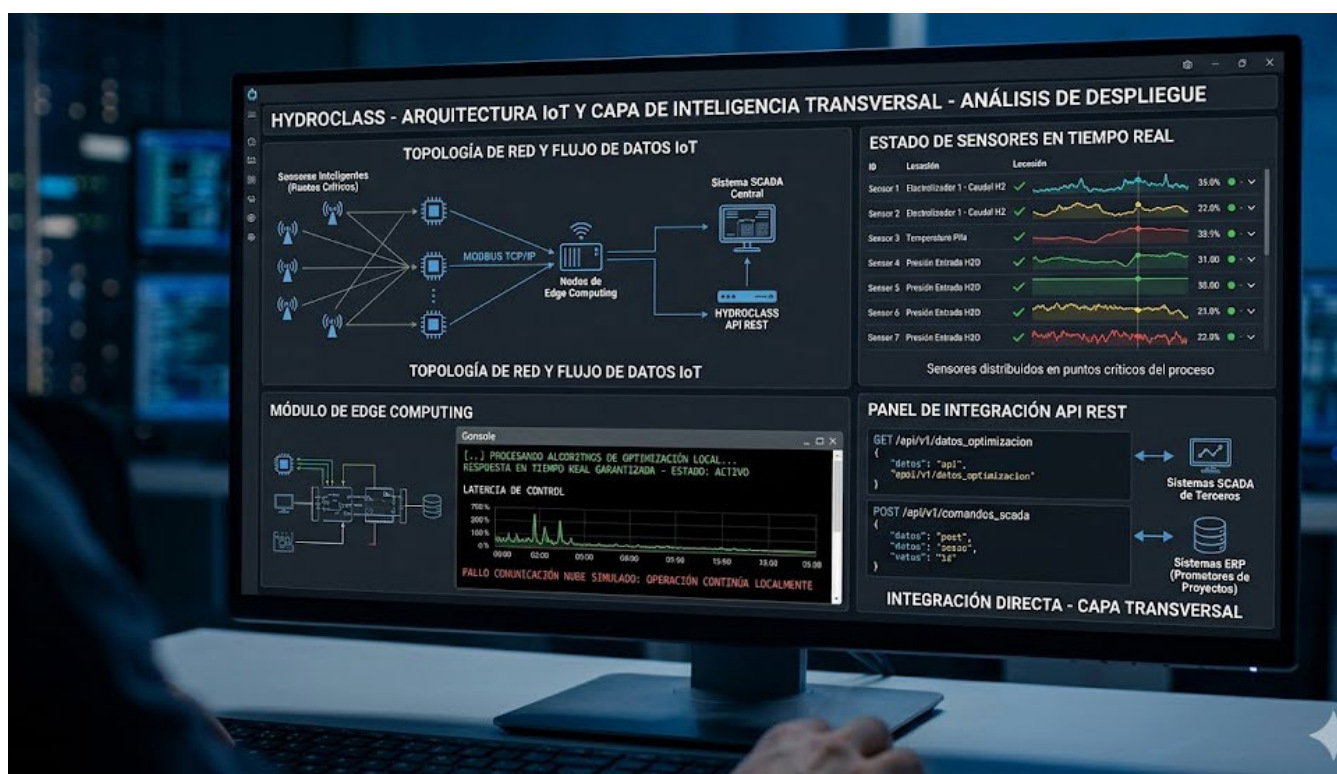


Del laboratorio al campo: Industria 4.0 para la viabilidad hídrica del hidrógeno verde

Proyecto galardonado con el accésit en el IV Premio a la Innovación Tecnológica, Empresarial y Sostenibilidad de la Fundación Técnica Industrial (FTI): Cómo HYDROCLASS – H2 OPTIFLOW integra IoT, inteligencia artificial y gemelo digital para transformar la evaluación de recursos hídricos en proyectos de hidrógeno renovable.



Mónica Álvarez Manso

La producción de hidrógeno verde mediante electrolisis requiere agua ultrapura con conductividad inferior a 0,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Alcanzarla a partir de fuentes naturales implica un proceso de pretratamiento cuya eficiencia y viabilidad económica dependen críticamente de la calidad del agua de partida —un parámetro que varía enormemente entre localizaciones y que el sector evaluaba hasta ahora de forma tardía, con métodos estáticos y análisis puntuales que consumían meses y no capturaban la variabilidad estacional. Global Virtualizza Ingenieros S.L. ha desarrollado HYDROCLASS – H2 OPTIFLOW, un sistema inteligente que, apoyándose en una plataforma de Industria 4.0 —sensórica IoT, edge computing, gemelo digital e inteligencia artificial—, permite evaluar la aptitud hídrica

de cualquier fuente en 24-48 horas con un error inferior al 5 %, frente a los 3-6 meses y errores del $\pm 20\text{-}30\%$ de los métodos convencionales.

1. EL RETO HÍDRICO DEL HIDRÓGENO VERDE

Los objetivos climáticos de la Unión Europea —40 GW de capacidad electrolizadora y 10 millones de toneladas de hidrógeno renovable en 2030, con una inversión en España de 8.900 millones de euros— colocan la gestión eficiente del agua en el centro de la viabilidad de los proyectos. Los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM), tecnología de referencia por su eficiencia y compacidad, exigen agua ultrapura con conductividad inferior a 0,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La obtención de

esa pureza mediante ósmosis inversa y electrodesionización genera un subproducto inevitable: el agua de rechazo, concentrada en sales y minerales, cuyo volumen puede superar el 50 % del agua entrada cuando la fuente es de baja calidad.

Esta agua de rechazo no puede descargarse libremente. La normativa española de vertidos establece límites estrictos que, cuando se superan, obligan a tratamiento adicional o gestión por gestor autorizado, disparando los costes operativos. El problema es que el sector carecía hasta ahora de herramientas para anticipar este escenario en la fase de planificación: la calidad del agua se media cuando la planta ya estaba proyectada, con costes de corrección mucho más elevados.

2. HYDROCLASS – H2 OPTIFLOW: ARQUITECTURA DE LA INNOVACIÓN

La innovación de Global Virtualizza no es un sensor ni un software aislado. Es una plataforma integrada que combina cuatro capas tecnológicas interdependientes para convertir la evaluación hídrica en un proceso automatizado, preciso y escalable.

3. LA PLANTA PILOTO: VALIDACIÓN EXPERIMENTAL EN LA UNIVERSIDAD DE LEÓN

El fundamento experimental del sistema es una planta piloto que simula a escala el proceso de pretratamiento industrial para electrolizadores PEM. El tren de proceso comprende filtración físico-química, ósmosis inversa de doble paso y electrodesionización (EDI). Quince puntos de monitorización distribuidos por el circuito registran en tiempo real todos los parámetros relevantes, controlados mediante sistema SCADA centralizado.

La planta fue el instrumento para una campaña de muestreo sin precedentes en España: 77 fuentes hídricas distribuidas por toda la Península Ibérica, seleccionadas mediante la clasificación climática Köppen-Geiger para cubrir la máxima diversidad geológica e hidrológica. Esta base de datos experimental —captaciones subterráneas y superficiales, con conductividades de 32 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en granitos del norte hasta más de 3.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en acuíferos yesíferos del sureste— es el activo diferenciador del sistema: ningún competidor dispone de un conjunto de datos validado experimentalmente de esta amplitud y especificidad para el sector del hidrógeno.

4. ALGORITMO PREDICTIVO E INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA

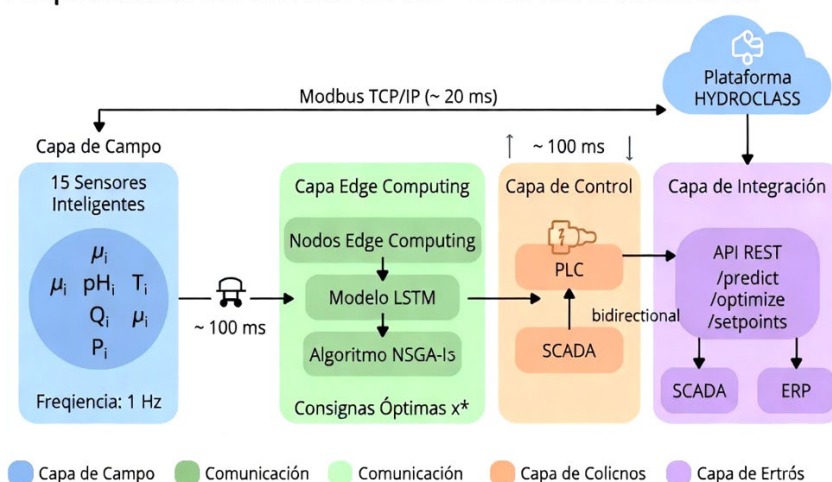
El núcleo del sistema es un algoritmo predictivo propietario —registrado como propiedad intelectual de Global Virtualizza Ingenieros S.L.— entrenado con los datos experimentales de la planta piloto. A partir de varios parámetros de entrada fácilmente medibles, el algoritmo predice con error inferior al 5 % las treinta y dos variables operativas críticas de la planta de pretratamiento. Esto convierte semanas de análisis en horas de predicción automatizada.

El algoritmo clasifica automáticamente la fuente en una de las tres categorías de HYDROCLASS y genera, en la misma operación, la ruta de tratamiento

Capa tecnológica	Componentes principales	Función en el sistema
Sensórica IoT industrial	9-15 sensores distribuidos (conductividad, pH, temperatura, caudal, presión, dureza, O_2)	Monitorización en tiempo real de todos los parámetros hídricos críticos
Edge Computing	Nodos de procesamiento local con latencia <100 ms; arquitectura redundante (disponibilidad >99,5 %)	Ejecución local del algoritmo: respuesta en tiempo real sin dependencia de nube
Gemelo Digital	Modelo virtual completo de la planta de tratamiento; balance de masa y energía en tiempo real	Simulación de escenarios operativos antes de construir la planta física
Inteligencia Artificial	Algoritmo predictivo propietario validado sobre 77 muestras peninsulares (error <5 %)	Clasificación automática de fuentes y predicción de agua de rechazo, consumo y vida de membranas

Figura 1. Las cuatro capas tecnológicas de HYDROCLASS – H2 OPTIFLOW.

Arquitectura IoT HYDROCLASS - Tren de Tratamiento



Esquema general de la arquitectura IoT desplegada en HYDROCLASS.

óptima y la estimación de costes operativos. La validación se realizó con 26 muestras independientes no utilizadas en el entrenamiento, confirmando la robustez del modelo incluso ante condiciones geológicas no representadas en el conjunto de entrenamiento.

El sistema incluye además algoritmos de optimización multi-objetivo que, una vez conocida la calidad hídrica, ajustan dinámicamente los parámetros operativos de la planta —presión de membranas, caudal de recirculación, voltaje en EDI— para minimizar simultáneamente

el coste energético, el volumen de rechazo y el desgaste de equipos. Esta capa de optimización continua, apoyada en los nodos de edge computing, permite que la planta se adapte en tiempo real a variaciones estacionales de la calidad del agua.

5. CLASIFICACIÓN HÍDRICA Y RESULTADOS CUANTIFICADOS

El análisis de los 77 puntos reveló que la conductividad eléctrica actúa como parámetro integrador: todos los demás indicadores físico-químicos mantienen

Categoría	Conductividad entrada	Agua de rechazo	Impacto operativo
ÓPTIMA	0 – 410 $\mu\text{S}/\text{cm}$	<30 %	Descarga directa permitida; coste mínimo
MODERADA	411 – 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$	30–50 %	Tratamiento parcial del rechazo necesario
RESTRINGIDA	>900 $\mu\text{S}/\text{cm}$	>50 %	Gestión por gestor autorizado; riesgo alto

Tabla 1. Clasificación HYDROCLASS – H2 OPTIFLOW.

Indicador	Métodos convencionales	HYDROCLASS – H2 OPTIFLOW
Tiempo de evaluación hídrica	3 – 6 meses	24 – 48 horas (–95 %)
Precisión predictiva	±20 – 30 %	<5 % (mejora del 85 %)
Fuentes evaluables en paralelo	1 – 2 por proyecto	Ilimitadas (escalabilidad ∞)
Variabilidad estacional	No considerada	Analizada y verificada
Tiempo de preparación de agua	12 – 28 horas	4 – 12 horas (–59 a –66 %)

Tabla 2. Mejora cuantificada frente a métodos convencionales del sector.

con ella una correlación directa. Este hallazgo simplifica radicalmente el diagnóstico de cualquier fuente.

El análisis geográfico del conjunto peninsular revela que más del 65 % de las localizaciones presentan agua en categoría Óptima o Moderada, lo que confirma el potencial real de España para el desarrollo sostenible del hidrógeno verde. Las zonas de mayor idoneidad se concentran en sustratos graníticos y pizarrosos del norte y noroeste; las cuencas del sureste requieren análisis específico antes de comprometer inversiones.

6. DIGITALIZACIÓN E INDUSTRIA 4.0: EL GEMELO DIGITAL

Una de las aportaciones más singulares del proyecto es el gemelo digital de la planta de tratamiento: un modelo virtual completo que reproduce con precisión superior al 99 % el comportamiento real del sistema, integrando balance de masa y energía en tiempo real. El gemelo permite simular escenarios de operación —variaciones estacionales de calidad del agua, cambios en la demanda de hidrógeno, mantenimientos programados— antes de que ocurran, habilitando un mantenimiento predictivo que reduce las paradas no programadas en un 70 %. Esta capacidad de simulación anticipada representa una ventaja competitiva que ningún proveedor convencional de sistemas de tratamiento ofrece.

La arquitectura IoT de HYDROCLASS despliega 15 sensores inteligentes en los puntos críticos del tren de tratamiento, con adquisición a 1 Hz y comunicación Modbus TCP/IP hacia el SCADA. Cada medición $d_i(t) = \{\sigma_i, pH_i, T_i, Q_i, P_i\}$ se transmite en menos de 20 ms, y el tiempo de ciclo completo hasta la actuación se mantiene por debajo de $t_{total} = 98.06$ ms, gracias al procesamiento local en los nodos de edge computing. Estos nodos ejecutan el modelo LSTM y el algoritmo NSGA

II, generando consignas óptimas x^* que se envían al PLC, mientras la API REST expone servicios de predicción y optimización para SCADA y ERP, convirtiendo a HYDROCLASS en una capa de inteligencia transversal que no interfiere en la lógica básica de control, pero la hace predictiva y auto optimizante

La disponibilidad operativa del sistema es superior al 99,5 % gracias a la arquitectura redundante y la conmutación automática ante fallos. El “dashboard” interactivo proporciona KPIs personalizables y un sistema de alertas multicanal que permite supervisión remota completa desde cualquier dispositivo.

7. SOSTENIBILIDAD, ECONOMÍA CIRCULAR Y ODS

La producción de hidrógeno verde a la escala prevista por el Plan REPowerEU representaría tan solo el 0,6 % del consumo mundial de agua para energía. El impacto hídrico global es manejable, pero puede ser significativo localmente cuando se utilizan fuentes de baja calidad en zonas con estrés hídrico. HYDROCLASS aborda este riesgo en origen: la selección inteligente de fuentes reduce el consumo de agua fresca hasta un 40 % y elimina el 80 % de las descargas con conductividad superior a los límites legales, protegiendo los acuíferos y los ecosistemas acuáticos receptores. El sistema se alinea directamente con el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) de las Naciones Unidas.

Desde el enfoque de economía circular, el sistema identifica oportunidades para la reutilización del agua de rechazo en usos secundarios compatibles —riego de cultivos tolerantes a la salinidad, procesos industriales de menor exigencia— y para la valorización del oxígeno generado en la electrólisis y del calor residual del proceso. El objetivo es que la fracción de subproductos que requiere gestión especial sea mínima y que el balance de recursos del ciclo completo

sea positivo tanto en términos energéticos como hídricos.

8. GLOBAL VIRTUALIZZA INGENIEROS: I+D+I Y RECONOCIMIENTO SECTORIAL

Global Virtualizza Ingenieros S.L. es una empresa de ingeniería con sede en León especializada en el desarrollo de sistemas de tratamiento de agua y tecnologías para la producción sostenible de energías renovables. El 35 % de su presupuesto anual se destina a actividades de I+D+i, desarrolladas en estrecha colaboración con grupos de investigación. Esta apuesta por la investigación industrial aplicada se materializó en el proyecto HYDROCLASS – H2 OPTIFLOW, cuyo desarrollo ha requerido más de tres años de trabajo multidisciplinar —ingeniería química, hidrogeología, ciencias de datos y electroquímica— y una inversión en validación experimental que constituye una barrera de entrada real para cualquier competidor que quiera replicar la solución.

En 2025, el proyecto recibió el Acésit del IV Premio a la Innovación Tecnológica Empresarial y Sostenibilidad de la Fundación Técnica Industrial (FTI), institución del Consejo General de la Ingeniería Técnica Industrial de España (COGITI).

La hoja de ruta tecnológica prevé la incorporación de IA generativa para optimización automática avanzada, trazabilidad blockchain de la huella hídrica de cada lote de hidrógeno, módulos de predicción climática para evaluar la disponibilidad futura del recurso, y la extensión a aplicaciones de desalinización para producción de hidrógeno desde agua de mar. El objetivo es convertirse en el estándar tecnológico de referencia para la evaluación hídrica en proyectos de hidrógeno verde a escala europea.

CONCLUSIONES

El agua de calidad adecuada es un factor de viabilidad del hidrógeno verde tan crítico como la disponibilidad de energía renovable, pero ha permanecido sistemáticamente infravalorado en la planificación de proyectos. HYDROCLASS – H2 OPTIFLOW demuestra que la combinación de validación experimental rigurosa, inteligencia artificial aplicada y plataforma de Industria 4.0 puede transformar semanas de análisis incierto en horas de predicción precisa, reduciendo el riesgo financiero de los promotores y anticipando el cumplimiento regula-

torio desde las primeras fases del proyecto.

España cuenta con el potencial hídrico, las capacidades tecnológicas y la ambición política para liderar la producción de hidrógeno verde en Europa. Con herramientas como HYDROCLASS, puede hacerlo además con garantías de eficiencia hídrica, minimización del impacto ambiental y sostenibilidad a largo plazo del recurso agua.

REFERENCIAS

[1] Álvarez-Manso M.; Búrdalo-Salcedo G.; Fernández-Raga M. Classification Framework for Hydrological Resources for Sustainable Hydrogen Production with a Predictive Algorithm for Optimization. Hydrogen 2025, 6, 54. DOI: 10.3390/hydrogen6030054 (CC BY 4.0).

[2] Ministerio para la Transición Ecológica. Hoja de Ruta del Hidrógeno Renovable en España. MITECO, Madrid, 2020.

[3] Comisión Europea. Estrategia del

Hidrógeno para una Europa Climáticamente Neutra. COM(2020) 301 final. Bruselas, 2020.

[4] Agencia Internacional de la Energía (AIE). Global Hydrogen Review 2024. IEA Publications, París, 2024.

Mónica Álvarez Manso es Ingeniera Técnica de Minas y directora técnica en Global Virtualizza Ingenieros S.L. E-mail:info@globalvirtualizza.com

Diseño con propósito: democratizando la tecnología geoespacial desde la necesidad

Proyecto finalista del I Premio MUPITI "Ingeniería para las personas"

Por Clara Gascón Jiménez

A veces, la ingeniería más efectiva no nace en centros de investigación avanzados, sino como respuesta directa a problemas reales sobre el terreno. La idea de este proyecto no surgió frente a una pantalla en España, sino durante mi estancia en la República Dominicana como cooperante en el Programa de Pequeños Subsidios del PNUD, y en estrecha colaboración con la ONG Guakía Ambiente. Allí descubrí una realidad compleja: organizaciones locales y estudiantes de la Universidad Autónoma de Santo Domingo necesitaban realizar levantamientos topográficos con el fin de proyectar infraestructuras esenciales para el suministro de agua y electricidad en comunidades vulnerables. ¿El problema? Los equipos comerciales de posicionamiento satelital de alta precisión (GNSS-RTK) tienen costes prohibitivos para ellos.

Ante esto, ya se había desarrollado una alternativa económica: un receptor GNSS de bajo coste y código abierto al que bautizaron como GA-01 y que lograba precisiones centimétricas por una fracción del precio habitual. Sin embargo, su envoltorio técnico original comprometía gravemente su viabilidad operativa a largo plazo. Al utilizarlo en el terreno, las limitaciones eran constantes: el sistema sufría filtraciones por falta de estanqueidad, el espacio interior tensionaba el cableado y, al acoplarse de manera lateral al jalón topográfico, el peso descentrado desestabilizaba el trípode. Por ello, se hacía indispensable abordar



Visualización fotorrealista del dispositivo GA-02.

un rediseño integral de la carcasa para transformar este valioso instrumento en un producto verdaderamente eficiente, seguro y ergonómico en el campo.

Al diseñar el nuevo modelo GA-02, los requerimientos surgieron de escuchar a los usuarios y observar las exigencias del entorno caribeño. Se