



SISTEMAS DE CONTROL INTELIGENTE DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Índice

01

Introducción
(pag.2)

02

Estructura
y contenidos
(pag.3)

03

Sistema IoT de
monitorización de
variables hidráulicas
(pag. 4)

04

Tecnología
micro hidroeléctrica
para la recuperación
de energía en redes
de riego
(pag.15)

05

Ahorro de energía con
variadores de velocidad
de bombas.
(pag.21)

06

Conclusiones
(pag.24)

07

Referencias
(pag .25)



1 Introducción.

El agua es un recurso natural, escaso e imprescindible para la vida. Tiene un papel fundamental en el desarrollo de la humanidad, aspectos como el crecimiento económico, la reducción de la pobreza, la sostenibilidad ambiental y el bienestar y salud humana se sustentan en los servicios que proporcionan los recursos hídricos (UNESCO, 2015). La creciente demanda de agua dulce se ha convertido en uno de los mayores y más complejos desafíos a nivel mundial por lo que es necesario restablecer un equilibrio entre la demanda y el suministro cada vez más limitado o de lo contrario el mundo se enfrentará a una situación de escasez de agua cada vez más grave que podría llegar a afectar a más de dos tercios de la población mundial para el año 2025 (UNESCO, 2009).

Además de los factores naturales que afectan a la disponibilidad de recursos hídricos, la actividad humana se ha convertido en el principal generador de presiones sobre el agua. Desde 1950 la población mundial ha aumentado en casi 6.000 millones hasta alcanzar actualmente los 7.794 millones de persona se prevé que alcancen los 9.800 millones para el año 2050. Esto supondrá un gran desafío para la agricultura que tendrá que incrementar hasta un 50% la producción de alimentos para abastecer a dicha población (FAO, FIDA, OMS, 2017), y todo ello en un escenario donde la disponibilidad de recursos hídricos es cada vez más limitante.

En zonas del sur de Europa, como Andalucía se prevé un escenario especialmente desfavorable en cuanto a disponibilidad de recursos hídricos como consecuencia del cambio climático: reducción entre el 15 y 20% de la precipitación media para el año 2050, aumento de su torrencialidad, incremento del 20% de la demanda anual de agua de riego, con aumento de la demanda punta en los meses de verano del 10% así como una mayor duración de la campaña de riego (Rodríguez Díaz et al., 2007). Todo esto, junto con la aparición de sistemas de producción agrícola más intensivos y el aumento de la superficie regada a nivel mundial, conlleva una mayor presión sobre los recursos hídricos, no solo en su aspecto cuantitativo, sino también en el cualitativo. Además, la aparición de nuevos sistemas a presión, como son el riego por aspersión y el riego por goteo, requieren de grandes cantidades de energía para la captación, el transporte, la distribución y la aplicación del agua, lo que se traduce en un aumento notorio de los costes de explotación.

La escasez de agua y el aumento de costes de las explotaciones agrícolas, derivado del incremento del precio de la energía eléctrica, han hecho que sea imprescindible controlar y gestionar de forma eficiente las redes distribución de agua de riego, detectando posibles fugas

y controlando puntos críticos donde el exceso o déficit de presión pueden afectar al correcto funcionamiento de la red.

Desde este punto de vista, el desarrollo e implementación de sistemas de monitorización basados en el uso de las tecnologías de la información y la comunicación (TICs) y el internet de las cosas (IoT) permite dar respuesta a esta necesidad, controlando en todo momento las principales variables hidráulicas y garantizando el buen funcionamiento de la red.

Por otro lado, el incremento de sistemas de riego presurizados que requieren grandes cantidades de energía (eléctrica o diesel), han provocado, un aumento de las emisiones de carbono. En los últimos cincuenta años, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por la agricultura, la silvicultura y la pesca se han duplicado. En 2010, más de 785 millones de toneladas de CO₂ correspondieron a emisiones relacionadas con el uso de energía en el sector agrícola. Esta cifra representa casi una quinta parte del total de las emisiones mundiales de CO₂ (Mérida García et al., 2018), que además se prevé que aumente como consecuencia del incremento de la demanda de riego. Todo esto ha llevado a la búsqueda de sistemas de generación de energía alternativos, destacando la apuesta por fuentes de energías renovables, como la energía solar fotovoltaica. Pero también están emergiendo nuevas alternativas de interés para las redes de distribución de agua a presión; es el caso de las microturbinas o bombas trabajando como turbinas que se usan para recuperar energía empleando energía micro-hidroeléctrica (García Morillo et al., 2018).

Mediante financiación del proyecto Hiba-Hub Iberia Agrotech, se han adquirido e instalado en la Finca de Rabanales (Universidad de Córdoba) distintos elementos tecnológicos para controlar y gestionar de forma más eficiente las redes de distribución de agua.

2 Estructura y contenidos.

Los contenidos de este estudio han sido estructurados de manera que queden cubiertos todos los elementos y tecnologías implementadas en la Finca de Rabanales para controlar de forma inteligente una red de distribución de agua.

De este modo tras la puesta en contexto del por qué es necesario realizar una gestión inteligente de la red de riego que permita hacer un uso más eficiente de los recursos hídricos y la energía. El documento recoge a continuación una descripción detallada de sistema de control inteligente que se ha implantado en la finca; los dispositivos instalados, sus características, ubicación, principio de funcionamiento y criterios para interpretar y hacer uso de la información que proporcionan. El punto 3 se centra en la descripción de los elementos usados para el control de

las variables hidráulicas de la red de distribución de riego, mientras que el punto 4 muestra cómo el uso de tecnología micro hidroeléctrica en redes de riego supone una solución al problema de suministro energético y una alternativa verde para reducir o sustituir el consumo de energía de otras fuentes de energía.

3 Sistemas IoT de monitorización de variables hidráulicas.

Para garantizar un uso sostenible del agua de riego es imprescindible gestionar de forma eficiente la infraestructura y el funcionamiento de los sistemas de riego. Pero esto no siempre es fácil, el mal diseño y/o escaso mantenimiento de las instalaciones de riego, aumenta la frecuencia de las averías, que en muchas ocasiones son difícil de detectar (sistemas de riego enterrados) y conllevan importantes pérdidas de agua, energía, fertilizantes, etc. con el consiguiente coste económico que todo ello supone.

Los actuales avances tecnológicos, los sistemas de comunicación, el almacenamiento de datos en la nube, las herramientas de análisis de datos y la modelización de redes hidráulicas permiten monitorizar y controlar el estado de la red de distribución de agua en tiempo real. El éxito de muchos de los actuales sistemas de monitorización de las redes de riego se basa en la adopción de nuevas tecnologías relacionadas con el Internet de las cosas (IoT), que permite la conectividad entre los elementos del sistema para procesar los datos y tomar la mejor decisión. La sustitución de los sistemas de monitorización convencionales como los SCADASs. PLCs, etc... por modernos sistemas IoT, ha facilitado la adopción de sistemas de gestión descentralizados, en los que los datos son accesibles desde cualquier lugar con conexión a internet (Pérez-Padillo et al., 2020).

La arquitectura típica de este tipo de sistemas de monitorización consta de 4 niveles representados en la Figura 1:

- El nivel de adquisición de datos contiene los distintos tipos de sensores que controlan las distintas variables hidráulicas y las transforman en señales eléctricas. En redes de riego es posible medir el nivel de agua en embalses o depósitos, el número de bombas en funcionamiento, la presión y el caudal en distintos puntos de la red, el estado de las válvulas, el volumen de agua aplicado, etc...
- El nivel de comunicación. Existen hoy día una amplia variedad de sistemas de comunicación; bluetooth, GPRS, Wifi, ZigBee, NFC, Lora, SigFox, etc... El sistema de comunicación debe elegirse conforme a los requerimientos de la aplicación a la que irán destinados. En el caso de las redes de distribución de agua y las redes de riego destacan los sistemas de comunicación de las redes Low Power Wide Area Network (LPWAN), que

son redes de telecomunicaciones destinadas al envío de pequeños paquetes de datos en la banda estrecha, que conlleva un consumo muy bajo de energía durante el proceso de transmisión. Esto supone una gran ventaja de este sistema tipo de sistemas respecto a otros, especialmente en el medio rural, ya que la ausencia de puntos de energía obliga a que estos sistemas cuenten con su propias baterías de alimentación.

- Base de datos y análisis en la nube. Toda la información adquirida por los sensores instalados en campo es almacenada y analizada en la nube, lo que permite el acceso remoto a los datos.
- Visualización de datos. Mediante aplicaciones y plataformas de interfaz amigable los usuarios pueden acceder y consultar la información a través de cualquier dispositivo con acceso a internet (ordenadores, tablets y smartphones).

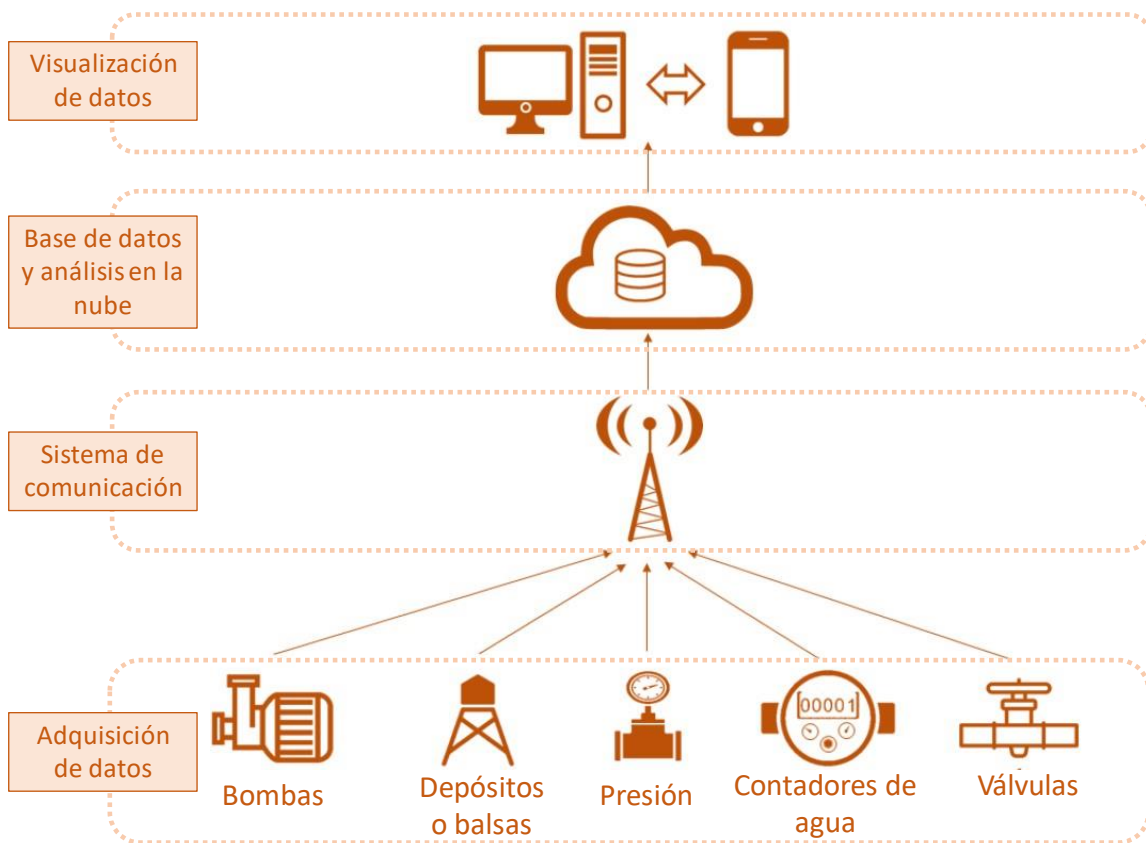


Figura 1:Arquitectura de un sistema de monitorización de redes de distribución de agua,

3.1 Arquitectura del sistema IoT implementado en la Finca de Rabanales

En el marco de las actividades de este proyecto se ha implementado un sistema de monitorización de la red de riego de la Finca de Rabanales que controla las principales variables hidráulicas, presión y caudal. La Figura 2 muestra la arquitectura del sistema IoT de monitorización implementado en la finca.

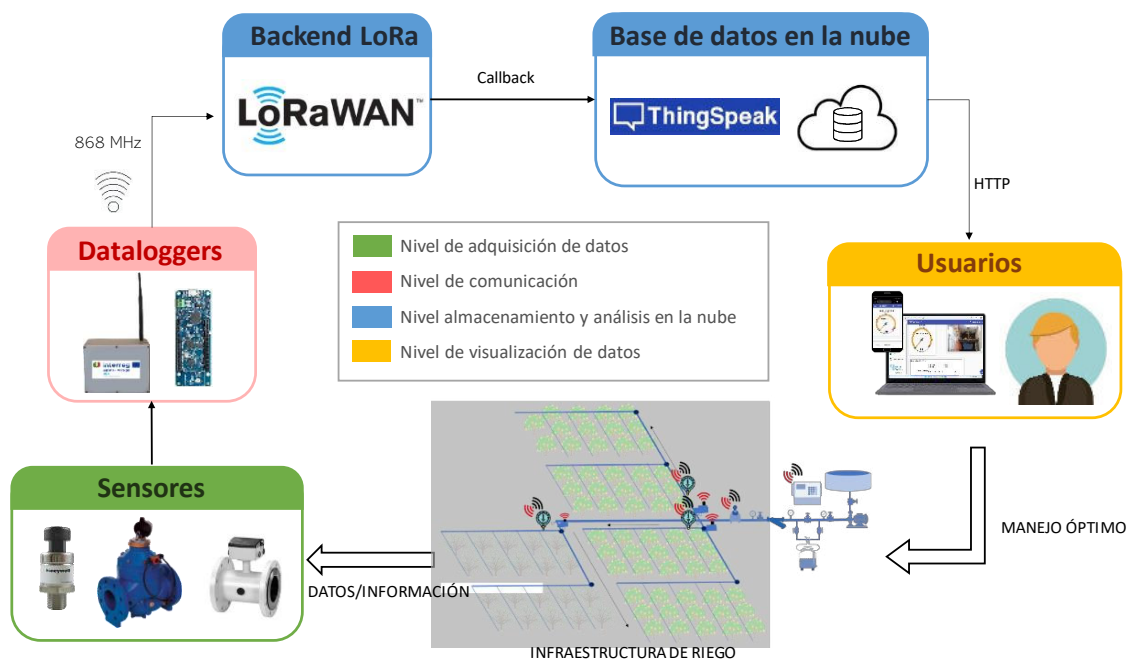


Figura 2. Esquema del Sistema de monitorización IoT implementado en la finca de Rabanales

El sistema cuenta con 5 válvulas contador, 9 sensores de presión distribuidos en distintos puntos de la finca y un caudalímetro electromagnético situado en la caseta de riego. Estos equipos cuentan con su propio nodo de comunicación, que utilizan la tecnología LoRa para la comunicación de datos. Toda la información es accesible desde una plataforma habilitada para la visualización de datos. A continuación, se describe más detalladamente los principales elementos del sistema IoT de monitorización de la red de riego de Rabanales

3.2 Descripción de los dispositivos de recolección de datos

3.2.1 Ubicación y descripción general

La Tabla 1 muestra una descripción e identifica las coordenadas exactas de cada dispositivo instalado, mientras que la Figura 3 señala la situación de los distintos tipos de sensores.

Tabla 1: identificación y ubicación (grados decimales) de los dispositivos instalados en la finca de riego.

Tipo de dispositivo	Descripción	Id	Coordenadas
Válvulas contador	Hidrante Arad BM 4"	v1	37.921097,-4.717236
		v2	37.932427,-4.714885
		v3	37.934312,-4.714958
		v4	37.919123,-4.723775
		v5	37.932427,-4.714885
Sensores de presión	Honeywell PX2AN1XX250PSACX	p1	37.932427,-4.714885
		p2	37.934312,-4.714958
		p3	
		p4	
		P5	Sobre el pivot de riego (37.92492,
		P6	-4.71828)
		P7	37.922523,-4.722305

		P8	37.919123,-4.723775
		p9	37.921097,-4.717236
Caudalímetro electromagnético	Caudalímetro Siemens Sitrans F M MAG 5000W - NBR-DN100	c1	37.921992,-4.716481



Figura 3. Ubicación de los sensores en campo

3.2.2 Sensor de presión

Los transductores de presión son los encargados de convertir la presión hidráulica en una señal eléctrica, por lo que al seleccionar estos dispositivos debe comprobarse que el rango de medición abarque toda la gama de presiones que puedan alcanzarse en el punto de la red donde se ubicará el sensor, de modo que se eviten daños en el resto de los componentes electrónicos y garantizar así la fiabilidad de las lecturas.

De acuerdo con la ecuación de conservación de energía entre dos puntos de la red (ec. 1), los cambios en las condiciones de funcionamiento del sistema afectan a las presiones de esta.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_A - H_L - H_E = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (1)$$

P representa la presión, v es la velocidad, z es la elevación, γ es el peso específico del agua, H_A es el incremento de energía aportado al fluido mediante el bombeo, H_L es la energía perdida por rozamiento con las paredes de las tuberías y H_E es la energía extraída por las turbinas. Mediante esta ecuación se entiende que las averías o fugas en la red de suministro, que afectan a la variable v , van ligadas a lecturas de presión fuera del rango ordinario en puntos aguas abajo de la fuga.

Los sensores de presión instalados son de la marca Honeywell modelo PX2AN1XX250PSACX. Este dispositivo se alimenta con una tensión de 3,3 V y una corriente de 4 mA y es compatible con la tensión de salida de la mayoría de las placas de microcontroladores que existen. Lee presiones comprendidas entre 0 bar y 17,23 bar y las convierte en una señal de tensión comprendida entre 0,33 V y 2,97 V. Cada uno de los dispositivos va conectado un nodo de comunicación o datalogger (apartado 3.3) que se encarga de transmitir de forma remota toda la información hasta la nube.

3.2.3 *Válvula Contador*

Los hidrómetros o válvulas contador ARAD BM 4" instalados en la finca son la combinación de contador de agua y válvula hidráulica en el mismo cuerpo. La válvula tiene doble cara y está diseñada para trabajar con grandes presiones (presión máxima de trabajo 16 bar). Las válvulas pilotos y los solenoides que posee, permiten transmitirle de forma remota las ordenes de apertura y cierre. El hidrómetro incluye un totalizador que muestra el volumen de agua acumulada que se ha aplicado a los sectores situados aguas debajo del dispositivo. De forma similar al funcionamiento de los transductores de presión, estos dispositivos se encargan de transformar el volumen de agua en una señal eléctrica, es decir que por cada m³ de agua que circula por la válvula se emite un pulso. Al igual que los sensores de presión, cada una de las 5 válvulas contador instaladas en la finca están conectadas a un nodo de comunicación para el envío de datos.

3.2.4 *Caudalímetro electromagnético*

En la cabecera de la instalación de riego se ha dispuesto un caudalímetro electromagnético Siemens Sitrans F M MAG 5000W. Este equipo sirve para medir con gran precisión el caudal volumétrico que circula por el punto donde se encuentra instalado. Este tipo de caudalímetros miden el caudal en función de la velocidad a la que pasa el fluido. Como muestra la Figura 4,

poseen unas bobinas en su interior que aplican un campo magnético perpendicular a la dirección en la que circula el agua, por lo que al atravesarlo se produce una tensión eléctrica que es captada por unos electrodos (situados a cada lado del tubo). Dicha tensión es proporcional a la velocidad, y por tanto al caudal del líquido que circula por su interior.

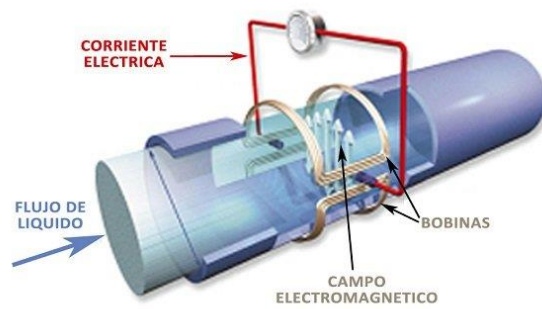


Figura 4: Esquema de caudalímetro electromagnético.

El principio de funcionamiento se basa en la ley de Faraday, que establece que cuando un líquido circula por un tubo no conductor y atraviesa un campo magnético, genera una tensión (E) que depende de la siguiente expresión (ec.2).

$$E = k * B * l * v \quad (2)$$

Donde E es el voltaje inducido, k es la constante de proporcionalidad, B es el campo magnético generado por las dos bobinas de cobre, l es la distancia entre electrodos de medición o diámetro interno del tubo de medición y v es la velocidad del líquido que atraviesa el caudalímetro. Esta última, v, es el único elemento variable de la ecuación, el resto son constantes, es por esto que la tensión E varía cuando lo hace v.

Este dispositivo también está conectado con un nodo de comunicación que transmite la información para hacerla accesible de forma remota.

3.3 Dispositivo Hardware para la toma de datos

Todos los dispositivos están conectados a un nodo de comunicación controlado por un microprocesador tipo Arduino que envía la información a la nube usando la tecnología LPWAN. Los nodos de comunicación empleados han sido desarrollados por Pérez-Padillo et al. (2020) cuyos elementos principales pueden verse en la Figura 5.

Estos nodos son muy versátiles puesto que pueden leer distintos tipos de señales; (4-20 mA, señal analógica, señal digital, señal I2C) y también pueden alimentarse de tres formas con baterías, con un pequeño módulo fotovoltaico o conectando el dispositivo a la red eléctrica convencional.

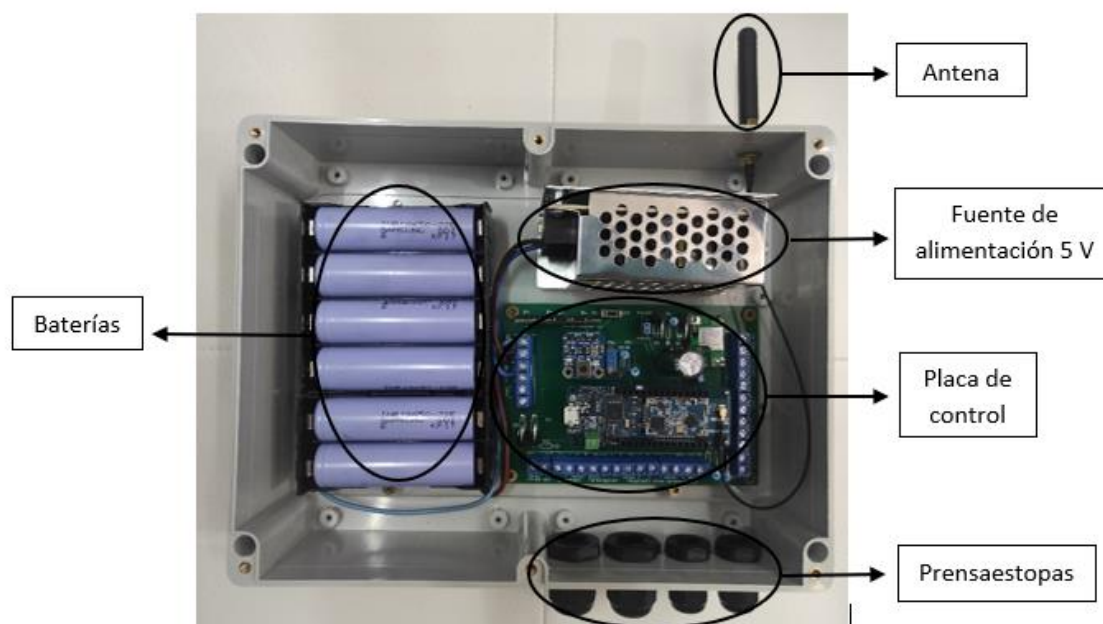


Figura 5. Nodo de comunicación.

Cada dispositivo alberga una placa de Arduino MKR WAN 1310. Aunque también existen otras placas dentro de la familia MKR, adaptadas a distintos sistemas de comunicación, Sigfox (Arduino MKR 1200), Wifi (Arduino MKR 1000), GSM (Arduino MKR 1400), y Narrow Band IoT (Arduino MKR 1500).

El microcontrolador Arduino recoge los datos hidráulicos cada 5 minutos y desconecta el sistema entre las mediciones, lo que permite a reducir la energía consumida en cada ciclo de lectura y aumentar la autonomía del dispositivo.

Como fuente de alimentación se han elegido baterías recargables Li-ion 18650. Estas baterías tienen una tensión nominal de 3,7 V y una capacidad de 2900 mAh. Este tipo de batería es ideal para los dispositivos IoT porque tienen un bajo nivel de autodescarga y requieren un mantenimiento mínimo. Estos nodos, cuentan además con una pequeña placa solar para cargar las baterías, por lo que no hay limitaciones de autonomía.

3.4 Sistema de comunicaciones

Los dataloggers utilizan LoRa como sistema de comunicación para transmitir la información. LoRa es la principal tecnología de redes LPWAN. Se trata de un protocolo de comunicación inalámbrica que permite el envío de pequeños paquetes de datos a grandes distancias (13-15 km) con un bajo consumo de energía usando frecuencias de 868 MHz de la banda ISM. Lora permite la comunicación bidireccional entre dispositivos, aunque en este caso se utiliza

comunicación unidireccional ya que solamente se transmiten las lecturas de los sensores hasta la nube.

Para poder utilizar esta tecnología hay dos opciones, usar un operador de red que ofrezca redes LoRaWAN o bien creando una red propia, para lo cual es necesario adquirir e instalar un Gateway en la zona donde se va a trabajar. Este Gateway se encarga de generar la red inalámbrica LoRaWAN para dar cobertura a los nodos, recibir la información que estos transmiten y enviarlas al servidor web. Una de las principales razones para elegir la tecnología LoRa es que la finca de Rabanales ya contaba con un Gateway propio con modulación Lora. Hay que aclarar que LoRa es el tipo de modulación en radiofrecuencia, mientras que LoRaWAN es un protocolo de red que usa la tecnología LoRa para comunicar y administrar dispositivos LoRa con el backend de la aplicación.

3.5 Base de datos y análisis en la nube.

El backend de LoRaWAN es la plataforma que contiene las herramientas para el control de los sensores, el análisis y el almacenamiento de datos. Mediante una llamada, “callback”, los datos se transmiten a la base de datos en la nube, en este caso ThingSpeak. ThingSpeak es una plataforma de datos de código abierto basada en la tecnología de la nube que permite la recopilación de datos en línea, su análisis y el manejo mediante una API abierta.

3.6 Visualización de datos

La plataforma de visualización de datos que tiene el usuario (frontend) interactúa con la API (backend) mediante protocolo HTTP, para que el usuario realice peticiones de información a la base de datos y pueda consultar y visualizar la información que desee. La Figura 6 muestra la interfaz de la plataforma de visualización de datos.



Figura 6. Interfaz de la plataforma visualización de datos

Además, todos los datos los sensores adquiridos en el marco de este proyecto son abiertos y pueden consultarse desde el repositorio de datos de riego habilitado en la web del proyecto.

3.7 Detección de averías en la red

El principal interés de la monitorización de la red de riego es detectar posible averías y fugas de agua. Cuando las lecturas de presión, caudal o consumo de agua se desvían de los valores normales indican algún tipo de avería en la red. Pérez-Padillo et al.(2022) ha clasificado distintos tipos de incidencia en base a las lecturas registradas por sensores de presión.

- a) Fallo del sensor: Aunque no es habitual, pueden producirse fallos en la transmisión de datos del sensor durante breves periodos de tiempo, que provocan fluctuaciones erróneas de la presión y que en ningún caso van asociados a averías o fugas de agua. Este tipo de incidente es fácil de identificar ya que va asociado a una fluctuación en la batería del nodo (Figura 7).

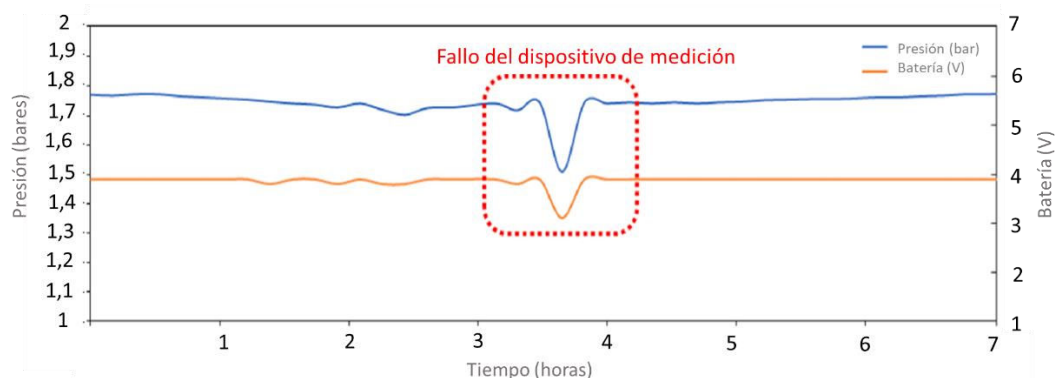


Figura 7. Incidente de fallo del sensor

b) Fuga o avería aguas abajo del sensor. La Figura 8 muestra las cuatro etapas que pueden apreciarse cuando se produce una avería de este tipo. En la primera etapa, la presión está dentro del rango de funcionamiento normal y termina con una caída repentina de la presión cuando se produce la fuga/ruptura. En el siguiente periodo, la presión se estabiliza en un valor de presión inferior al normal hasta que comienza la reparación. La duración de esta fase determina la cantidad de pérdidas de agua causadas por la fuga/ruptura en la tubería. Una vez detectado el problema, se cierra la válvula de cierre aguas arriba y comienza el periodo de reparación. Cuando finaliza el periodo de reparación finaliza y se reabre la válvula la presión recupera sus valores normales.

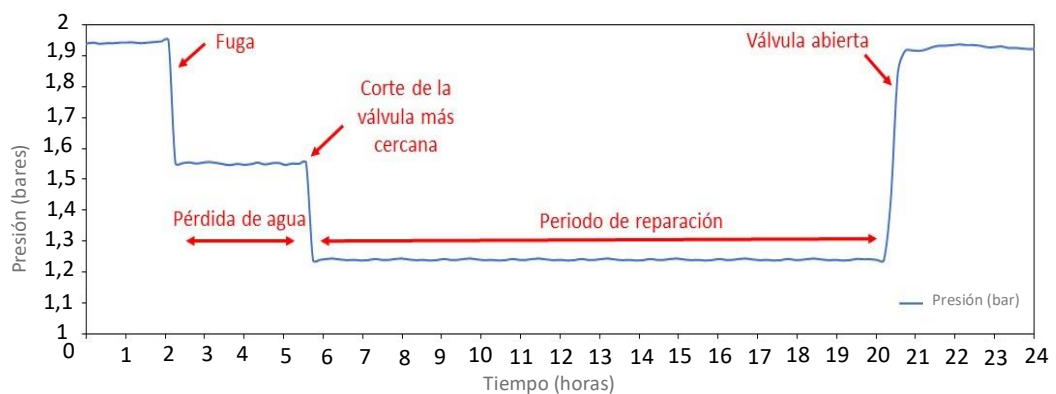


Figura 8. Fuga aguas abajo del sensor

c) Fuga o rotura aguas arriba del sensor. Este tipo de incidencia se detecta de forma similar a la anterior. En este caso, la fuga/ruptura se detecta por una caída repentina de los valores de presión (Figura 9), que siguen disminuyendo progresivamente a medida que el caudal en la tubería dañada se reduce debido a las pérdidas de agua. El periodo de reparación comienza con el corte del suministro mediante el cierre de la correspondiente válvula de cierre. Los valores del registro de presión vuelven a los niveles normales tras volver a abrir la válvula de cierre una vez que se ha solucionado la fuga/ruptura.

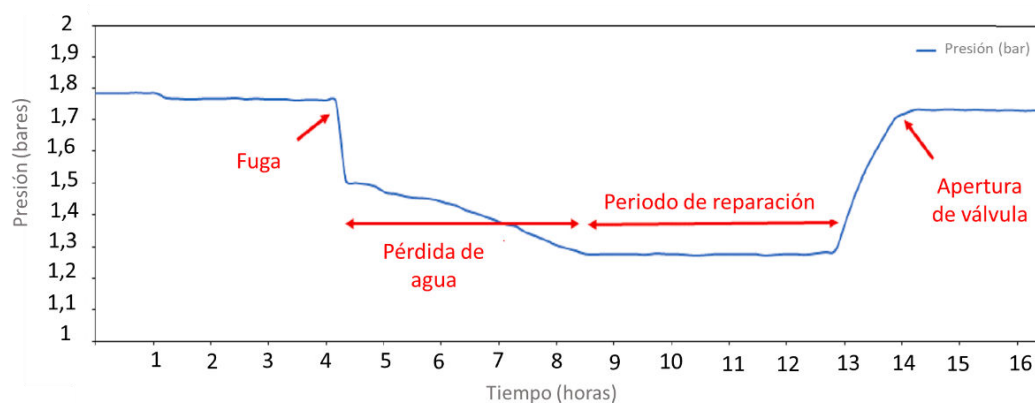


Figura 9. Fuga aguas arriba del sensor

La ubicación de la válvula de cierre y del sensor, así como la topología de la tubería dañada, determinan la presión mínima registrada por el sensor durante el periodo de reparación en los casos b) y c)

La instalación de distintos transductores de presión a lo largo de una red de riego permite detectar y localizar las fugas en tiempo real, mejorando así el rendimiento hidráulico del sistema y reduciendo el tiempo de detección de fugas y por consiguiente las pérdidas de agua. La medición de la presión también se utiliza para comprender el comportamiento del sistema hidráulico en diferentes escenarios de funcionamiento, con el fin de mejorar la gestión de situaciones adversas.

3.8 Implementación de sistemas de riego de precisión.

La implantación de sistemas de riego de precisión, basados en el uso de sensores, las TIC's y el IoT, surge como una solución potencial para aumentar la productividad y disminuir el impacto ambiental de la agricultura de regadío. El riego de precisión permite realizar un uso óptimo del agua de riego manteniendo la producción de los cultivos en cantidad y calidad. Para realizar una programación óptima del riego deben evaluarse de forma exacta las necesidades de agua del cultivo y aplicar la cantidad exacta de agua en el momento oportuno.

Contar con elementos que monitoricen el uso del agua (contadores y caudalímetro) es imprescindible para la implementación de sistemas de riego de precisión. Gracias a estos dispositivos es posible conocer la cantidad de agua que se está aplicando en cada momento, lo que a su vez es esencial para detectar posibles desviaciones del riego programado respecto al aplicado, detectar ineficiencias en la red de riego, garantizar que el consumo de agua en la campaña se ajusta a la dotación de riego asignada y obtener indicadores de eficiencias en el uso del agua del cultivo (producción obtenida/volumen de agua aplicado) que pueden llegar incluso a servir como elemento de diferenciación en el mercado para aquellos agricultores que se

esfuerzan por realizar un uso más sostenible del agua. Además, la adquisición de grandes volúmenes de datos de riego y su posterior análisis mediante técnicas de inteligencia artificial permite, por ejemplo, predecir con antelación y de forma precisa el comportamiento del cultivo, el suelo o la red de riego ante unas determinadas condiciones.

4 Tecnología micro hidroeléctrica para la recuperación de energía en redes de riego.

La modernización de los sistemas de riego, que pasa por sustituir los tradicionales canales abiertos por sistemas a presión, supone una mejora de la eficiencia en el uso del agua, sin embargo, conseguir este cambio va asociado a un incremento notorio de la demanda de energía (Morillo et al., 2018), el aumento del coste del agua de riego (en redes de riego a presión, la energía supone el 40% del coste total del agua) y también conlleva la aparición de excesos de presión en determinados puntos de la red de riego. Ante este escenario es imprescindible emprender acciones que permitan reducir el consumo de energía como, por ejemplo; realizar una correcta sectorización de la red de riego, detección de puntos críticos, mejorar la eficiencia del sistema de riego y los sistemas de bombeo o la introducción de fuentes de energía renovables para el suministro de energía en instalaciones de riego (Díaz et al., 2020). En este sentido, la introducción de la energía hidroeléctrica en el regadío se presenta como una alternativa especialmente interesante para la recuperación de energía en redes a presión.

Habitualmente, los excesos de presión en la red se disipan instalando válvulas reductoras de presión, pero la sustitución de estas por la instalación de una turbina (tecnología micro hidroeléctrica) permite reducir el exceso de presión al mismo tiempo que se genera electricidad. El problema de las turbinas es su elevado coste y los largos periodos de amortización, pero este inconveniente desaparece cuando en lugar de turbinas se usa la tecnología de las PAT, del inglés “Pump as Turbine”, bomba que trabaja como turbina. Las PAT son bombas que trabajan a la inversa, es decir que, en lugar de consumir energía para la impulsión del agua, aprovechan la presión y el movimiento del agua para generar energía.

Las PAT son más adaptables a pequeñas escalas, donde los saltos de presión que deben salvarse son más pequeños y aunque su rendimiento es inferior al de una turbina convencional, su coste de adquisición y periodo de amortización es menor. El periodo de recuperación de una PAT de entre 5-500kW es de entre 2-5 años (en función de la obra civil, las tuberías y/o la electrónica, así como la dimensión de la bomba y su capacidad de generación de energía), mientras que en turbinas convencionales el retorno de la inversión está comprendido entre 8-10 años.

Las turbinas se seleccionan en función del caudal y la altura de presión a la que trabajan para alcanzar el punto de máxima eficiencia (ME), pero conforme el punto de funcionamiento se aleja del punto de ME, se reduce el rendimiento del sistema. Con desviaciones del $\pm 50\%$ en turbinas apenas se producen pérdidas de eficiencia, mientras que en PAT cuando el caudal se desvía -20% del caudal del punto de ME, se produce una caída del rendimiento de la bomba de hasta un 70%. Por esta razón es tan importante un buen dimensionamiento de las PAT y garantizar su funcionamiento cerca del punto de ME (García Morillo et al., 2018).

El uso de esta tecnología en riego tiene una relevancia significativa para el sector, ya que debido al alto coste de la energía muchos agricultores que se ven obligados a limitar las horas de riego a las horas donde el coste de energía es menor, por lo que en muchas ocasiones no pueden aplicar la totalidad de las necesidades de agua de los cultivos. Además, el ahorro energético derivado del uso de tecnología micro hidroeléctrica podría traducirse en una importante reducción de las emisiones de CO₂ y de los costes de explotación, aumentando así la competitividad de la producción agrícola y reduciendo la huella de carbono de la agricultura de regadío y de la industria agroalimentaria.

4.1 Caso de estudio en Finca de Rabanales.

La Finca de Rabanales cuenta con un punto de bombeo (143 m cota), situado sobre la balsa de riego (coordenadas 37.921100, -4.717227), que se encarga de impulsar el agua a dos sectores de riego A y B (Figura 10), cuyas cotas más elevadas se encuentran a 170 m y 160 m respectivamente. Un sistema de riego debe suministrar caudal demandado a la presión adecuada en toda la superficie en riego, con la máxima homogeneidad posible en la distribución del agua en la parcela, por lo que el diseño y dimensionamiento del sistema bombeo debe hacerse teniendo en cuenta las condiciones de caudal y presión requeridas en el punto más desfavorable, en este caso el sector A, por ser el más alejado y de cota más elevada. Este dimensionamiento, hace que al impulsar el agua al sector B con el mismo sistema de bombeo, se genere un exceso de presión en el sistema que es disipada mediante una válvula reductora de presión (VRP) situada en la "Caseta de riego/turbina".



Figura 10. Instalación de riego sobre la que se encuentra instalada la turbina.

Para aprovechar el exceso de presión existente en este punto, se ha instalado en la caseta de riego una bomba que actúa como turbina (PAT), que permitirá generar energía a partir de un salto de presión. La energía generada se ha usado para habilitar un punto de luz en dicha caseta.

4.2 Dimensionamiento de la PAT/Turbina.

Las condiciones hidráulicas de caudal y presión determinan que tipo de turbina es la más adecuada para cada caso; turbina tradicional o PAT. Cuando la capacidad de recuperación de energía es inferior a 100 kW es aconsejable la instalación de PAT por su menor coste, facilidad de instalación y la rápida amortización.

Por tanto, para el dimensionamiento de la PAT/turbina convencional el primer paso es evaluar la potencia eléctrica que puede generar una turbina hidráulica. Para determinar la potencia eléctrica deben tenerse en cuenta la potencia hidráulica (P_H) y el rendimiento global del sistema (η_T) y se calcula mediante la ecuación 3.

$$P_E = P_H * \eta_T \quad (3)$$

Tal y como muestra la ecuación 4 la eficiencia o rendimiento global del sistema (η_T) se obtiene como producto del rendimiento de la turbina hidráulica (η_{th}), el rendimiento del generador eléctrico (η_g) y el rendimiento de la electrónica (cuadro eléctrico e inversor) (η_e).

$$\eta_T = \eta_{th} * \eta_g * \eta_e \quad (4)$$

Para sistemas de turbinas tradicionales puede considerarse que la eficiencia global es de 0,6 (eficiencia de la regulación hidráulica 0,85, de la turbina más el generador 0,74 y del transformador 0,95) y en el caso de PAT es 0,5 (0,85 de la regulación hidráulica, 0,65 de eficiencia de la PAT más el generador y 0,95 para el transformador).

Para el cálculo de la potencia hidráulica P_H , expresada en kW se utiliza la expresión de la ecuación 5:

$$P_H = (\rho * g * Q * H)/1000 \quad (5)$$

Donde ρ es la densidad del agua (997 kg/m³), g es la aceleración de la gravedad expresada en m/s² (este valor es 9,81), Q es el caudal expresado en m³/s y H es el salto de presión expresado en m.c.a.

En el punto de estudio de la finca de rabanales donde se produce el exceso de presión, situado en “Caseta riego/turbina” (Figura 10), el caudal medio es de 0,0038 m³/s (3,8 l/s) y el salto de presión de aproximadamente 40 m.c.a (3,92 bar). Conforme a esto, la potencia hidráulica del sistema serían 1,5 kW. Al ser una potencia muy baja se descartó la instalación de una turbina convencional y se optó por una PAT. Aplicando las ecuaciones 5 y 3 con el caudal y presión anteriormente indicados y considerando que el rendimiento de una PAT es del 50%, se podría generar una potencia eléctrica de 0,743 kW.

Para garantizar el correcto funcionamiento de la PAT en estas condiciones se optó por instalar una PAT de la serie LINE HP, modelo LHP-10N4. Esta turbina genera hasta 0,9 kW con un caudal de 4,3 l/s y 50 m.c.a de salto de presión.

4.3 Esquema de instalación de la turbina

En la instalación realizada en la finca de Rabanales, la energía alterna generada por la PAT pasa por un inversor monofásico (Potencia nominal 1200W, alimentación 24 VDC. Salida 230VAC-50Hz) que la transforma en continua para ser posteriormente almacenada en 2 baterías de gel (12VDC y 150Ah). Estas baterías suministran energía a una acometida eléctrica habilitada en la caseta de riego. Para proporcionar corriente al punto de luz, la corriente debe pasar de la batería

al inversor para transformar la corriente continua de las baterías en corriente alterna. La figura 11 muestra un esquema general de cómo debe ser la instalación de la PATs.

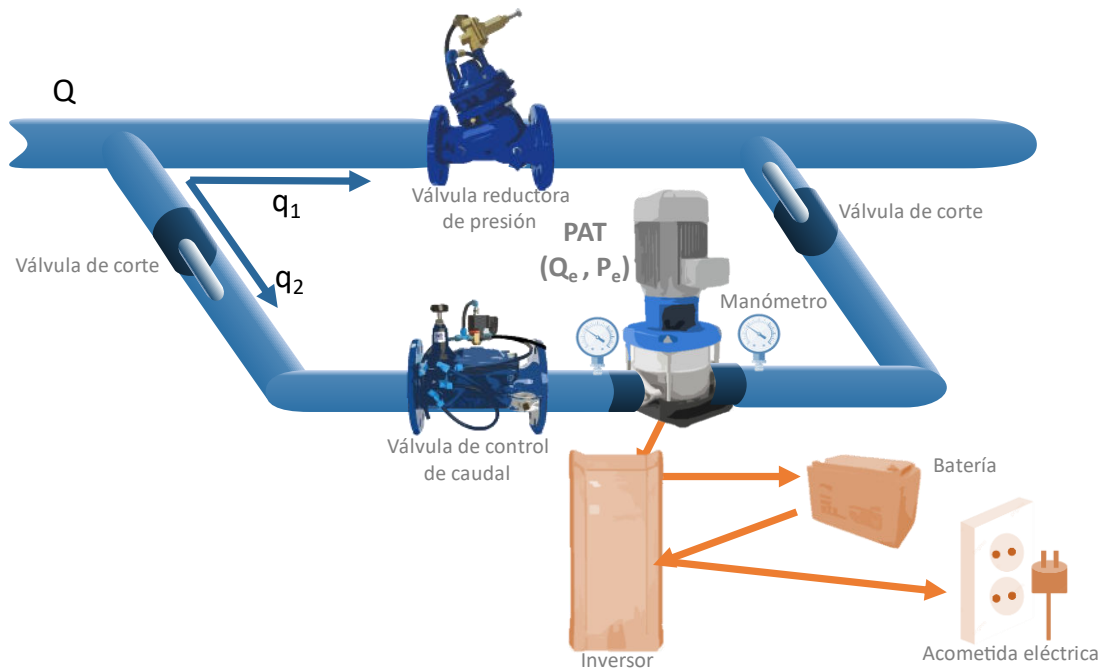


Figura 11. Esquema instalación PAT para carga de baterías.

Dado que la eficiencia de la PAT cae bruscamente cuando el caudal se aleja de las condiciones de caudal (Q_e) y presión (P_e) del punto de máxima eficiencia, la instalación de la PAT se hace en un by-pass junto con una válvula reguladora de control de flujo para garantizar que funciona el máximo tiempo posible cerca de del punto de máxima eficiencia (ME).

Con la implementación de este sistema de derivación se asegura el cumplimiento de la siguiente norma:

$$\begin{aligned} \text{Si } Q < Q_e \text{ entonces } q_2=0 \text{ y } q_1=Q; \\ \text{Si } Q > Q_e \text{ entonces } q_2=Q_e \text{ y } q_1=Q-Q_e \end{aligned} \quad (6)$$

donde Q es el caudal de la tubería (m^3/s), Q_e es el caudal de diseño de la PAT (m^3/s), q_2 es el caudal desviado a la PAT (m^3/s), y q_1 es el caudal que circula fuera de la derivación de la PAT.

A diferencia de la mayoría de las turbinas convencionales, las PATs no tienen capacidad para regular el caudal o la presión por sí mismas, por lo que la falta de un dispositivo de regulación significa que la regulación debe realizarse hidráulicamente y hay que desviar parte del caudal para mantener la contrapresión y garantizar que la PAT funciona cerca de su punto de máxima eficiencia.

Además, en la instalación de las PATs es necesario incorporar manómetros a la entrada y salida de la turbina para conocer el salto de presión existente. También deben instalarse válvulas de

corte al inicio y salida del by-pass para permitir que el agua pueda seguir circulando en caso de realizar mantenimientos en la turbina.

4.4 Potencia eléctrica generada por la PAT instalada en la finca de Rabanales.

La turbina cuenta con un sistema de comunicación propio que transmite en tiempo real la información hasta la nube. Mediante una plataforma el usuario puede acceder a todos los datos en tiempo real y también descargarlos.

Tras las primeras pruebas en campo se ha obtenido información sobre el modo de trabajo de la PAT, su rendimiento y las condiciones de caudal y presión para la generación de energía. La Figura 12, muestran la potencia eléctrica instantánea (W) generada por la turbina en un periodo de media hora, que varía en la medida que lo hacen el caudal y la presión de la red. Cuando las condiciones de caudal se aproximan a las consideradas en el dimensionamiento de la turbina 3,8 l/s de caudal y salto de presión de 4 bares, la potencia eléctrica generada alcanza valores de más de 700W, que se aproximan mucho a los estimados de forma teórica.

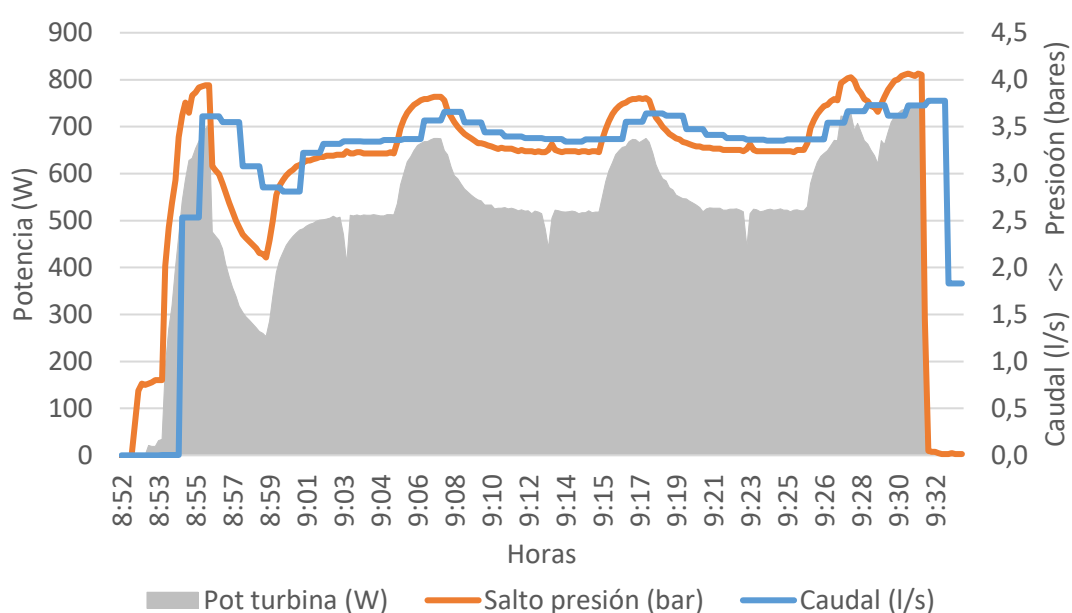


Figura 12. Evolución de la potencia eléctrica generada por la turbina en función del salto de presión (bar) y el caudal (l/s) de la red.

El salto de presión y la potencia eléctrica generada por la turbina están estrechamente relacionados. Mediante el análisis de los datos registrados (Figura 13) se puede comprobar que existe una relación prácticamente lineal entre ambos términos, con un coeficiente de determinación R^2 de 0,98.

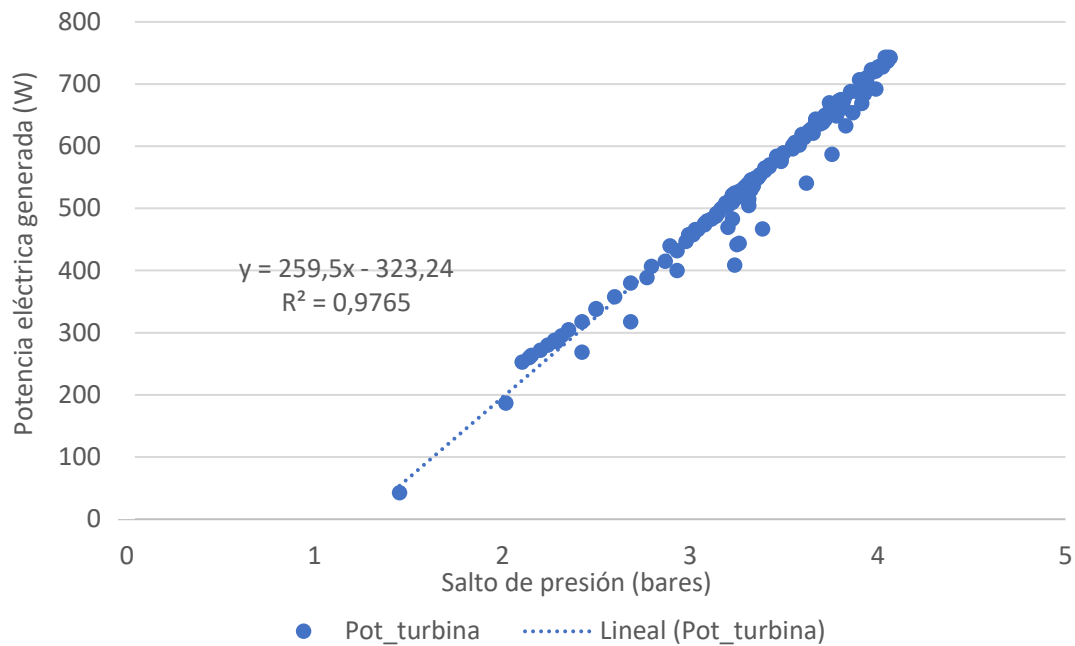


Figura 13. Relación de la potencia eléctrica generada (W) con el salto de presión (bares).

Durante el periodo de tiempo analizado también ha podido estimarse el rendimiento de la PAT ya que se monitoriza tanto la potencia hidráulica del sistema como la potencia eléctrica generada. De esta manera pudo comprobarse que el rendimiento de la PAT osciló entre 37,6% y 69,3%, con un rendimiento medio de la PAT del 48,9%.

5 Ahorro de energía con variadores de velocidad de bombas para el ahorro de energía.

Los variadores de velocidad son dispositivos electrónicos que modifica la frecuencia de alimentación eléctrica del motor de la bomba, variando su velocidad de giro y por tanto, indirectamente la curva característica de la bomba.

Las curvas características de una bomba son exclusivas de cada bomba y relacionan el caudal con la presión de bombeo (Figura 14), de modo que, al desplazarse sobre dicha curva, un mayor caudal va asociado a una menor presión y al contrario, cuanto menor es el caudal mayor es la presión con la que la bomba impulsa el agua. Cualquier cambio en la velocidad del motor significará menores revoluciones y por tanto curvas características por debajo de la nominal. Por tanto, los variadores de frecuencia permiten que una bomba pueda trabajar en cualquier punto por debajo de la curva característica de la bomba a su velocidad nominal. Por ejemplo, en la Figura 14, cuando se fija una presión constante de trabajo, el variador de velocidad permite que la bomba pase de trabaja a 50 Hz de frecuencia a 40Hz, pasando del punto 1 al punto 2', con lo que se consigue pasar de un gasto de caudal Q1 a Q2 sin incrementar la presión de trabajo H.

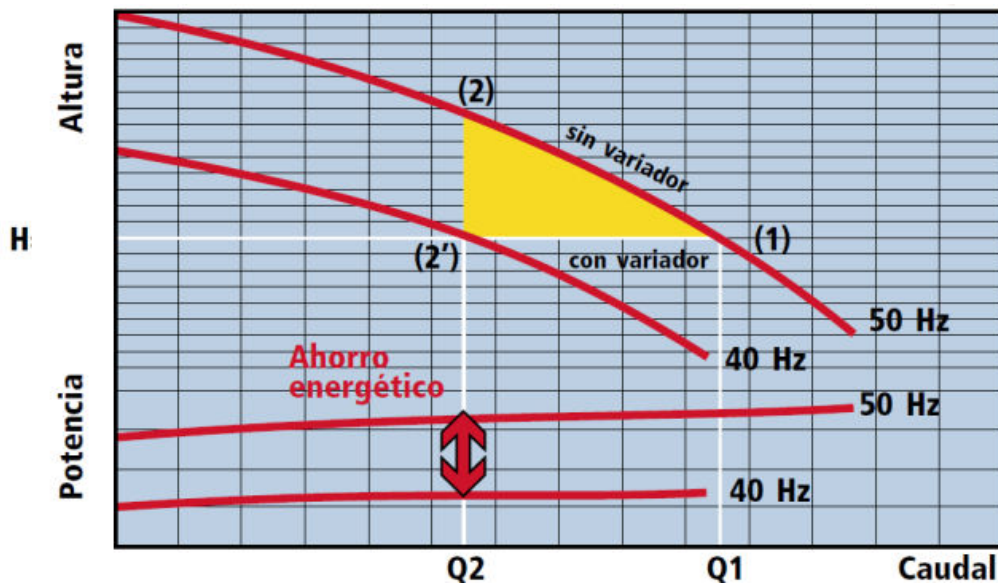


Figura 14: Cambio en la curva característica con variador de frecuencia.

Lo mismo ocurre en el contrario, por ejemplo, en la finca de Rabanales se ha instalado un variador de frecuencia en la misma caseta de riego donde se encuentra la turbina. Cuando no es necesaria la generación de energía (baterías completamente cargadas), es posible usar las válvulas de corte para cerrar el paso del agua a la turbina (Figura 11) y evitar el problema de sobrepresión mediante el uso de un variador de frecuencia, que permitiría bajar de un punto 2 a 2' (Figura 14), reduciendo la presión H sin modificar el caudal.

Ajustando la velocidad mediante el variador de frecuencia se reduce la potencia de trabajo del motor, lo que va ligado a un ahorro energético (Figura 15). En bombas centrífugas se cumple que la presión (H) es proporcional al cuadrado de la relación de velocidad, mientras que el caudal (Q) es proporcional a la velocidad, por lo que la Potencia (Q*H) es proporcional al cubo de la relación de velocidades (ecuación 7).

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{N_0}{N}\right)^3 \quad (7)$$

Donde P_0 es la potencia inicial o nominal, P la potencia usando variador de frecuencia y N_0 y N son respectivamente la velocidad inicial de giro del motor y con variador de frecuencia. Con la ecuación 7 es posible conocer la relación entre la fracción de la potencia total alcanzada y la relación de velocidades de giro del motor (Tabla 2). De modo que cuando, por ejemplo, la velocidad de giro se reduce a un 60%, el consumo de potencia se ahorra un 78,4% ya que la potencia se reduce a un 21,6% de la total.

Tabla 2. Relación entre fracción de la potencia total alcanzada y la relación de velocidades de giro del motor.

Velocidad (%)	Potencia (%)
100	100
90	72,9
80	51,2
70	34,3
60	21,6
50	12,5
40	6,4
30	2,7

Ejemplo:

Calcular el ahorro de potencia de una bomba cuya potencia nominal son 10 kW y pasa de tener una velocidad de giro de 1800 r.p.m a 60 Hz a 1440 r.p.m con 50 Hz.

Solución:

$P_0 = 10 \text{ kW}$, $N_0 = 1800 \text{ r.p.m}$, $N = 1440 \text{ r.p.m}$

$$P = \left(\frac{1440 \text{ r.p.m}}{1800 \text{ r.p.m}}\right)^3 * 10 \text{ kW} = 5,1 \text{ kW}$$

Al reducir la velocidad del motor un 20% (1800 r.p.m → 1440 r.p.m), se demandan 5,1 kW, (51,2% de la potencia nominal), es decir se reduce o ahorra un 48,8% de la potencia.

Además del ahorro de energía, el uso de variadores de frecuencia presenta las siguientes ventajas:

- Protege el motor de sobrepresiones y perturbaciones del voltaje de entrada.
- Mejora la calidad y productividad del proceso productivo gracias al control del par y velocidad del motor.
- Arranque y paradas progresivo del motor que evita puntas de corriente alta y golpes de ariete
- Mantenimiento de condiciones de trabajo constantes gracias al establecimiento de condiciones de presión o caudal constantes.
- Disminución del número de arranques y paradas de las bombas.
- Aumenta la vida útil de los motores y reduce su mantenimiento
- Reducción de las emisiones de contaminantes. La reducción de consumo de energía eléctrica y combustibles fósiles va ligada a una menor emisión de gases de efecto invernadero.

6 Conclusión

En un contexto de escasez de agua cada vez más frecuente, la digitalización del sector agroalimentario y la aplicación de las TICs y el IoT es indispensable para lograr una óptima gestión del nexo agua-energía, que minimice las pérdidas de agua y los costes económicos asociados al manejo de las redes de agua. Desde este punto de vista, la instalación de sensores de presión y caudal permite controlar de forma remota y en tiempo real el funcionamiento de la red de riego, facilitando la detección de fugas y minimizando las pérdidas de agua. Por otra parte, el uso de energías renovables es una alternativa en auge que permite reducir las emisiones de CO₂ y los costes de explotación. En este sentido el uso tecnología micro-hidroeléctrica permite aprovechar los excesos de presión, frecuentes en redes de riego, para generar energía eléctrica, lo cual es especialmente interesante para puntos sin acceso a la red eléctrica o como alternativa para sustituir o reducir el uso de otras fuentes de energía no renovables. Cuando no sea necesaria la generación de energía, el uso de variadores de frecuencia evita la aparición de sobrepresiones en la red a la vez que se reduce en consumo de energía.

Gracias a la adquisición de grandes volúmenes de datos de campo (presión, caudal, condiciones ambientales) tomados en tiempo real, es posible crear complejos modelos informáticos cuyo objetivo es apoyar a los agricultores en la toma de decisiones.

7 Referencias

- Rodríguez- Díaz, J.A., González-Perea, R., Moreno, M.Á., 2020. Modelling and management of irrigation system. *Water (Switzerland)* 12, 1–4. <https://doi.org/10.3390/w12030697>
- FAO, FIDA, OMS, 2017. El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2017. Fomentando la resiliencia en aras de la pa y la seguridad alimentaria.
- García Morillo, J., McNabola, A., Camacho, E., Montesinos, P., Rodríguez Díaz, J.A., 2018. Hydro-power energy recovery in pressurized irrigation networks: A case study of an Irrigation District in the South of Spain. *Agric. Water Manag.* 204, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.035>
- Hunt, C.E., 2004. *Thirsty planet: Strategies for sustainable water management*. Zed Books (New York), New York. https://doi.org/https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Thirsty%20Plant-strategies%20for%20Sustainable%20Water%20Management&author=C.E.%20Hunt&publication_year=2004
- Mérida García, A., Fernández García, I., Camacho Poyato, E., Montesinos Barrios, P., Rodríguez Díaz, J.A., 2018. Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system. *J. Clean. Prod.* 175, 670–682. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.093>
- García- Morillo, J., Rodríguez-Díaz, J.A, Crespo, M., McNabola, A., 2018. Energy Saving Measures in Pressurized Irrigation Networks: A New Challenge for Power Generation 1440. <https://doi.org/10.3390/proceedings2231440>
- Pérez-Padillo, J., Morillo, J.G., Ramirez-Faz, J., Roldán, M.T., Montesinos, P., 2020. Design and implementation of a pressure monitoring system based on iot for water supply networks. *Sensors (Switzerland)* 20, 1–19. <https://doi.org/10.3390/s20154247>
- Pérez-Padillo, J., Puig, F., García Morillo, J., Montesinos, P., 2022. IoT platform for failure management in water transmission systems. *Expert Syst. Appl.* 199. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116974>
- UNESCO, 2015. *The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world*. UNESCO Publishing, Paris. <https://doi.org/http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2015-water-for-a-sustainable-world/>
- UNESCO, 2009. *The United Nations World Water Development Report 3-Water in a Changing World* (Paris, France). (Paris, France). https://doi.org/10.1142/9781848160682_0002