Conocida la distribución de caudales de la red de distribución a lo largo del año, se puede obtener, en la ecuación (2), el tiempo anual de funcionamiento (T_f), a partir del volumen total bombeado y de los caudales Q_i en cabecera para cada intervalo i definido en la curva de consigna de la red:

$$T_f = \sum_{i=1}^S T_i \cdot f_i = \sum_{i=1}^S \frac{V_T}{Q_i} \cdot f_i \quad (2)$$

En donde:

T_i : tiempo de funcionamiento del bombeo (h) que ha estado suministrando el caudal.

Q_i : caudales en cabecera para cada intervalo (m^3/h).

V_T : Volumen total anual bombeado por la estación de bombeo (m^3).

f_i : frecuencia del caudal Q_i .

1.5. FUNCIONAMIENTO DE ESTACIONES DE BOMBEO

Las estaciones de bombeo son una de las principales infraestructuras que forman parte de los sistemas de distribución de agua. Se encargan de suministrar energía a la corriente líquida, para transformarla en energía de posición (elevaciones a balsas de riego) o en energía de presión (suministro de agua a presión a redes de distribución). Así mismo, son las principales causantes del consumo de energía de las instalaciones de riego. Para unas determinadas necesidades de altura y caudal de elevación, el consumo de energía está directamente relacionado con la elección del equipo de bombeo, ya que lo energéticamente correcto es que esas necesidades coincidan con el punto de funcionamiento óptimo del equipo seleccionado, es decir, que trabaje a su máximo rendimiento. Un pequeño descenso del rendimiento del bombeo se traduce en un incremento directo del consumo de energía, siendo este tanto mayor cuanto menor es el rendimiento del bombeo.

Por tanto, una vez conocidas las necesidades de presión y caudal, se debe seleccionar una bomba para que ésta funcione en su punto de máximo rendimiento.

Esto es fácil en elevaciones a balsas de riego (punto de funcionamiento fijo), pero no en bombeos que suministran agua a presión a redes de distribución de riego (punto de funcionamiento variable), ya que se debe regular el punto de funcionamiento del bombeo para adaptarlo a las necesidades de cada momento.

Las redes colectivas de distribución de agua para riego tienen una demanda de caudal y presión en cabecera variable a lo largo del día y a lo largo del año, ya que esta demanda de caudal depende de las necesidades de agua de los cultivos abastecidos y de la simultaneidad de apertura de tomas a lo largo del día, mientras que la demanda de presión dependerá de la pérdida de carga en la red, que es función del caudal abastecido, así como de la ubicación de las tomas respecto al punto de suministro.

Por tanto, en redes colectivas de distribución de agua de riego que se alimentan directamente de un bombeo, se debe instalar un sistema de regulación del bombeo capaz de garantizar el caudal y la presión de diseño en las tomas de riego para todas las situaciones de consumo que se puedan producir, con el mínimo coste económico.

Por tanto, el bombeo debe trabajar con el máximo rendimiento posible en todas las situaciones de demanda, de forma que el consumo energético sea mínimo (*Abadía, 2015*).

El análisis de las frecuencias de caudales en redes colectivas es un parámetro fundamental, puesto que se adapta a la demanda real y se consigue optimizar la estación de bombeos, maximizando el rendimiento de las bombas y minimizando el coste energético.

1.5.1. Curvas características

Las curvas características reales de una bomba las obtiene el fabricante ensayando la bomba un banco de pruebas. Las curvas características están definidas por la relación entre la altura (H) y el caudal (Q), el rendimiento (η) y el caudal (Q) y la potencia (N) y el caudal (Q). Para ello se debe instalar en el banco de pruebas, una válvula de regulación que permita variar el caudal impulsado por la bomba, así como un sistema de medición de variables que permita medir con precisión el caudal, la altura, el rendimiento y la potencia. Estas curvas deben venir detalladas en los catálogos de bombas, y caracterizan de forma detallada las prestaciones de las mismas. En bombas aspirantes, otra curva característica que las define es la curva NPSHr-Q, que determina la carga neta de aspiración requerida frente al caudal impulsado.

En la Figura 5. se pueden ver las curvas características facilitadas por el fabricante (Bombas Ideal).

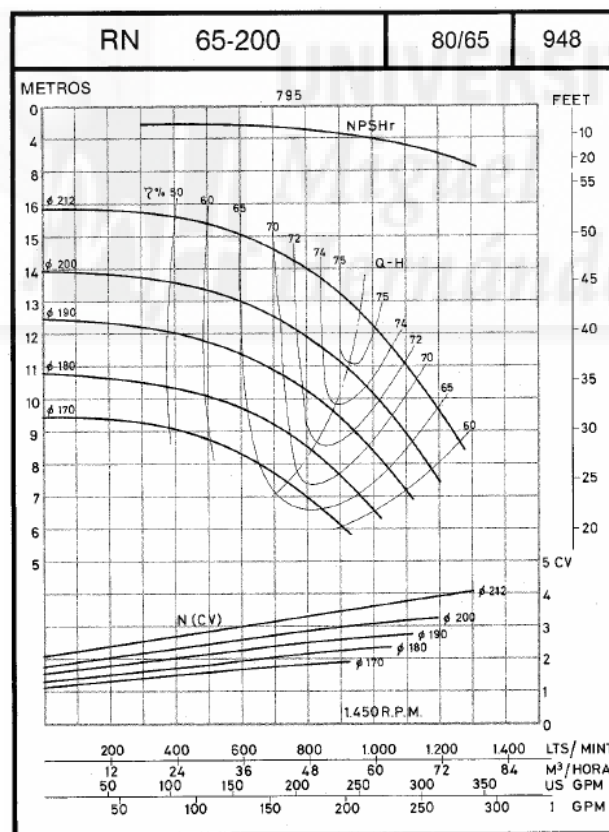


Figura 5. Curvas características bomba Ideal. Fuente: Abadía Sánchez, R. (2015).

La curva altura caudal (H – Q), también llamada curva motriz de la bomba, nos indica la altura manométrica que proporciona una bomba en función del caudal impulsado. Esta curva puede ajustarse a una ecuación de uno de los dos tipos siguientes:

$$H = A - CQ^2 \quad (3)$$

$$H = A + BQ - CQ^2 \quad (4)$$

Ambas corresponden a parábolas. En el primer caso la curva tiene pendiente negativa en todo su dominio, y en el segundo la curva tiene un máximo relativo para caudal no nulo, lo que difiere ligeramente del comportamiento real. En ambos casos el coeficiente C es negativo.

La curva potencia caudal (N – Q) es así mismo una curva parabólica y, generalmente, con la potencia creciente al aumentar el caudal, como puede verse en la Figura 6. La forma general de dicha ecuación es la siguiente:

$$N_a = A' + B'Q + C'Q^2 \quad (5)$$

N_a es la potencia absorbida en el eje de la bomba y se mide con un freno o con un dinamómetro de torsión. Por otro lado, la potencia útil suministrada viene dada por la expresión:

$$N_s = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (6)$$

Por tanto, podemos relacionar la potencia absorbida por la bomba con la útil, obteniendo el rendimiento de la misma:

$$\eta = \frac{\gamma Q H}{N_a} \quad (7)$$

Curva de rendimiento caudal $\eta - Q$. Junto a la curva motriz de la bomba es la otra curva indispensable para su selección en unas condiciones de funcionamiento determinadas, y se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = EQ + FQ^2 \quad (8)$$

Esta ecuación también representa una parábola invertida, con la diferencia en que pasa por el origen de coordenadas. Por tanto, el coeficiente F también es negativo.

En la Figura 6. se representa la curva motriz de una bomba junto con la curva de rendimiento individual de dicha bomba.

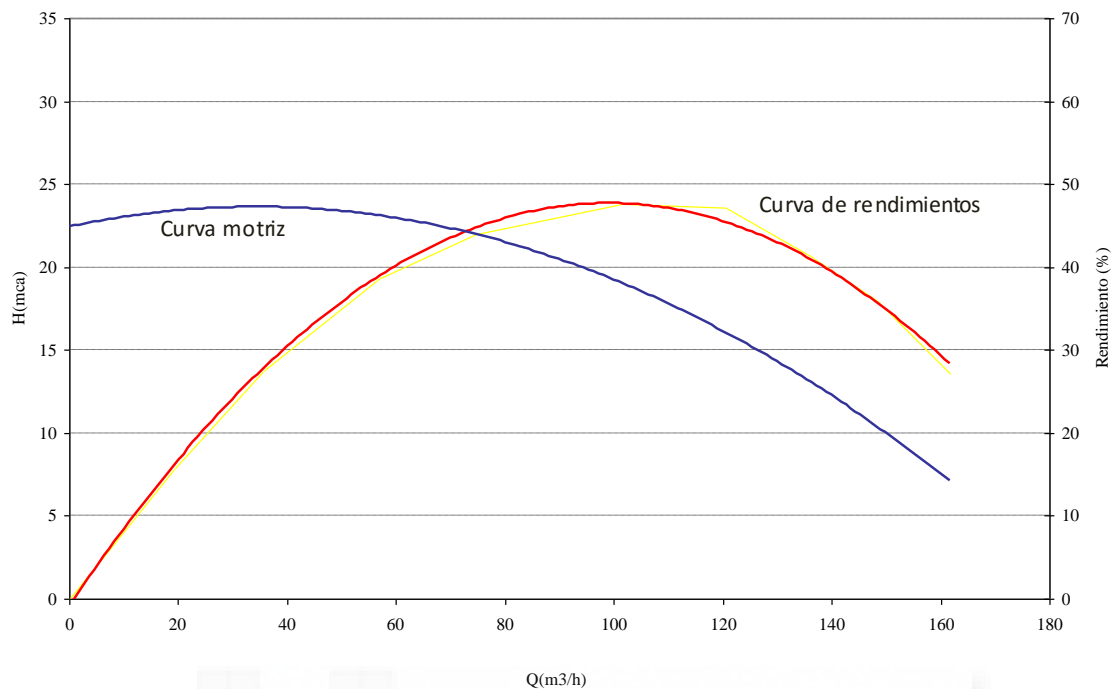


Figura 6. Curva motriz y de rendimiento de una bomba. Fuente: Abadía Sánchez, R. (2015).

1.5.2. Asociación de bombas

La asociación de bombas puede llevarse a cabo, bien en serie o bien en paralelo. En el primero de los casos la impulsión de una bomba constituye la aspiración de la siguiente unidad, por lo que el caudal bombeado será el mismo en todas ellas, aunque las alturas creadas deben sumarse.

Bombas en serie

El acoplamiento de bombas en serie puede presentar interés cuando haya que elevar un mismo caudal a distintas alturas. Tal situación resulta muy poco frecuente, por lo que en la práctica este montaje es sumamente extraño.

Bombas en paralelo

Cuando acoplemos las bombas en paralelo, se aspira el fluido de un punto común, inyectándose después el caudal a la impulsión general. Por tanto, en este caso lo que se suman son los caudales, conservándose las alturas. La asociación en paralelo se plantea como solución a adoptar cuando en la instalación hay una demanda variable de caudal, debiendo garantizar unos requerimientos de presión estables.

El servicio puede garantizarse mediante la progresiva entrada en funcionamiento de distintos grupos de bombeo, consiguiendo mantener el rendimiento del conjunto dentro de unos márgenes aceptables. La utilización de una sola bomba tratando de

satisfacer una amplia gama de consumos sería factible, pero a costa de trabajar con rendimientos bajísimos en determinados puntos de funcionamiento (Cabrera et al., 1996).

En el caso de que los grupos conectados en paralelo sean de características idénticas, a igualdad de altura manométrica el caudal suministrado será el sumatorio de los caudales que suministra cada grupo (Arviza et al., 2002), como se observa en las ecuaciones (9) y (10).

$$Q = \sum_i Q_i \quad (9)$$

$$H = H_1 = H_2 = \dots = H_i \quad (10)$$

1.5.2.1. Funcionamiento de bombas en paralelo

Para el cálculo de bombas en paralelo también se emplean las curvas motrices y de rendimiento de las bombas, teniendo ligeras modificaciones respecto a las curvas definidas para una bomba individual con velocidad de giro fija.

En caso de que se tenga una bomba que trabaje a velocidad variable, la curva motriz y de rendimiento de la misma, sería la siguiente:

$$H = A\alpha^2 + B\alpha Q + CQ^2 \quad (11)$$

$$\eta = \frac{E}{\alpha} Q + F \left(\frac{Q}{\alpha} \right)^2 \quad (12)$$

Siendo: α el cociente entre la velocidad de giro de la bomba y su velocidad nominal.

Por otro lado, en función de la velocidad de giro, las ecuaciones que definen el funcionamiento de las bombas en paralelo, dependen de si las bombas trabajan a velocidad fija o variable:

- N bombas iguales en paralelo de velocidad fija:

$$H = A + B \frac{Q}{n} + C \left(\frac{Q}{n} \right)^2 \quad (13)$$

$$\eta = E \frac{Q}{n} + F \left(\frac{Q}{n} \right)^2 \quad (14)$$

Siendo: n el número de bombas iguales funcionando en paralelo

- N bombas iguales en paralelo de velocidad variable:

$$H = A\alpha^2 + B\frac{\alpha}{n}Q + C\left(\frac{Q}{n}\right)^2 \quad (15)$$

$$\eta = \frac{E}{\alpha n}Q + F\left(\frac{Q}{\alpha n}\right)^2 \quad (16)$$

Con la obtención de las curvas Altura-Caudal y Rendimiento-Caudal de la estación de bombeo, se puede obtener el consumo energético de la misma, conociendo el caudal instantáneo suministrado así como las horas de funcionamiento del bombeo, tal y como se recoge en el apartado 1.5.4.

1.5.3. Sistemas de regulación de bombeos

Los sistemas de regulación de redes sirven para asegurar el suministro de las condiciones de funcionamiento de las redes colectivas de distribución de agua, ante cualquier escenario de demanda posible, y con el mínimo gasto energético. Este suministro puede realizarse básicamente de tres formas:

- Mediante depósito o balsa elevada con cota suficiente
- Mediante bombeos de impulsiones simples
- Mediante estaciones de bombeo de inyección directa a la red

1.5.3.1. Regulación de bombeos de inyección directa a redes colectivas

Los bombeos de inyección directa a red deben tener una gran capacidad de adaptación a situaciones de demanda muy diferentes, ya que el caudal y la presión demandada dependen del número de regantes que utilizan la red al mismo tiempo.

Así, en las horas y meses de mínima demanda de agua, el caudal será muy bajo, mientras que, en las horas y mes de máximo consumo, el caudal será muy elevado, y el bombeo ha de estar regulado para suministrar todas las situaciones con el máximo rendimiento posible, siendo este último aspecto el que condiciona el sistema de regulación.

En efecto, los bombeos que alimentan las redes de distribución, al igual que el dimensionado de las tuberías, se dimensionan para la situación de máximo consumo de la zona regable. En esta situación la altura y presión demandada se corresponde con el 100% de las superficies regables demandando agua en el mes de máximas necesidades. En la práctica, la superficie regada es siempre inferior a la superficie equipada para riego en la zona regable por diversos motivos, y además la situación de

máximas necesidades hídricas se restringe a unos pocos días a lo largo de todo el año. Esto da como resultado que los bombeos suelen estar sobredimensionados.

Además, según diversos estudios, en las redes de riego con muchos usuarios, la frecuencia de caudales demandados de poca magnitud a lo largo del año, es mucho mayor que la de caudales elevados, por lo que el bombeo debe adaptarse a estas situaciones de bajo suministro de agua con un elevado rendimiento.

Para poder regular a un elevado rendimiento caudales muy pequeños a muy altos, se deben instalar bombas en paralelo, para abarcar el abanico de caudales demandados, y poder adaptarse así a la curva de demanda de la red, con el máximo rendimiento posible. Según se activen los bombeos, nos encontramos con dos formas de regular:

- Bombas en paralelo con bombas de velocidad fija
- Bombas en paralelo con bombas de velocidad variable

Existen tres modos de regulación de este tipo de estaciones de bombeo, que dependen de la forma en que las bombas reciben la señal de arranque y parada:

- a. Regulación manométrica: Cuando la señal arranque y parada procede de un transductor de presión instalado al inicio de la impulsión.
- b. Regulación caudalimétrica, si la señal se recibe del caudalímetro instalado al inicio de la impulsión el bombeo.
- c. Regulación manocaudalimétrica, si la señal se recibe de ambos tipos de sensores. En este caso, el caudal determina el número de bombas que deben funcionar de forma simultánea, y la presión la orden de arranque y parada de las bombas (Abadía, 2015).

1.5.4. Diseño y cálculo de estaciones de bombeo

En el diseño de una estación de bombeo que alimenta a una red de distribución, para conseguir que el rendimiento del mismo sea el máximo posible tanto para demandas de caudal pequeñas como elevadas, el diseño de la estación de bombeo debe hacerse mediante la instalación de bombas en paralelo en número variable, pudiendo ser todas iguales o no, dependiendo de la frecuencia de caudales a lo largo del año. Estas bombas se deben accionar, al menos una de ellas, con variadores de frecuencia para poder adaptarse a la altura y caudal demandados en cada situación de consumo, con el máximo rendimiento posible. Para el correcto funcionamiento de la estación de bombeo, la regulación del punto de funcionamiento se debe hacer de forma automática mediante un transductor de presión y caudalímetros que permitan controlar la secuencia de arranque y parada de las bombas de forma automática, según se vaya modificando la demanda. De esta forma la curva de funcionamiento de

la estación de bombeo se adaptará mucho mejor a la curva de demanda de la red, teniendo en todo momento un rendimiento elevado.

El proceso de diseño y dimensionado, tal y como se representa en la Figura 7, contempla la selección del número de grupos en paralelo, selección de las curvas características, selección del número de variadores y selección de la secuencia de arranque de las bombas.

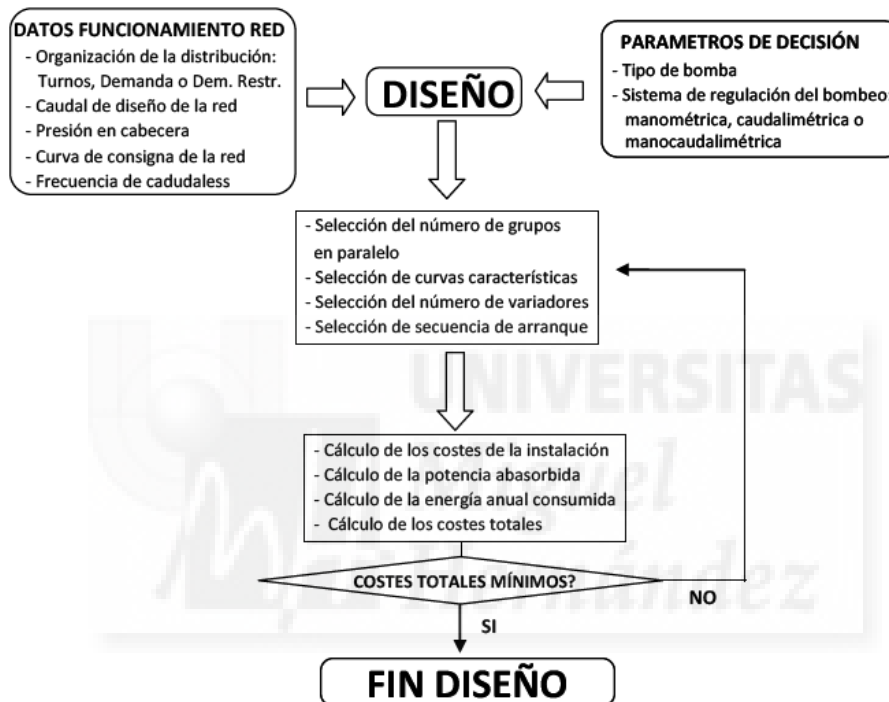


Figura 7. Diagrama del proceso de diseño de una estación de bombeo de una red de distribución. Fuente: Abadía Sánchez, R. (2015).

El dato de partida para el dimensionado será el caudal de diseño fijado en cabecera (Q_d) y la altura manométrica de diseño demandada (H_d), de acuerdo con la curva de consigna de la red de distribución. A la hora de seleccionar el número de grupos en paralelo, si los grupos son iguales, se debe cumplir, como se expresa en la ecuación (11), que:

$$Q_j = \frac{Q_d}{p} \quad (17)$$

En donde:

p: es el número de grupos en paralelo a instalar

Qj: es el caudal nominal de cada bomba del grupo

Qd: es el caudal de diseño en cabecera de la red

Para elevadas frecuencias de caudales pequeños de la red, es aconsejable que al menos dos de las bombas de la estación suministren la mitad del caudal que el resto, a la misma altura manométrica, de forma que la suma del caudal nominal de todas las bombas se corresponda con el caudal de diseño en cabecera.

Para seleccionar las curvas características de las bombas, se deben escoger curvas planas para que haya un buen solapamiento en el proceso de arranque y parada de cada grupo en paralelo. Además, se debe escoger grupos que sean capaces de suministrar la altura manométrica de diseño demandada (Hd) y su caudal nominal (Qj) con el máximo rendimiento posible.

El número de grupos óptimo a instalar en la estación de bombeo, así como el número de variadores de frecuencia y la secuencia de arranque de las bombas, sería aquella que hiciese mínima la función de costes totales anuales. Los costes totales de la estación de bombeo a optimizar estarán formados por costes de las bombas y variadores de velocidad, y por los costes energéticos. La función a minimizar sería, como se muestra en la ecuación (12), la siguiente:

$$C_T = C_A + C_E = \alpha \cdot (p \cdot C_b + v \cdot C_v) + P \cdot \sum_{i=1}^S N_i \cdot T_i \quad (18)$$

En donde:

CT: costes totales del bombeo anuales.

CA: costes de amortización de las bombas.

CE: costes energéticos anuales.

α : tasa de actualización de la inversión.

p: número de grupos en paralelo a instalar.

Cb: coste de cada bomba.

v: número de variadores de frecuencia a instalar.

Cv: coste de cada variador de frecuencia.

P: coste de la energía (€/kWh).

N_i: potencia absorbida para cada intervalo de caudal definido en la curva de consigna de la red.

T_i: tiempo de funcionamiento del bombeo que ha estado suministrando el caudal Q_i.

i: intervalo de tiempo que suministra el mismo caudal i.

S: coeficiente de simultaneidad fijado para la obtención del caudal de diseño en cabecera.

Los costes energéticos se calcularían, por tanto, teniendo en cuenta la ecuación (19):

$$C_E = P \cdot \sum_{i=1}^S N_i \cdot T_i = P \cdot \sum_{i=1}^S \frac{g \cdot Q_i \cdot H_i}{\eta_i} \cdot \frac{V_T \cdot f_i}{Q_i} = P \cdot g \cdot V_T \cdot \sum_{i=1}^S \frac{H_i \cdot f_i}{\eta_i} \quad (19)$$

En donde:

CE: costes energéticos anuales.

P: coste de la energía (€/kWh).

g: aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).

N_i: potencia absorbida para cada intervalo de caudal definido en la curva de consigna de la red.

T_i: tiempo de funcionamiento del bombeo que ha estado suministrando el caudal Q_i.

i: intervalo de simultaneidad fijado para la obtención de la curva de consigna de la red.

S: coeficiente de simultaneidad fijado para la obtención del caudal de diseño en cabecera.

Q_i: caudal en cabecera para el intervalo i definido en la curva de consigna de la red.

H_i: altura manométrica demandada por la red para el caudal de cabecera Q_i.

V_T: Volumen total anual bombeado por la estación de bombeo.

η_i: rendimiento de la estación de bombeo para el caudal bombeado Q_i.

f_i: frecuencia del caudal Q_i.

El rendimiento de la estación de bombeo (η_i) para cada intervalo de caudal en cabecera (Q_i), dependerá del rendimiento de cada una de las p bombas en paralelo de la estación de bombeo que contribuyen a dicho caudal, como se observa en las ecuaciones (14) y (15):

$$\eta_i = \frac{\sum_{j=1}^p \eta_j \cdot Q_j}{Q_i} \quad (20)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^p Q_j \quad (21)$$

En donde:

Q_j : caudal de la bomba en paralelo j de la estación de bombeo.

η_i : rendimiento de la estación de bombeo para el caudal bombeado Q_i .

η_j : rendimiento de la bomba en paralelo j que suministra un caudal Q_j .

La aplicación de la ecuación de costes energéticos anuales, se debe aplicar para diferente número de grupos de bombeo, variadores de frecuencia y diferentes secuencias de arranque. El diseño óptimo será el que haga mínima dicha ecuación. Las secuencias de arranque pueden ser diferentes según se instalen bombas de velocidad fija o variable. En general, cuando se instalan varias bombas en paralelo las secuencias de arranque pueden ser las siguientes:

- Con todas las bombas de velocidad fija (BVF): arranque secuencial.
- Con una BVV y el resto BVF: arranque secuencial.
- Con dos o menos BVV y el resto BVF: arranque secuencial.
- Con dos o más BVV y el resto BVF: arranque simultáneo.

La aplicación de la ecuación costes totales del bombeo anuales, dependerá del tipo de activación de las bombas en paralelo y de los variadores de velocidad seleccionados, como se observa en la Figura 8.

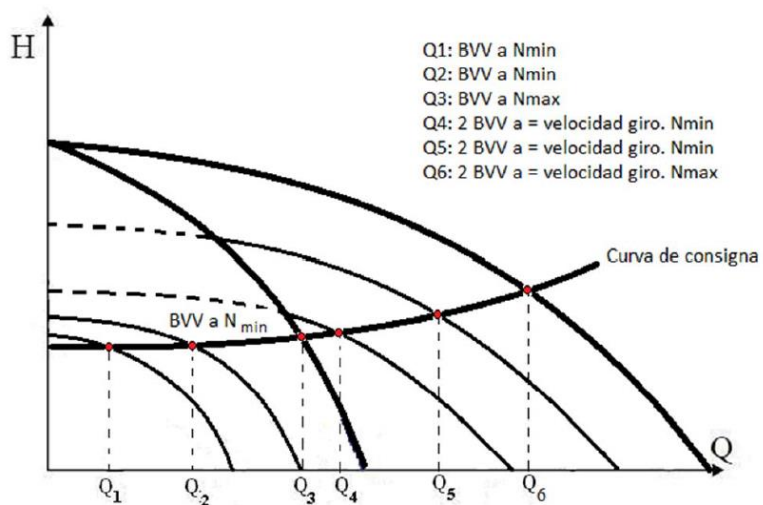


Figura 8. Asociación de bombas en paralelo con 2 bombas de velocidad variable con activación simultánea. Fuente: Abadía Sánchez, R. (2015).



1.6. AUTOMATIZACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCION

El objetivo de la automatización es gestionar y controlar adecuadamente todos los procesos de captación y distribución de agua, desde los puntos de entrada de agua a la red hasta las parcelas de riego.

El automatismo se debe por tanto adaptar a las características de la red de distribución hidráulica que va a controlar. En grandes sistemas de distribución de agua de riego, en donde se parte de una o varias fuentes de agua (pozos, canales, estación de bombeo, balsas, etc.), pueden contar con conducciones principales, que transportan el agua a los sectores de riego (áreas funcionalmente independientes). Desde éstos, a través de la red secundaria, se lleva hasta los hidrantes de agrupación (sectores de riego con control común de presión y caudal). Desde ahí, la red terciaria conduce el agua hasta la entrega en parcela, y ahí termina la infraestructura común propia del colectivo. En otros casos, desde las tuberías principales de transporte se abastece un sistema de balsas desde donde parten las redes de distribución que llegan hasta las parcelas de cultivo. Todos los procesos que se den en el sistema de distribución (puesta en funcionamiento de bombas, control de presión, control de caudal, control de nivel de pozo o balsa, apertura y cierre de válvulas, lectura de contadores, etc.) son susceptibles de ser automatizados, bien por actuación directa o programada.

Para el estudio de inyecciones directas a red de riego y sobre todo, a redes de distribución a presión como sucede en las comunidades de regantes, es interesante tener automatizado la red colectiva de distribución de riegos. El caudal demandado por la instalación abastecida puede variar a lo largo de la jornada de riego, por lo que se requiere de un sistema de regulación del caudal que adecue la presión y el caudal impulsado por las bombas a la demanda instantánea de la red de distribución. De esta forma se consigue optimizar el consumo energético de las estaciones de bombeo. En estos casos, un buen sistema de regulación requiere de una automatización completa de la estación de bombeo, mediante la colocación de bombas de velocidad variable, sensores de presión y caudalímetros, comandados por un PLC, para que el rendimiento de los grupos de bombeo estén en torno a sus rendimientos máximos.

A continuación, se describen los autómatas programables utilizados en la automatización y regulación de las estaciones de bombeo, así como las características principales de la automatización de las estaciones de bombeo, según las funciones que realicen (Ruiz Canales et al., 2009).

1.6.1. Características de los autómatas programables

El autómata programable, normalmente conocido como PLC (Programable Logic Controller), es un dispositivo ideado especialmente para controlar un proceso dado, en base a unas instrucciones programadas a través de software. Se trata de un equipo estanco de pequeño tamaño que normalmente se instala junto al cuadro de mando de las estaciones de bombeo (Figura 9), que permite programar cuantas órdenes y esquemas de control se requieran. Además, permiten comunicarse con el exterior y recibir órdenes a través de las líneas de comunicación convencionales, lo que posibilita la configuración de sistemas de telemando y teled medida, dando lugar al control centralizado.



Figura 9. Autómata programable (PLC). Fuente: (Ruiz Canales et al., 2009)

Las características principales que hacen que los PLC sean elementos casi imprescindibles en los procesos de automatización son las siguientes:

- Estructura modular, lo que permite ampliaciones según aumenten las necesidades.
- Robustez ante ambientes peligrosos.
- Posibilidad de comunicación con otros PLC o con ordenadores convencionales.
- Elevada capacidad para implementar programas complejos de secuencias de automatización, que con lógica cableada serían inabordables.
- Facilidad en la corrección y modificación de programas.
- Bajo precio.

En las estaciones de bombeo, los PLC se emplean para controlar el arranque y parada de las bombas, la apertura y cierre de válvulas, el nivel de agua en las aspiraciones y en las balsas de almacenamiento, la regulación del caudal de la estación de bombeo, la presión, etc.

De forma esquemática, el funcionamiento del PLC consiste en leer continuamente el estado de sus entradas, a las que se acoplan elementos que emiten señales analógicas o digitales, que miden como se encuentra la estación de bombeo (presostatos, sondas de nivel, transductores de presión, etc.). En función de dichas entradas, el programa cargado en la memoria del PLC indica que actuaciones se deben llevar a cabo, y en consecuencia, que señal eléctrica deben emitirse por cada una de las salidas del PLC, para poder accionar los actuadores que a ellas se encuentran conectados (relés para la puesta en marcha de bombas, accionamiento de solenoides, accionamiento de válvulas, modificación de la velocidad de giro de las bombas, etc.).

En la Figura 10, puede verse un esquema general de un PLC. Su configuración básica está formada por un módulo o módulos de canales de entrada, un cuerpo central, y un módulo o módulos de canales de salida. Tanto las entradas como las salidas pueden ser digitales y analógicas. A su vez de cuerpo central salen las conexiones para el sistema de comunicación.

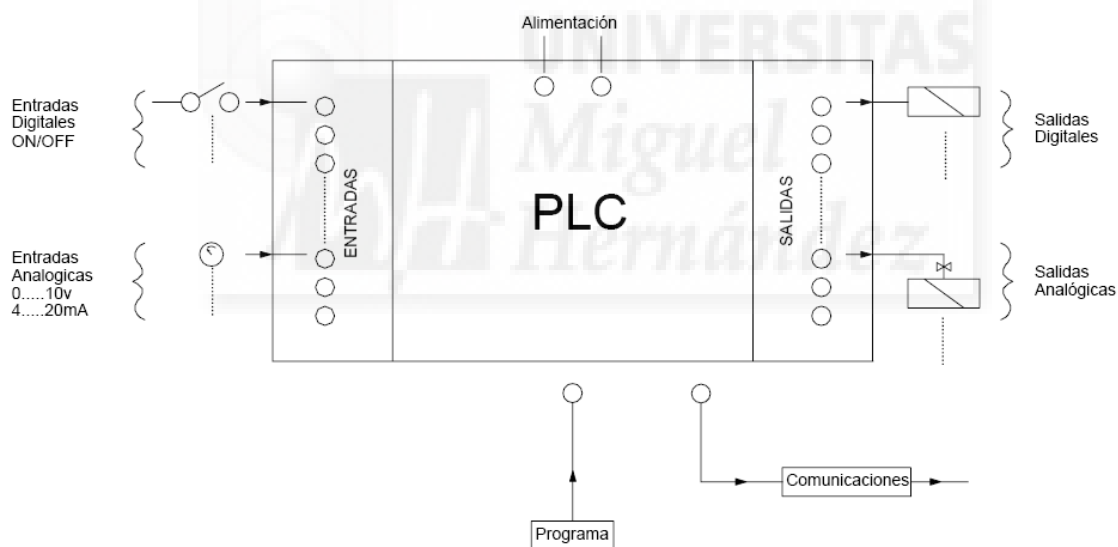


Figura 10. Esquema general de un PLC. Fuente: (Ruiz Canales et al., 2009)

Las entradas digitales son de tipo on/off, y permiten leer el estado de presostatos, contactores, pulsadores, conmutadores, sondas de nivel, y en general de todos los equipos del bombeo que interese conocer su estado conectado (on) o desconectado (off). Las entradas analógicas suelen ser de corriente (miliamperios mA) o de voltaje (voltios v), y permite conocer las señales emitidas para la medida de la presión, el caudal, el volumen, la presión diferencial, voltaje, intensidad, potencia y $\cos \phi$,

temperatura, y en general todos los equipos que pueden emitir una señal de tipo analógico.

Por otro lado, las salidas digitales se emplean para la realización de las maniobras de arranque y parada de bombas, apertura y cierre de electroválvulas y de válvulas motorizadas, así como para la activación de pilotos luminosos. Las salidas analógicas se emplean para actuar sobre la velocidad de giro de las bombas, y sobre la posición de apertura de las válvulas motorizadas (Ruiz Canales et al., 2009).

1.6.2. Automatizaciones de inyecciones directas a red

Las inyecciones directas a red se producen cuando los bombeos inyectan un caudal y presión a una red de distribución de riego, de la que se abastecen directamente los usuarios. Por tanto, el caudal demandado por parte de los regantes tiene que ser suministrado por el bombeo a la presión mínima de funcionamiento de los sistemas de riego en parcela abastecidos. Se trata por tanto de una demanda de caudal que varía a lo largo del día, que han de suministrar los equipos de bombeo. El objetivo de la regulación del bombeo es garantizar el suministro de los caudales demandados por los regantes a la presión mínima requerida en todos los puntos de la red de distribución, con el mínimo coste energético.

Existen diversas formas de regulación de las estaciones de bombeo que inyectan directamente a red de riego. Las más sencillas consisten en la instalación de una válvula mecanizada en serie o en paralelo, que ajusta el punto de funcionamiento de la estación de bombeo. Este tipo de regulación requiere de un PLC que reciba la señal de un sensor de presión que active la apertura y cierre de la válvula según la presión de consigna establecida, pudiendo ser la bomba de velocidad fija o variable.

Una forma más eficiente de regular la estación de bombeo, es mediante la instalación de varias bombas en paralelo, siendo al menos una de velocidad variable. Para poder automatizar el funcionamiento de este tipo de bombeos, se requiere de instalación de un PLC, que controle los accionadores de las bombas (variadores de velocidad, arrancadores electrónicos o contactores), en función de los sensores instalados en la red, que envían información del estado de carga en la que se encuentra en cada momento. La forma de realizar la regulación del caudal impulsado se puede hacer de varias formas:

- Regulación manométrica.
- Regulación caudalimétrica.
- Regulación mano-caudalimétrica.

Para el correcto funcionamiento de este tipo de bombeos, en los que el caudal impulsado puede ser muy variable, se debe diseñar la estación con varios grupos en paralelo, de forma que al menos dos sean de la mitad de caudal que el resto, ya que el caudal suministrado por bombas en cada instante dependerá del número de regantes que tengan su toma abierta en dicho instante. De esta forma, podemos asegurar que el funcionamiento de cada grupo de bombeo esté en torno a su caudal nominal. En estos casos se debe programar el PLC para que se ponga en marcha el grupo o grupos de bombeo necesarios.

Cada una de las bombas debe poder funcionar de tres modos, seleccionables mediante un conmutador de llave existente en el cuadro de control. Los tres modos seleccionables son, Automático, Manual y 0. El funcionamiento en cada posición del selector, debe ser el siguiente:

- Automático: Cuando el selector esté en esta posición, la instalación estará comandada por un autómatas programable, que será el encargado de dar la orden de marcha a los variadores y arrancadores mediante una entrada digital de estos. Cuando el autómatas de la orden de puesta en funcionamiento de la instalación, arrancará una de las bombas accionada con su variador de frecuencia, hasta que el transductor de presión instalado en el colector de impulsión detecte la presión de consigna. Para el escenario de tres bombas en paralelo, dos de ellas con velocidad de giro variable y una tercera bomba con velocidad de giro fija, cuando el caudal demandado por la red sea superior al que suministra la primera bomba funcionando a su máxima frecuencia, la presión en el colector de impulsión será menor que la de consigna, por lo que el autómatas dará la orden de arranque de la segunda bomba, incrementando la frecuencia de dicha bomba hasta alcanzar la presión de consigna en el colector de impulsión. En caso de que la segunda bomba llegue también a su máxima frecuencia de funcionamiento y la presión en el colector y la de consigna no se igualen, sino que cada vez el error entre la consigna y el valor actual sea mayor, se reducirá la frecuencia de funcionamiento de las dos bombas que funcionan con el variador y se dará orden de arranque de la bomba fija. Si sigue sin igualarse la presión de consigna con la del colector de impulsión, se incrementará la frecuencia de una de las bombas hasta conseguir que ambas presiones se igualen. Cuando estén todas las bombas trabajando a su frecuencia máxima la presión en el colector de impulsión sea superior a la de consigna, la orden será de reducción de la frecuencia de forma progresiva en cada bomba de variador, quedando únicamente la bomba fija en marcha. En caso de que la presión siga siendo mayor a la de consigna, parará la bomba fija, y arrancarán las dos bombas de variador, una a su máxima frecuencia y la otra a una frecuencia tal que iguale la presión del colector de impulsión a la de consigna.

- Manual: En esta posición se accionará de forma manual cada una de las bombas. No obstante, para evitar excesos bruscos de presión, se puede configurar

tanto en los variadores como en los arrancadores estáticos, una rampa de arranque y parada de 20 segundos de duración, que evitaría sobreintensidades en el arranque y golpes de ariete en las paradas.

- Posición 0: En esta posición las bombas permanecerán paradas (Ruiz Canales et al., 2009).



1.7. COSTE ENERGÉTICO EN REGADÍO

La energía es un recurso estratégico clave en el desarrollo económico de la sociedad. Cualquier actividad que redunde en un incremento de la productividad de cualquier sector, así como en una mejora de las condiciones de vida de la población, está asociada a un mayor consumo energético. En el regadío, la importancia de este recurso es cada vez mayor debido principalmente a la mayor dependencia energética de los regadíos modernizados y al gran incremento del precio de la energía de los últimos años (Abadía, 2013).

1.7.1. Tarifas eléctricas

A raíz de la liberalización del mercado eléctrico, ha habido un continuo cambio regulatorio en los últimos años en la contratación de la energía, en especial en la energía de alta tensión.

Desde el 2006 hasta el 2008 se ha legislado para alcanzar la supresión de tarifas generales de riego para alta tensión y la tarifa horaria de potencia. El RD 809/ 2006, de 30 de junio, por el que se revisa la tarifa eléctrica a partir de julio de 2006, que establecía la supresión de tarifas especiales para riegos de alta y baja tensión a partir del 1 de enero de 2007, hasta las continuas modificaciones posteriores como el Real Decreto Ley 9/2006, de 15 de septiembre, por la que se adoptan medidas urgentes para paliar los efectos producidos por la sequía y el Real Decreto 871/2007, de 29 de junio, por el que se ajustan las tarifas eléctricas a partir del 1 de julio de 2007, que se propuso una nueva supresión de tarifas de riego a partir de julio de 2008.

Tras la eliminación de las tarifas reguladas, deben estar en el mercado libre los consumidores de alta tensión, pagando unos peajes de acceso por el uso de las redes (Rocamora et al., 2010).

Desde el año 2008, la situación que viven las comunidades de regantes es especialmente delicada en cuanto a los costes de energía por la desaparición de las tarifas eléctricas, todas las comunidades de regantes tuvieron que pasar al mercado libre a contratar energía y supuso un aumento coste de energía por la desaparición de una tarifa, que velaba por un control del coste de energía para las comunidades de regantes. En el mercado libre la única alternativa es buscar la mejor oferta de entre las que puede localizar en el mercado.

El mercado liberalizado tiene una doble facturación:

- Por peajes por el uso de las redes también denominadas tarifas de acceso. Los peajes son únicos en todo el territorio nacional. No incluyen ningún tipo de impuesto. Su

coste depende del nivel de tensión y características de consumo y potencia. Los precios están regulados por el MINETUR.

• Por la energía consumida. Lectura de contadores: kWh consumidos y precio pactado con comercializadora, €/kWh.

Los componentes del coste de energía como se observa en la Figura 11, se reparte entre los costes de producción de la energía, la compra de energía en el mercado que es variable, y el coste regulado por el gobierno.



Figura 11. Componentes del precio de electricidad. Fuente: Yusta, J.M (2013).

En agosto del año 2013, el término de potencia que pagan las comunidades de regantes se multiplica por más del doble, para consumos estacionales de riego supone un incremento en el coste.

El aumento del coste del término de potencia es un problema, puesto que supone el 45 % de coste final del KW para comunidades de regantes (Yusta, 2015).

1.7.2. Tarifa de acceso

En la actualidad, Según lo recogido en el artículo 16 de la Ley 24/2013, del Sector Eléctrico, los peajes de acceso a las redes serán únicos en todo el territorio nacional y no incluirán ningún tipo de impuestos. Además, tendrán en cuenta las especialidades por niveles de tensión y las características de los consumos por horario y potencia.

Las tarifas de acceso quedan definidas en el Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre, por el que se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica (BOE 8 de noviembre de 2001) y la posterior

CORRECCIÓN de errores del Real Decreto 1164/2001 (BOE 18 de enero de 2002). Las condiciones de aplicación se completan con lo establecido tanto en el Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, como en el Real Decreto 1435/2002, de 27 de diciembre, por el que se regulan las condiciones básicas de los contratos de adquisición de energía y de acceso a las redes en baja tensión.

La estructura actual de tarifas de acceso tiene una fórmula compuesta por un término de potencia, un término de energía activa y, en su caso, término de energía reactiva.

Está regulada por el Real Decreto 1164/2001. Una parte de la facturación se encuentra regulada: los peajes que hay que pagar por utilizar las redes de distribución, que se publican en el Boletín Oficial del Estado. Se trata del término de potencia y de la parte regulada del término de energía.

A la parte regulada del término de energía hay que añadir la parte libre, que se negocia entre el consumidor y el comercializador y tiene en cuenta el margen comercial, costes de servicios complementarios, desvíos, moratoria nuclear, tasas municipales y garantía de potencia.

El Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre, establece tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica, en su artículo 2 se establece los costes establecidos de las tarifas de la normativa vigente:

1. Los costes de transporte de energía eléctrica.
2. Los costes de distribución de energía eléctrica.
3. Los costes de gestión comercial reconocidos a los distribuidores por atender a suministros de consumidores cualificados conectados a sus redes que adquieren su energía ejerciendo su condición de cualificados.
4. Los costes de diversificación y seguridad de abastecimiento.
5. Los costes permanentes que se relacionan a continuación:
 - Compensación de extrapeninsulares.
 - Operador del sistema.
 - Operador del mercado.
 - Comisión Nacional de Energía.
 - Costes de transición a la competencia.

En su caso, las tarifas de acceso incluirán además como costes otros ingresos o pagos resultantes de los transportes intracomunitarios o de las conexiones internacionales, incluidos los derivados del mecanismo de gestión de restricciones que estén establecidos en la normativa vigente.

En el artículo 7, se definen las tarifas de acceso.

Las tarifas de acceso de aplicación general, sin más condiciones que las que las derivadas de la tensión a que se haga la acometida y las que se establecen para cada una de ellas, son las siguientes:

a) Tarifas de baja tensión:

Se aplicarán a los suministros efectuados a tensiones no superiores a 1 kV y son las siguientes:

- Tarifa 2.0A: tarifa simple para baja tensión.
- Tarifa 3.0A: tarifa general para baja tensión.

b) Tarifas de alta tensión:

Se aplicarán a los suministros efectuados a tensiones superiores a 1 kV y son las siguientes:

- Tarifa 3.1A: tarifa específica de tres períodos para tensiones de 1 a 36 kV.
- Tarifa 6: tarifas generales para alta tensión.

Artículo 8. Períodos tarifarios.

A las tarifas simples se puede aplicar la modalidad de dos períodos, denominándose en ese caso 2.0 DHA y 2.1 DHA respectivamente. Se consideran como horas punta y horas valle en horario de invierno y horario de verano las siguientes, como se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2. Tarifas simples para dos períodos.

Invierno		Verano	
Punta	Valle	Punta	Valle
12-22	0-12 22-24	13-23	0-13 23-24

En las tarifas 2.0DHS y 2.1DHS se diferencian tres períodos: periodo 1, periodo 2 y periodo 3 (supervalles). Se consideran como horas del periodo tarifario 1, 2 y 3 (supervalles) en todas las zonas del sistema peninsular y en los sistemas insulares y extrapeninsulares, como se observa en la Tabla 3, las siguientes:

Tabla 3. Tarifas diferenciadas en tres períodos.

Invierno y Verano		
P1	P2	P3
13-23	0-1 7-13 23-24	1-7

La tarifa general de baja tensión, 3.0A es una tarifa de tres períodos horarios. La Tabla 4, muestra la distribución de horas punta (P1), llano (P2) y valle (P3), en invierno y verano, en las distintas zonas en que se divide el mercado eléctrico nacional (Zona 1: Península; Zona 2: Baleares; Zona 3: Canarias; Zona 4: Ceuta y Melilla).

Tabla 4. Tarifa general de baja tensión 3.0.A, con tres períodos horarios y cuatro zonas.

Fuente: Rocamora, M.C. 2016.

hora	laborables				
	invierno		verano		
	zonas 1, 2 y 3	zona 4	zonas 1 y 3	zona 4	zona 2
0-1	P3	P2	P2	P2	P2
1-2	P3	P2	P2	P2	P2
2-3	P3	P2	P2	P2	P2
3-4	P3	P2	P2	P2	P2
4-5	P3	P2	P2	P2	P2
5-6	P3	P2	P2	P2	P2
6-7	P3	P2	P2	P2	P2
7-8	P3	P2	P2	P2	P2
8-9	P3	P2	P2	P2	P2
9-10	P2	P2	P2	P2	P2
10-11	P2	P2	P1	P1	P2
11-12	P2	P2	P1	P1	P2
12-13	P2	P2	P1	P1	P2
13-14	P2	P2	P1	P1	P2
14-15	P2	P2	P1	P1	P2
15-16	P2	P2	P1	P1	P2
16-17	P2	P2	P2	P2	P2
17-18	P1	P2	P2	P2	P1
18-19	P1	P1	P2	P2	P1
19-20	P1	P1	P2	P2	P1
20-21	P1	P1	P2	P2	P1
21-22	P1	P1	P2	P2	P1
22-23	P1	P1	P2	P2	P1
23-24	P2	P2	P2	P2	P2

P1

P2

P3

Las Tarifas 6 (tarifas generales para alta tensión) son de aplicación a cualquier suministro en tensiones comprendidas entre 1 y 36 kV con potencia contratada en alguno de los períodos superior a 450 kW y a cualquier suministro en tensiones superiores a 36 kV, excepto la tarifa de conexiones internacionales. Estas tarifas se diferencian por niveles de tensión, de acuerdo con la Tabla 5, y están basadas en seis períodos tarifarios en que se dividen la totalidad de las horas anuales.

Tabla 5. Modalidades de tarifa 6 en función de la tensión de servicio.

Nivel de tensión	Tarifa
$1 \text{ kV} \leq V < 30 \text{ Kv}$	6.1 ^a
$30 \text{ kV} \leq V < 36 \text{ Kv}$	6.1B
$36 \text{ kV} \leq V < 72,5 \text{ Kv}$	6.2
$72,5 \text{ kV} \leq V < 145 \text{ Kv}$	6.3
$V \geq 145 \text{ Kv}$	6.4
Conexiones internacionales	6.5

En la Orden ITC/2794/2007 se definen las temporadas eléctricas y los tipos de días a efectos de la aplicación de tarifas. La distribución de períodos horarios en los distintos tipos de días, establecida en el anexo II de la citada orden, en la península, se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Distribución de horas en la tarifa 6P en la Península (zona 1).

Fuente: Rocamora, M.C. 2016.

hora	ZONA 1: PENÍNSULA											
	A		B1	C		B	A1	C-D	B	C	B1	A
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0-1												
1-2												
2-3												
3-4												
4-5												
5-6												
6-7												
7-8												
8-9	Orange	Orange	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Orange	Green	Yellow	Blue	Yellow	Orange
9-10	Orange	Orange	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Orange	Green	Yellow	Blue	Yellow	Orange
10-11	Red	Red	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Yellow	Blue	Yellow	Red
11-12	Red	Red	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Yellow	Blue	Yellow	Red
12-13	Red	Red	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Yellow	Blue	Yellow	Red
13-14	Orange	Orange	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Yellow	Blue	Yellow	Orange
14-15	Orange	Orange	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Yellow	Blue	Yellow	Orange
15-16	Orange	Orange	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Yellow	Blue	Yellow	Orange
16-17	Orange	Orange	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Yellow	Blue	Yellow	Orange
17-18	Orange	Orange	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Yellow	Blue	Yellow	Orange
18-19	Red	Red	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Yellow	Blue	Yellow	Red
19-20	Red	Red	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Yellow	Blue	Yellow	Red
20-21	Red	Red	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Yellow	Blue	Yellow	Red
21-22	Orange	Orange	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Yellow	Blue	Yellow	Orange
22-23	Orange	Orange	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Yellow	Blue	Yellow	Orange
23-24	Orange	Orange	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Red	Green	Yellow	Blue	Yellow	Orange

El mes de junio corresponde a dos temporadas: del 1 al 15 de junio: temporada media con punta de mañana; del 15 al 30 de junio: temporada alta con punta de mañana y tarde.

La distribución de horas es diferente en las otras zonas del territorio: Baleares, Canarias, Ceuta y Melilla.

1.7.3. Peaje de acceso

En la actualidad, Según lo recogido en el artículo 16 de la Ley 24/2013, del Sector Eléctrico, los peajes de acceso a las redes serán únicos en todo el territorio nacional y no incluirán ningún tipo de impuestos. Además, tendrán en cuenta las especialidades por niveles de tensión y las características de los consumos por horario y potencia.

Todo consumidor, en el mercado libre de energía para su suministro deberá compensar las tarifas de acceso de redes. Estas son el precio del peaje que se paga por utilizar estas redes.

En la Orden IET/2444/2014, de 19 de diciembre, se determinan los peajes de acceso de energía eléctrica para 2015.

En el artículo 9 de la Orden, de peajes de acceso, los precios de los términos de potencia y energía activa de aplicación a partir de la entrada en vigor de la presente orden a cada uno de los peajes de acceso definidos en el capítulo VI de la Orden ITC/1659/2009, de 22 de junio, por la que se establece el mecanismo de traspaso de clientes del mercado a tarifa al suministro de último recurso de energía eléctrica y el procedimiento de cálculo y estructura de las tarifas de último recurso de energía eléctrica, en el Real Decreto 647/2011, de 9 de mayo, por el que se regula la actividad de gestor de cargas del sistema para la realización de servicios de recarga energética y en el Real Decreto 1164/2001, de 26 de diciembre, por el que se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica, son los fijados en el anexo I de la Orden IET/107/2014, de 31 de enero, por la que se revisan los peajes de acceso de energía eléctrica para 2014.

En el anexo I, se recogen los precios de los términos de potencia y términos de energía activa, de los peajes de acceso 6.1A y 6.1B definidos en el Real Decreto 1164/2001, de 26 de diciembre, por el que se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica. Los términos de potencia en €/KW y año, se observan en la Tabla 7.

Tabla 7. Términos de potencia en €/KW y año.

Peaje	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6
6.1A	39,139427	19,586654	14,334178	14,334178	14,334178	6,540177
6.1B	33,237522	16,633145	12,172701	12,172701	12,172701	5,553974

Para este caso, en la Tabla 8, se muestra los términos de energía en €/KWh.

Tabla 8. Términos de energía €/KWh.

Peaje	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6
6.1A	0,026674	0,019921	0,010615	0,005283	0,003411	0,002137
6.1B	0,023381	0,017462	0,009306	0,004631	0,002990	0,001871

Los precios unitarios para la financiación de los pagos por capacidad regulados en el anexo III de la Orden ITC/2794/2007, de 27 de septiembre, por la que se revisan las tarifas eléctricas a partir del 1 de octubre de 2007, aplicables por la energía adquirida por clientes, 6.1A y 6.1B definidos en el Real Decreto 1164/2001, de 26 de diciembre, toman los siguientes valores expresados en euros/kWh, en la Tabla 9.

Tabla 9. Precio unitario para la financiación de los pagos por capacidad.

Peajes de acceso	Precio unitario para la financiación de los pagos por capacidad. Euro/kWh (b.c.)					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
6.1A (1 kV a 30 kV)	0,013630	0,006291	0,004193	0,003145	0,003145	0,000000
6.1B (30 kV a 36 kV)	0,013630	0,006291	0,004193	0,003145	0,003145	0,000000

En los últimos años, se ha visto incrementado el coste de las tarifas de acceso, como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Aumento de tarifas de acceso 2008-2014 (tarifa 6.1).

Fuente: Yusta, J.M. 2015.

	ENERO 2008	ENERO 2009	JULIO 2009	ENERO 2010	ABRIL 2011	ENERO 2012	ABRIL 2012	AGOSTO 2013	FEBRERO 2014	
	ITC/3860/2007	ITC/3801/2008	ITC/1723/2009	ITC/3519/2009	ITC/688/2011	IET/3586/2011	IET/843/2012	IET/1491/2013	IET/107/2014	
TERMINO POTENCIA (euros/kW año)	P1	10,092239	10,092239	13,119911	16,26869	16,594064	16,925945	17,683102	38,102134	39,139427
	P2	5,050488	5,050488	6,565634	8,141386	8,304214	8,470298	8,849205	19,067559	19,586654
	P3	3,696118	3,696118	4,804953	5,958142	6,077305	6,198851	6,476148	13,954286	14,334178
	P4	3,696118	3,696118	4,804953	5,958142	6,077305	6,198851	6,476148	13,954286	14,334178
	P5	3,696118	3,696118	4,804953	5,958142	6,077305	6,198851	6,476148	13,954286	14,334178
	P6	1,686408	1,686408	2,19233	2,718489	2,772859	2,828316	2,954837	6,366846	6,540177
TERMINO ENERGIA (euros/kWh)	P1	0,019305	0,035714	0,046428	0,069642	0,071035	0,072456	0,075697	0,025967	0,026674
	P2	0,016934	0,029635	0,038526	0,052010	0,053050	0,054111	0,056532	0,019393	0,019921
	P3	0,012870	0,016988	0,022084	0,027715	0,028269	0,028834	0,030124	0,010334	0,010615
	P4	0,007307	0,009645	0,012539	0,013793	0,014069	0,014350	0,014992	0,005143	0,005283
	P5	0,004719	0,006229	0,008098	0,008908	0,009086	0,009268	0,009682	0,003321	0,003411
	P6	0,004290	0,004290	0,005577	0,005577	0,005689	0,005803	0,006062	0,00208	0,002137

1.7.4. Causas del incremento del coste energético

Desde los años 70 del pasado siglo hasta ahora, ha habido una transformación de los sistemas de aplicación de agua de riego, pasando de riego por gravedad, a riego a presión que si necesitan energía para su aplicación. Hoy día, en torno al 73% de la superficie de riego en España se riega por sistemas de presión (ESYRCE Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Año 2015).

La ejecución de los continuos planes de modernización de regadíos, han promovido la modernización de las redes colectivas de distribución de agua de riego, desplazando el riego tradicional de acequias y canales por redes ramificadas de tuberías a presión para abastecer a los sistemas de riego por goteo y aspersión. Esta modernización ha dado lugar a que se centralice en consumo energético en las Comunidades de Regantes, encargadas de asegurar el correcto aprovechamiento de las concesiones de agua para regadíos, repercutiendo en el coste del agua, el coste energético necesario para su correcta distribución y aprovechamiento (Abadía, 2013).

En las Comunidades de Regantes se ha visto incrementado el coste energético debido a tres factores importantes, comentados en los apartados anteriores:

1. La supresión definitiva de las tarifas especiales de alta y baja tensión para riegos, a partir del 1 de julio de 2008, tal y como se anunciaba en el Real Decreto 871/2007, de 29 de junio, por el que se ajustan las tarifas eléctricas a partir del 1 de julio de 2007.
2. La liberalización del mercado eléctrico español, obligando a los consumidores a la suscripción del contrato de suministro en el mercado libre a partir de 1 de julio del 2008, tal y como se recoge en la disposición transitoria primera de la Orden ITC/1857/2008, de 26 de junio, por la que se revisan las tarifas eléctricas a partir del 1 de julio de 2008.

3. El aumento de coste de término de potencia en el año 2013, regulado por el gobierno, ha supuesto para comunidades de regantes de ciclo de riegos estacionales, aun ajustándose a las horas valle, un impacto de costes energéticos.

Tanto la modernización de regadíos como el incremento del coste de la energía en comunidades de regantes, ha supuesto dependencia energética del regadío, aumentado casi hasta valores del 100%, en el caso del regadío modernizado, y al mismo tiempo, el precio de la energía ha aumentado más de un 80% respecto al coste de la energía antes de la supresión de la tarifa de riegos y la liberalización del mercado eléctrico (Ederra y Muguragen, 2010).

1.7.5. El ahorro energético en las comunidades de regantes

El consumo energético en una comunidad de regantes se produce en los grupos de bombeo instalados en las estaciones de elevación (Rocamora et al., 2010). Tanto el diseño de las infraestructuras de riego como el rendimiento de las estaciones de bombeo condicionan el consumo energético de una comunidad de regantes.

La disminución del consumo energético se considera que puede realizarse mediante dos aspectos:

a. Por la disminución de consumos de agua como consecuencia de un mejor conocimiento de las necesidades a través de los Servicios de Asesoramiento al Regante y por la reestructuración o modernización con cambio de sistema de riego. Tiene mayor efecto en los regadíos en los que se considera la posibilidad de un cambio del sistema de riego (puede pasar la eficiencia de 0,4 hasta 0,75) y los que se encuentran con escaso porcentaje de revestimiento de sus redes en la actualidad (pueden mejorar la eficiencia de 0,4 a 0,6). No obstante, en el caso de modernizaciones que lleven aparejado un cambio de sistema de riego el ahorro de agua, si se produce, puede compensarse con un mayor consumo de energía para los riegos a presión, ya que requieren de media una potencia instalada del orden de 2,0 kW por hectárea.

b. Por la correcta adecuación del sistema de bombeo, tanto en los nuevos regadíos como en la modernización, en lo referente a los siguientes conceptos:

- Introducción de variadores de frecuencia para funcionamiento de bombas en régimen variable.
- Elección de un sistema de regulación del funcionamiento de las estaciones de bombeo que permita trabajar en el punto de máximo rendimiento para cualquier caudal y presión demandada.
- Mejora de rendimientos en los equipos de impulsión.

- Automatización de los sistemas de mando, maniobra y control.
- Posibilidad de construcción de depósitos operativos, en casos determinados.
- Diseño de redes optimizadas energéticamente.
- Mejora del factor de potencia.
- Elección de la tarifa más adecuada.

De los conceptos seleccionados para la correcta adecuación del sistema de bombeo, es de fácil aplicación, la regulación del funcionamiento de las estaciones de bombeo que permita trabajar en el punto de máximo rendimiento adaptándose a cualquier caudal y presión demandada.

En este trabajo se aborda el estudio de la selección de un sistema de regulación bombeo adaptado a las demandas de caudales requeridas en cualquier momento por una comunidad de regantes, optimizando así el sistema de bombeo y minimizando el coste energético.





2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

Las estaciones de bombeo que abastecen redes colectivas de agua de riego a la demanda, deben ser capaces de suministrar todas las posibles demandas de caudal y presión a lo largo de la campaña de riego, con un consumo mínimo de energía. Para ello, se emplean bombas en paralelo que se pueden activar de diferentes formas, con el fin de que para cada demanda de agua, el consumo de energía sea mínimo.

Entre las diversas formas de regular estas estaciones de bombeo, se van a estudiar las siguientes:

- Bombas en paralelo con velocidad fija.
- Bombas en paralelo con velocidad fija y variable.
- Bombas en paralelo con velocidad variable.

Por otro lado, estaciones con dos o más bombas de velocidad variable, el arranque puede ser de tipo escalonado o simultáneo, lo que influye también en el consumo energético. El sistema de regulación que minimice el consumo de energía, dependerá de la curva de demanda de agua de la red.

El objetivo del trabajo es establecer el sistema de regulación de estaciones de bombeo que haga mínimo el consumo energético de una red colectiva de distribución de agua a presión, para dos patrones de demanda de agua habituales en redes colectivas de distribución de agua de riego.

2.1. PLAN DE TRABAJO

Para ello se ha realizado una simulación en el banco de ensayos del laboratorio de hidráulica que dispone la EPSO, para el estudio del consumo energético del sistema de regulación de bombeo de una red de distribución de riego a presión, que simula una red de una comunidad de regantes a pequeña escala.

El estudio se ha dividido en 5 fases:

1ª. Puesta a punto y calibración de los equipos de medida empleados para la toma de datos:

Para ello, se realizó una calibración de los sensores y equipos empleados en la toma de datos que envían la señal correspondiente al autómata programable empleado, mediante el empleo de equipos de medidas contrastados. Se han calibrado los transductores de presión, los caudalímetros, las lecturas del analizador de redes eléctricas que incorpora el autómata programable y se han medido las curvas características de las bombas instaladas.

2ª. Programación de la apertura de tomas de la red:

Se obtuvo la hora de apertura y cierre de cada toma, que den lugar a dos curvas de frecuencia de caudal diario distribuido:

- Curva 1: Con frecuencia máxima de caudales en cabecera bajos. Se obtiene para tiempo de riego corto, 3 horas de riego diarias y caudal de $2,8 \text{ m}^3/\text{h}$. La jornada de riego tiene una duración de 12 h por lo que la probabilidad de riego por toma es de 0,25.
- Curva 2: Con frecuencia máxima de caudales en cabecera altos. Se obtiene para tiempo de riego largo, 7 horas de riego diarias y caudal de $2,8 \text{ m}^3/\text{h}$. La jornada de riego tiene una duración de 12 h por lo que la probabilidad de riego por toma es de 0,58.

La obtención de las dos curvas de frecuencia máxima de caudales en cabecera, así como la determinación del horario de apertura y cierre de cada toma que da lugar a cada curva de frecuencia.

3ª. Programación de la regulación de la estación de bombeo. Todas las regulaciones ensayadas son de tipo manométrico. Se han programado tres tipos de regulación para cada curva de demanda de caudales:

- Regulación 1: 1 Bomba con velocidad variable + 2 Bombas de velocidad fija y sistema de puesta en marcha secuencial.
- Regulación 2: 2 Bombas de velocidad variable + 1 Bomba de velocidad fija y sistema de puesta en marcha simultáneo.

- Regulación 3: 3 Bombas de velocidad variable y sistema de arranque simultáneo. Las tres bombas trabajan de forma simultánea y misma velocidad de giro para suministrar la presión de consigna.

Por tanto, el número total de ensayos son de 6 que se corresponderán con dos curvas de frecuencia de caudales máximos en cabecera y tres formas de regular el arranque de las bombas.

4ª. Toma de datos de funcionamiento de la red:

Una vez establecida las distintas configuraciones del sistema de regulación del bombeo para cada una de las dos configuraciones de apertura de tomas ensayadas, se procedió a la realización de los ensayos. La toma de datos de cada ensayo se realiza mediante el autómatas programable (PLC) que controla la estación de bombeo.

En primer lugar, se programó la apertura y cierre de cada toma que dé lugar a una de las curvas de frecuencia, después se estableció una forma de regulación del bombeo, luego se programó el intervalo de tiempo de almacenamiento de datos de funcionamiento y se inició el ensayo. La duración de cada ensayo fue de una jornada efectiva de riegos, es decir de 12 horas.

Los datos que se almacenados son el caudal por toma, presión real en hidrantes, velocidad de giro de cada bomba y potencia absorbida por cada bomba. Con estos datos se determinó el rendimiento de la estación de bombeo para cada intervalo de tiempo.

5ª. Análisis y comparativo de la energía consumida de los distintos escenarios ensayados:

Se compararon los resultados obtenidos para las dos curvas de frecuencias de caudal ensayados, determinando el sistema de regulación que minimiza el consumo de energía para cada una de ellas.



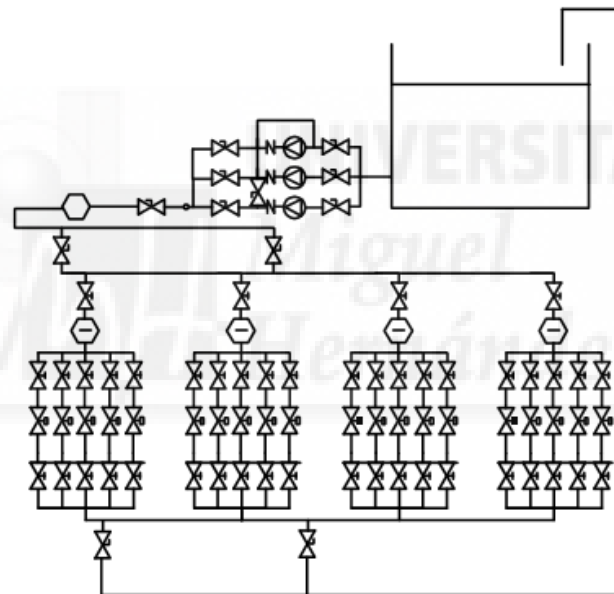
3. METODOLOGÍA

3. METODOLOGÍA

3.1. BANCO DE ENSAYOS

El banco de ensayo de materiales de riego para la realización de este trabajo, se sitúa en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela, en el laboratorio de hidráulica y riegos.

El banco de ensayos de materiales de riego consta de una red colectiva de distribución de agua de una comunidad de 20 regantes. En la Figura 12, se observa el esquema de la red colectiva de distribución de agua del banco de ensayo que se dispone para la realización del trabajo. La red colectiva de distribución de agua consta de 3 bombas, válvulas de bola, válvulas de mariposa, de retención, codos, tes, electroválvulas, tuberías, contadores, manómetro, etc, que se describen con detalle en los siguientes apartados.



	BOMBA 3 CV
	PUNTO DE MEDIDA DE PRESIÓN
	VÁLVULA DE BOLA
	ELECTROVÁLVULA
	VÁLVULA DE MARIPOSA
	VÁLVULA DE RETENCIÓN
	TUBERÍA PVC
	CONTADOR DE CHORRO MÚLTIPLE
	CONTADOR ELECTROMAGNÉTICO

Figura 12. Esquema red colectiva.
Fuente: elaboración propia (2016).

3.1.1. Sistema de bombeo

Características generales de las bombas

El sistema de bombeo consta de tres bombas de 2,2 kW de potencia, que toma agua de un depósito de 5.000 litros y la impulsa a través de las tuberías como se muestran en la Figura 13.



Figura 13. Depósito de agua del banco de ensayos de material de riego.

Estas son bombas eléctricas centrifugas fabricadas según estándares EN 733 equipadas con motores ie2/ie3. El acoplamiento es tipo corto mediante una abrazadera con un impulsor ensamblado directamente a la extensión del eje del motor. En la Figura 14, se muestra el sistema de bombeo del banco de ensayo. En el apartado 3.2.5 se detallan las características técnicas de las tres bombas instaladas en el banco de ensayo.



Figura 14. Sistema de bombeo del banco de ensayos de material de riego.

Funcionamiento de las bombas

Las bombas están conectadas para que funcionen de forma individual, o bien conectadas en paralelo.

Las bombas disponen de un motor cuya velocidad de giro puede ser variada electrónicamente mediante un variador de frecuencia para así regular presiones y caudales o pueden comportarse como bombas fijas. El sistema de bombeo tiene varios modos de funcionamiento, dependiendo de cómo queramos que trabaje el sistema de bombas: en serie o en paralelo. Para la simulación de la comunidad de regantes, obviamente trabajarán en paralelo. Además las tres bombas pueden funcionar como bomba maestra, o bien como bomba esclava, según se configure en el autómatas programable instalado.

Curva característica de las bombas

La curva característica real de cada bomba se obtiene ensayando las bombas en el mismo banco de pruebas. La curva característica está definida por la relación entre la altura (H) y el caudal (Q). Para ello, se utiliza una válvula de regulación que permita variar el caudal impulsado por la bomba, y poder tomar los diferentes datos de caudales y de presiones en cabecera. En el apartado 4.2 se pueden ver las curvas características de las bombas medidas en el banco de ensayos.

En el banco de ensayo para la simulación de la red colectiva de distribución de riego, hay instaladas 3 bombas. La bomba 2 y la bomba 3 son idénticas mientras que la bomba 1 se instaló más tarde, siendo muy parecida a las otras bombas. Son FEH, versión acoplada con adaptador, e impulsor ensamblado directamente a la extensión del eje del motor. En la Figura 15, se observa las 3 bombas instaladas en el banco de ensayos.



Figura 15. Bombas de la instalación.

Características técnicas de las bombas

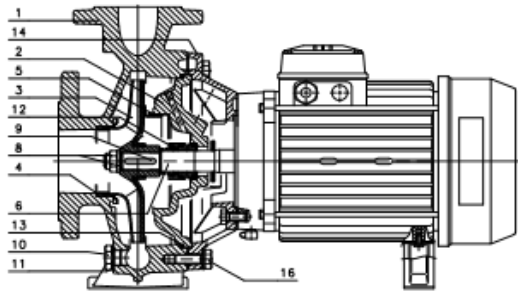
Por otra parte, las características técnicas más importantes de las 3 bombas se resumen en la Tabla 11:

Tabla 11. Características técnicas de las bombas.

	BOMBA 1	BOMBA 2	BOMBA 3
Tipo de bomba	FEH 40-125/22 C	CN 40-125/22	CN 40-125/22
Caudal nominal	18-48 m ³ /h	15-39 m ³ /h	15- 39 m ³ /h
Altura nominal	23-9 m	24-14.5	24-14.5
Potencia del motor de la bomba	2,2 kW	2,2 Kw	2,2 kW
Fecha de fabricación y número de serie	20131115, 01611		
Velocidad	2836 min ⁻¹	2850 min ⁻¹	2850 min ⁻¹

Además, las partes y materiales de las bombas del banco de ensayos, se reflejan en la Figura 16, y la Tabla 12.

Tabla 12. Materiales de las partes de la bomba.



REF. N.	PART	MATERIAL
1	Cuerpo de la bomba	Hierro Fundido
2	Carcasa de la junta	Hierro Fundido
	Impulsor	Acero inoxidable
	Impulsor	Hierro Fundido
	Impulsor	Bronce
4	Anillo de desgaste	Acero inoxidable
5	Anillo contra-desgaste	Acero inoxidable
6	Extensión del eje	Acero inoxidable
7	Acoplamiento rígido del eje	Acero inoxidable
8	Tuerca y arandela del impulsor	Acero inoxidable
9	Lengüeta	Acero inoxidable
10	Tapones de llenado y drenaje	Latón niquelado
11	Juntas de llenado y drenaje	Aluminio
12	Junta mecánica	Corámica / Carbón / NBR
13	Elastomeros	NBR (versión estándar)
14	Adaptador *	Aluminio
	Adaptador	Hierro Fundido
16	Tornillos y pernos de fijación a la bomba	Acero galvanizado

Figura 16. Partes de la bomba.

En la Figura 17, se muestra un ensayo de las características técnicas del fabricante, para el área de funcionamiento de la bomba 1.

En la primera gráfica, el ensayo muestra la altura de funcionamiento de la bomba, que oscila entre valores de 25 a 9 m.c.a. Mientras que, en la segunda gráfica se observan los rendimientos en el intervalo de altura a la que trabaja la bomba 1. En la tercera gráfica, se muestra la curva de NPSH, que define los límites de succión de la bomba para varios valores de caudal. Es fundamental para saber la presión total, que debe existir como mínimo en la entrada de la bomba para evitar la cavitación, es decir, permite saber las alturas máximas de succión de la bomba para cada valor de caudal. Por último, en la cuarta gráfica, se observa la curva de la potencia del eje, con respecto al caudal, que oscila de 1.4 a 2.2 kW, la potencia de la bomba.

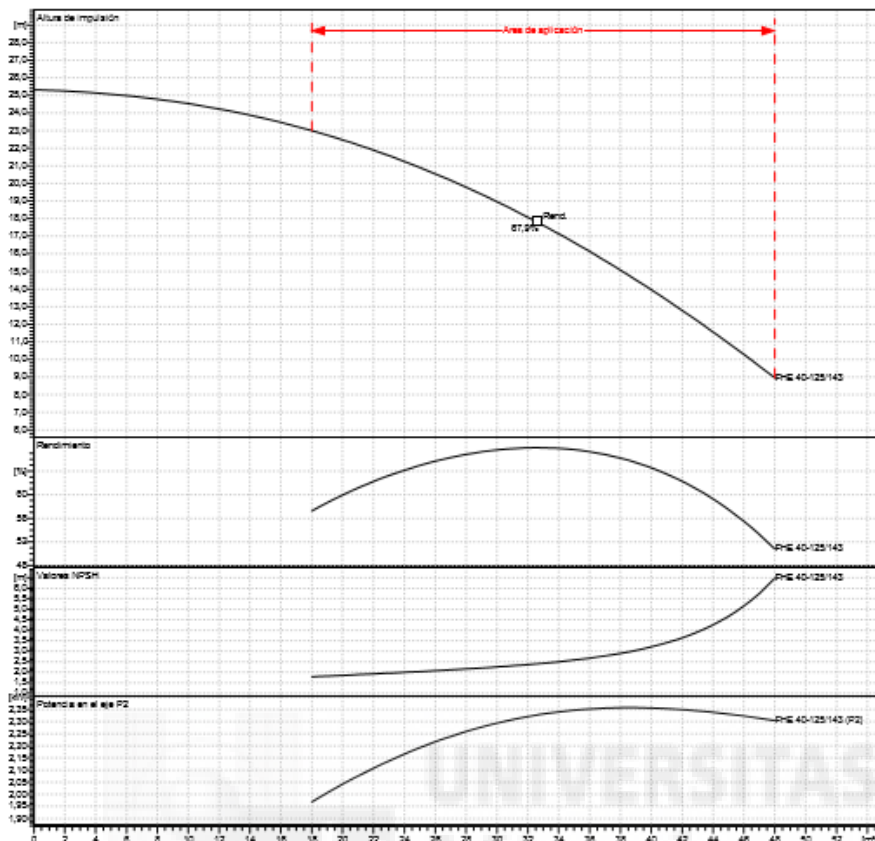


Figura 17. Gráficas de la curva de la altura de funcionamiento, de rendimiento de la bomba, de NPSH y de la potencia en el eje, de la bomba 1.

La Figura 18, presenta las características de funcionamiento de la bomba 2 y 3. En primer lugar, se muestra la curva de la altura de funcionamiento que oscila entre valores de 24 a 14 m.c.a. Además, en este gráfico se representa el rendimiento de las bombas a diferentes alturas de funcionamiento. También se muestra la curva de NPSH, que define los límites de succión de la bomba para varios valores de caudal. Por último, se representa la potencia de la bomba que oscila entre valores de 1.4 a 2.2 kW.

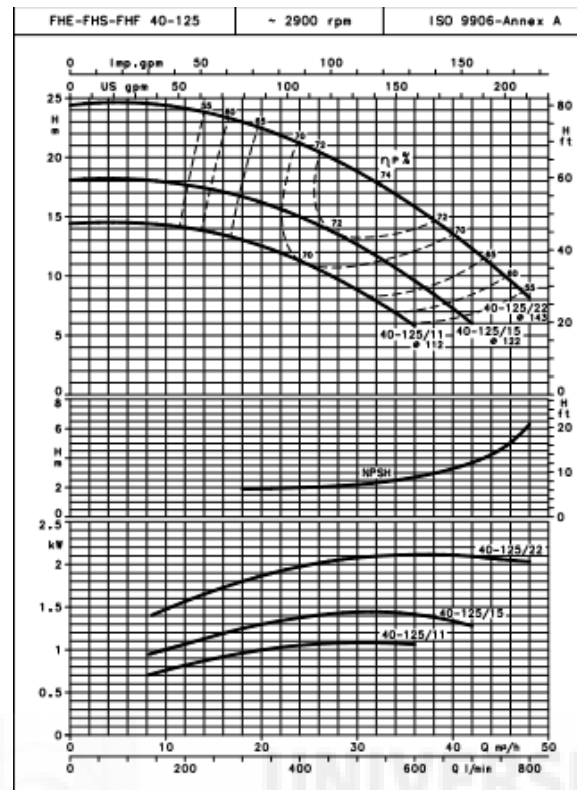


Figura 18. Gráficas de la curva de la altura de funcionamiento, de rendimiento de la bomba, de NPSH y de la potencia en el eje, de las bombas 2 y 3.

3.1.2. Tuberías

La red colectiva de distribución de agua de la comunidad de regantes, consta de tuberías de PVC, de diferentes diámetros nominales a lo largo de toda la red colectiva de distribución de agua.

Primeramente, desde el depósito de agua sale una tubería de aspiración de 110 mm hasta llegar a las bombas, después se une a una tubería de impulsión de 90 mm para cada una de las bombas hasta llegar a las válvulas de impulsión de apertura y cierre. A la salida de estas, se unen a una tubería principal de 110 mm de diámetro nominal. Como se quiere pasar el agua por el contador electromagnético instalado en el banco de ensayos, éste está montado en un by pass de una tubería de 140 mm de diámetro nominal, a la salida del by pass se vuelve a la tubería principal de 110 hasta llegar la comunidad de regantes. De esa tubería principal se ramifican dos tuberías a 90 mm y dos tuberías de retorno de 90 mm que volverá a la principal del retorno. Esas dos tuberías de 90 mm, dan agua a 4 tuberías de 50 mm, en donde están instalados con contadores de chorro múltiple. Estas tuberías a su vez, por medio de un colector se ramifican en cinco tuberías de 25 mm, cada una de ellas para dotar de agua a 20 regantes. De la misma forma estarán las tuberías de 25 mm de retorno, que se unen, a

las tuberías de 50 mm de retorno hasta llegar a las tuberías de 90 mm de retorno, antes comentadas, estas a su vez conectan por último con la tubería principal del retorno.

Las tuberías están normalizadas por la UNE 53112:1988 de plásticos, tubos y accesorios de poli (cloruro de vinilo) no plastificado para conducción de agua a presión. En la Figura 19, se muestran tuberías que componen la red colectiva de distribución de agua.



Figura 19. Tuberías del banco de ensayos.

3.1.3. Válvulas

La red de distribución de agua dispone de diferentes tipos de válvulas. Válvulas de mariposa, de bola, manoreductoras y electroválvulas.

Las válvulas manoreductoras se ubican en el comienzo de las tuberías de impulsión de cada bomba. En la Figura 20, se observa una válvula manoreductora de la instalación.



Fotografía 20. Válvula manoreductora instalada en la tubería de impulsión de la bomba 3.

Las válvulas de mariposa están ubicadas en la tubería principal, al comienzo y en la terminación del bypass, también al comienzo de la red colectiva. En la Figura 21, se observa una válvula mariposa de la instalación.



Figura 21. Válvula de mariposa instalada en la tubería principal del banco de ensayos.

Las válvulas de bola manuales se encuentran instaladas en al comienzo de las 4 tuberías de 50 mm, antes de los contadores de chorro múltiple, además para cada regante, al comienzo de las tuberías de 25 mm, están instaladas válvulas de bola manuales en la entrada y en el retorno de agua. En la Figura 22, se observa válvulas de bola del banco de ensayos.

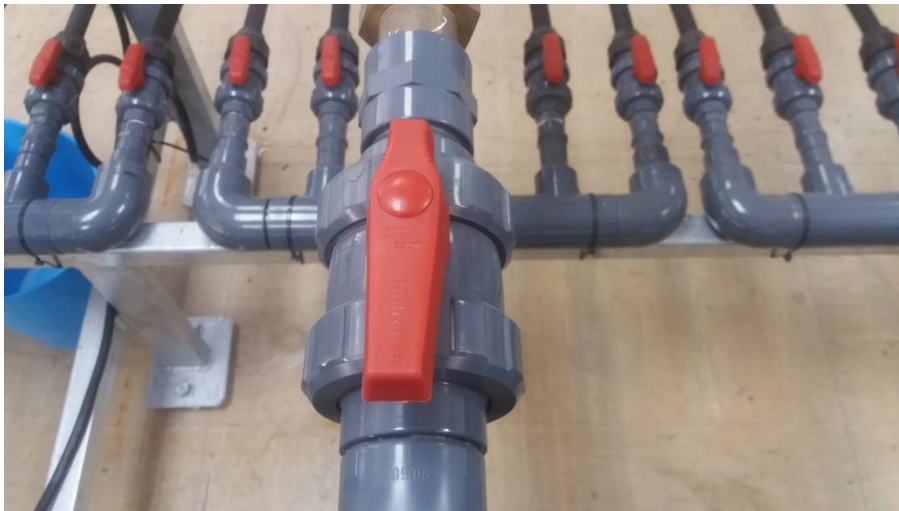


Figura 22. Válvula de bola al inicio de la red colectiva y al fondo se muestran las válvulas de bola de retorno.

Por último, las electroválvulas están conectadas con el PLC, éste manda una señal y da la orden de apertura o cierre de la válvula. Están ubicadas justo antes de llegar el agua a cada regante. En la Figura 23, se muestra una de las electroválvulas del banco de ensayos.



Figura 23. Electroválvula del banco de ensayos.

Las electroválvulas son tipo bermad s-392. Las características principales son las siguientes:

- Válvula elastomérica accionada por resorte
o Autoactivada

- o Variedad de resortes (muelles) de cierre
- Válvula plástica hidroeficiente en forma de globo o angular
 - o Trayectoria de flujo sin obstrucciones
 - o Una sola pieza móvil
 - o Alta capacidad de caudal
 - o Altamente duradera y resistente a las sustancias químicas y los daños por cavitación
- Diafragma y junta hermética flexibles y balanceados
 - o Apertura total
 - o Cierre hermético a prueba de goteo

El actuador de selenoide magnético es de 2 vías tipo Latch, 2 conductores. Las características eléctricas son:

- Voltajes: 6-20 VCC
- Resistencia de la bobina: 6Ω
- Inductancia de la bobina: 90 mH
- Duración de impulso: 20-100 mseg
- Condensador necesario: $4700\mu\text{F}$
- Modos de operación (conexiones eléctricas):
 - + Rojo y -Negro: Posición Latch
 - + Negro y -Rojo: Posición desenganchado

En la Figura 24, se muestra las 20 electroválvulas instaladas en el banco de ensayos.



Figura 24. Electroválvulas de la instalación.

3.1.4. Accesorios

Además de las bombas, válvulas y tuberías, el banco de ensayo dispone de accesorios necesarios para el funcionamiento y control como son los filtros, ventosas, etc., así como material para conectar el circuito (conexiones y bridas), como se observa en la Figura 25.



Figura 25. Accesorios de la red de distribución de riego del banco de ensayos.

3.1.5. Automatización

La automatización del banco de ensayos consiste en la programación de los siguientes elementos instalados en el cuadro eléctrico:

- Programación del autómata FX3U 16M (Mitsubishi Electric). Este modelo puede manejar básicamente dos tipos de dato: Registros de 16 bits (datos, temporizadores, contadores, etc.) e información de un bit (relés auxiliares, entradas, salidas, etc.).

El PLC, está conectado con los transductores de presión, el caudalímetro electromagnético, los cuatro contadores de chorro múltiple, las tres bombas y las veinte electroválvulas. En la Figura 26, se observa el PLC instalado en el banco de ensayos.



Figura 26. Controlador lógico programable de la instalación.

- Programación de la pantalla táctil GOT 1000 (Mitsubishi Electric), ambos alimentados a 24 V. En la pantalla táctil, es donde configuramos todas las actuaciones de la simulación de la red colectiva de distribución de agua de riego. En la Figura 27, se observa la pantalla táctil instalada en el banco de ensayos.



Fotografía 27. Pantalla táctil y cassette del programador.



3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS

Los equipos empleados son de dos tipos, los sensores que envían señales al PLC y los actuadores que reciben señales del PLC. Entre los primeros se encuentran los contadores de agua y los transductores de presión, y entre los segundos, las bombas y las electroválvulas. Además, los variadores de frecuencia incorporan un analizador de redes que recoge entre otros parámetros, la velocidad de giro de las bombas, y la potencia absorbida. Así, los datos obtenidos por el PLC son, las revoluciones por minuto de las bombas, potencia de cada bomba, presión de la comunidad de regantes, presión en cabecera, programación horaria de la demanda de caudal, caudal general, caudal de cada contador y caudal de cada hidrante. A continuación, se describen cada uno de los equipos instalados en el banco de ensayos.

3.2.1. Contador chorro múltiple

Contador cuyo principio de funcionamiento es el sistema chorro múltiple, el cual asegura una distribución de cargas uniforme en la turbina cuando se produce la circulación del agua a través de ésta. En la Figura 28, se muestra uno de los contadores instalados en el banco de ensayos.

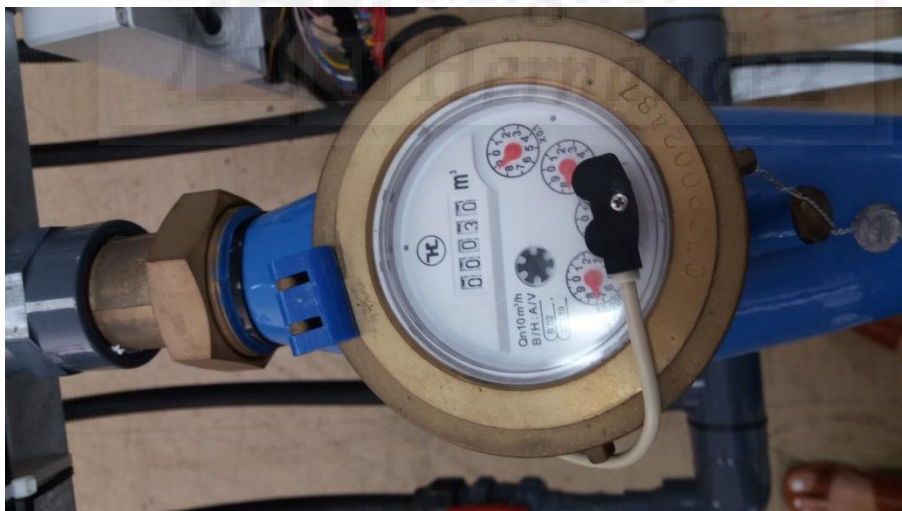


Figura 28. Contador de chorro múltiple.

Las características técnicas del contador modelo MFSM-40, son las siguientes:

- Relojería orientable manualmente que facilita la lectura en todas las posiciones.
- Carcasa en latón con pintura epoxy.

- Turbina y relojería en material termoplástico.
- Montaje al vacío para impedir la condensación de agua.
- Sellado anti-hielo.
- Transmisión magnética de alta fiabilidad.
- Preequipo de emisor de pulsos para telelectura.
- Transmisión por arrastre magnético fiable, larga vida útil.
- Datos técnicos de acuerdo con la norma ISO4064, clase B.
- Condiciones de trabajo: 0,1°C- 30°C para agua fría y presión ≤ 1.6 Mpa.
- Máximo de error permisible: Q mínimo $<Q.t = \pm 5 \%$ y Q máximo $<Q.t = \pm 2 \%$.
- Calibre de 40 mm, clase B, caudal máximo de 20 (m³/h), caudal nominal de 10 (m³/h), mínima lectura de 0,00001 m³ y máxima lectura de 99.999 m³.

Las partes y el material que forman este tipo de contadores, se muestra en la Figura 29 y la Tabla 13.

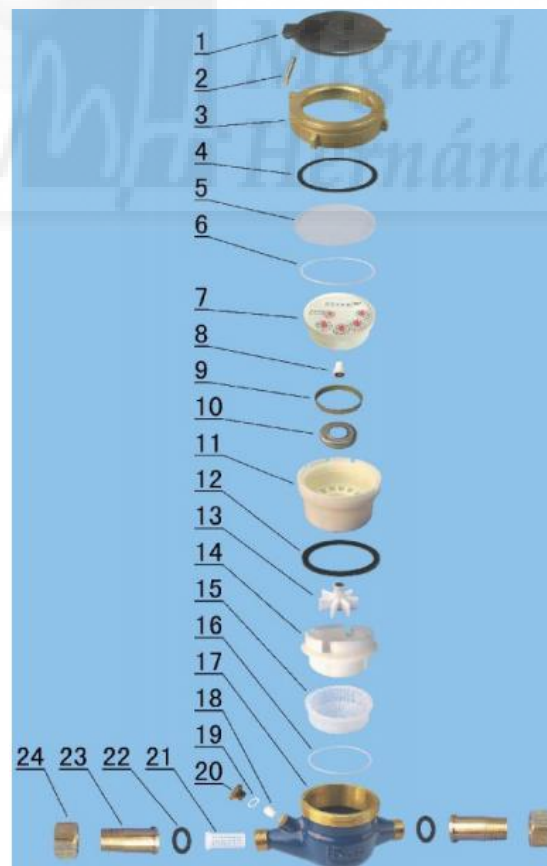


Figura 29. Partes del contador de chorro múltiple.

Tabla 13. Partes y materiales que forman el contador de chorro múltiple.

Código	Descripción	Material	Uds.
1	Tapa.	Plástico	1
2	Pasador.	Latón	1
3	Brida Cubre Relojería.	Latón	1
4	Junta Plana.	Plástico	1
5	Cristalino	Metraquilato	1
6	Junta Tórica.	Silicona	1
7	Relojería.	Ensamblado	1
8	Engranaje Magnético.	Compuesto	1
9	Anillo Magnético.	Hierro	1
10	Anillo Magnético.	Hierro	1
11	Cazo.	Plástico	1
12	Junta Plana.	Goma	1
13	Turbina.	Compuesto	1
14	Distribuidor.	Plástico	1
15	Filtro Distribuidor.	Plástico	1
16	Junta de Filtro.	Silicona	1
17	Cuerpo.	Latón	1
18	Tornillo Regulación.	Nylon	1
19	Arandela.	Nylon	1
20	Tapón.	Latón	1
21	Filtro de Entrada.	Plástico	1
22	Junta.	Goma	2
23	Tubo Racor.	Latón	2
24	Tuerca Racor.	Latón	2

3.2.2. Transductores de presión

Transductores de presión industrial son alimentados con una tensión entre 9 y 28 Vdc en corriente continua (DC), y ofrecen una intensidad de salida entre 4 y 20 mA, proporcional a la presión en el interior de la tubería en la que se encuentra (rango de señal de 0-6 bares). Éstos cuentan con un error de 0,15 % de fondo de escala. En la Figura 30, se muestra el transductor de presión de la instalación.



Figura 30. Transducción de presión ubicada en el inicio de la red colectiva de riego.

3.2.3. Caudalímetro electromagnético

El medidor de flujo inductor es un aparato para la medición volumétrica del caudal de los líquidos eléctricamente conductibles. El principio de la medición está basado en el principio de Faraday sobre la inducción electromagnética.

El medidor de flujo inductor consta de dos partes básicas, el captador de caudal y la unidad de evaluación que puede formar integrante del captador o puede estar separada e interligada con el captador mediante un cable.

Además, permite medir una amplia gama de velocidades de flujo (0,1 – 10 m/s), la conductividad mínima exigida del líquido de 20 microsiemens/centímetro.

El caudalímetro electromagnético está instalado en una tubería de diámetro nominal de 125, por lo tanto, el caudal min será de 1,2 l/s y el caudal máximo de 120 l/s. En la Figura 31, muestra el caudalímetro electromagnético de la instalación.



Figura 31. Caudalímetro electromagnético, situado en el bypass del banco de ensayos.

3.2.4 Variadores de frecuencias

Todos los parámetros eléctricos de los equipos de bomba son leídos por los variadores de frecuencia.

Un variador de frecuencia (siglas VFD, del inglés: Variable Frequency Drive o bien AFD Adjustable Frequency Drive) es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Un variador de frecuencia es un caso especial de un variador de velocidad.

Un variador de frecuencia se conecta entre la red y el motor. Su tarea consiste en transformar una tensión fija con frecuencia constante en una tensión variable con frecuencia variable. De este modo es posible cambiar de forma continua la velocidad un motor asíncrono. De un motor estándar con una bobina resulta un sistema de accionamiento de velocidad variable.

Mediante la modificación de la tensión y de la frecuencia de salida de un variador de frecuencia es posible regular de forma continua las revoluciones del motor conectado.

Además de ello, un variador de frecuencia ofrece también otras ventajas, como por ejemplo tiempos de aceleración y de retardo de ajustes, elevación de par de giro, protección electrónica contra sobrecorriente integrada o una regulación PID integrada.

Para este trabajo, se utilizan tres variadores de velocidad modelo MITSUBISHI ELECTRIC, D-700-SC, como se observa en la Figura 32 uno de los variadores de velocidad del banco de ensayos, además en la Figura 33, se observa las partes que componen el variador de frecuencia.



Figura 32. Variador de frecuencia del banco de ensayos.

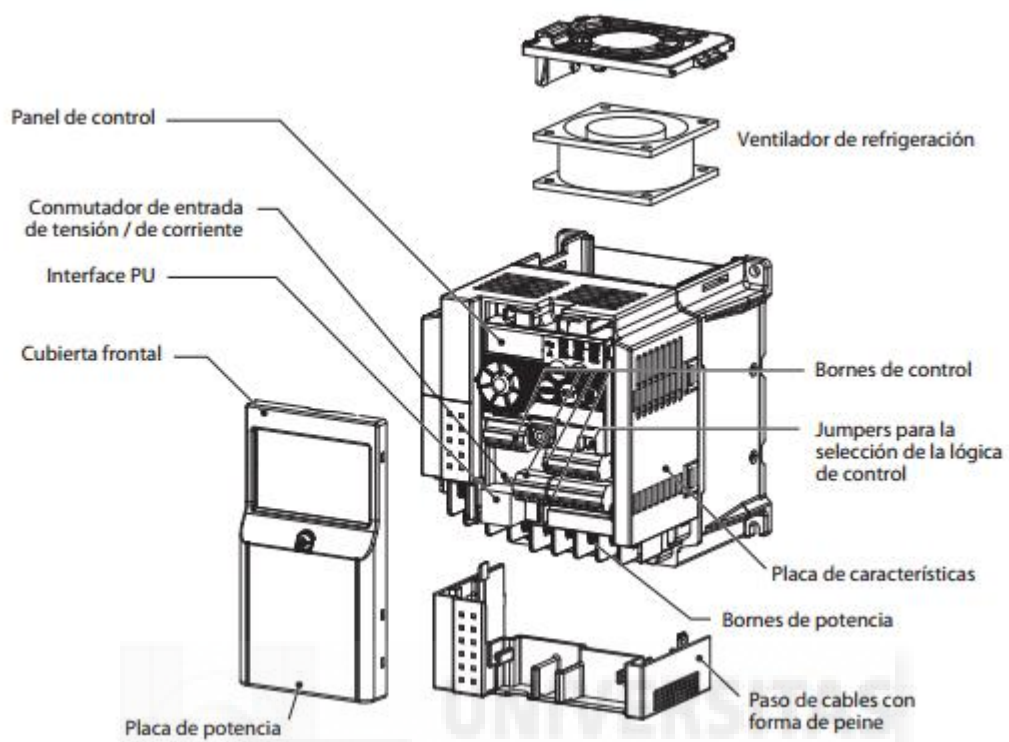


Figura 33. Componentes del variador de frecuencia.

3.3. DISEÑO DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

3.3.1. Programación de apertura y cierre de tomas

Se plantea obtener dos curvas aleatorias de frecuencia de caudal diario (frecuencia máxima caudales pequeños; frecuencia máxima caudales grandes).

- Riegos de tiempos pequeños, para cultivos hortícolas de 3 horas de riego cada regante. Probabilidad de riego por toma 1: 0.25
- Riegos de tiempos largos, para cultivos arbóreos de 7 horas de riego cada regante. Probabilidad de riego por toma 2: 0,58

Para ello, se programa el diseño de las curvas por medio de Python. Python es un lenguaje de programación interpretado cuya filosofía hace hincapié en una sintaxis que favorezca un código legible.

Para poder visualizar los datos empleados en el diseño y las curvas, se utiliza Jupyter notebook, que es una aplicación web que realiza una modelización estadística para generar las curvas de frecuencia de caudal diario.

Para generar de forma aleatoria curvas de demanda, se tiene en cuenta las características de la red, duración de cada riego, la jornada de riego, automatización, etc. Con la condición de racionar el mismo volumen de agua diario y el mismo caudal para cada regante.

La generación de curvas aleatorias de demanda diaria comienza dividiendo la Jornada Efectiva de Riego (12 horas) en intervalos de tiempo de 10 minutos. Después se elige aleatoriamente el momento de inicio de riego, en un tiempo comprendido entre el inicio de la JER y la JER menos el tiempo necesario para el riego.

Para realizar la tendencia aleatoria de caudales, se genera 100 datos aleatorios de caudales para cada una de las curvas de frecuencia de caudal diario distribuido, con la aplicación de programación utilizada. A partir de estos datos generados, se obtiene los caudales máximos, que envuelven todas las frecuencias de caudales aleatorias. Una vez obtenido los caudales máximos, se calcula la moda de estos. La moda da el valor con mayor frecuencia en una distribución de datos.

Una vez obtenida la moda de los caudales totales de la jornada efectiva de riego para cada caso, se representa la curva de frecuencia de caudales de distribución, como se observa en la Figura 34, la gráfica de frecuencia/ caudales totales.

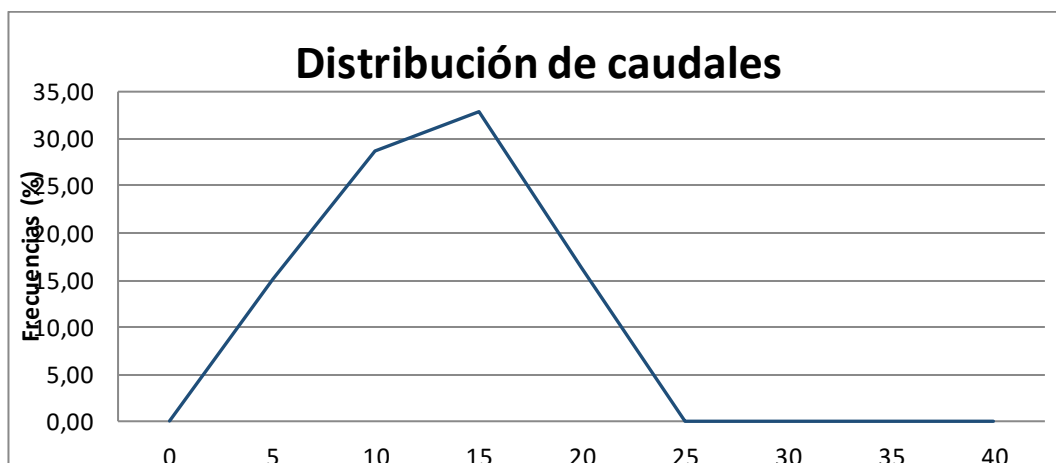


Figura 34. Curva de frecuencia de caudales distribuidos en una jornada efectiva de riego.

En relación con los resultados de la distribución de caudales totales, se realiza la programación de riegos para cada uno de los regantes que componen la comunidad, es decir, se programa la abertura y cierre de las electroválvulas ajustándolo a la distribución de los caudales totales, mediante la Tabla 14:

Tabla 14. Plantilla de programación horaria en una jornada efectiva de riego.

Hora	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4	D5	Qtotal		
8:00																							
8:10																							
8:20																							
8:30																							
...																							
...																							
20:00																							

De esta forma, ya se tiene la programación horaria del riego para las 20 tomas de agua que forman la comunidad de regantes del banco de ensayos, para cada los dos casos de estudio.

3.3.2. Curvas características

Curva característica de la red

Se ha obtenido la curva característica de la red, midiendo la presión y el caudal en cabecera de la misma, para todas las situaciones de demanda.

En el apartado 4.2 se puede ver la curva de consigna de la red de distribución del banco de ensayos.

3.3.3. Presión consigna

En el diseño de una estación de bombeo se eligen las bombas cuya altura óptima de funcionamiento sea lo más parecida posible a la presión de consigna demandada por la red. Esa presión de consigna demanda por la red, depende de la presión requerida en las tomas de riego, que a su vez dependerá del sistema de riego a presión empleado en las parcelas de cultivo. Habitualmente para riego por goteo la presión de diseño en tomas de riego suele estar entre 2 y 3 bares, mientras que en riego por aspersión entre 3,5 y 5 bares.

Una vez fijada la presión de consigna, se debe dimensionar el bombeo para que garantice la presión de diseño para todos los hidrantes de la red, de forma que el rendimiento del bombeo sea el máximo.

En este caso el procedimiento es diferente, ya que se parte de un bombeo previo existente en el banco de ensayos, que tiene unas condiciones óptimas de funcionamiento, por lo que la presión de consigna se ha fijado a partir de la altura óptima suministrada por las bombas, considerando todas las tomas de la red abiertas.

Para ello se ha obtenido la curva motriz y de rendimiento de las 3 bombas en paralelo, y se ha calculado el caudal que da lugar al rendimiento máximo del bombeo, y a partir de la curva motriz, la altura suministrada para dicho caudal, que será la presión que tiene que suministrar el bombeo.

Conocido dicho caudal, se ha ajustado el caudal individual de cada toma para que el caudal total, considerando todas las tomas abiertas, sea igual al caudal de máximo rendimiento.

Para ajustar el caudal individual de cada toma, se ha calculado la sección de un orificio para instalarlo en cada toma, con el fin de regular su caudal. La sección del orificio se ha obtenido a partir de la siguiente expresión:

$$Q = C_d \cdot S_0 \cdot \frac{\sqrt{2g\Delta h}}{\sqrt{1 - C_d^2 \cdot \left(\frac{S_0}{S}\right)^2}} \quad (22)$$

Siendo Q el caudal de la toma individual en m^3/s ; C_d el coeficiente de descarga del orificio (0,675); S la sección de la tubería en la que se instala el orificio en m^2 ; S_0 la sección del orificio en m^2 ; Δh la altura de presión aguas arriba del orificio en m ; g aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Despejando S_0 de la ecuación 22, se obtiene el diámetro del orificio, ya que el resto de variables son conocidas.

En el apartado 4.3 se muestran los valores de la presión de consigna fijada.

Para el presente trabajo, se realizará este mismo procedimiento, para poder obtener la presión consigna adecuada a las condiciones del banco de ensayos.

3.3.4. Sistema de regulación de la estación de bombeos

Para configurar los tres tipos de regulación del sistema de bombeo que se estudia en este trabajo, se deben realizar pruebas para adecuar el sistema de bombeo a la red de distribución y que puedan trabajar las bombas a un rendimiento óptimo.

Para ello, una vez elegida la presión consigna de trabajo, se prueba las distintas configuraciones para que las bombas trabajen de forma adecuada. La configuración se establece viendo el comportamiento de cada bomba.

Para empezar, se pretende repartir el funcionamiento de las 3 bombas con los caudales totales de la comunidad de regantes, es decir, veinte regantes con un caudal de $2,88 \text{ m}^3/\text{h}$ cada uno y un caudal total de $57,6 \text{ m}^3/\text{h}$. En la repartición se quiere aproximar, en la medida de lo posible, que el funcionamiento de una bomba suministre alrededor el un tercio del total del caudal total de la comunidad de regantes.

En este trabajo se ha optado por el estudio de tres sistemas de regulación de la estación de bombeos, para estudiar la energía consumida, poder comparar y seleccionar el sistema de regulación de bombeo que haga mínimo el gasto energético de la comunidad de regantes simulada en el banco de ensayos, para las dos curvas de frecuencia de caudales distribuidos en una jornada efectiva de riego de 12 horas de duración. En la Tabla 15, se presentan los diferentes ensayos para el presente trabajo:

Tabla 15. Ensayos para los casos de estudio.

		TIPO DE REGULACIÓN DE BOMBEO
TIEMPO DE RIEGO	3 horas de riego en una JER de doce horas	1 bomba con velocidad variable + 2 bombas con velocidad fija
		2 bombas con velocidad variable + 1 bomba fija
		3 bombas con velocidad variable
	7 horas de riego en una JER de 12 horas	1 bomba con velocidad variable + 2 bombas con velocidad fija
		2 bombas con velocidad variable + 1 bomba fija
		3 bombas con velocidad variable

En los ensayos, siempre una bomba será la maestra, es decir, el comportamiento de esa bomba condicionará el comportamiento de las bombas esclavas.

El funcionamiento de las bombas en cada sistema de regulación, es el siguiente:

- Regulación 1: 1 Bomba con velocidad variable + 2 Bombas de velocidad fija y sistema de puesta en marcha secuencial. La bomba con velocidad variable trabajará como maestra (bomba 3), con velocidad de giro necesaria para suministrar la presión de consigna según la demanda de caudal. Cuando la bomba maestra esté trabajando a las máximas revoluciones y la presión suministrada sea inferior a la de consigna, arrancará una bomba de velocidad fija (Esclava 1) y la bomba maestra reducirá su velocidad de giro hasta ajustar la presión suministrada la presión de consigna. Conforme aumente la demanda de agua la bomba maestra irá incrementando su velocidad, hasta que alcance su máxima velocidad de giro y la presión suministrada sea inferior a la de consigna, momento en el que se producirá el arranque de la otra bomba fija (Esclava 2). Por lo contrario, conforme se reduzca la demanda de caudal y la bomba maestra trabaje por debajo por debajo del valor de la velocidad de giro configurada, parará la esclava 2 y pasará lo mismo con la esclava 1.
- Regulación 2: 2 Bombas de velocidad variable + 1 Bomba de velocidad fija y sistema de puesta en marcha simultáneo. Las dos bombas de velocidad variable trabajaran con velocidad de giro necesaria para suministrar la

presión de consigna según la demanda de caudal, mientras que la tercera bomba trabajará con velocidad fija. Cuando la bomba maestra esté a su máxima velocidad de giro y la presión suministrada sea ligeramente inferior a la de consigna, arrancará la bomba Esclava 1 poniéndose ambas bombas a la misma velocidad de giro. Conforme aumente la demanda de caudal irán incrementando ambas bombas su velocidad de giro para suministrar la presión de consigna, hasta llegar a su máxima velocidad y la presión suministrada sea ligeramente inferior a la de consigna, momento en el que arrancará la bomba fija (Esclava 2) y las dos bombas de velocidad variable reducirán de forma simultánea su velocidad de giro. Por el contrario, conforme vaya disminuyendo la demanda de agua y las dos bombas de velocidad variable estén por debajo del valor de la velocidad de giro configurada, la bomba fija parará, y ambas incrementarán su velocidad de giro para suministrar la presión de consigna. Posteriormente, al reducir más la demanda y ambas bombas vuelvan a trabajar por debajo de la velocidad mínima de giro, parará la bomba esclava 1.

- Regulación 3: 3 Bombas de velocidad variable y sistema de arranque simultáneo. Las tres bombas trabajan de forma simultánea y misma velocidad de giro para suministrar la presión de consigna. Cuando la bomba maestra esté a su máxima velocidad de giro y la presión suministrada sea ligeramente inferior a la de consigna, arrancará la bomba Esclava 1 y ambas se pondrán a la misma velocidad de giro. Conforme aumente la demanda de caudal irán incrementando ambas bombas su velocidad de giro para suministrar la presión de consigna, hasta llegar a su máxima velocidad y la presión suministrada sea ligeramente inferior a la de consigna, momento en el que arrancará la bomba Esclava 2 y las tres bombas se pondrán a la misma velocidad de giro. Por el contrario, conforme disminuya la demanda de caudal y la velocidad de giro sea inferior a la mínima, se producirá la parada de la Esclava 2 y posteriormente la parada de la Esclava 1.

Para cada ensayo propuesto, se realiza la configuración del sistema de bombeo. En la Tabla 16, se observa la configuración de bombas en el autómata, a partir de esta, se trabajará para cada uno de los sistemas de regulación seleccionados en el presente trabajo.

Tabla 16. Sistema configuración de las tres bombas del banco de ensayos.

CASO 1, 2 Y 3: SISTEMA CONFIGURACIÓN BOMBA

	BOMBA 1	BOMBA 2	BOMBA3
¹ RPM (MAESTRA) PARA MARCHA BOMB. ESCLAVAS			
² RPM (MAESTRA) PARA PARO BOMB. ESCLAVA 1			
² RPM (MAESTRA) PARA PARO BOMB. ESCLAVA 2			
³ RPM ESCLAVA 1			
⁴ TIEMPO (S) MARCHA /PARO ESCLAVA 1			
⁵ RPM ESCLAVA 2			
⁵ TIEMPO (S) MARCHA /PARO ESCLAVA 2			

A continuación, se explica cada una de las opciones de la configuración del sistema de bombeo del autómata.

La primera opción *RPM (maestra) para marcha bomba esclavas*, se establece un valor alto de RPM, para que la bomba maestra trabaje a un óptimo de rendimiento.

La segunda opción, *RPM (maestra) para paro bomba esclava 1*, se establece las RPM de la bomba maestra para que funcionando las dos bombas debajo del mínimo óptimo, se pare la bomba esclava 1.

De la misma forma, la tercera opción, *RPM (maestra) para paro bomba esclava 2*, se establece la RPM de la bomba maestra, para que funcionando las tres bombas por debajo de mínimo óptimo, se pare la bomba esclava 2.

Para la cuarta opción, *RPM esclava 1*, se establece el valor de la esclava 1, cuando está en velocidad fija.

La quinta opción es el *tiempo (s) marcha /paro esclava 1*, es el tiempo que este el valor establecido de la maestra para que se ponga en marcha o pare.

La sexta opción es igual que la cuarta opción, pero para la bomba esclava 2.

De la misma forma la opción séptima es la misma que la quinta opción, pero para la bomba esclava 2.

3.3.5. Introducción y recogida de datos con el PLC

Una vez introducido los datos de programación de riego y la configuración de bombas en la pantalla táctil de la programación, comienza la simulación de los ensayos

propuestos en el trabajo. El PLC guarda datos registrados cada cierto intervalo de tiempo.

Primeramente, para la introducción de datos, de cada ensayo propuesto, se realiza de forma manual en la pantalla táctil del PLC, en la Figura 35, se observa la pantalla táctil con el menú general.



Figura 35. Menú principal del programador táctil.

El menú general de la pantalla táctil del programador consta de tres bloques, comunidad de regantes, control de bombas y registro de datos, que se detallan a continuación.

- Comunidad de regantes

En este primer bloque, se guardan los datos de la programación de riegos de una jornada efectiva de la comunidad de regantes, como se puede observar en la Figura 36.

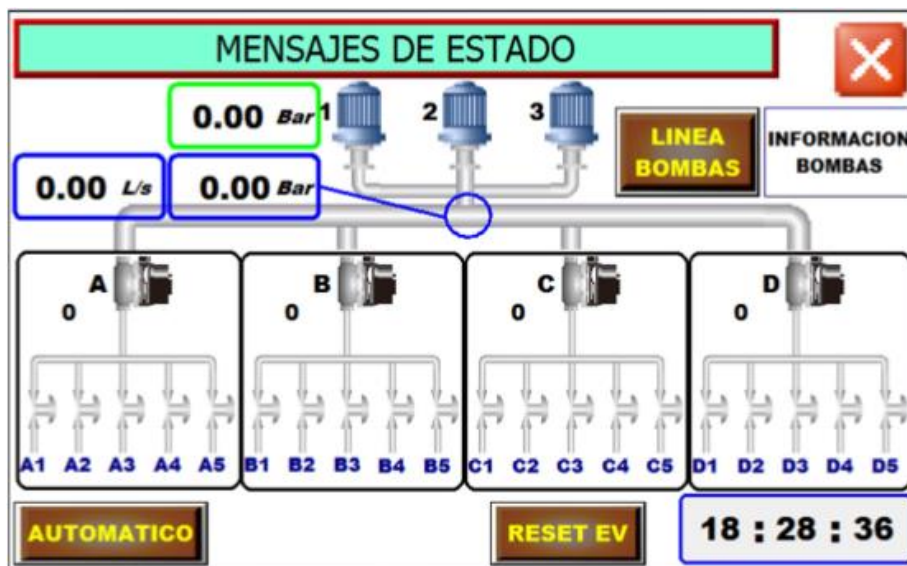


Figura 36. Menú de programación de riegos de la comunidad de regantes.

- Control bombas

En el segundo bloque de control de bombas, se tiene tres opciones: modo de trabajo, información de bombas y configuración de bombas, como se muestra en la Figura 37.



Figura 37. Menú configuración de bombas de la pantalla táctil.

En la primera opción "modo trabajo" cuando se selecciona, aparece en la pantalla táctil el modo de trabajo de cada una de las bombas, se puede trabajar a velocidad fija o velocidad variable, además se elige que bomba va a ser la maestra, la esclava 1 y la esclava 2, como se observa en la Figura 38.



Figura 38. Menú modo trabajo de la pantalla táctil.

La segunda opción “información de bombas”, se visualiza a tiempo real los registros de datos de velocidad de giro, frecuencia, revoluciones, intensidad, tensión, factor carga y potencia de las bombas, además de la presión de la comunidad de regantes, en cada momento durante la simulación, como se muestra en la Figura 39.

MENSAJES DE ESTADO							X
	BOMBA 1	BOMBA 2	BOMBA 3				
Velocidad:	0.00	0.00	0.00	Hz	CONSIGNA	0.00 Bar	
Velocidad:	20	20	20	Rpm	PRESION COMUNIDAD DE REGANTES	0.00 Bar	
Frecuencia:	0.00	0.00	0.00	Hz	PRESION 1	0.00 Bar	
Revoluciones:	0	0	0	Rpm	PRESION 2	0.00 Bar	
Intensidad:	0.00	0.00	0.00	A			
Tensión:	0.0	0.0	0.0	V			
Factor carga:	0.0	0.0	0.0	%			
Potencia:	0.00	0.00	0.00	kW			

Figura 39. Menú información de bombas de la pantalla táctil.

En la tercera opción “configuración de bombas”, aparece una tabla para introducir los datos de configuración las bombas en cada uno de los ensayos de estudio, como se observa en la Figura 40.

CONFIGURACION BOMBAS			
	BOMBA 1	BOMBA 2	BOMBA 3
RPM (MAESTRA) PARA MARCHA BOMB. ESCLAVAS	2900	0	0
RPM (MAESTRA) PARA PARO BOMB. ESCLAVAS	1900	0	0
RPM ESCLAVA 1	0	2500	0
TIEMPO (S) MARCHA/PARO ESCLAVA 1	0.0	15.0	0.0
RPM ESCLAVA 2	0	0	3000
TIEMPO (S) MARCHA/PARO ESCLAVA 2	0.0	0.0	20.0

Figura 40. Menú configuración de bombas de la pantalla táctil.

- Registro de datos

En este último bloque, se establece el tiempo de toma de datos de cada ensayo de simulación de la comunidad de regantes, como muestra en la Figura 41.

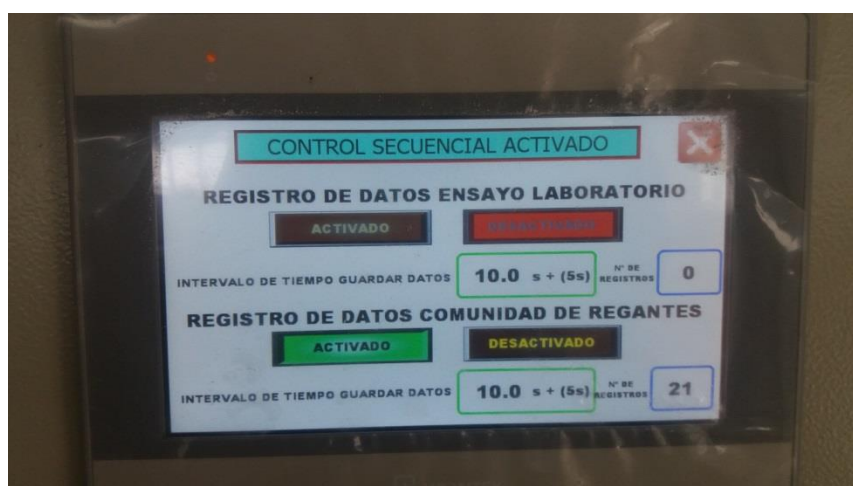


Figura 41. Menú registro de datos de la pantalla táctil.

Para finalizar, se guarda en el PLC, el registro de datos en formato .dtl que se convertirá con el programa *Easy Converter* en formato .csv, para poder trabajar de forma más fácil y sencilla.

3.3.6. Energía consumida y coste energético

Los datos obtenidos del PLC para cada ensayo propuesto serán los siguientes:

- Caudal de los cuatros contadores
- Caudal de cada hidrante
- Potencia de cada una de las bombas
- Rpm de cada una de las bombas
- Presión de la comunidad de regantes

A partir de los datos obtenidos por el autómata, se calcula la potencia suministrada por las bombas, se obtiene la potencia absorbida y a partir de ambas, se calcula rendimiento del bombeo, la energía consumida y los costes energéticos.

Para el cálculo de la energía consumida, se parte de la potencia absorbida en cada intervalo de tiempo, y el tiempo de cada intervalo de toma de datos:

$$E_c = \sum N_{(abs)i} \cdot T_i \quad (23)$$

Siendo: E_c la energía consumida en kWh, $N_{(abs)i}$ la potencia absorbida en el intervalo i en kW, y T_i el tiempo del intervalo en h.

Para el cálculo del coste energético del bombeo, a partir de la ecuación 12, vista en el apartado 1.5.4 se calcula mediante la expresión:

$$C_E = P \cdot E_c = P \cdot \sum N_{(abs)i} \cdot T_i \quad (24)$$

Siendo: C_E el coste energético en €; P el coste de la energía en €/kWh; E_c la energía consumida en kWh; $N_{(abs)i}$ la potencia absorbida en el intervalo i en kW, y T_i el tiempo del intervalo en h.

3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez obtenido el registro de datos del PLC y calculado los parámetros objeto de presente trabajo, se realizó el análisis de los resultados obtenidos.

Primeramente, de los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos propuestos, se procedió a relacionar y comparar los resultados para establecer la configuración de bombas más adecuada para cada tiempo de riego establecido y poder obtener una mayor optimización energética de la simulación de la comunidad de regantes.

Dentro del análisis de resultados, se detallan los siguientes apartados:

- Relación de datos

Los datos analizados, se obtuvieron por el PLC en formato dtl., éste se convirtió a formato .csv, para cada caso estudiado y se recogen en la Tabla 17.

Tabla 17. Datos obtenidos por el PLC.

Horario
Tiempo
Milisegundos
Caudal A
Caudal A1
Caudal A2
Caudal A3
Caudal A4
Caudal A5
Caudal B
Caudal B1
Caudal B2
Caudal B3
Caudal B4
Caudal B5
Caudal C
Caudal C1
Caudal C2
Caudal C3
Caudal C4

Caudal C5
Caudal D
Caudal D1
Caudal D2
Caudal D3
Caudal D4
Caudal D5
RPM B1
RPMB2
RPM B3
POT.1
POT.2
POT.3
PRESION CR

- Cálculo de los resultados

A continuación, con los datos obtenidos, y mediante las ecuaciones detalladas en el apartado 3.3.6 se calculó la potencia suministrada, el rendimiento del bombeo y la energía consumida, para los seis ensayos propuestos en el presente trabajo. En la tabla 18, se muestra los parámetros calculados para las seis combinaciones estudiadas.

Tabla 18. Tabla resumen de resultados de los ensayos propuestos.

FECHA	HORA	DIFERENCIA HORA	HORA	DIFER HORA	CAUDAL A	CAUDAL A (m3/h)	CAUDAL B	CAUDAL B (m3/h)	CAUDAL C	CAUDAL C (m3/h)	CAUDAL D	CAUDAL D (m3/h)	CAUDAL TOTAL (L/S)	CAUDAL TOTAL (m3/h)	PRESION	PRESION (mca)
25/07/2016	8:11:03	0:01:03	0,0175	0,0175	1052	3,7872	1030	3,708	0	0	1063	3,8268	3,145	11,322	188	19,176
25/07/2016	8:12:06	0:02:08	0,0180556	0,04	1052	3,7872	1020	3,672	0	0	1075	3,87	3,147	11,3292	189	19,278
25/07/2016	8:13:11	0:03:13	0,0180556	0,05	1052	3,7872	1020	3,672	0	0	1075	3,87	3,147	11,3292	189	19,278
25/07/2016	8:14:16	0:04:18	0,0180556	0,07	1063	3,8268	1020	3,672	0	0	1075	3,87	3,158	11,3688	187	19,074
25/07/2016	8:15:21	0:05:23	0,0180556	0,09	1063	3,8268	1030	3,708	0	0	1075	3,87	3,168	11,4048	189	19,278

POTENCIA B1	POTENCIA B1 (Kw)	POTENCIA B2	POTENCIA B2 (Kw)	POTENCIA B3	POTENCIA B3 (Kw)	POT.TOTAL (Kw)	POT. ABS (Kw)	RTO %	ENERGÍA CONSUMIDA	ENER.CONS	RPM B1	RPM2	RPM3
0	0	0	0	149	1,49	1,49	0,591626581	39,71	0,03	0,0261	0	0	2765
0	0	0	0	154	1,54	1,54	0,595151765	38,65	0,05	0,0278	0	0	2766
0	0	0	0	149	1,49	1,49	0,595151765	39,94	0,08	0,0269	0	0	2770
0	0	0	0	150	1,5	1,5	0,590912139	39,39	0,11	0,0271	0	0	2756
0	0	0	0	146	1,46	1,46	0,599123226	41,04	0,13	0,0264	0	0	2763

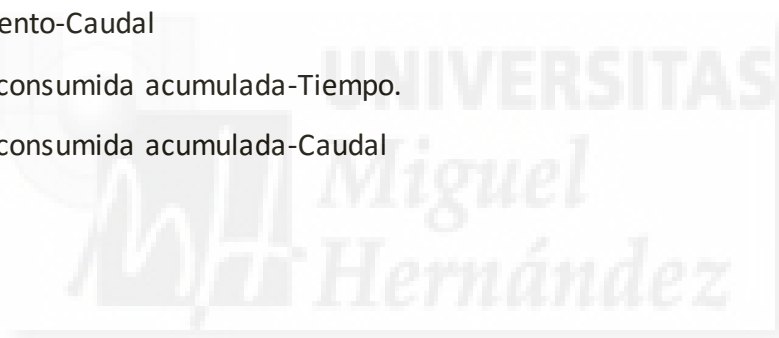
- Comparación y relación de resultados

Una vez calculados los parámetros anteriores, se realizó las curvas de los seis ensayos estudiados en este trabajo para poder comparar los resultados con las distintas combinaciones y analizar el sistema de regulación de bombeo que minimice el consumo de energía para las dos curvas de frecuencia de caudales.

Para cada uno de los ensayos realizados, se representa de forma gráfica la curva (Y-X) Altura-Caudal + Rendimiento-Caudal.

Por otro lado, también se comparan los resultados de las distintas formas de regulación, para cada uno de las dos curvas de demanda ensayadas, representando de forma gráfica las siguientes curvas:

- Caudal-Tiempo
- Potencia absorbida-Tiempo + Potencia suministrada-Tiempo.
- Potencia-Caudal.
- Rendimiento-Caudal
- Energía consumida acumulada-Tiempo.
- Energía consumida acumulada-Caudal





4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CURVAS DE FRECUENCIA DE CAUDAL DIARIO DISTRIBUIDO y HORARIO DE APERTURA Y CIERRE DE TOMAS.

4.1.1 Curvas de frecuencia de caudal diario distribuido

En los ensayos realizados para la obtención de los resultados de apertura y cierre de tomas en una JER, primero se ha obtenido las dos curvas aleatorias de frecuencias de caudales totales para cada uno de los tiempos de riego, a partir de la moda para los 100 casos aleatorios para cada una de las curvas. En la Figura 42 y Figura 43, se muestran las curvas aleatorias de frecuencias de caudales para tiempos de riego de tres horas y siete horas, respectivamente.

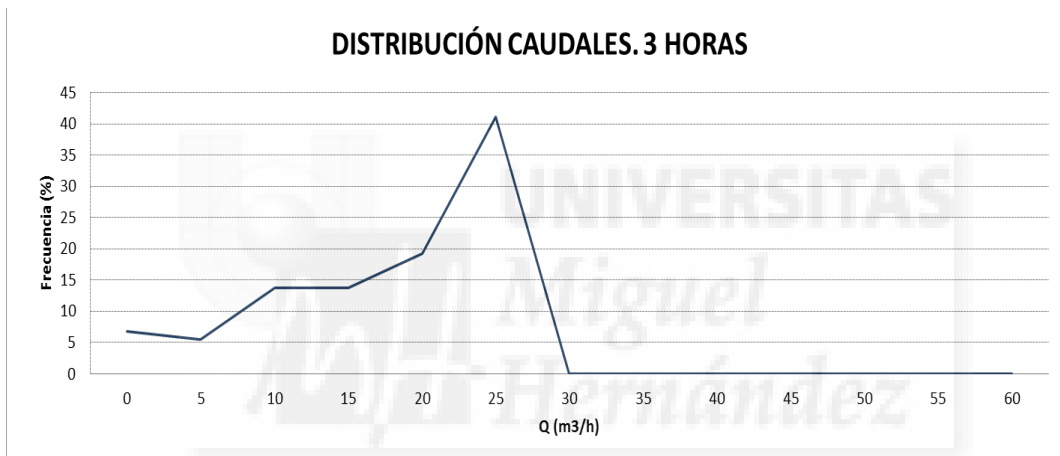


Figura 42. Curva aleatoria de frecuencia de caudales totales para riegos de tres horas.

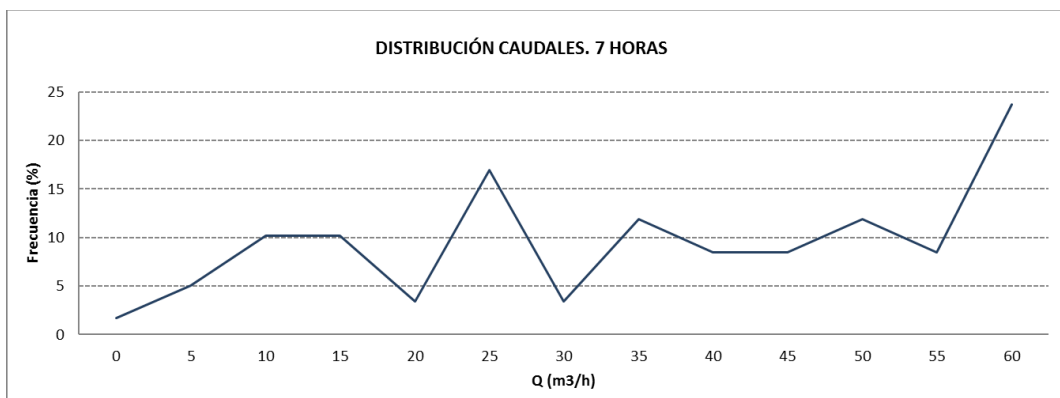


Figura 43. Curva aleatoria de frecuencia de caudales totales para riegos de siete horas.

Los resultados muestran que para tiempos de riego de 3 horas en una JER de 12 horas, la máxima frecuencia de caudales totales es de un 41 %, para caudales totales que

oscilan de entre 20-25 m³/h y el caudal máximo durante la JER es de 23,04 m³/h, como se observa en la Figura 44. En cambio, para tiempos de riego de siete horas en una JER de 12 horas, la máxima frecuencia, es menor, de 24 % para caudales totales que oscilan entre 55-60 m³/h, el máximo caudal empleado durante la JER es de 57,6 m³/h, que coincide con la máxima frecuencia, como se muestra en la Figura 45. Es decir, cuanto mayor es el tiempo riego de cada regante mayor será el caudal total durante la JER. En este caso de estudio, para riegos de tres horas, nunca coinciden a la vez todos los regantes, la frecuencia es 0% para caudales de 57,6, que es el caudal total de todos los regantes. En cambio, para tiempos de riego de siete horas, sí que coinciden a la vez todos los regantes, siendo la máxima frecuencia durante la JER, con un 24 %.

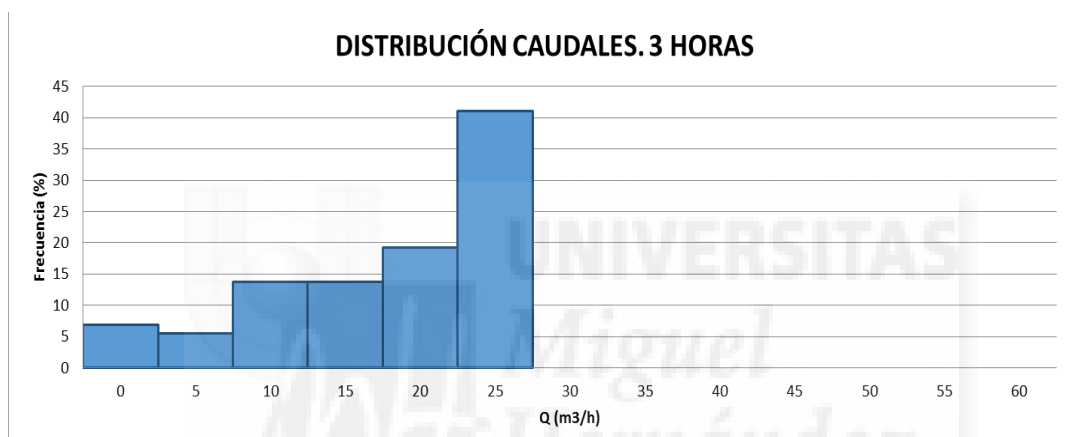


Figura 44. Histograma de frecuencia de caudales totales para riegos de tres horas.

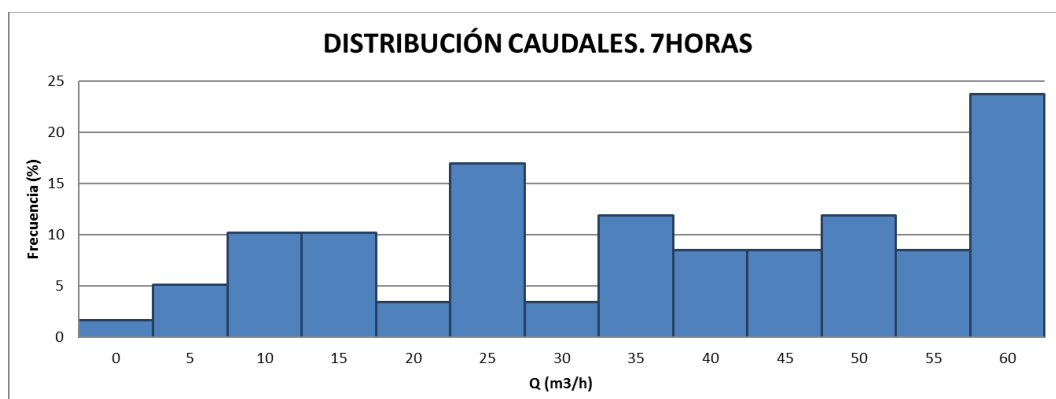


Figura 45. Histograma de frecuencia de caudales totales para riegos de siete horas.

4.1.2 Horario de apertura y cierre de tomas

Una vez obtenidas las curvas de frecuencias de caudales totales, se ha realizado el horario de apertura y cierre de tomas para una JER de doce horas con Excel,

ordenando los datos recogidos en la realización de las curvas de frecuencia hasta conseguir una programación horaria de apertura y cierre de tomas ajustada a las curvas obtenidas. En las Tablas 19 y 20, se muestran el horario de apertura y cierre de tomas para tiempos de riego de tres y siete horas, respectivamente.

La programación horaria va de las ocho de la mañana hasta las ocho de la tarde, con intervalos de 10 minutos.



HORARIO DE ABERTUR	COMUNIDAD DE REGANTES																				Q TOTAL (m3/h)	
ELECTROVÁLVULAS	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4	D5		
01/01/2016 8:00																						0
01/01/2016 8:10	2,88																					2,88
01/01/2016 8:20	2,88																					2,88
01/01/2016 8:30	2,88																					2,88
01/01/2016 8:40	2,88																					2,88
01/01/2016 8:50	2,88	2,88	2,88																			8,64
01/01/2016 9:00	2,88	2,88	2,88																			8,64
01/01/2016 9:10	2,88	2,88	2,88																			8,64
01/01/2016 9:20	2,88	2,88	2,88																			8,64
01/01/2016 9:30	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88																	14,4
01/01/2016 9:40	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88																	14,4
01/01/2016 9:50	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88																	14,4
01/01/2016 10:00	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88																	14,4
01/01/2016 10:10	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88																17,28
01/01/2016 10:20	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88																17,28
01/01/2016 10:30	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88																17,28
01/01/2016 10:40	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88																17,28
01/01/2016 10:50	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88																17,28
01/01/2016 11:00	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88															20,16
01/01/2016 11:10	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88															20,16
01/01/2016 11:20		2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88															17,28
01/01/2016 11:30		2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88														20,16
01/01/2016 11:40		2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88														20,16
01/01/2016 11:50		2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88														20,16
01/01/2016 12:00			2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88												20,16
01/01/2016 12:10			2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88												20,16
01/01/2016 12:20			2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88												20,16
01/01/2016 12:30			2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88											23,04
01/01/2016 12:40				2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88											17,28
01/01/2016 12:50					2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88										20,16
01/01/2016 13:00					2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88										20,16
01/01/2016 13:10					2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88									23,04
01/01/2016 13:20						2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88									20,16
01/01/2016 13:30						2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88									20,16
01/01/2016 13:40						2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88								23,04
01/01/2016 13:50						2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88								23,04
01/01/2016 14:00						2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88								23,04
01/01/2016 14:10						2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88								20,16
01/01/2016 14:20						2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88							23,04
01/01/2016 14:30						2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88							23,04
01/01/2016 14:40							2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88							20,16
01/01/2016 14:50							2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88						23,04
01/01/2016 15:00							2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88						23,04
01/01/2016 15:10								2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88						17,28
01/01/2016 15:20								2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88					20,16
01/01/2016 15:30								2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88					23,04
01/01/2016 15:40									2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88					20,16
01/01/2016 15:50										2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88					20,16
01/01/2016 16:00											2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88					17,28
01/01/2016 16:10												2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88					17,28
01/01/2016 16:20													2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88				20,16
01/01/2016 16:30														2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88			20,16
01/01/2016 16:40															2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88		20,16
01/01/2016 16:50																2,88	2,88	2,88	2,88	2,88		17,28
01/01/2016 17:00																	2,88	2,88	2,88	2,88		17,28
01/01/2016 17:10																		2,88	2,88	2,88	2,88	17,28
01/01/2016 17:20																			2,88	2,88	2,88	17,28
01/01/2016 17:30																				2,88	2,88	14,4
01/01/2016 17:40																					2,88	14,4
01/01/2016 17:50																					2,88	14,4
01/01/2016 18:00																					2,88	11,52
01/01/2016 18:10																					2,88	11,52
01/01/2016 18:20																					2,88	11,52
01/01/2016 18:30																					2,88	8,64
01/01/2016 18:40																					2,88	5,76
01/01/2016 18:50																					2,88	5,76
01/01/2016 19:00																					2,88	5,76
01/01/2016 19:10																					2,88	5,76
01/01/2016 19:20																					2,88	5,76
01/01/2016 19:30																						0
01/01/2016 19:40																						0
01/01/2016 19:50																						0
01/01/2016 20:00																						0
Q regante (m3/h)	54,72	54,72	54,7	54,72	54,7	54,72	54,7	54,72	54,7	54,7	54,72	54,7	54,7	54,72	54,72	54,7	54,7	54,7	54,7	54,7	54,72	1094,4

Tabla 19. Horario de apertura y cierre para riegos de tres horas cada regante y una JER de doce horas.

4.2. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS

En la Figura 46, se muestra las curvas características del conjunto de bombeo de los ensayos realizados. Como se observa, las tres bombas son semejantes, apenas hay diferencias de altura con respecto al caudal, con un caudal máximo de cada bomba que oscila entre 43-48 m³/h con una altura de 6-7 m.c.a, en cambio cuando las tres bombas funcionan en paralelo se alcanza caudales mayores, un caudal máximo de 80 m³/h con una altura de 17 m.c.a.

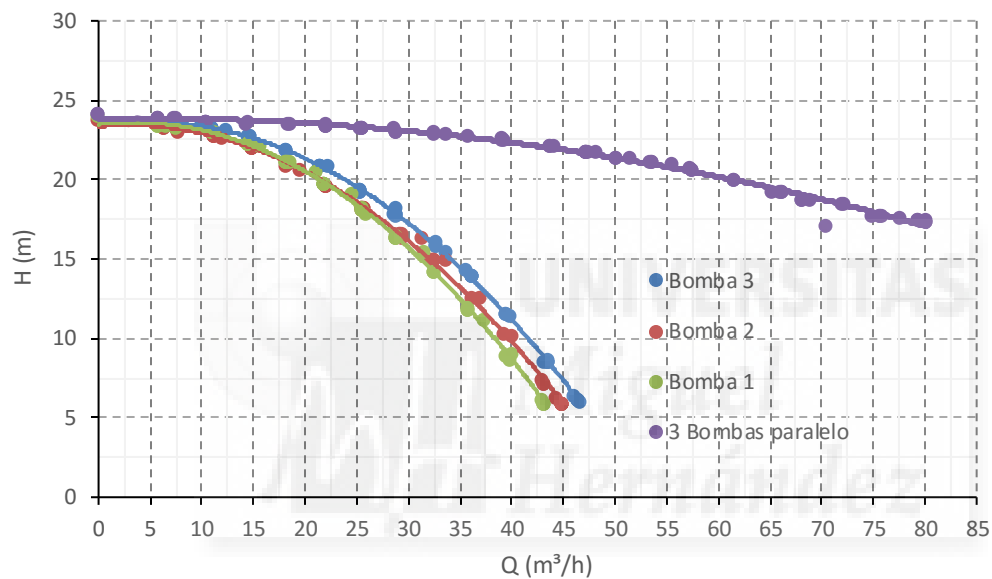


Figura 46. Curvas Caudal–Altura de las bombas 1, 2, 3 y las tres bombas en paralelo.

Por otra parte, en la Figura 47, se muestra la curva característica y la curva rendimiento-caudal de la bomba 1. En la gráfica se muestra las ecuaciones de la línea de tendencia, para un máximo rendimiento de la bomba 1, se obtiene un caudal de 24,82 m³/h y una altura de 18,49 m.c.a.

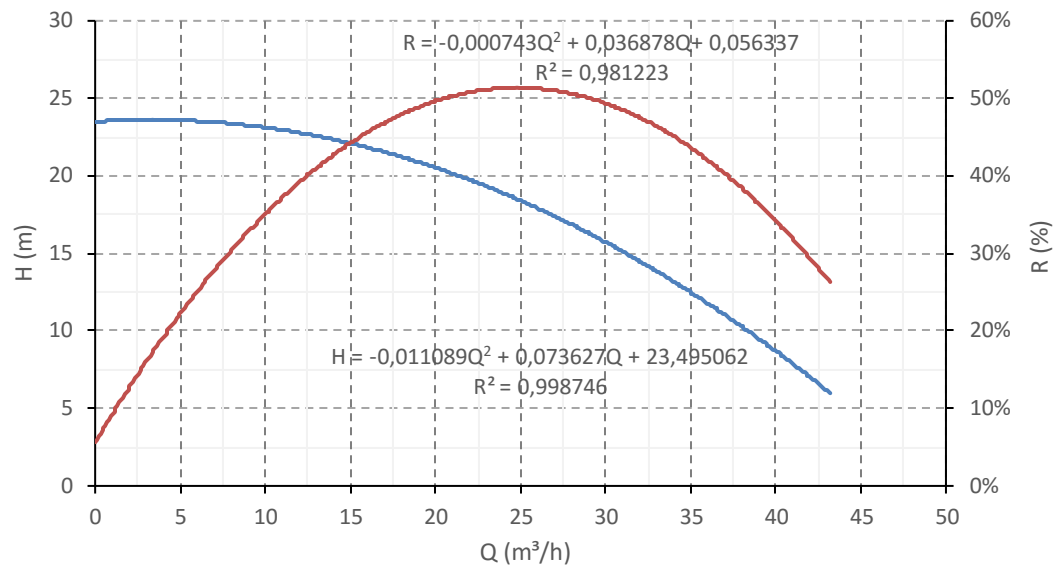


Figura 47. Curva característica y la curva rendimiento-caudal de la bomba 1.

En la Figura 48, se observa la curva característica y la curva rendimiento-caudal de la bomba 2. En la gráfica se muestra las ecuaciones de la línea de tendencia, para un máximo rendimiento de la bomba 2, se obtiene un caudal de 25,26 m³/h y una altura de 18,47 m.c.a.

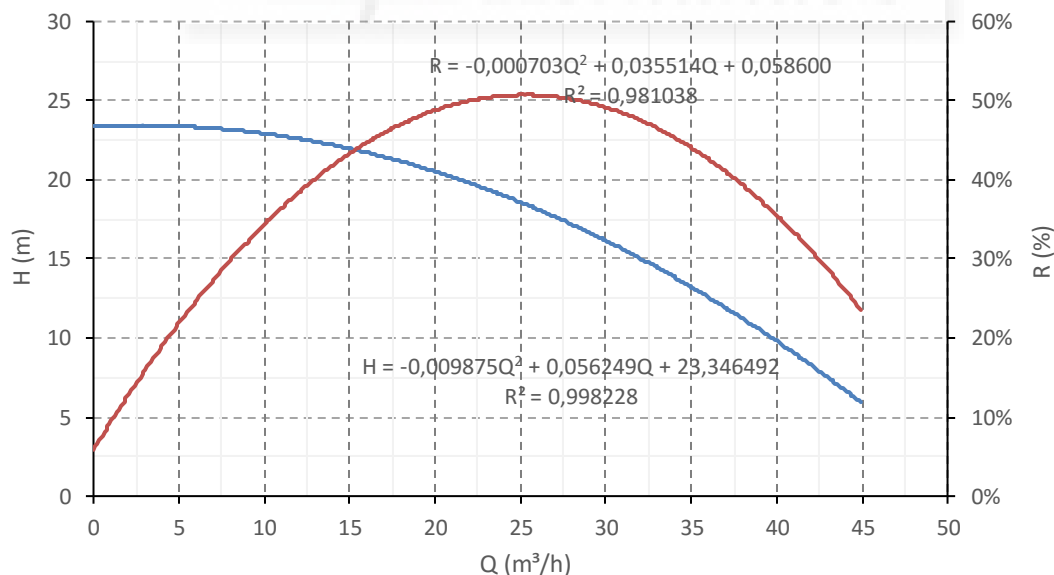


Figura 48. Curva característica y la curva rendimiento-caudal de la bomba 2.

En la Figura 49, se muestra la curva característica y la curva rendimiento-caudal de la bomba 3. En la gráfica se muestra las ecuaciones de la línea de tendencia, para un máximo rendimiento de la bomba 3, se obtiene un caudal de 25,78 m³/h y una altura de 19,23 m.c.a.

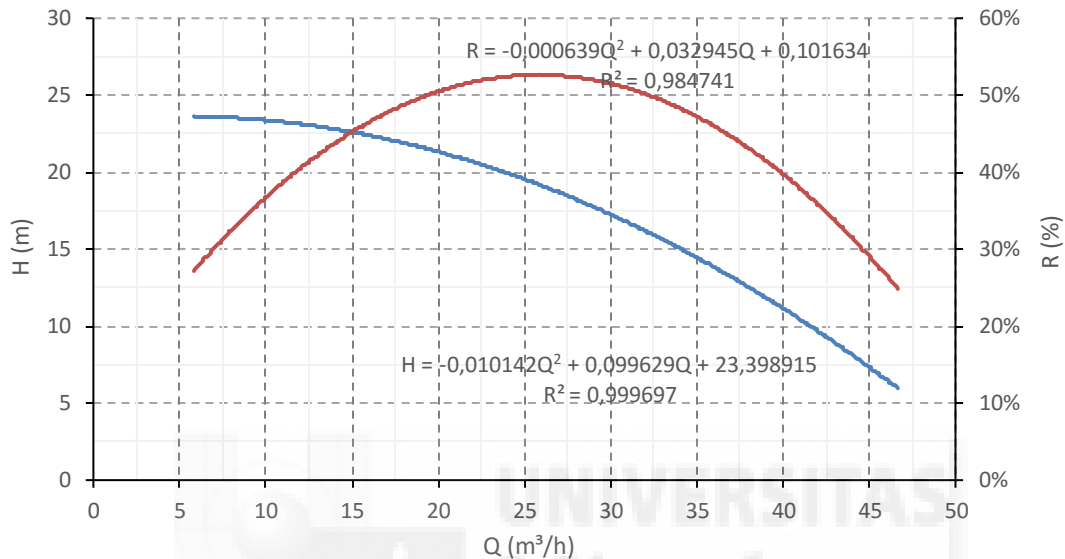


Figura 49. Curva característica y la curva rendimiento-caudal de la bomba 3.

Por último, en la figura 50, se muestra la curva característica y la curva rendimiento-caudal de las tres bombas en paralelo. En la gráfica se muestra las ecuaciones de la línea de tendencia, para un máximo rendimiento de las tres bombas en paralelo, se obtiene un caudal de 65,85 m³/h y una altura de 19,42 m.c.a.

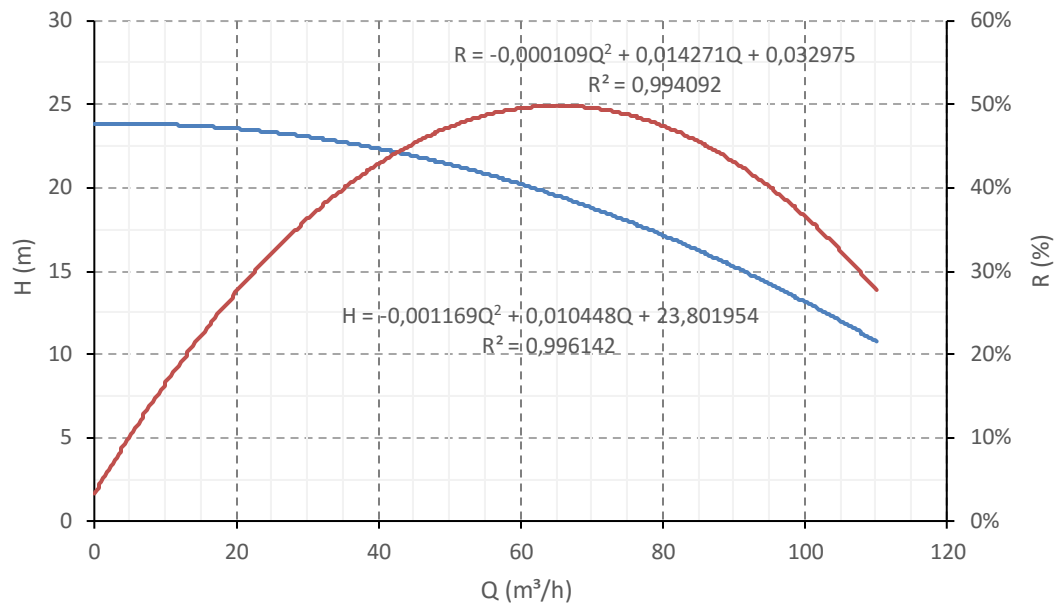


Figura 50. Curva característica y la curva rendimiento-caudal de las tres bombas en paralelo.

Para resumir, en la Tabla 21, se muestra los valores obtenidos de caudales (m^3/h) y presiones (m.c.a) para cada una de los tipos de funcionamiento de las bombas.

Tabla 21. Resumen de los valores obtenidos a rendimiento máximo de las bombas.

	CAUDAL A RTO MÁX (m^3/h)	H A RTO MÁX (m.c.a)
B1	24,82	18,49
B2	25,26	18,47
B3	25,78	19,23
3B PARALELO	65,85	19,42

4.3. PRESION DE CONSIGNA Y CURVA DE CONSIGNA DE LA RED

La presión de consigna de la red, una vez realizado el ensayo con las tres bombas funcionando en paralelo y con todas las tomas abiertas, se ha obtenido a partir de la curva Altura-Caudal y Rendimiento-Caudal. Se ha conseguido el caudal que da un rendimiento máximo de las tres bombas en paralelo y la altura suministrada por las tres bombas para dicho caudal. Como se puede ver en la Figura 51., el caudal máximo es de $65,3 \text{ m}^3/\text{h}$ que se corresponde con una altura suministrada de $19,4 \text{ m}$. Por tanto, la presión de consigna de la red ha sido de $19,4 \text{ m}$.

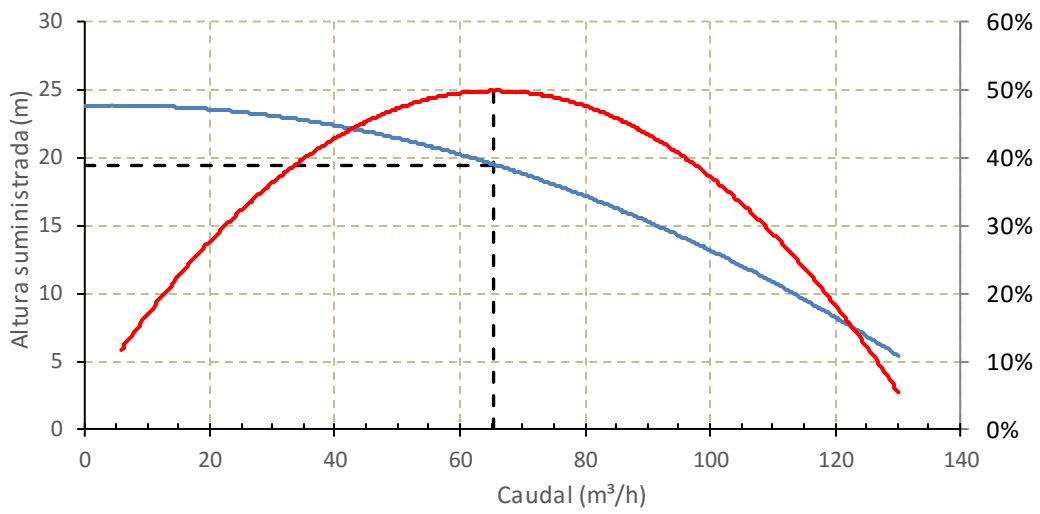


Figura 51. Curva característica y presión consigna red.

Para dicha presión de consigna, la curva de consigna de la red se muestra en la Figura 52.

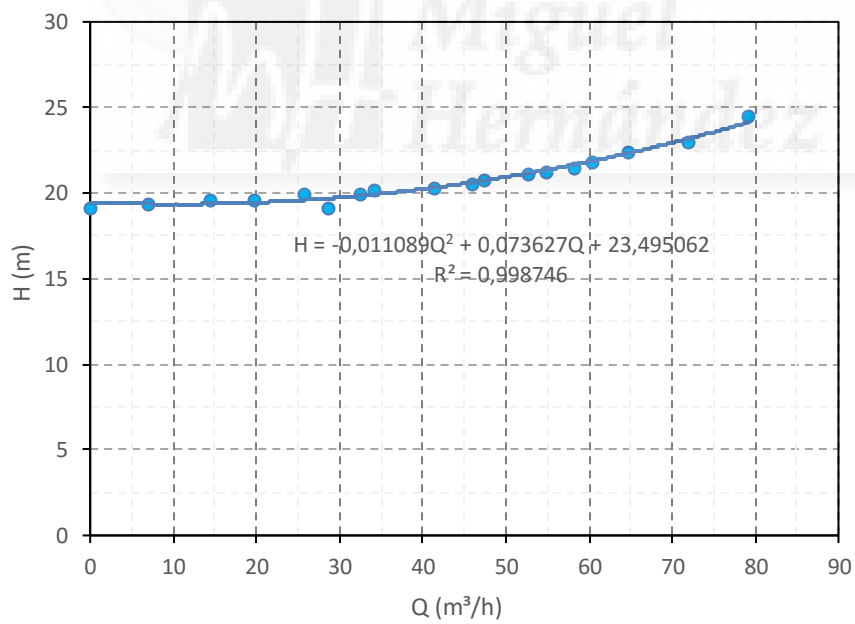


Figura 52. Curva consigna de la red.

4.4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS

Una vez realizada la simulación de los tres sistemas de regulación de riego con las dos curvas de frecuencias de caudales máximos, y una vez realizado los cálculos explicados en la metodología planteada, se obtuvieron los siguientes resultados:

4.4.1. Curvas altura caudal y rendimiento caudal

Tiempos de riego de tres horas

En los tres sistemas de regulación de bombeo, existen diferencias en los resultados obtenidos de rendimiento de las bombas. Estas curvas, de las Figuras 53, 54 y 55, muestran que los saltos de cambio de número de bombas en funcionamiento si son acusados, por lo tanto, se ven alterados los valores de rendimientos con el cambio de bomba o funcionamiento de bombas en un mismo sistema de regulación. El sistema de regulación que mayor diferencia de rendimiento tiene con el cambio de funcionamiento de una bomba a dos bombas en paralelo es el sistema de regulación de 1BVV+2BVF, con una diferencia de rendimiento de 11 %, con un 8 % el sistema de regulación de 2BVV+1BVF, y por último, el que menos diferencia es el sistemas de 3BVV, con un 7%.

Por otra parte, el sistema de regulación de 3BVV es el que tiene mejor rendimiento de dos bombas en paralelo de 48,5 %, para el sistema de regulación 2BVV+1BVF, el valor es de 44%, y para el sistema de regulación de 1BVV+2BVF, un rendimiento del 41 %.

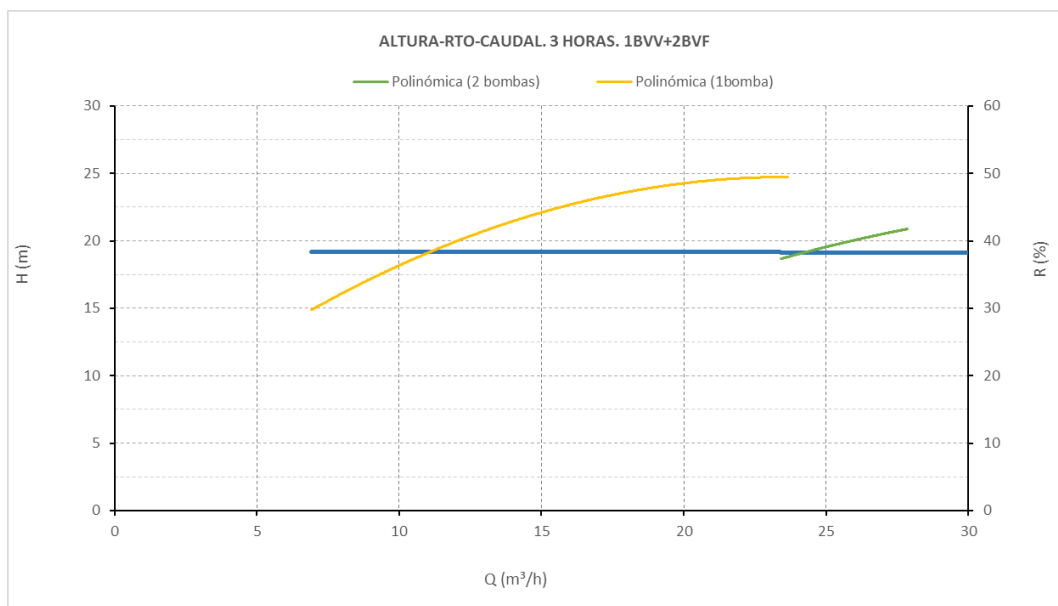


Figura 53. Curvas de altura-rendimiento-caudal para tiempos de riego de tres horas.

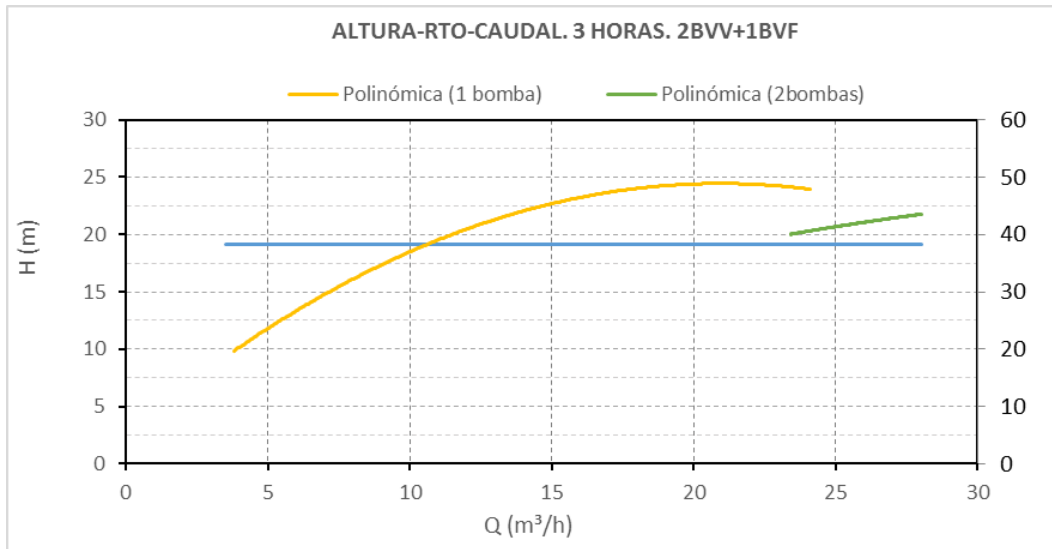


Figura 54. Curvas de altura-rendimiento-caudal para tiempos de riego de tres horas.

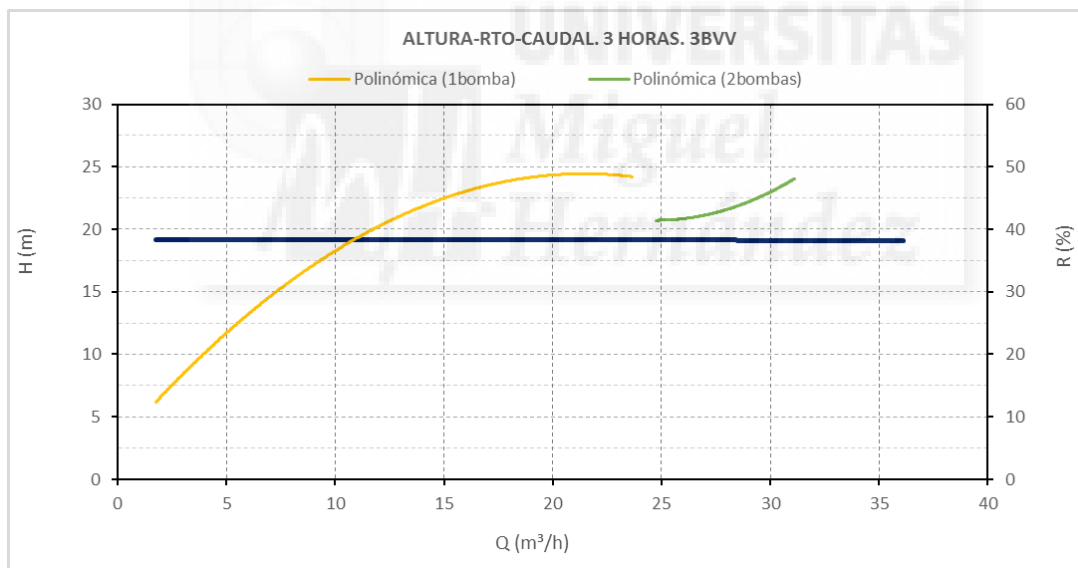


Figura 55 Curvas de altura-rendimiento-caudal para tiempos de riego de tres horas.

Tiempos de riego de siete horas

En los tres sistemas de regulación de bombeo, no existen grandes discrepancias en los resultados obtenidos de rendimiento de las bombas. Estas curvas, de las Figuras 56, 57 y 58, muestran que los saltos de cambio de número de bombas en funcionamiento no son acusados, por lo tanto, no se ven alterados los valores de rendimientos con el cambio de bomba o funcionamiento de bombas de un mismo sistema de regulación.

Por otra parte, el sistema de regulación de bombeo 3BVV es el que tiene mejor rendimiento de tres bombas en paralelo de aproximadamente un valor de 43 %, siendo para el sistema de regulación de 2BVV+1BVF, un valor de 41%, y para el sistema de regulación de 1BVV+2BVF, un rendimiento del 40,8 %.

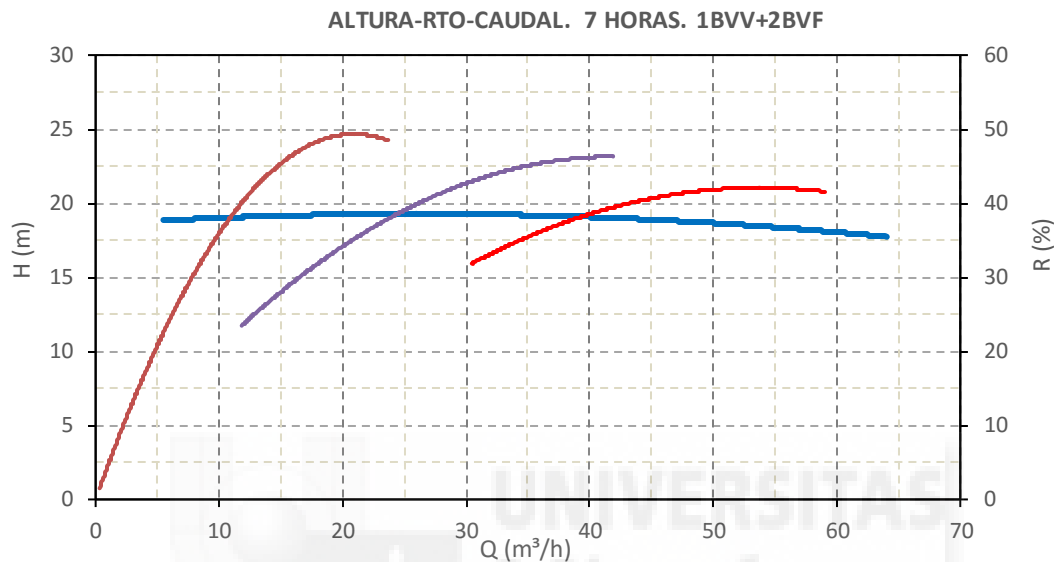


Figura 56. Curvas de altura-rendimiento-caudal para tiempos de riego de siete horas.

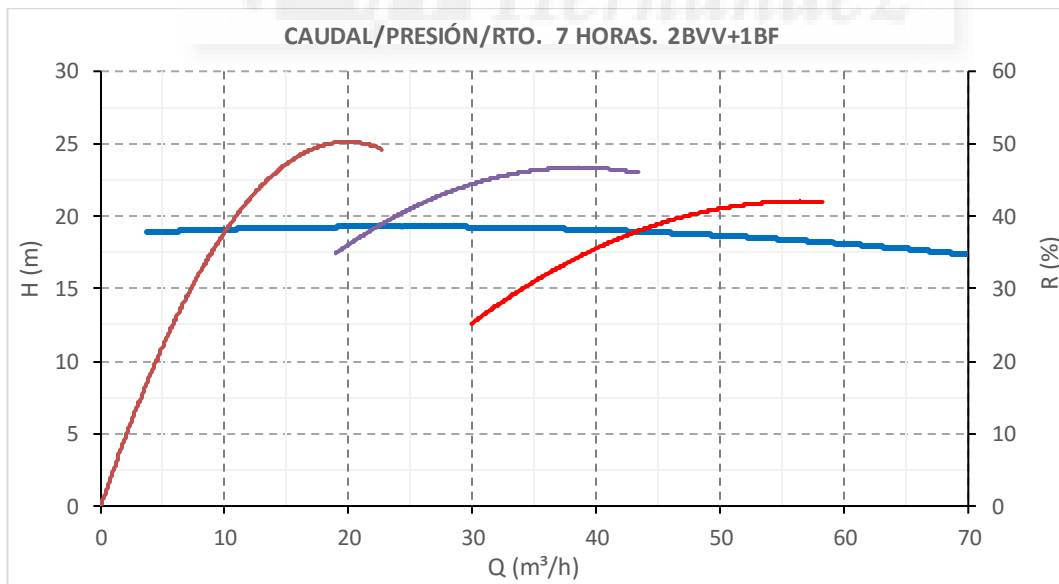


Figura 57. Curvas de altura-rendimiento-caudal para tiempos de riego de siete horas.

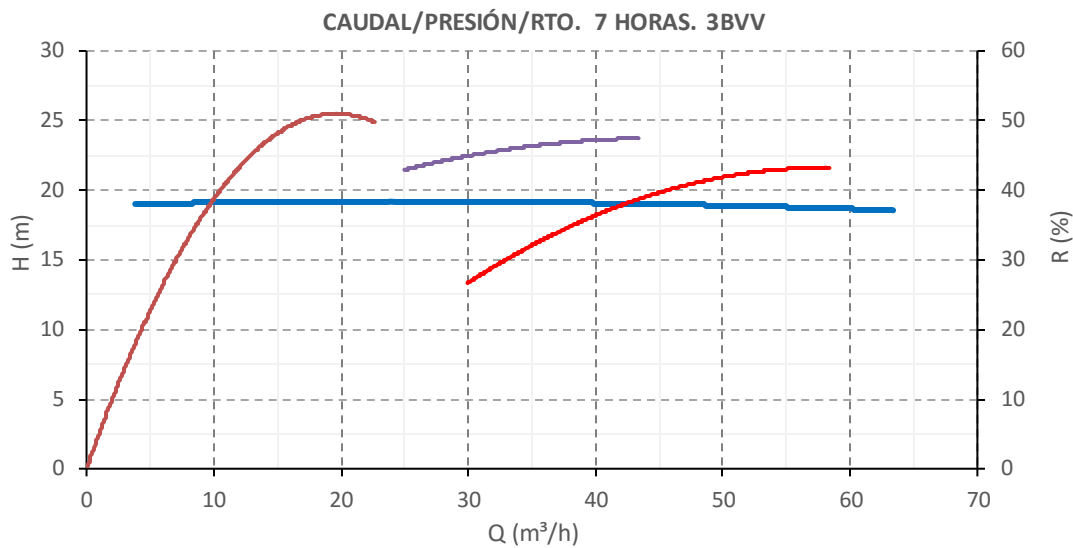


Figura 58. Curvas de altura-rendimiento-caudal para tiempos de riego de siete horas.

4.4.2. Distribución de caudal

Para tiempos de riego de tres horas, los resultados obtenidos de las frecuencias de caudales teóricas no se ajustan con los datos obtenidos por el automático del banco de ensayos. Las programaciones de riego para los tres sistemas de regulación de bombeo son iguales, es decir, los resultados teóricos de frecuencias de caudales son iguales. En cambio, los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, difieren los valores de caudales con respecto al tiempo para los tres sistemas de regulación de bombeo, como se observa en la Figura 59. Además, también se aprecian diferencias en el gráfico de frecuencia de caudales para los tres tipos de regulación de bombeo, cuando deberían ser valores iguales, como se muestra en la Figura 60. Estas diferencias de caudal distribuido registradas por el automático, pueden ser debidas a interferencias en la señal captada, por falta de apantallamiento en los cables de señal, ya que sucede algo parecido en la distribución para tiempo de riego de siete horas.

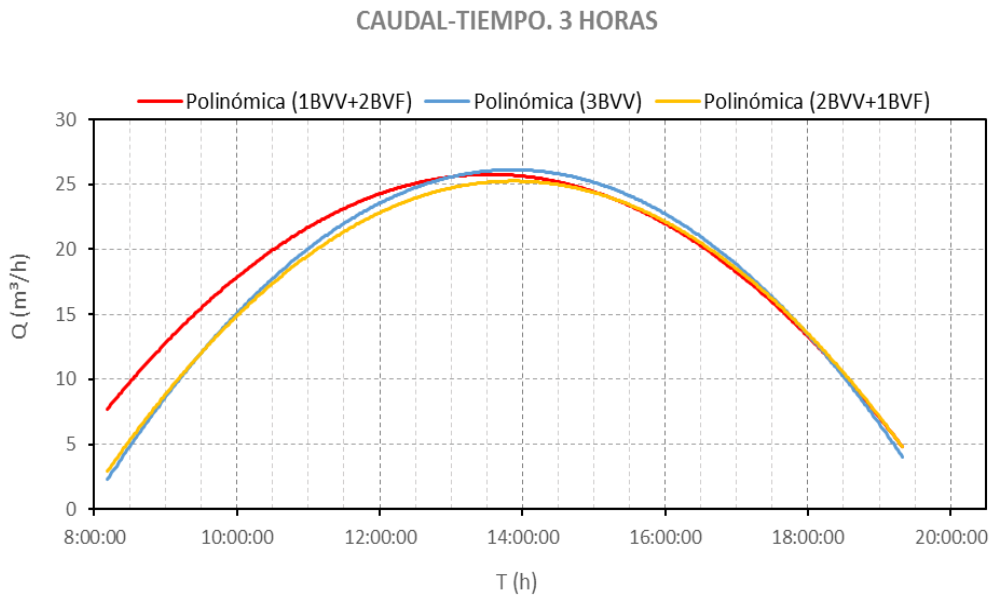


Figura 59. Curva caudal-tiempo de los sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de tres horas.

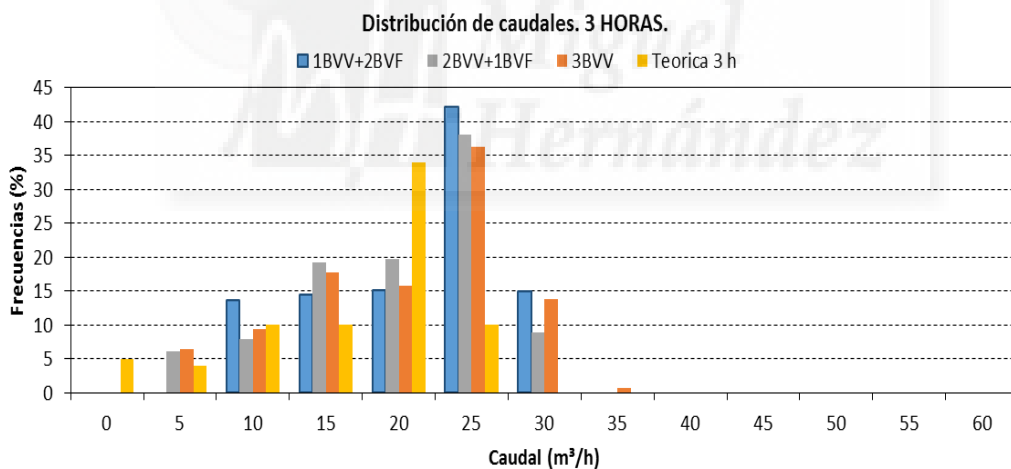


Figura 60. Distribución de frecuencia de caudales de los sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de tres horas.

De la misma manera sucede para tiempos de riego de siete horas. Las programaciones de riego son iguales, siendo las frecuencias de caudales teóricas iguales pero los resultados obtenidos por el autómata en el banco de ensayos difieren, como se puede observar en la Figura 61 y la Figura 62.

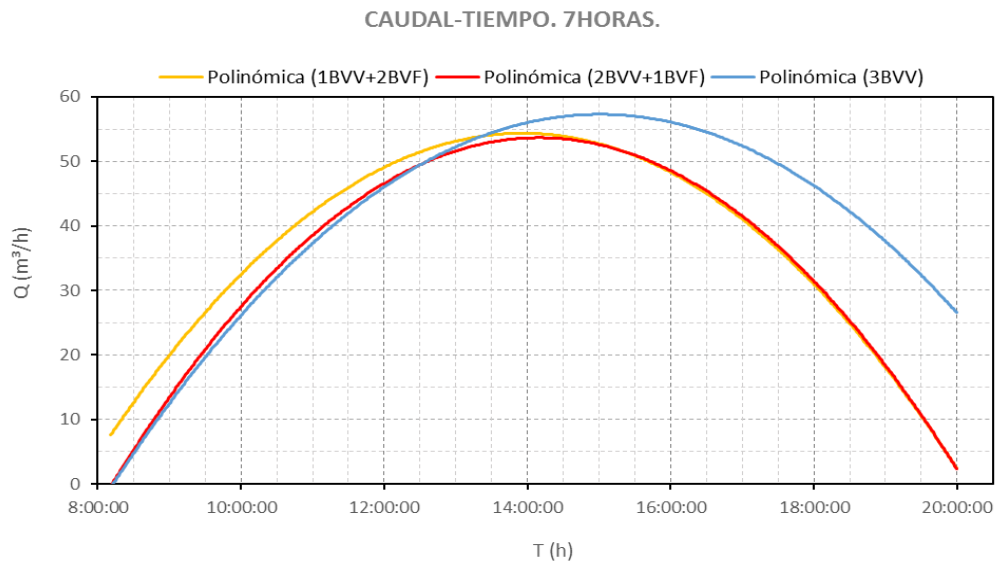


Figura 61. Curva caudal-tiempo de los sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de siete horas.

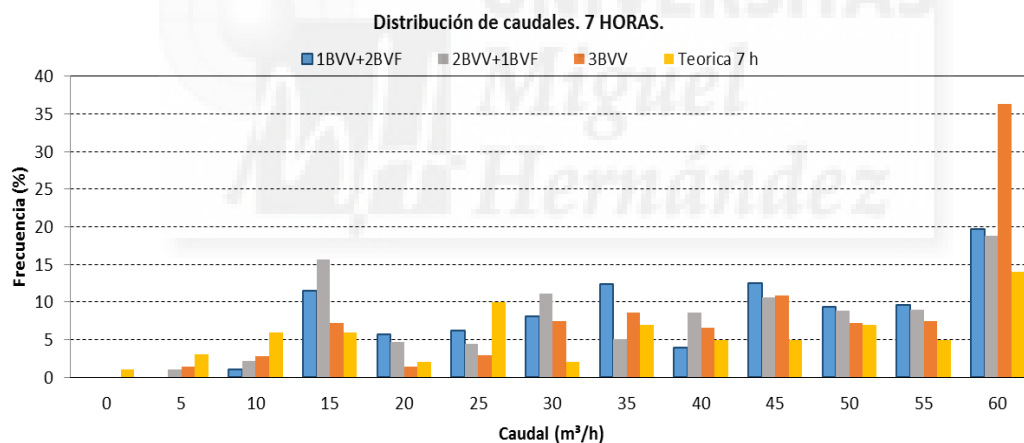


Figura 62. Distribución de frecuencia de caudales de los sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de tres horas.

Para solucionar este problema en el análisis de los resultados, se procedió a comparar aquellos valores en el que coinciden los caudales con respecto al tiempo, para cada uno de los tiempos de riego y para cada sistema de regulación de bombeo.

- Para tiempos de riego de tres horas con una jornada efectiva de riego de 8:00 a 20:00, se realizó el análisis de resultados de 14:00-20:00, puesto que coinciden los caudales de los tres sistemas de regulación de bombeo, como se puede ver en la Figura 59.

- Para tiempos de riego de siete horas con una jornada efectiva de riego de 8:00-20:00, se realizó el análisis de resultados de los sistemas de regulación de bombeo que tienen el mismo caudal con respecto al tiempo. Por un lado, se realizó el análisis de los resultados de 8:00-13:00 para los sistemas de regulación de bombeo de 3 BVV y de 2 BVV+1BVF, por otro lado, también un análisis de resultados de 15:00-20:00 para los sistemas de regulación de bombeo de 2BVV+1BVF y de 1BVV+2BVF. En la Figura 61 se puede ver la coincidencia de caudal distribuido para estas dos franjas horarias.

4.4.3. Gráficos de curvas potencia-caudal

En la distribución de caudales para tiempos de riego de tres horas, la Figura 63, muestra los resultados obtenidos de las curvas de potencia-caudal para los sistemas de regulación de bombeo estudiados. Para caudales de demanda de 5-20 m³/h, los valores de potencia apenas tienen diferencias. A partir de los 20 m³/h, se observan diferencias en los valores. Para un caudal de 27,5 m³/h, el sistema de regulación que mayor potencia consume 1BVV+2BVF con un valor de potencia consumida de 3,6 kW, el sistema de regulación de 2BVV+1BVF, tiene un valor más bajo, con un consumo de 3,4 kW. Por último, el sistema de regulación de menor consumo de potencia es de 3BVV, con 3,3 kW.

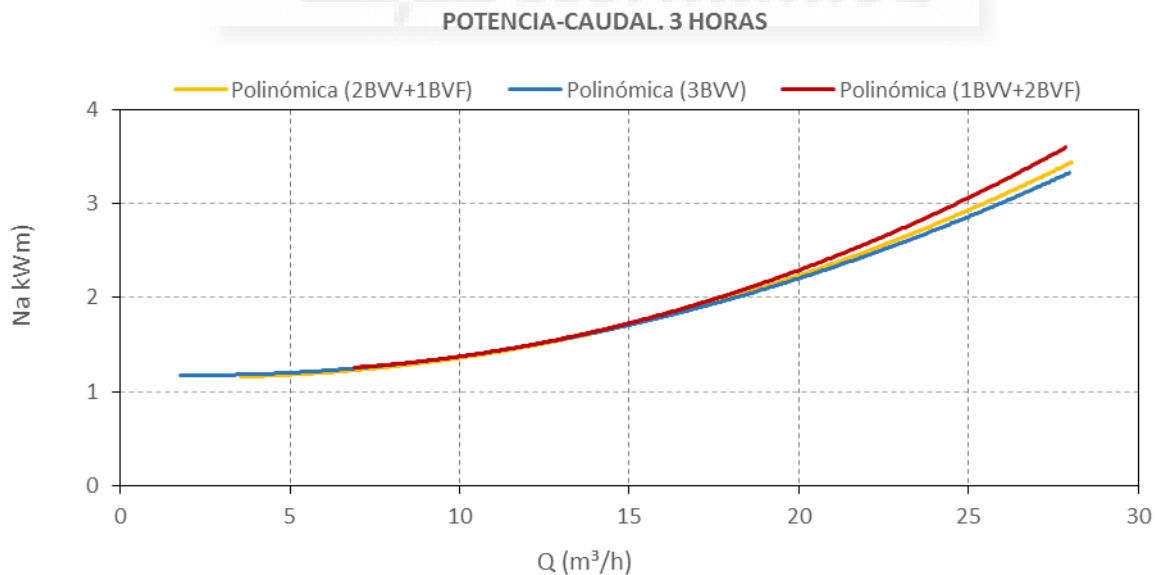


Figura 63. Curva potencia-caudal de sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de tres horas.

Para distribución de caudales de tiempos de riego de siete horas, apenas se muestran diferencia en el consumo de potencia con respecto al caudal, ya que estos valores de los tres sistemas de regulación de bombeo son de 7 kW. En la Figura 64, el sistema de regulación de 3BVV es el que menos consume, con un valor de 7 kW, siendo un valor similar el sistema de regulación de 2BVV+1BVF.

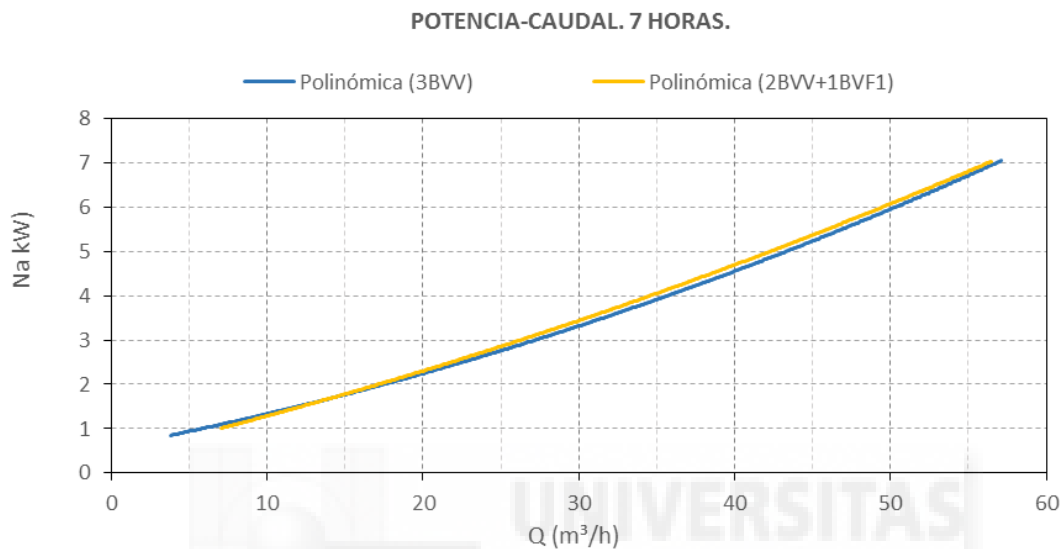


Figura 64. Curva potencia-caudal de sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de siete horas.

La Figura 65, muestra también la comparación de los resultados de los sistemas de regulación de bombeo, siendo el sistema de regulación 1BVV+2BVF, el que mayor consumo de potencia consume, con un valor de 7 kW y el de menor consumo de potencia el sistema de 2BVV+1BVF.

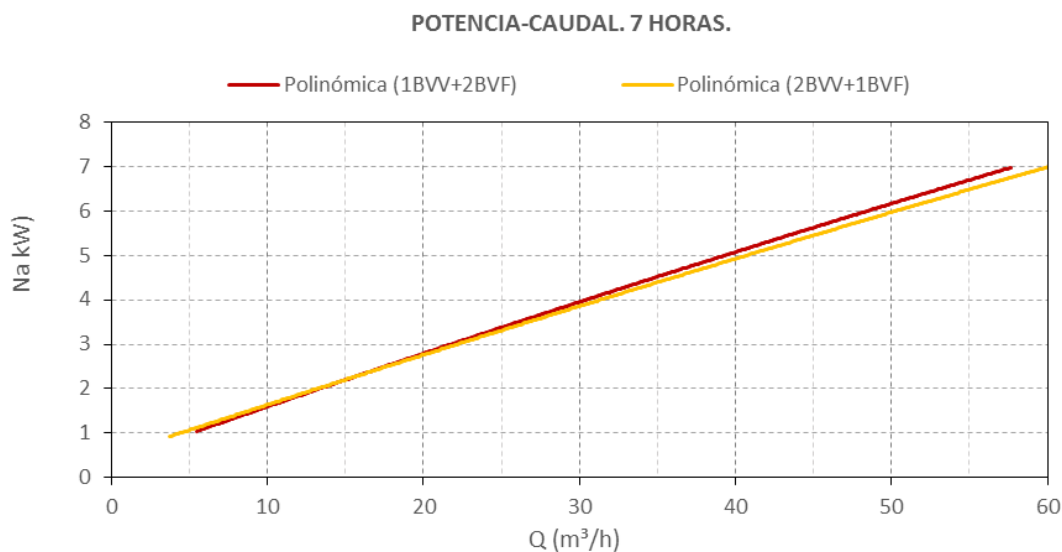


Figura 65. Curva potencia-caudal de sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de siete horas.

4.4.4. Gráficos de curvas rendimiento-caudal

En las curvas de rendimiento-caudal, para distribución de caudales de tiempos de riego de tres horas, apenas se muestran diferencias de rendimiento de bombas en caudales pequeños de 5-20 m³/h. Conforme aumenta los caudales, es decir, caudales mayores de 20 m³/h, se aprecian diferencias, siendo el sistema de regulación de 3BVV el de mayor rendimiento, por el contrario, el sistema de regulación 1BVV+2BVF es el que menos rendimiento, como se muestra en la Figura 66. Esta diferencia de rendimiento de bombas es debido a que los tiempos de riego son cortos, las frecuencias de caudales son más variables, por lo tanto, las bombas con variador de frecuencia se adaptan a la demanda de caudal en cada momento, mientras que las bombas de velocidad fija funcionan con una velocidad constante, independiente del caudal demandado, a veces estas bombas trabajarán por debajo de su rendimiento óptimo.

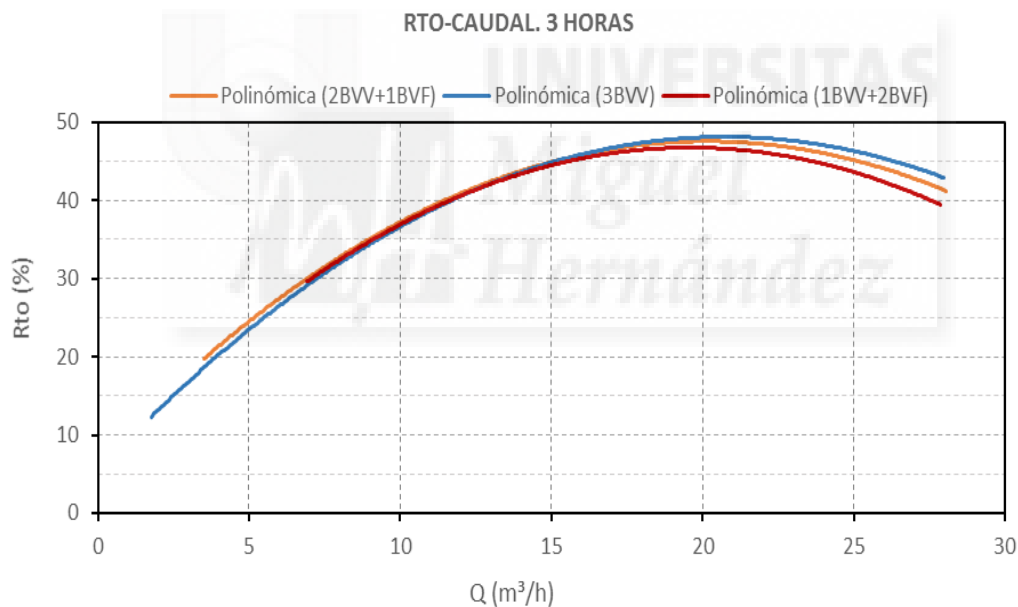


Figura 66. Curva rendimiento-caudal de los sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de tres horas.

Por otra parte, para distribución de caudales de tiempos de riego de siete horas, las curvas de rendimiento-caudal varían en función de caudal, como se observa en la Figura 67. Para un caudal de 27,5 m³/h, el sistema de regulación de bombeo con mayor rendimiento es del 3BVV, con un valor de 47% y el sistema de regulación de 2BVV+1BVF, tiene un valor de 42%.

Por otra parte, en la Figura 68, el sistema con menor rendimiento de bombas es el sistema de 1BVV+2BVF, con un valor de 41%. Sin embargo, para caudales 55 m³/h, los tres sistemas de regulación de bombeo son similares con un 40 %, puesto que las bombas están trabajando a caudales altos y las bombas trabajan a mayor rendimiento, las bombas variables se adaptan al caudal demandado y por otra parte, las bombas de velocidad fija trabaja a mayor rendimiento a mayor caudal demandado.

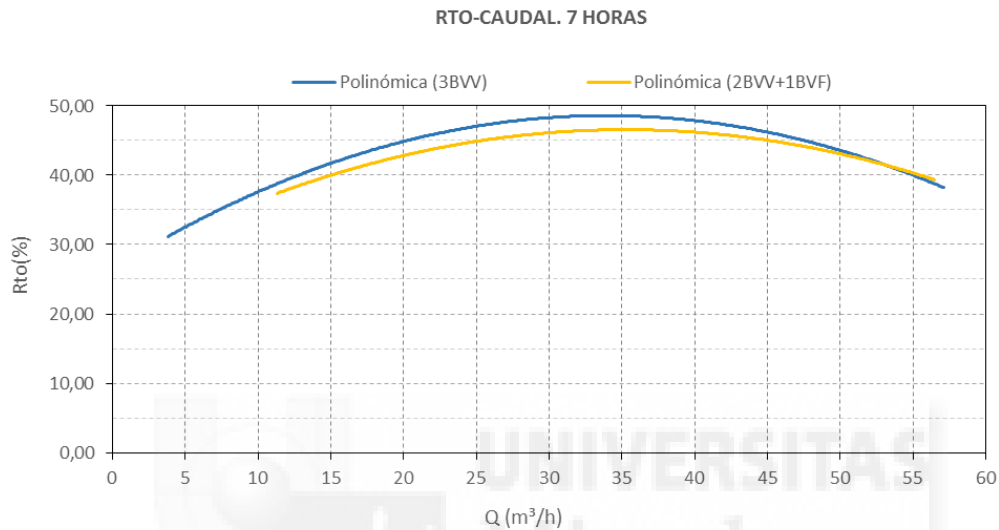


Figura 67. Curva rendimiento-caudal de los sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de siete horas.

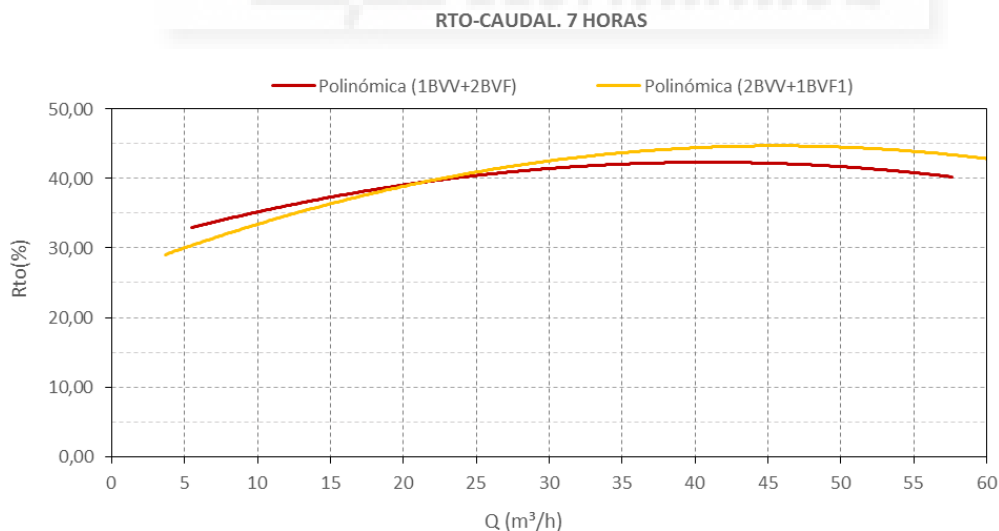


Figura 68. Curva rendimiento-caudal de los sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de siete horas.

4.4.5. Gráficos de curva potencia-tiempo

Para una distribución de caudales de tiempos de riego de tres horas, se observa en la Figura 69, que la potencia suministrada es similar en los tres sistemas de regulación mientras que, la potencia absorbida difiere, siendo el sistema de regulación de 1BVV+2BVF el que más potencia absorbida consume con un valor de 3,5 kW, y el sistema de regulación de 3BVV, el que menos potencia absorbida consume con un valor 3 kW.

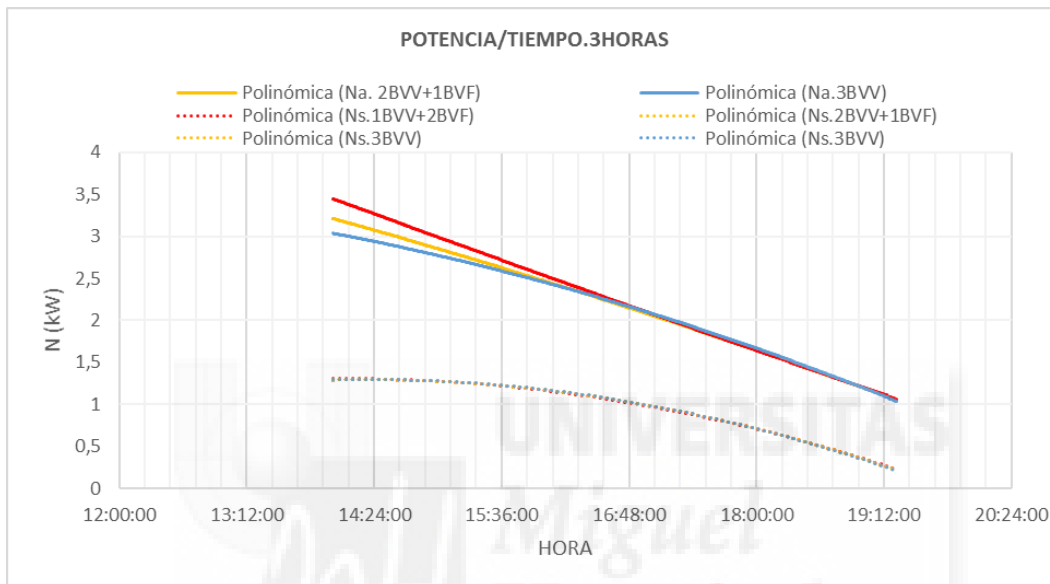


Figura 69. Curva potencia-tiempo de los sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de tres horas.

Por otra parte, para distribución de caudales de tiempos de riego de siete horas, también se muestra en la Figura 70, que los resultados de potencia suministrada son similares para los sistemas de regulación de 3BVV y 2BVV+1BVF. Para la potencia absorbida se aprecian pequeñas diferencias de valores, siendo el sistema de regulación de 2BVV+1BVF, la que mayor valor de potencia obtiene.

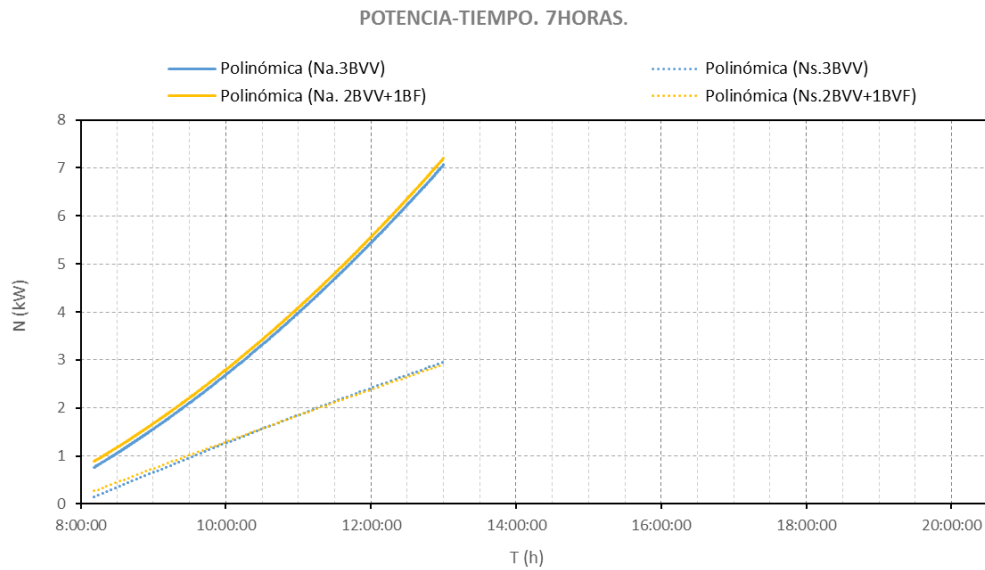


Figura 70. Curva potencia-tiempo de los sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de siete horas.

Para los sistemas de regulación de 1BVV+2BVF y 2BVV+2BVF, también tiene similares valores de potencia suministrada, en cambio en potencia absorbida hay pequeñas diferencias de valores, como se muestra en la Figura 71.

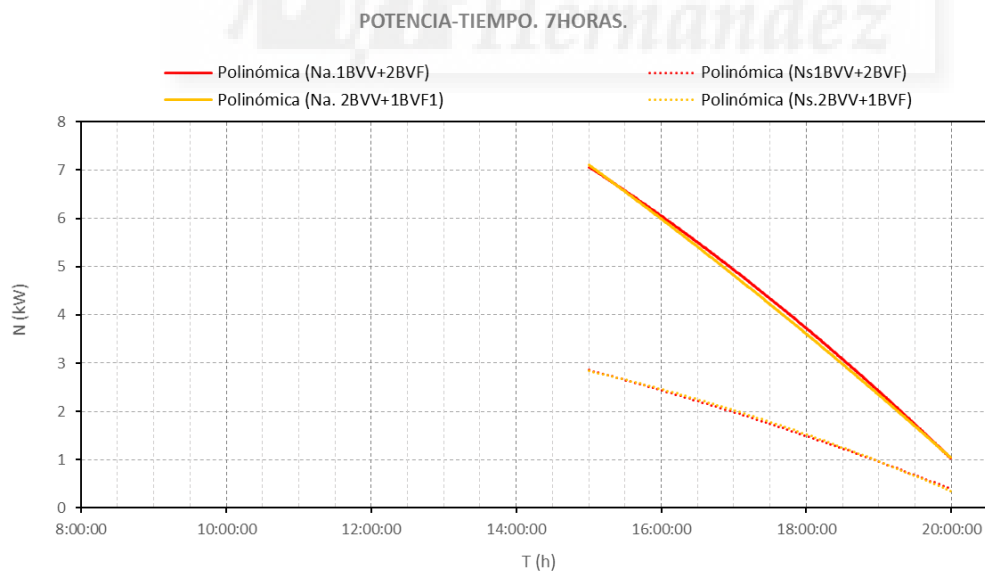


Figura 71. Curva potencia-tiempo de los sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de siete horas.

4.4.6. Gráficos de curva de energía acumulada-tiempo

Para distribución de caudales de tiempos de riego de tres horas durante una jornada efectiva de 12 horas, el sistema de regulación de bombeo que más consume es el 1BVV+2BVF, siendo la energía consumida de unos 11,9 kWh. Para estos caudales tan cortos, de tres horas, durante 12 horas de jornada efectiva, no se trabaja a un rendimiento máximo de las bombas y además existe gran diferencia de frecuencia de caudales, por tanto, trabajar con dos bombas fijas, hace que el consumo de energía sea mayor porque las bombas fijas no se adaptan a las condiciones óptimas de demanda de caudales. Mientras que los sistemas de regulación de bombeo de 2BVV+1BVF y 3BVV, apenas tienen diferencias de consumos de energía acumulada, 11,6 y 11,5 kWh, respectivamente, puesto que, en riegos de tres horas, sólo se han utilizado dos bombas (las dos bombas de velocidad variable) porque el caudal demandado máximo no llega a los 30 m³/h. En estos dos sistemas de regulación que trabajan con dos bombas de velocidad variable, muestra un menor consumo de energía, ya que las diferencias de frecuencias de caudales son mayores, por tanto, estas bombas se van regulando conforme al caudal demandado tan dispar durante la jornada efectiva de riego, como se observa en la Figura 72.

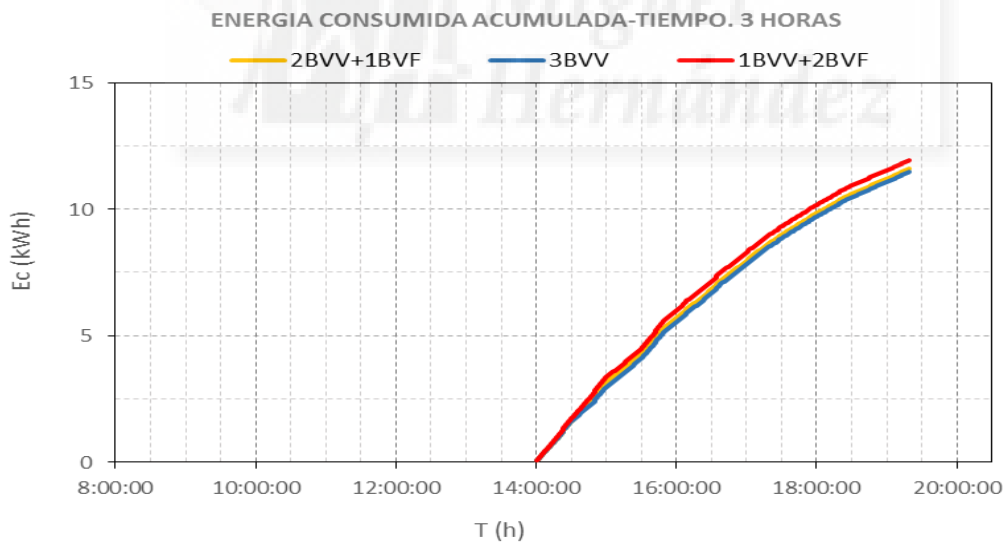


Figura 72. Curva de energía consumida-tiempo de los sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de tres horas.

Para distribución de caudales de tiempos de riego de siete horas con una jornada efectiva de riego de 12 horas, los sistemas de regulación de 3BVV y 2BVV+1BVF, apenas tienen diferencias en los consumos de energía acumulada, siendo el sistema de regulación de 2BVV+1BVF el que más consume con un valor de 17,96 kWh. Por otra

parte, el sistema 3BVV da un valor de consumo de 17,4 kWh, consume menos, puesto que las tres bombas tienen variador de frecuencia y la potencia consumida se adapta al caudal demandado, siendo más eficiente el consumo de energía con respecto a los demás sistemas de regulación de bombeo, como se muestra en la Figura 73.

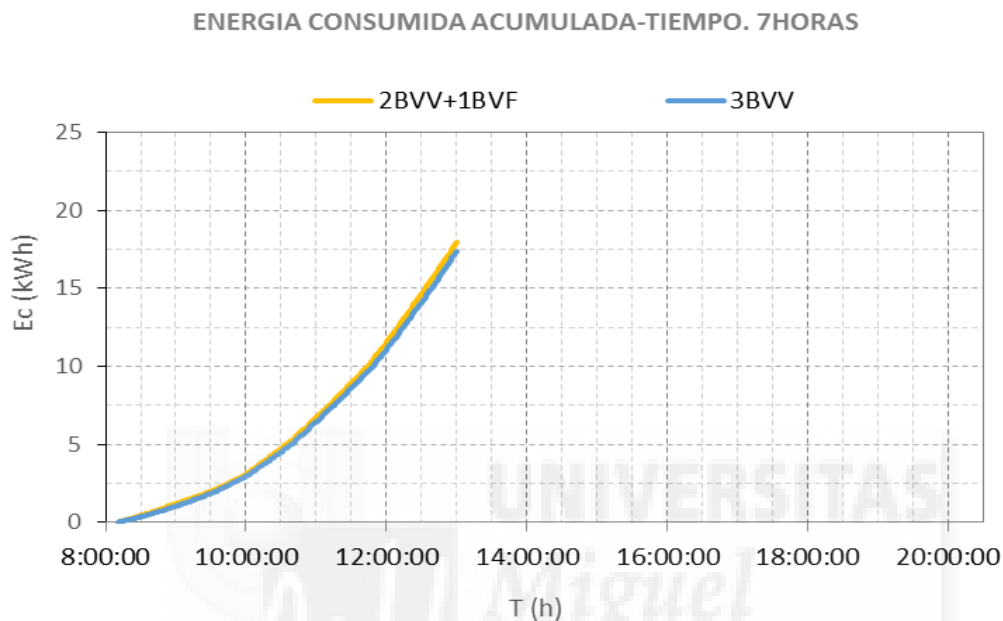


Figura 73. Curva de energía consumida-tiempo de los sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de siete horas.

De las otras curvas comparativas, el sistema de regulación de bombeo que más consume energía es el de 1BVV+2BVF, con un consumo de energía de 21,22 kWh. El segundo sistema que más consume es el de un sistema de regulación de 2BVV+1BVF, con un consumo de 20,86 kWh, aun teniendo dos bombas de velocidad fija en el momento que baja el caudal demandado, es menos eficiente porque las dos bombas fijas trabajan por encima de las condiciones óptimas del caudal demandado, como se observa en la Figura 74.

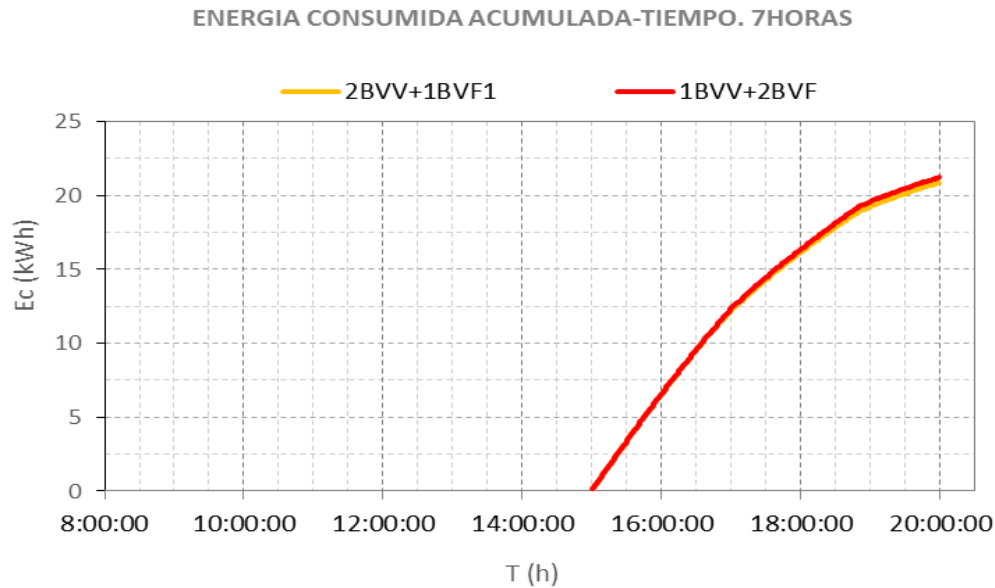


Figura 74. Curva de energía consumida-tiempo de los sistemas de regulación de bombeo para tiempos de riego de siete horas.

4.4.6.1. Influencia de la demanda de caudal en los sistemas de regulación de bombeos

Para determinar cuál de los tres sistemas de regulación de la estación de bombeo ensayados es más eficiente, y si influye la curva de demanda de caudal en el sistema de regulación, se han extrapolado los resultados obtenidos de los ensayos a un año de funcionamiento. Para ello se han considerado bombas de 100 kW de potencia, y una distribución de caudal anual proporcional a la distribución ensayada, de la siguiente forma:

- 3 meses de verano con la misma distribución que la ensayada.
- 3 meses de invierno con una distribución de caudal un 50% inferior a la ensayada.
- 6 meses de otoño y primavera con una distribución de caudal un 25% inferior a la ensayada.

En la Tabla 22 se muestran los resultados de consumo energético obtenidos para cada sistema de regulación, así como el coste energético considerando un coste medio total del kWh de 0,08 €/kWh.

Tabla 22. Coste de la energía consumida con bombas de 100 kW de los sistemas de regulación de bombeo para tiempo de riego de tres y siete horas.

	TIPO REGULACIÓN	Ec acum* (kWh)	Ec acum extrop 12 horas JER(kWh)	Ec acum 1 mes verano(kWh)	Ea acum 3 meses verano(kWh)	Ec acum 3 meses invierno(kWh)	Ec acum 6 meses primavera/otoño(kWh)	Ec acum 1 año (kWh)	Ec acum 1 año 100 kW (kWh)	Precio energía (€/kWh)	Coste Ec 1 año (€)
TIEMPO RIEGO 3 HORAS	1BVV+2BVF	11,93	23,86	715,93	2147,80	360,97	3221,70	5730,47	260449,74	0,08	20835,98
	2BVV+1BVF	11,60	23,20	695,92	2087,77	350,96	3131,66	5570,39	253174,39	0,08	20253,95
	3BVV	11,51	23,01	690,31	2070,94	348,16	3106,41	5525,50	251133,99	0,08	20090,72
TIEMPO RIEGO 7 HORAS	1BVV+2BVF	21,22	50,94	1528,09	4584,26	2292,13	6876,38	13752,77	625063,32	0,08	50005,07
	2BVV+1BVF	20,87	50,09	1502,60	4507,79	2253,89	6761,68	13523,36	614636,77	0,08	49170,94
	2BVV+1BVF	17,96	43,10	1293,12	3879,36	1939,68	5819,04	11638,08	528950,74	0,08	42316,06
	3BVV	17,41	41,78	1253,40	3760,19	1880,09	5640,28	11280,57	512701,75	0,08	41016,14

En la Tabla 22 se muestra que el sistema de regulación de bombeo más eficiente, es el de 3BVV para las diferentes demandas de caudal estudiadas.

Para realizar un análisis de la influencia de los sistemas de regulación de bombeo en el ahorro energético, en la Tabla 23, se puede ver los porcentajes de ahorro con respecto al sistema de regulación de 1BVV+2BVF.

Tabla 23. Porcentaje de ahorro energético de los sistemas de regulación con respecto al sistema de regulación de 1BVV+2BVF.

	TIPO REGULACIÓN	% Ahorro Energético respecto a 1BVV+2BVF
TIEMPO RIEGO 3 HORAS	1BVV+2BVF	0,0%
	2BVV+1BVF	2,8%
	3BVV	3,6%
TIEMPO RIEGO 7 HORAS	1BVV+2BVF	0,0%
	2BVV+1BVF	1,7%
	2BVV+1BVF	0,0%
	3BVV	4,8%

Para distribución de caudales de tiempos de riego de tres horas, el sistema de bombeo que más energía consume es el de 1BVV+2BF y el más eficiente el de 3BVV, siendo una diferencia de consumo energético de 9.316 kWh. El uso de un sistema de regulación de bombeo u otro puede ahorrar hasta un 3,6 % de coste energético anual.

En cambio, el ahorro que se produce entre un sistema de regulación de 3BVV y 2BVV+1BVF, apenas tiene diferencias, con un valor de 0,8%. Esto es debido que, para tiempos de riego de tres horas, la tercera bomba del sistema de regulación de bombeo no se ha utilizado porque con el funcionamiento de dos bombas, la demanda de

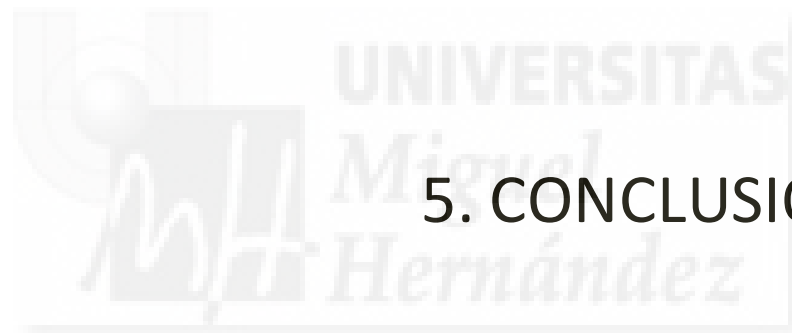
caudal máxima se cubría. Por lo tanto, los sistemas 3BVV y 2BVV+1BVF funcionaban prácticamente igual, como si fueran 2BVV.

Por otra parte, para distribución de caudales de tiempos de riego de siete horas, del sistema de bombeo que más consume energía (1BVV+2BF) al más eficiente hay una siendo una diferencia de consumo energético de 30.003 kW. El empleo de un sistema de regulación de bombeo u otro puede ahorra hasta 4,8 % de coste energético anual.

En este caso, el ahorro que se produce entre un sistema de regulación de 3BVV y 2BVV+1BVF, si que tiene una gran diferencia, con un valor de 3,1 % de ahorro de coste energético. El sistema de regulación trabaja con tres bombas, si estas tienen velocidad variable, se van adaptando a la demanda de caudal optimizando el rendimiento de las bombas, se consigue una mayor eficiencia y por tanto un mayor ahorro energético del sistema.

Para los dos tipos de distribución de caudal, se puede apreciar en la Tabla 23, que la mejora de la eficiencia energética de la regulación del bombeo, es mayor en la distribución de caudal para tiempos de riego de 7 horas que para tiempos de riego de 3 horas.





5. CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

La evaluación de la mejor alternativa para la optimización energética de bombeos de inyección directa a redes colectivas de distribución de agua, se basó en realizar tres combinaciones de sistemas de regulación de bombeo para dos curvas de demanda de caudal a lo largo de un JER. Este análisis comparativo ha permitido determinar las condiciones de regulación óptimas.

Se ha comprobado que la influencia del sistema de regulación en el ahorro energético es mayor en la distribución de caudal correspondiente a tiempos de riego de 7 horas (probabilidad de apertura 0,58) que en la distribución de caudal correspondiente a tiempos de riego de 3 horas (probabilidad de apertura 0,25).

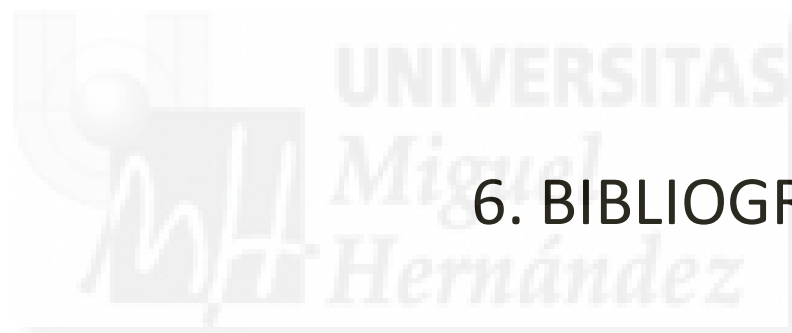
Par las dos distribuciones de caudal, la regulación del bombeo más eficiente es la regulación 3 (3BVV), siendo el ahorro energético respecto al sistema de regulación 1 (1BVV+2BVF) del 4,8% para tiempos de riego de 7 h, y del 3,6% para tiempos de riego de 3 h.

El sistema de regulación 2 (2BVV+1BVF) produce un ahorro energético del 2,8% para tiempos de riego de 3 horas y del 1,7% para tiempos de riego de 7 horas. Este sistema de regulación de bombeo es menos eficiente que el sistema de regulación 3.

Entre los casos estudiados, se obtuvieron menor consumo energético los sistemas de regulación que utilizan bombas de velocidad variable con respecto a las bombas de velocidad constante.

La potencial mejora de la eficiencia energética permitiría ahorrar hasta 4,8 % de coste energético anual, con respecto a las otras alternativas estudiadas. El empleo de una curva de distribución de caudales en una JER, también se ve influenciada en el consumo energético. Tiempos de riego de siete horas, para cultivos arbóreos, aporta una mejora en la eficiencia energética con un ahorro de un 1,7-4,8% del coste energético anual, dependiendo del sistema de regulación de bombeo utilizado.

La reducción de costes energéticos en redes colectivas de distribución de agua puede proceder, de la disminución del consumo energético mediante la determinación de un sistema de regulación de bombeo y una curva de distribución de caudales a lo largo de una JER, que permita hacer mínima la demanda de energía de la red colectiva. El desarrollo de metodologías que permitan analizar diferentes combinaciones de sistemas de regulación de bombeo junto con curvas de distribución de caudales, pueden permitir la consecución de mayores ahorros en los costes de energía en redes colectivas de distribución de agua.



6. BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

Abadía, R. 2013. *Ahorro y eficiencia energética en regadíos*. Revista Profesional de los Ingenieros Agrónomos. Nº43. 22-28.

Abadía, R. 2015. *Recursos hídricos e instalaciones hidráulicas*. Apuntes de la asignatura. Master Ingeniería Agronómica, Universidad Miguel Hernández (UMH).

Arviza, J., Balbastre, I., González, P. 2002. *Ingeniería rural: hidráulica*. Universidad Politécnica de Valencia.210-211.

Cabrera E., Espert V., García-Serra J., Martínez F. 1996. *Ingeniería Hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua*. Volumen I. UD Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia. 232-233.

Ederra, I., Murugarren, N. 2010. *La nueva tarifa eléctrica: la escalada de precios del agua*. Servicio de Asesoramiento al Regante. Riegos de Navarra S.A. 47 pp.

Lamaddalena, N.; Sagardoy J.A. 2000. Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. FAO Irrigation and drainage paper nº 59. Roma.

López-Gunn, E., Zorrilla, P., Prieto, F. y Llamas, M. R. (2012). *Water efficiency in Spanish agriculture*. *Journal of Agricultural Water Management*. 108 83– 95.

Moreno, M.A., Planells, P., Córcoles,J.I., Tarjuelo, J.M., Carrión, P.A. 2008. *Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations*. Science Direct. 95-105.

Rocamora, M.C. 2016. *Gestión de equipo e instalaciones eléctricas*. Apuntes de la asignatura. Master Ingeniería Agronómica, Universidad Miguel Hernández (UMH).

Rocamora, M.C., Abadía R., Cámara J.M., Melián M.A., Puerto H., Ruiz A. (2010). *Manual de Auditorías Energéticas en Comunidades de Regantes*. Cap.11. Editorial Club Universitario. Alicante.

Ruiz-Canales, A., Molina Martínez, J.M., Martínez Álvarez, V., Soto García, M., Abadía Sanchez, R., Puerto Molina, H., Martín Górriz, B., Cancela Barrio, J., Fandiño Beiro, M., Cuesta García, T., Rey Sanjurjo, B. 2009. *AUTOMATIZACIÓN Y TELECONTROL DE SISTEMAS DE RIEGO*. Editorial Limencop. ISBN: 978-84-613-0613-8

Yusta, J.M. 2013. *Mercados, ofertas, contratos, facturas eléctricas: herramientas y soluciones en comunidades de regantes*. Conferencia. Universidad Internacional Menéndez Pelayo Pirineos, Huesca.

Yusta, J.M. 2015. *Situación actual de las estrategias utilizadas para optimizar el coste energético en comunidades de regantes*. VII Jornada técnica riegos del Alto Aragón-bombeo solar de gran potencia para comunidades de regantes. Parque tecnológico Walqa, Huesca.

<http://www.magrama.gob.es/es/>

<https://www.boe.es/>

<http://www.idae.es/>

<https://es3a.mitsubishielectric.com/fa/es/products/drv/inv/local/d700>

