



Sistema híbrido eólico-fotovoltaico-biomasa como esquema de gestión de fuentes renovables y almacenamiento energético en hidrógeno

Autor: Domingo González Navarro

Institución: Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de la Comunidad Valenciana

Otros autores: Carlos Sánchez Díaz (Universidad Politécnica de Valencia); Javier Monrabal Mateo

Resumen

La introducción a gran escala de las energías renovables en el sistema de generación de energía eléctrica supone una solución viable y económica para la sustitución de combustibles fósiles y nucleares, permitiendo además una reducción importante de emisiones de CO₂. Sin embargo, el carácter no gestionable del recurso eólico provoca que la disponibilidad de la energía renovable dependa de las condiciones ambientales (viento, sol...), que son altamente variables y de difícil predicción. En este ámbito se construye el laboratorio LabDER con el objetivo de estudiar la viabilidad técnica y económica de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico-biomasa como esquema de gestión de fuentes renovables y almacenamiento energético en hidrógeno. De acuerdo con este esquema, la energía eléctrica excedente producida por el aerogenerador o la planta fotovoltaica se invierte en producir y almacenar hidrógeno, que será transformado posteriormente en energía eléctrica a través de una pila de combustible cuando la producción sea inferior a la demanda. Por su parte el subsistema de gasificación de biomasa también actúa como apoyo en la generación, disponiendo así el sistema renovable de capacidad de adaptación frente a variaciones en la demanda de energía eléctrica o desviaciones en la producción del aerogenerador debido a errores en la predicción del viento. El sistema está concebido para actuar de forma autónoma mediante sistemas de control en cada uno de los subsistemas (eólico, biomasa, fotovoltaica e hidrógeno), integrados todos ellos en un sistema global de control distribuido. Para ello se ha construido una planta piloto del almacenamiento en hidrógeno compuesta por un electrolizador que genera hidrógeno a partir de agua y energía eléctrica, un depurador de hidrógeno, un compresor elevador de presión que inyecta el hidrógeno en una botella de almacenamiento, una red de aire comprimido y un autómata programable para realizar funciones de control. Dentro del proyecto global se pretende describir el desarrollo del subsistema de producción y almacenamiento de hidrógeno, los resultados obtenidos y las líneas de investigación actuales y futuras.

Palabras clave: Sistemas híbridos; Energía renovable; Almacenamiento de energía; Caracterización experimental; Control experimental

CONTENIDO

1. Introducción	3
2. Descripción del sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno	5
3. Red de comunicaciones y sistema de adquisición de datos.....	9
4. Caracterización del sistema y resultados	11
5. Diseño del algoritmo de control	20
6. Implementación del control y resultados.....	25
7. Conclusiones	29
8. Líneas de trabajo actuales y futuras	29
9. Bibliografía	30

1. Introducción

La introducción a gran escala de las energías renovables en el sistema de generación de energía eléctrica constituye una solución técnicamente viable y económica para la sustitución de combustibles fósiles y nucleares, suponiendo una reducción importante de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

La energía eólica se ha convertido en una de las fuentes que más contribuye a la generación eléctrica, llegando a superar el 20% de la cobertura en España. Sin embargo, el carácter no gestionable del recurso eólico causa que la disponibilidad de energía eólica dependa de las condiciones de viento, que son altamente variables y de difícil predicción.

En la actualidad el sistema eléctrico actúa ante un exceso de energía eólica sobre la prevista desconectando los aerogeneradores necesarios, con la consiguiente pérdida de generación eléctrica para el operador del parque. Este hecho suele suceder con frecuencia durante la noche, cuando puede coincidir la disminución de la demanda eléctrica con la existencia de fuertes vientos. Por otra parte, si la generación eólica es inferior a la prevista, el sistema eléctrico debe recurrir a centrales próximas de generación para obtener la energía eléctrica necesaria.

Algunos casos recientes ilustran el impacto sobre la regulación del sistema eléctrico. El día 2 de noviembre de 2008 [1] se produjo un exceso de producción eólica debida a la aparición de fuertes vientos (con un error de predicción de 3200 MW) cuando la curva de demanda estaba en su nivel más bajo. Para mantener la estabilidad del sistema hubo que recurrir a las reservas de regulación, ordenando el desacoplamiento de los grupos térmicos y finalmente como último recurso la desconexión de los parques de aerogeneradores, anulando una potencia de generación total de 2800 MW.

En un escenario a corto plazo se prevé que la contribución de la energía eólica se incremente de forma importante [2]. Sin embargo, las desviaciones en la previsión de viento [3] suponen un problema para la gestión de la red eléctrica que se agrava conforme aumenta la presencia de parques eólicos, suponiendo una seria limitación que impide plantear objetivos más ambiciosos para la energía eólica. Esta desviación dificulta seriamente mantener el balance entre generación y consumo, y en un escenario de introducción masiva de energía eólica supone un reto fundamental a resolver. Este gran desafío al que se enfrenta el sector tecnológico pasa necesariamente por resolver el viejo problema del almacenamiento energético y establecer mecanismos que permitan garantizar la fiabilidad y seguridad del sistema. Para ello es necesario desarrollar

sistemas híbridos de generación [4,5] que permitan una regulación optimizada y una flexibilidad adecuada a las necesidades de la gestión de producción y demanda.

Con el fin de garantizar la generación eléctrica programada para los parques eólicos, se propone como solución disponer de un sistema de almacenamiento de energía eléctrica y un sistema de generación gestionable y de respuesta rápida. De esta forma, parte de la energía excedente se puede almacenar para recuperarla en los momentos de mayor demanda. El hidrógeno se ha convertido en la apuesta actual para solucionar el problema del almacenamiento de energía [6,7]. Además, el hidrógeno como vector energético ha sido considerado un eje estratégico de la Unión Europea en la política energética y el desarrollo sostenible para las próximas décadas.

El actual mercado liberalizado de energía eléctrica ajusta el precio de la energía en función de la demanda. Durante la noche la demanda de energía eléctrica es mínima, reduciéndose el precio a casi la mitad respecto a las horas de máxima demanda. En este período se puede aprovechar la energía generada por el parque eólico para producir hidrógeno a través de electrólisis de agua a un precio reducido. De esta forma, en caso de excedentes de energía eólica o debido a la reducción de potencia por regulación del sistema eléctrico, la producción de hidrógeno actúa como sumidero de energía, que será utilizada en los momentos de máximo consumo cuando el precio de la energía es mayor.

El empleo del hidrógeno supone por tanto una triple contribución al actual problema energético. Por una parte, el hidrógeno como vector energético se presenta como una solución al problema del almacenamiento de energía, permitiendo de esta forma desacoplar generación y demanda e incrementar la producción de energía eléctrica a través de fuentes limpias y respetuosas con el Medio Ambiente.

Por otra parte, el almacenamiento de energía en forma de hidrógeno aporta capacidad de regulación a las plantas de generación eléctrica con recursos no gestionables, como son la energía eólica y solar, facilitando su integración en el sistema eléctrico y permitiendo planteamientos ambiciosos sobre el incremento de energías renovables en la generación.

Y finalmente, debido a su alto poder energético y sus características como elemento químico, el hidrógeno se convierte en una opción interesante para el transporte de energía eléctrica, permitiendo una vía de distribución alternativa a las actuales redes eléctricas que tienen un gran impacto sobre el Medio Ambiente.

La introducción del hidrógeno puede contribuir a una mejor gestión de la generación eléctrica e incrementar la aportación de los recursos renovables al sistema eléctrico, con la correspondiente reducción de las emisiones contaminantes y de efecto invernadero a la atmósfera. Plantea por lo tanto un nuevo escenario sostenible, tanto energética como medioambientalmente, en el que recursos naturales abundantes como son el sol, el viento y el agua se convierten en recursos energéticos fundamentales.

En este ámbito se construye el laboratorio LabDER (Distributed Energy Resources Laboratory), perteneciente al Instituto de Ingeniería Energética de la Universidad Politécnica de Valencia, y cuyo objetivo es el desarrollo de una planta piloto para estudiar la viabilidad técnica y económica de todas las posibles configuraciones para un sistema híbrido eólico-fotovoltaico-biomasa como esquema de gestión de fuentes renovables y almacenamiento energético en hidrógeno.

Este proyecto pretende contribuir al desarrollo y la integración de las tecnologías de generación renovable y almacenamiento de energía, imprescindibles para lograr en un futuro próximo un escenario energético donde la Sostenibilidad y la protección del Medio Ambiente sean los pilares fundamentales en la búsqueda de un mundo mejor.

Dentro del proyecto global, el presente trabajo pretende describir principalmente el desarrollo del subsistema de producción y almacenamiento de hidrógeno, mostrando el estado actual del desarrollo, los resultados obtenidos y las líneas de investigación actuales y futuras.

2. Descripción del sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno

El laboratorio de recursos energéticos distribuidos LabDER (<http://ie.webs.upv.es/labder>) dispone de una planta piloto de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico-biomasa formando una micro-red. En la Figura 1 se muestra el esquema del sistema híbrido instalado.

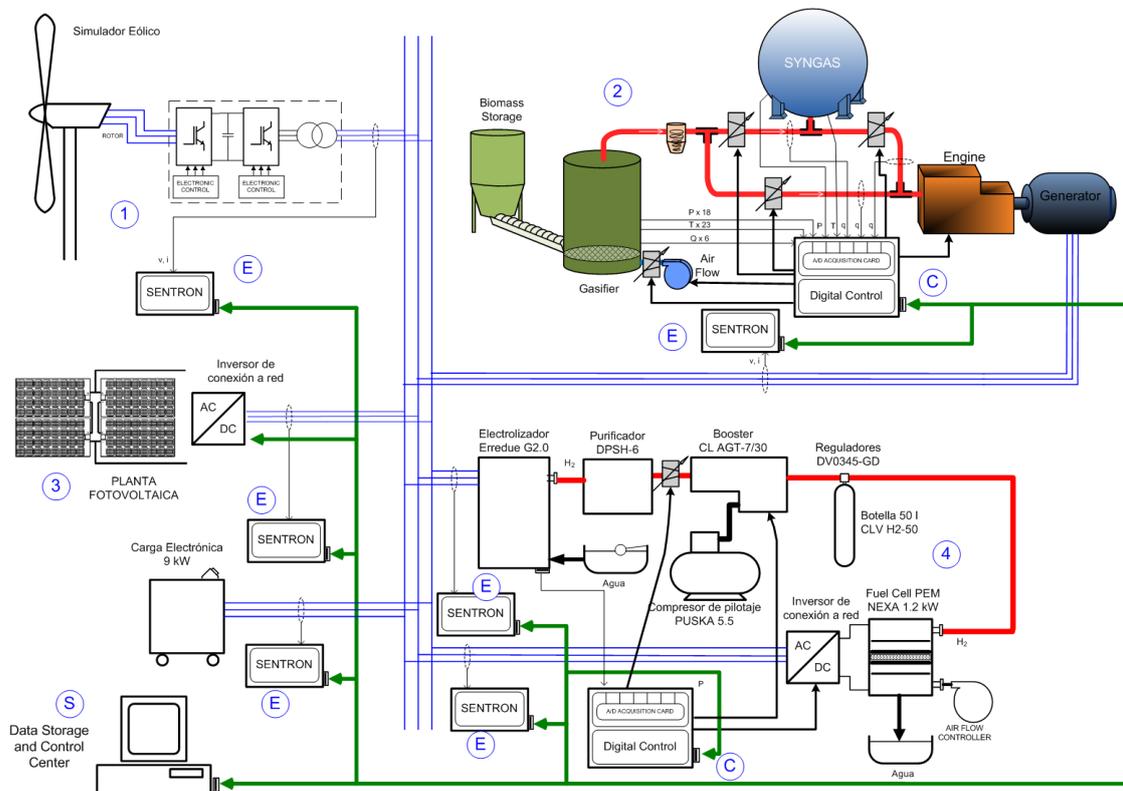


Figura 1. Diagrama del sistema híbrido eólico-fotovoltaico-biomasa. 1: subsistema eólico; 2: subsistema de biomasa; 3: subsistema fotovoltaico; 4: subsistema producción y almacenamiento de hidrógeno. E: medidor de energía; C: PLC de control; S: centro de control y sistema SCADA.

El subsistema eólico está formado por una turbina eólica Anelion SW 3.5 GT de 5.5 kW de potencia y un inversor de red Windy Boy de 2500 W. El subsistema fotovoltaico está compuesto por una planta fotovoltaica de 2 kW de potencia y un inversor de red Xantrex GT 2.5 de 2.5 kW. El subsistema de biomasa dispone de una planta de gasificación de biomasa de 10 kW y un motor-generador eléctrico que consume el gas de síntesis

producido. También se dispone de una carga eléctrica programable de 10 kW, una bancada de baterías de 12 kWh y un inversor-cargador Xantrex XW4548E de 4.5 kW.

Se dispone de un subsistema de producción y almacenamiento de hidrógeno formado por un electrolizador alcalino de 7.2 kW, un compresor booster elevador de presión y una botella de 50 litros. Se ha instalado además una pila de combustible Ballard Nexa tipo PEM de 1.2 kW que genera energía eléctrica consumiendo el hidrógeno almacenado en la botella. El conjunto formado por el generador de hidrógeno y la pila de combustible actúa como almacén de energía, produciendo y almacenando hidrógeno en condiciones de energía excedente del sistema híbrido, y generando energía eléctrica en condiciones de energía deficitaria.

Se han instalado medidores de energía Sentron en todos los subsistemas para monitorizar el flujo de energía de los diferentes componentes. Para la comunicación entre los distintos elementos del sistema se ha implementado una red común de comunicaciones basada en Modbus TCP/IP.

El desarrollo del proyecto implica la puesta en marcha, caracterización y diseño del control individual de cada subsistema, integrando finalmente todos ellos en un sistema de control global. Este documento describe los trabajos realizados en el ámbito del subsistema de generación y almacenamiento de hidrógeno, por lo que se desarrolla a continuación cada uno de los elementos que lo componen. El diagrama de bloques del sistema se muestra en la Figura 2.

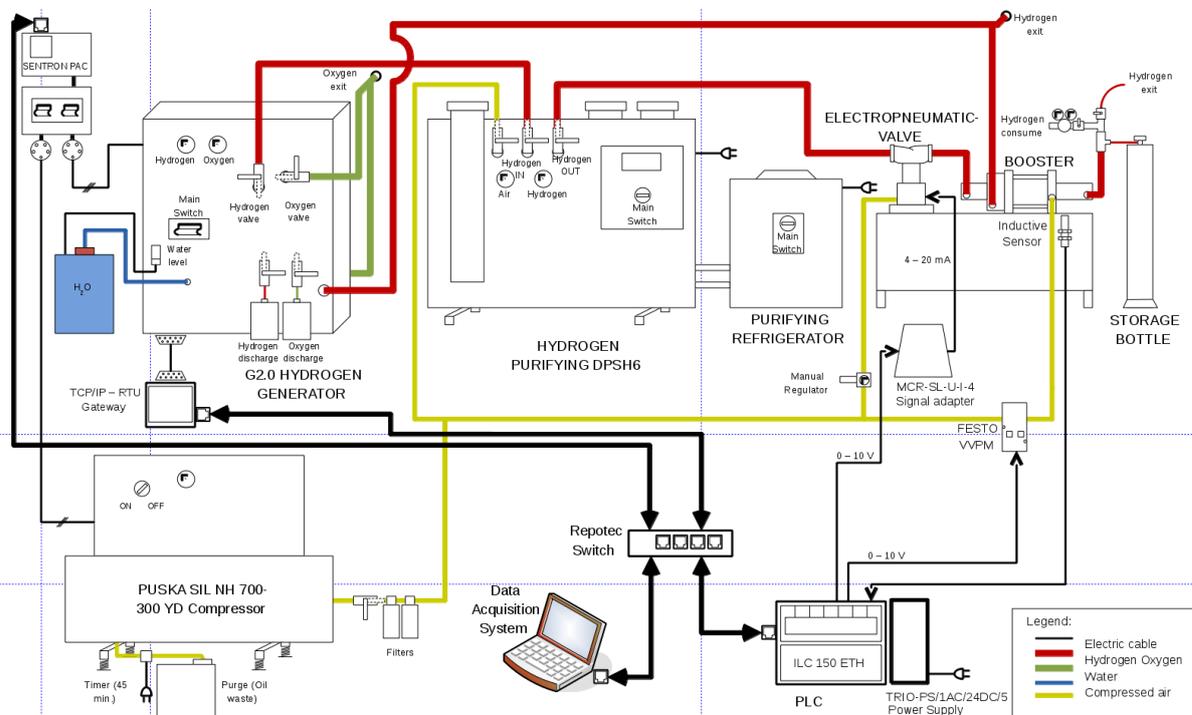


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno.

La producción de hidrógeno se realiza a través de un electrolizador Erre Due G2.0 de tipo alcalino, que consume agua destilada desde un depósito y genera hidrógeno y oxígeno. Este modelo proporciona una capacidad máxima de producción de hidrógeno de 1.33 Nm³/h a una presión de 2.5 bar, con una pureza en un rango entre 99.3% y 99.8%. El proceso de electrólisis utiliza una solución electrolítica de sosa cáustica (NaOH) con una densidad de 1.2 g/ml. Los parámetros del electrolizador se han configurado específicamente para LabDER, proporcionando una presión de trabajo de 4 bar. El control de todo el proceso de electrólisis se realiza a través de un autómata programable (PLC) modelo ABB 07KT97 integrado en el electrolizador, que permite consultar las variables de proceso a través de protocolo Modbus RTU.

Mientras que el oxígeno actualmente es desechado, el hidrógeno generado se transporta por medio de la red de distribución hasta un purificador Erre Due DPSH-6 previamente a su almacenamiento. En este dispositivo se incrementa la pureza del hidrógeno hasta un valor de 99.995% necesario para su uso en la pila de combustible. El proceso de depuración requiere refrigeración, realizándose por medio de un refrigerador externo modelo ACW-LP 25 de Euro Cold.

En la red de distribución de hidrógeno se dispone de una válvula reguladora de caudal. La válvula de accionamiento electroneumático corresponde a la serie 240 de SAMSON de paso recto, tipo 3241-7, con un accionamiento neumático tipo 3277 y un posicionador electroneumático de simple efecto. La válvula es controlada por medio de una señal eléctrica normalizada de 4 a 20 mA que regula el grado de apertura. Para ello se utiliza un módulo MCR-SL-U-I-4 de Phoenix Contact, que transforma una tensión de entrada 0-10V en el rango de corriente 4-20 mA.

El hidrógeno generado se almacena en una botella para gases de 50.7 litros de capacidad y presión máxima de 200 bar, fabricada por Linde. Se dispone además de una central de gas Druva modelo SMD 500-24 y un punto de consumo Linde R40, para las operaciones de carga y descarga de la botella. La carga de la botella se mide a través de un manómetro de presión con un rango 0-315 bar.

Para introducir el gas en la botella por diferencia de presiones, es necesario disponer previamente de un sistema de elevación de la presión del hidrógeno. Para este fin se utiliza un compresor Haskell AGT/7-30 tipo booster, accionado neumáticamente, que presuriza el hidrógeno procedente del electrolizador hasta una presión máxima de 200 bar, necesaria para la carga completa de la botella de hidrógeno.

El suministro neumático se realiza a través de una instalación fija de tuberías de aire comprimido y un compresor alternativo de pistón de una etapa, modelo PUSKA SIL NH 700-300, con un depósito de 300 litros de capacidad. Proporciona una presión nominal de servicio de 10 bar, y alcanza un caudal de aire aspirado de 700 litros por minuto a una presión de 7 bar. La presión de aire se utiliza para el pilotaje de la válvula electroneumática y del compresor booster, así como para el proceso de depuración PSA (Pressure Swing Adsorption) en el depurador de hidrógeno.

El sistema de generación de hidrógeno es de tipo industrial, y está diseñado para generar tanto hidrógeno como se le demande desde la línea de consumo. El objetivo del sistema de control consiste en consumir la energía sobrante del sistema renovable, que se invertirá en generación de hidrógeno. Esta operación de ajuste de la energía consumida

solamente se puede llevar a cabo mediante la regulación del caudal de producción demandado (consumo). Esta función reguladora pretende realizarse por medio de la operación conjunta de la válvula de caudal y el compresor booster.

Para monitorizar el consumo eléctrico del electrolizador se ha instalado un multimetro SENTRON PAC3200 de Siemens, que registra un amplio conjunto de parámetros de la red eléctrica. Este dispositivo integra una interfaz de red Ethernet que permite la consulta de las magnitudes eléctricas a través de protocolo Modbus TCP.

El nodo de control de la producción y almacenamiento de hidrógeno se implementa sobre un autómata programable de Phoenix Contact, modelo ILC 150 ETH, que también integra un dispositivo de red Ethernet para su conexión a la red de comunicaciones.

La Figura 3 incluye varias fotografías de las instalaciones del sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno descrito.

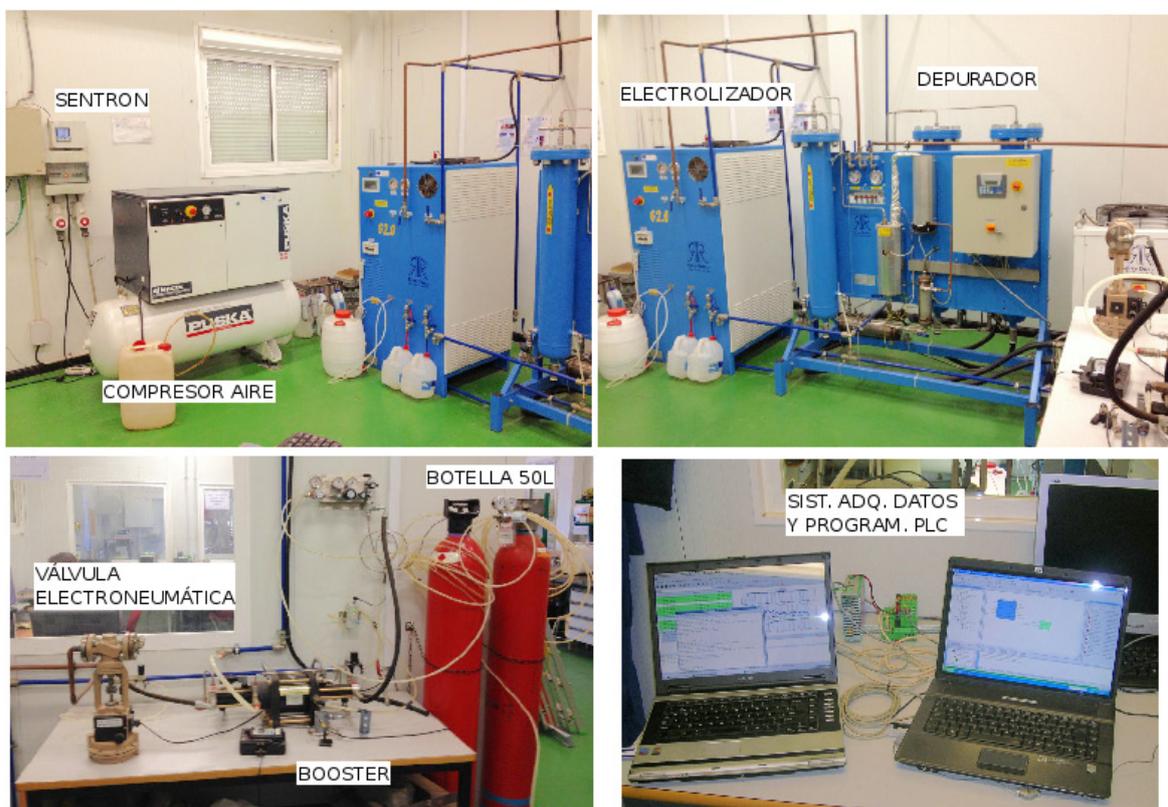


Figura 3. Imágenes de la instalación del sistema de producción y almacenamiento de hidrógeno.

3. Red de comunicaciones y sistema de adquisición de datos

Se ha diseñado una red de comunicaciones Ethernet TCP/IP para integrar todos subsistemas de LabDER, de tipo redundante (red cableada e inalámbrica) y con capacidad para autodiagnóstico y tolerancia a fallos [8]. La estructura de la red está prevista para implementar el control distribuido del sistema. En la Figura 4 se muestra la topología de la red de comunicaciones, donde cada subsistema forma un nodo cuyos elementos se encuentran agrupados bajo un conmutador de red (switch).

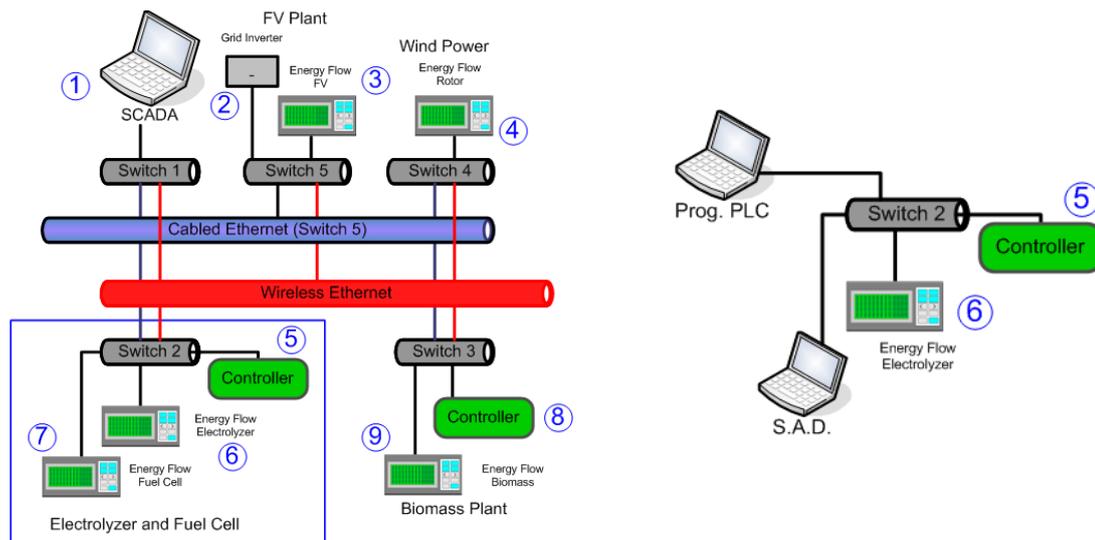


Figura 4. Esquema de la red de comunicaciones redundante (derecha) y subred del sistema de producción y almacenamiento de hidrógeno configurada para los ensayos (derecha). 1: sistema SCADA; 2: inversor de red; 3, 4, 7, 9: medidores de energía; 5: PLC de control del subsistema de producción de hidrógeno; 6: medidor Sentron del electrolizador.

El subsistema de generación y almacenamiento de hidrógeno incluye el autómata programable ILC 150 ETH y el medidor Sentron, agrupados en una subred física bajo el switch nº 2. Este elemento corresponde a un switch gestionable Repotec modelo RP-1708I, con 8 puertos RJ-45 10/100Mbps. Bajo este mismo switch se han conectado dos equipos informáticos, uno bajo plataforma Windows para la programación del autómata y otro bajo plataforma Linux [9] para el sistema de adquisición de datos.

Para caracterizar el comportamiento del sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno ha sido necesario realizar una serie de ensayos. Para ello se ha implementado previamente un sistema de adquisición de datos que permite leer datos de las variables disponibles de forma automatizada y facilita el tratamiento informático de la información obtenida.

La comunicación Modbus RTU del electrolizador se realiza a través de conexión serie RS-232, por lo que no puede ser integrado directamente en la red de comunicaciones. Por lo tanto, se ha adoptado como solución implementar la lectura de datos desde el propio equipo informático que ejecuta el sistema de adquisición de datos, adaptando la señal del puerto serie del PLC al puerto USB del ordenador.

Por otra parte, la velocidad de pistoneo del booster es un parámetro importante para la caracterización. Para su medición se ha aprovechado el movimiento alternativo de un elemento mecánico del booster durante su funcionamiento para diseñar un sensor de pistoneo. Un detector óptico de proximidad detecta la posición final del ciclo de compresión y actúa como entrada digital al autómata programable ILC 150 ETH, que realiza el cálculo de la velocidad en tiempo real. Además, se ha programado el PLC para que actúe como servidor Modbus TCP, dejando disponibles las variables medidas para su acceso desde la red.

Debido a la heterogeneidad y particularidades de los diferentes elementos que forman Ladder, se ha optado por desarrollar desde cero un sistema de adquisición de datos específico para la realización de los ensayos, cuyo diseño modular y extensible permite su fácil adaptación durante el desarrollo de todo el proyecto. En la Figura 5 se muestra el esquema simplificado del sistema de adquisición de datos y la relación de variables monitorizadas más importantes.

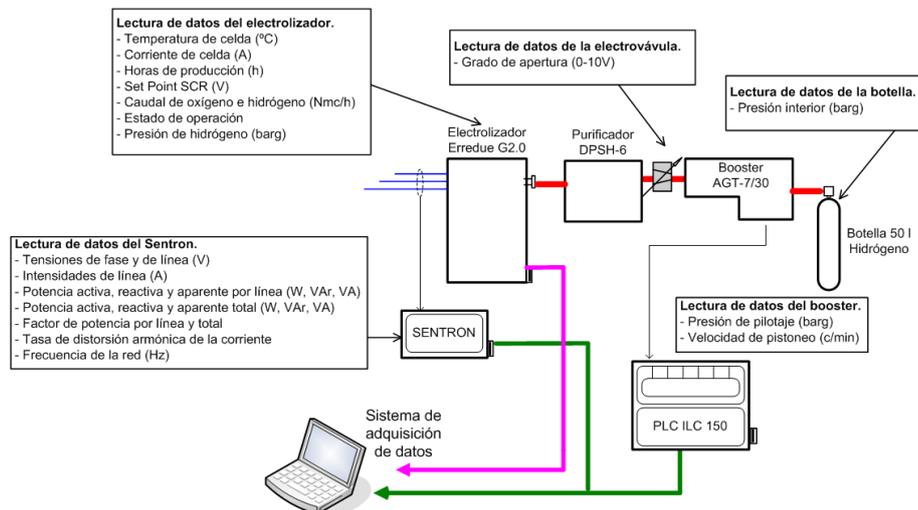


Figura 5. Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos, con las principales magnitudes a monitorizar.

La estructura del sistema de adquisición de datos desarrollado está formada por tres módulos independientes. El módulo de recolección de datos (módulo SAD) establece comunicación con los dispositivos remotos Modbus (medidor Sentron, electrolizador y autómata ILC 150 ETH), realiza la lectura de los datos y los almacena en un fichero con formato csv, registrando un total de 41 variables. Se ha desarrollado un cliente Modbus RTU para leer datos desde el electrolizador y sendos clientes Modbus TCP para el medidor Sentron y el autómata ILC 150 ETH.

El módulo de establecimiento de marcas (módulo MARK) se ejecuta en paralelo con el módulo SAD, permitiendo al usuario establecer referencias temporales que identifican un evento de interés sucedido durante el ensayo (variaciones manuales de parámetros, lecturas manuales de presión, un fallo del sistema, etc).

El módulo de generación de gráficos (módulo PLOT) lee los ficheros generados por los

módulos SAD y MARK durante la realización del ensayo, y a partir de estos datos genera los gráficos identificando además los eventos ocurridos por medio de las referencias temporales. El software desarrollado permite realizar ampliaciones de zonas determinadas del gráfico y desplazamientos dinámicos sobre el mismo, facilitando así el trabajo de interpretación de los resultados.

La Figura 6 muestra el esquema de funcionamiento del sistema de adquisición de datos.

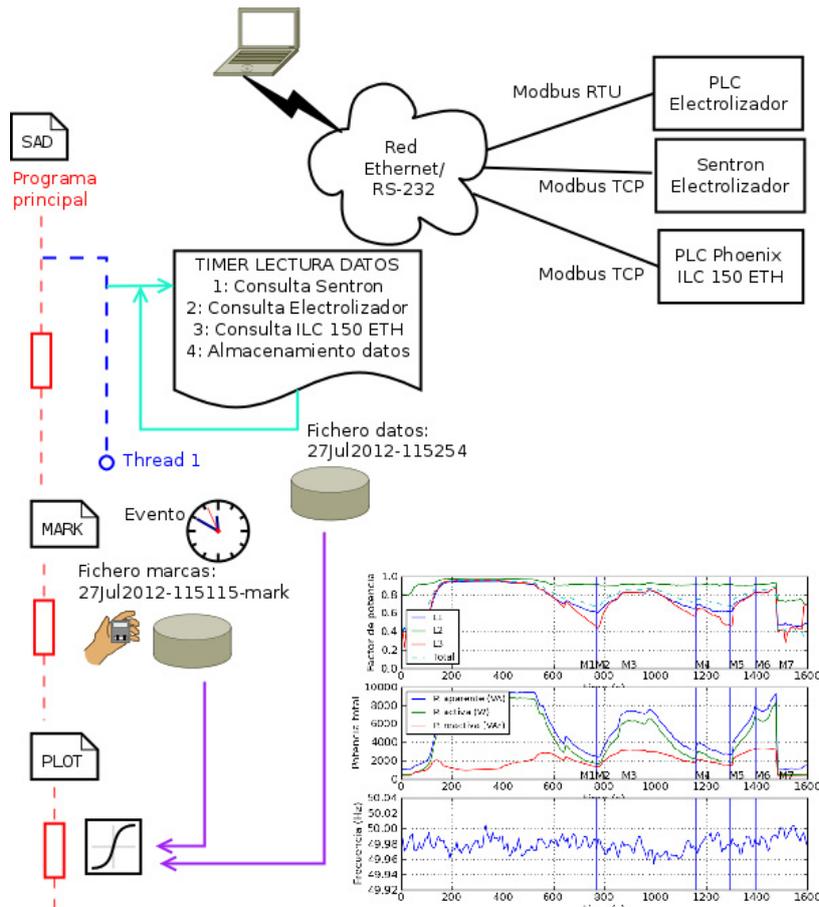


Figura 6. Esquema de funcionamiento del software de adquisición de datos

Para el desarrollo del software de adquisición de datos se ha elegido el lenguaje de programación Python [10], y las bibliotecas Matplotlib y Pymodbus para generación de gráficos científicos e implementación de arquitecturas Modbus cliente-servidor.

4. Caracterización del sistema y resultados

Se han realizado numerosos ensayos para caracterizar el comportamiento de cada componente del subsistema de generación y almacenamiento de hidrógeno, con el fin de establecer las bases para el diseño del control del sistema. Los resultados de la fase experimental más relevantes corresponden al conjunto electrolizador-depurador, el compresor booster y la válvula de regulación de caudal.

El electrolizador realiza una etapa inicial de presurización cuando se pone en funcionamiento, alcanzando la presión de trabajo y quedando a la espera de la demanda de caudal. En condiciones de demanda nula, se observa un valor residual de generación de hidrógeno que se almacena en un depósito interno del electrolizador.

El proceso de purificación de gas que realiza el depurador de hidrógeno tiene una influencia notable sobre el comportamiento del electrolizador. Este fenómeno se puede observar en la Figura 7, donde se representa la potencia eléctrica consumida por el electrolizador y el caudal de hidrógeno residual, en condiciones de demanda nula antes y después (marca M2) de poner en marcha el depurador.

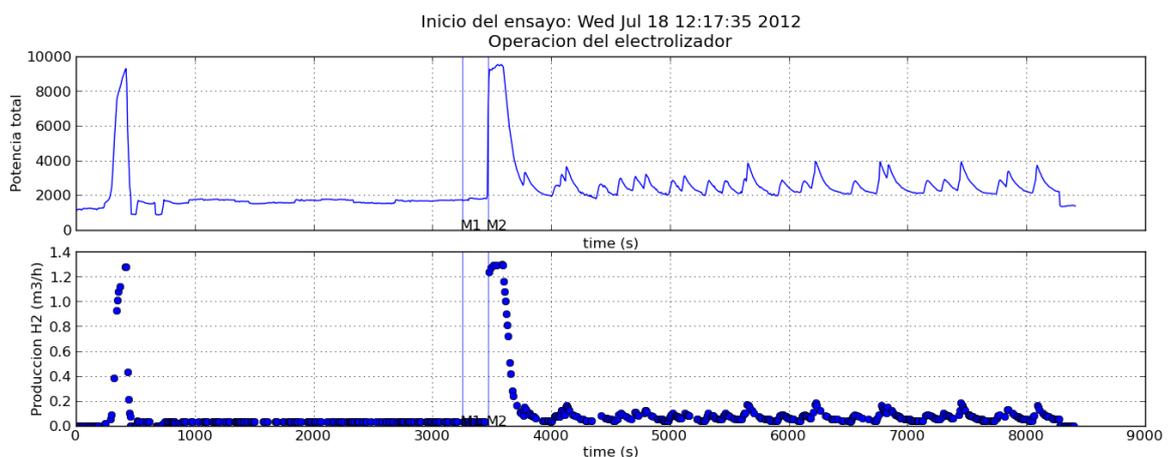


Figura 7. Influencia del depurador de hidrógeno sobre el electrolizador: potencia consumida (arriba) y caudal de hidrógeno generado (abajo). M2 identifica la activación del depurador.

Una vez superado el transitorio inicial, se puede apreciar que el proceso de depuración obliga al electrolizador a un ciclo de trabajo con subidas y bajadas de consumo eléctrico y generación de hidrógeno. Se observa claramente el comportamiento estable antes de la entrada en funcionamiento del depurador, y las perturbaciones introducidas con posterioridad. Este comportamiento podría ser debido a las variaciones de presión en el interior del depurador durante el proceso de purificación, que actúan respecto al electrolizador como demandas temporales de caudal de hidrógeno. Este fenómeno se manifiesta también en el resto de variables de proceso del electrolizador, como la presión de trabajo o la corriente de celda.

Los efectos del depurador sobre el electrolizador suponen un problema importante a la hora de realizar ajustes precisos sobre parámetros fundamentales para la regulación del sistema como es el caudal de hidrógeno. Supone por tanto un factor de error a considerar en las tareas de control del sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno. A bajos caudales de hidrógeno, las variaciones del caudal no solamente constituyen un problema para el control del sistema, sino también para la realización de ensayos en dicha zona de operación. También se ha comprobado que el efecto del depurador pierde influencia cuando la generación de hidrógeno es elevada, desapareciendo prácticamente la perturbación a máxima capacidad de producción del electrolizador.

En el diseño inicial del sistema se ha considerado que la carga de hidrógeno de la botella

puede ser calculada integrando la producción instantánea del electrolizador en función del tiempo, no siendo por lo tanto necesario disponer de una lectura automatizada de la presión de la botella. No obstante, en los ensayos realizados se observa un desvío importante entre la curva teórica y los datos experimentales, con una presión estimada de botella por encima de la real. Este error se incrementa progresivamente conforme crece el valor acumulado de moles de hidrógeno generados, tal y como se muestra en la Figura 8.

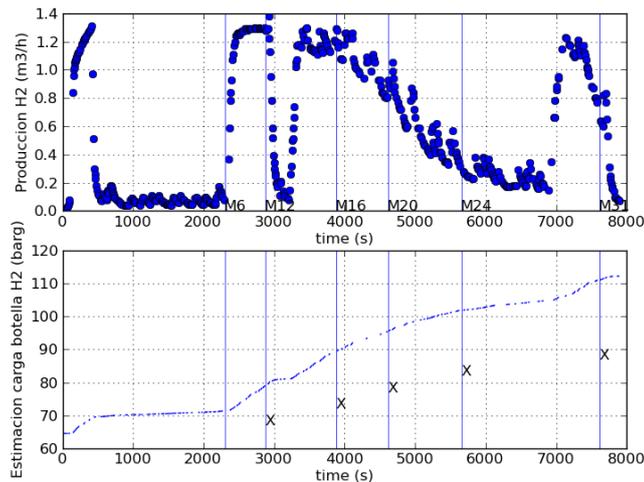


Figura 8. Caudal de hidrógeno generado (arriba) y potencia estimada de la botella (abajo) comparada con la presión real (cruces).

También se produce un incremento de la presión estimada de la botella desde el inicio del ensayo hasta la marca M6 que identifica el inicio de la demanda de caudal. Debido al caudal residual que genera el electrolizador en vacío (sin demanda de hidrógeno) se contabiliza una producción de hidrógeno que no se traduce en almacenamiento. Este efecto residual se intensifica en el caso de presurizaciones del electrolizador, variaciones de presión en el proceso de purificación y caídas de presión provocadas por la puesta en marcha y regulación del compresor booster

Debido a estos efectos, la estimación del hidrógeno almacenado en la botella no puede hacerse de forma precisa leyendo los valores de caudal desde el electrolizador. Sería necesario instalar un medidor de caudal aguas abajo del depurador, que no se vea afectado por las perturbaciones y mida realmente el caudal introducido en la botella de hidrógeno.

No obstante, teniendo en cuenta que el desplazamiento del pistón de gas del booster define con exactitud el volumen de hidrógeno que se introduce en la botella, puede resultar más efectivo realizar la estimación de la carga de la botella basándose en el ciclo de pistoneo del booster.

También es importante conocer la relación entre la corriente de celda consumida por el electrolizador y el caudal de hidrógeno producido. Se ha obtenido experimentalmente la curva de eficiencia en la producción de hidrógeno, que se puede observar en la Figura 9.

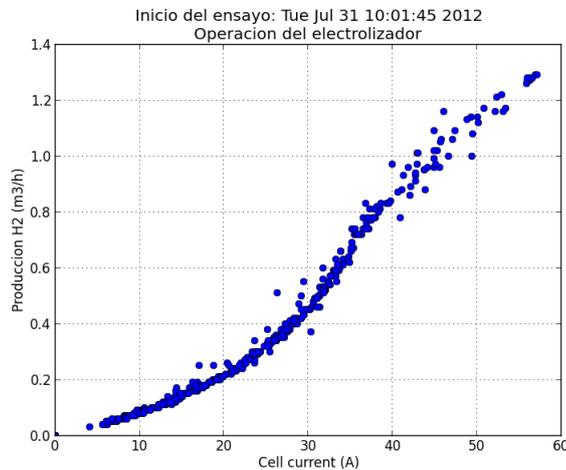


Figura 9. Relación entre la producción de hidrógeno y la corriente de celda.

Se aprecia una falta de linealidad en el rango entre 10 y 40 A, donde el caudal de hidrógeno real es menor que el previsto. Se ha comprobado experimentalmente que la disminución en la eficiencia no está relacionada con la temperatura de trabajo del electrolito, por lo que actualmente se están analizando las posibles causas.

El consumo de aire comprimido del sistema se debe casi en su totalidad al compresor booster. Este elemento es pilotado por aire comprimido, que se utiliza para el accionamiento del pistón principal, realizando de esta forma un movimiento alternativo que se mantiene mientras exista presión de pilotaje.

Se ha obtenido teóricamente el consumo de aire del booster [11], que resulta ser función del volumen del cilindro de aire, la presión de aire de pilotaje y la velocidad de pistoneo del compresor. A mayor presión de pilotaje el aire contenido en el cilindro es mayor y por lo tanto aumenta el consumo de caudal de aire. De igual forma, a mayor velocidad de pistoneo del booster, la cantidad de aire consumido es mayor.

Por otra parte, tal y como se ha comprobado experimentalmente, en condiciones de altas velocidades de pistoneo y una presión elevada de aire de pilotaje, el consumo de aire del booster supera la capacidad del compresor Puska, disminuyendo la presión de la red por debajo de los 6 bar necesarios para el funcionamiento del depurador de hidrógeno con la consecuente parada del sistema. Este hecho supone una limitación de tipo operativo, cuya influencia en la regulación y control de la producción de hidrógeno es de gran importancia.

Se ha analizado la evolución del tiempo de llenado del depósito para velocidades de pistoneo crecientes. En la Figura 10 se muestra que el tiempo invertido en presurizar el depósito es cada vez mayor, en consonancia con el mayor caudal de aire consumido por el booster. A su vez, el tiempo de parada del compresor es menor, entrando finalmente en una fase de funcionamiento permanente. En estas condiciones de operación, el caudal de aire proporcionado por el compresor Puska y el consumo de aire del booster son iguales.



Figura 10. Evolución del tiempo de llenado del depósito del compresor de aire con velocidades de pistoneo crecientes.

El máximo caudal de aire que puede consumir el booster sin riesgo de provocar una caída inadmisibles de presión en la red y la parada del sistema ha sido calculado en 610.08 l/min. Puesto que la velocidad de pistoneo y la presión de aire de pilotaje del booster están relacionadas entre sí, es posible determinar la relación V_p - P_{ab} para el caudal máximo de consumo de aire, tal y como se muestra en la Figura 11.

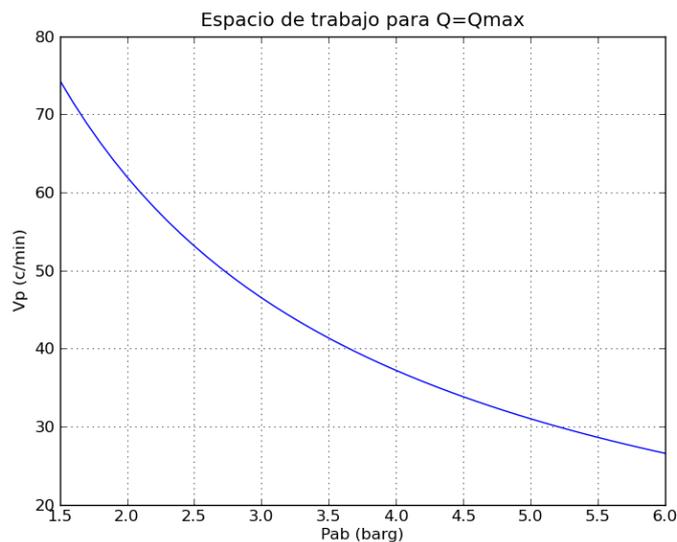


Figura 11. Velocidad de pistoneo frente a presión de pilotaje del booster para el consumo máximo de aire.

El gráfico expresa la restricción impuesta por la capacidad máxima de generación de caudal y presión de aire por parte del compresor Puska, donde la zona por debajo de la curva pertenece a condiciones de trabajo viables.

El compresor booster ha resultado ser un elemento complejo donde la presión de salida del gas y el caudal impulsado a la botella están relacionados entre sí. El modelo AGT 7/30 tiene una primera etapa de compresión (la parte de la entrada de hidrógeno) con una relación de 7:1, y una segunda etapa de compresión con una relación de 30:1. La presión de salida P_o del booster depende de parámetros constructivos del mismo y de las

presiones de suministro P_s y de pilotaje P_{ab} , de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P_o = 30 \times P_{ab} + 4.2 \times P_s \quad (1)$$

El parámetro P_o es la presión de salida máxima a la que el booster es capaz de impulsar hidrógeno, estando éste pilotado por una presión P_{ab} . Como la botella de hidrógeno está conectada a la salida del booster, la presión a vencer para introducir el hidrógeno debe ser la presión interna P_b de la botella. De esta forma, si el booster está pilotado a una presión determinada P_{ab} , éste es capaz de impulsar hidrógeno hasta que la presión de la botella sea igual a P_o . A partir de este momento el booster es incapaz de superar la presión del interior de la botella y no se produce almacenamiento. En este punto es necesario incrementar la presión de pilotaje para seguir almacenando gas.

Por otra parte, el caudal generado por el booster se determina de acuerdo con la expresión siguiente, donde F_h está en l/min en condiciones estándar, D_b en l/min, V_p en ciclos/min y la presión de suministro en bar.

$$F_h = \frac{V_p}{100} \times V_e \times D_b \times \frac{P_s + 1.013}{1.013} \quad (2)$$

La ecuación expresa el caudal de gas desplazado como el producto de la velocidad de pistoneo V_p (número de ciclos por unidad de tiempo) por el volumen geométrico total D_b de las cámaras de gas, considerando además la reducción del caudal real por la eficiencia volumétrica V_e . A medida que aumenta la carga de la botella, la eficiencia volumétrica disminuye y es necesario un incremento de la velocidad de pistoneo para mantener el mismo caudal de hidrógeno.

En el caso del sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno, donde la presión de suministro de hidrógeno es prácticamente constante, el caudal de hidrógeno impulsado depende de tres factores diferenciados: el volumen real de hidrógeno por ciclo, la eficiencia volumétrica y la velocidad de pistoneo del booster.

La velocidad de pistoneo del booster y la presión de aire de pilotaje están relacionadas entre sí, que a su vez determinan la presión del gas de salida y el caudal de hidrógeno impulsado a la botella. Debido a la necesidad de obtener la relación entre dichas variables para realizar un control adecuado de la producción de hidrógeno, se construye un modelo teórico de funcionamiento del booster, tal y como se muestra en la Figura 12.

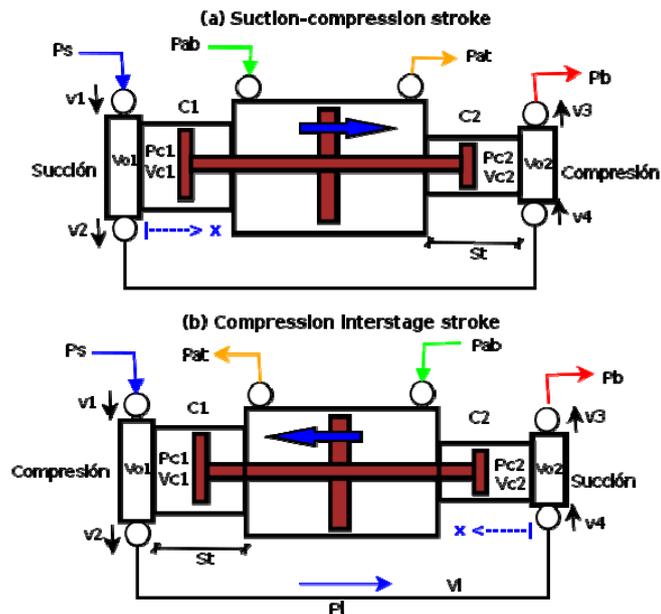


Figura 12. Diagrama de bloques del funcionamiento del booster. a) etapa de succión-compresión, b) compresión interetapa. Leyenda: P_s , presión de suministro de hidrógeno; P_b , presión de carga de la botella; P_i , presión de la interetapa; P_{ab} , presión de aire de pilotaje; P_{at} , presión atmosférica; C1, C2, cámaras de gas; P_{c1} , P_{c2} , presiones de gas en C1 y C2; V_{c1} , V_{c2} , volumen ocupado de gas en C1 y C2; V_{o1} , V_{o2} , volúmenes muertos en C1, C2; v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , válvulas; V_i , volumen de la etapa intermedia; St , longitud de recorrido del pistón; x , desplazamiento del pistón.

Los dos cilindros de gas están situados en los extremos del booster, identificando la entrada de gas (primera etapa de compresión) a la izquierda, correspondiente a la cámara C1, y la salida de gas (segunda etapa de compresión) a la derecha, correspondiente a la cámara C2. Además, existe una etapa intermedia de compresión que conecta ambos cilindros, con el fin de incrementar la presión final de salida. A la entrada del booster se encuentra el gas a una presión de suministro P_s , que se transforma tras las dos fases de compresión en una presión de salida P_o .

El desplazamiento alternativo que realiza el pistón de la sección de aire, como consecuencia de la presión de pilotaje, desplaza ambos pistones de gas que están conectados solidariamente en el mismo eje. De esta forma, la sección de gas se caracteriza por dos fases diferenciadas, identificadas como carrera de succión-compresión (a) y carrera de compresión interetapa (b).

En la fase de succión-compresión (suction-compression stroke) el pistón de aire se desplaza a la derecha, arrastrando con él los dos pistones de gas. En la primera etapa de compresión (cámara C1) se produce una succión de gas que llena el cilindro, mientras que en la segunda etapa de compresión (cámara C2) el pistón expulsa el gas al exterior.

En la fase de compresión interetapa (interstage compression stroke) el pistón de aire se desplaza en sentido contrario, combinándose una compresión en la cámara C2 y una succión en la cámara C2 que desplazan el gas desde el cilindro del entrada hasta el cilindro de salida. Durante esta fase se incrementa la presión de suministro del gas, que es comprimido de nuevo en la fase (a) hasta alcanzar el valor P_o .

Llegados a este punto se puede afirmar que el compresor booster es un elemento esencial en la regulación del sistema, puesto que es el responsable de proporcionar por un lado presión de salida de hidrógeno suficiente para inyectarlo en la botella, y por otro el caudal de hidrógeno que se haya demandado, ambos parámetros regulables con la presión de aire pilotaje. Parece deducirse que es un elemento suficiente para llevar a cabo la regulación del sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno.

En los ensayos realizados se ha comprobado la relación lineal entre la velocidad de pistoneo del booster y el caudal de hidrógeno generado, de acuerdo con la ecuación 2. En la Figura 13 se muestra la curva de velocidad de pistoneo y la curva de caudal de hidrógeno, donde se observa que la producción del electrolizador es proporcional al caudal demandado por el booster, con una rápida respuesta ante variaciones de velocidad.

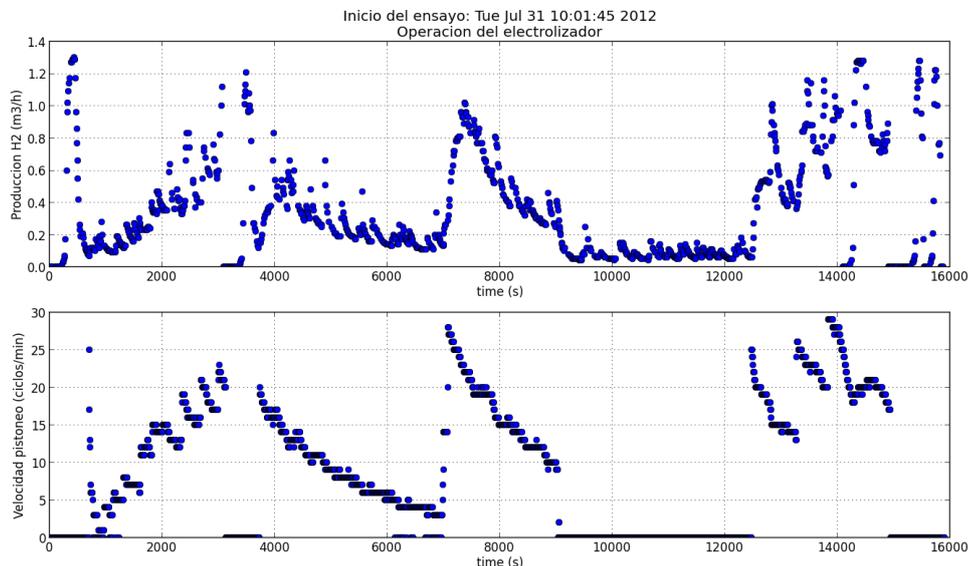


Figura 13. Comportamiento del caudal de hidrógeno (arriba) respecto a la velocidad de pistoneo del booster (abajo).

Con el fin de cuantificar adecuadamente la relación lineal entre ambas variables, eliminando el efecto de la dispersión de valores, se ha realizado un análisis estadístico de los datos del ensayo. En la Figura 14 se representa el caudal de hidrógeno frente a la velocidad de pistoneo, con los modelos de ajuste analizados.

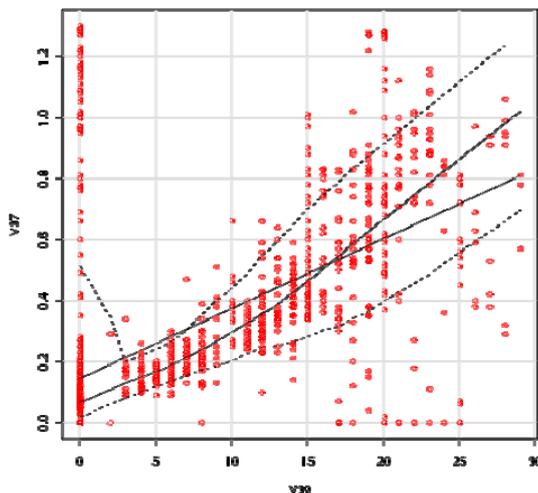


Figura 14. Modelo de regresión lineal del caudal de hidrógeno (V37, eje Y) frente a la velocidad de pistoneo (V39, eje X). Los modelos no lineales también están representados.

El test de Pearson confirma una importante correlación entre la velocidad de pistoneo y el caudal de hidrógeno, con un valor de 0.594 para un intervalo de confianza del 95%. No obstante, los resultados indican que el 65% del espacio muestral no se explica por la recta de ajuste, debido principalmente a las fluctuaciones del caudal medido y al caudal residual a velocidad de pistoneo nula. Por otra parte, el modelo lineal proporciona una recta de ajuste cuyos parámetros son similares a la ecuación teórica, validándose por tanto el modelo propuesto con las limitaciones ya indicadas.

El funcionamiento de la electroválvula reguladora de caudal se basa en la regulación del caudal que la atraviesa modificando la sección de paso. No obstante, conocida la capacidad del booster para forzar un caudal de hidrógeno mediante la velocidad de pistoneo, se intuye que la modificación de la sección de paso de la electroválvula podría variar la velocidad de paso del gas pero nunca regular un caudal que viene impuesto aguas abajo por el booster.

Para determinar experimentalmente el efecto regulador de la electroválvula se han realizado ensayos en condiciones de alta velocidad de pistoneo para evitar las perturbaciones introducidas por el depurador. En dichos ensayos se ha variado progresivamente la sección de paso en todo su rango sin que se aprecie ningún efecto sobre el caudal. Se puede concluir por tanto que la presencia de un caudal forzado por el booster impide a la electroválvula realizar adecuadamente su función.

Los resultados obtenidos en la caracterización del comportamiento del sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno han sido de gran utilidad para implementación posterior del sistema de regulación y control. Las conclusiones más importantes se exponen a continuación:

- El sistema de producción y almacenamiento de hidrógeno está sometido a restricciones técnicas que limitan su campo de actuación, tanto en los ensayos como en operación real. La capacidad del actual compresor de aire instalado es

insuficiente para la operación en un amplio rango del espacio de trabajo. Esta limitación, junto con otras debidas a la velocidad máxima admisible de pistoneo del booster y la capacidad nominal de producción de hidrógeno del electrolizador, delimitan zonas de operación no válidas.

- Los procesos internos del electrolizador y del depurador introducen perturbaciones en el funcionamiento del electrolizador, manifestándose como fluctuaciones periódicas en el caudal de hidrógeno medido. Debido a estas fluctuaciones y a la existencia de un caudal residual en vacío (sin demanda de hidrógeno) en el electrolizador, ubicar el punto de medición del caudal de hidrógeno en el propio electrolizador ha resultado no ser la mejor solución.
- La función reguladora prevista a priori para la válvula electroneumática se ve anulada por la presencia de un elemento como el compresor booster a la salida de la válvula, que fuerza un caudal determinado de hidrógeno hacia la botella. Por lo tanto, la regulación de caudal utilizando conjuntamente la válvula y el compresor booster no es viable en todo el espacio de trabajo que requiera compresión previa del gas antes de su almacenamiento en la botella.
- Se ha comprobado que el cierre completo de la válvula electroneumática detiene la demanda de caudal, por lo que puede ser utilizada también como elemento de seguridad. Sin embargo, en estas condiciones el booster permanece pistoneando en vacío, siendo necesario implementar un mecanismo de seguridad que anule la presión de aire de pilotaje cuando el sistema se detiene debido a un fallo de funcionamiento o una parada de emergencia.
- El compresor booster, utilizando la presión de aire de pilotaje como un único parámetro de regulación, ha demostrado ser un elemento suficiente por sí solo para ajustar el sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno a los parámetros operativos que definen su punto de trabajo, y que son exclusivamente el caudal de hidrógeno a producir y el grado de carga de la botella de almacenamiento.
- Resulta fundamental disponer de un mejor control de la presión de la botella de hidrógeno y de la presión de pilotaje. Se propone la instalación de un medidor de la presión interior de la botella que pueda ser fácilmente monitorizado e integrado en el sistema de control. De igual forma, se propone la sustitución del actual regulador manual de presión de aire de pilotaje del booster por un regulador controlado electrónicamente, también integrado en el sistema de control.

5. Diseño del algoritmo de control

Los resultados obtenidos en la fase de caracterización del sistema [12], principalmente los relacionados con la función reguladora del compresor booster, implican modificaciones importantes sobre el algoritmo de control previsto inicialmente.

Para una mejor comprensión, se describe a continuación la estructura de control prevista del sistema global y la ubicación del control del subsistema de generación y almacenamiento dentro de dicha estructura. En una primera fase del proyecto se pretende implementar un sistema de control centralizado, que se convertirá en fases

posteriores en un sistema de control distribuido de acuerdo con la estructura mostrada en la Figura 15.

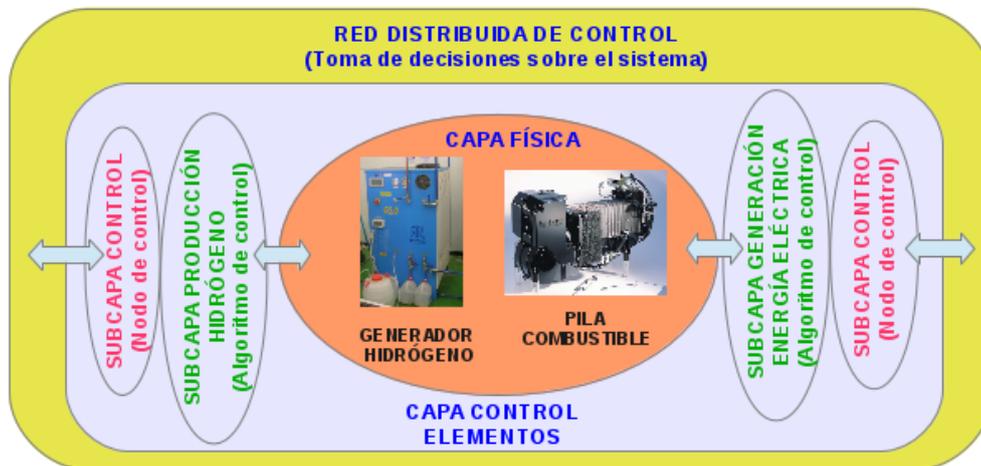


Figura 15. Esquema del sistema de control distribuido.

De acuerdo con esta estructura se define un primer nivel denominado capa física, que contiene las instalaciones correspondientes al subsistema de generación y almacenamiento de hidrógeno y al subsistema de producción de energía (pila de combustible). En el segundo nivel aparece la capa de control de los elementos, que está formada a su vez por dos subniveles o subcapas asociadas a cada uno de los subsistemas anteriores. La subcapa más próxima a la capa física implementa el algoritmo de control mientras que la subcapa más alejada implementa el nodo de control. Los nodos de control de cada subsistema establecen comunicación entre sí a través de la capa superior que implementa la red de control distribuido.

Esta última capa es la que establece el valor de energía excedente que debe consumir el subsistema de generación y almacenamiento de hidrógeno. Este valor es leído por la subcapa de control y transmitido a la subcapa de generación de hidrógeno como entrada al algoritmo de control. Ambas subcapas se implementan en el PLC ILC150.

El punto de operación del sistema en cada instante viene definido por dos parámetros: un parámetro externo impuesto por el control distribuido que establece el caudal de hidrógeno a generar y otro parámetro interno que define en qué punto de carga se encuentra la botella.

El algoritmo de control tiene como función determinar los parámetros de operación del sistema para mantener un consumo de energía eléctrica determinado. La Figura 16 muestra el esquema del algoritmo de control propuesto. A partir de la consigna de energía a consumir, se determina la corriente de celda del electrolizador que corresponde a ese consumo, que a su vez determina el caudal de hidrógeno generado. Conocido el caudal de hidrógeno a generar, la velocidad de pistoneo del booster se obtiene fácilmente. En este punto es necesario calcular la presión de aire de pilotaje del booster que genera esta velocidad de pistoneo, que depende también de la presión de carga de la botella.

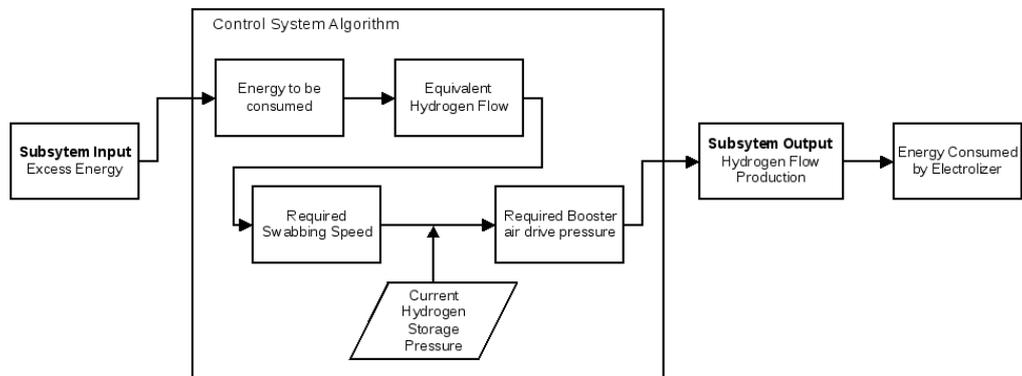


Figura 16. Diagrama de bloques del algoritmo de control.

Se han realizado los ensayos necesarios para obtener la relación analítica entre las variables implicadas en el algoritmo de control. Para implementar el algoritmo es necesario traducir la consigna de energía en un valor de potencia eléctrica. En los ensayos realizados la potencia activa ha ofrecido mejores resultados que la potencia aparente, por lo que se utiliza este parámetro. Para determinar la relación entre la potencia activa consumida y la intensidad de celda se ha realizado un ajuste polinómico de los datos experimentales, obteniendo una relación lineal entre ambas. Por otra parte, a partir de la intensidad de celda se puede determinar fácilmente el caudal de hidrógeno generado utilizando la expresión de la eficiencia de Faraday, que proporciona una relación lineal. No obstante, debido a la falta de linealidad del electrolizador en el rango entre 10 y 40 A, el error obtenido utilizando dicha expresión es excesivo. Por lo tanto se realiza también un ajuste polinómico, dando como resultado una relación de cuarto orden. En la Figura 17 se representa la relación entre las variables y el ajuste polinómico realizado.

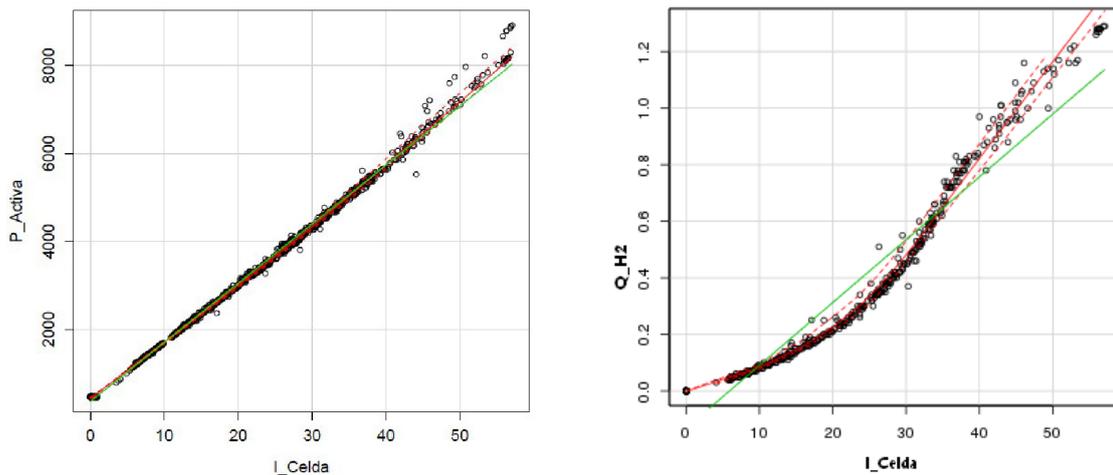


Figura 17. Relaciones entre la corriente de celda del electrolizador y la potencia activa consumida (izquierda) y el caudal de hidrógeno producido, con diferentes curvas de ajuste (derecha).

La relación entre la velocidad de pistoneo del booster y el caudal de hidrógeno generado ya ha sido calculada, y corresponde a la ecuación 2. Debido a su dependencia con la eficiencia volumétrica, es necesario disponer de la presión de carga de la botella de hidrógeno.

La siguiente etapa del algoritmo consiste en determinar la presión de aire de pilotaje necesaria para mantener una determinada velocidad de pistoneo. Sin embargo, el punto de operación del booster está definido por su comportamiento dinámico. Diversos trabajos [13] han obtenido de forma satisfactoria distintos aspectos del funcionamiento planteando el modelo de comportamiento dinámico del booster de simple etapa. Se ha realizado por lo tanto el desarrollo de un modelo dinámico para el booster de doble etapa, con el fin de obtener la relación entre la velocidad de pistoneo y la presión de aire de pilotaje.

En la Figura 18 se muestra el balance de fuerzas sobre el pistón del booster en la sección de aire y en la sección de hidrógeno, debidas a la presión interior de las cámaras de aire y de gas.

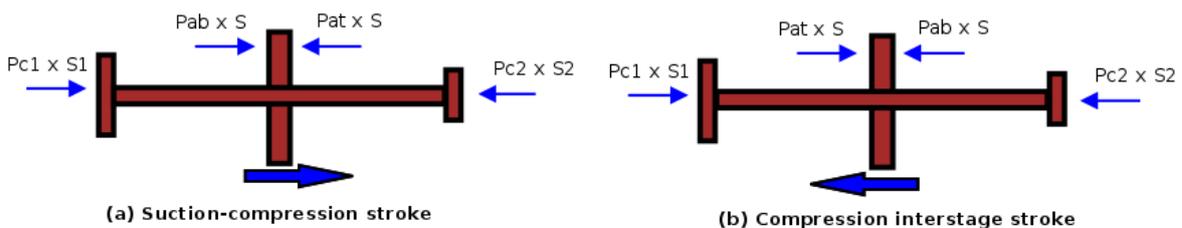


Figura 18. Diagrama de balance de fuerzas sobre el émbolo del booster en la etapa de succión-compresión (a) y en la compresión interetapa (b). P_{ab} : presión de aire de pilotaje; P_{at} : presión atmosférica; P_{c1} , P_{c2} : presiones en las cámaras de gas; $S1$, $S2$: secciones de los pistones de las cámaras de gas; S : sección del pistón de la cámara de aire.

Planteando el balance de fuerzas de acuerdo con la segunda ley de Newton, y despreciando las fuerzas de rozamiento, se obtienen las siguientes expresiones para cada una de las etapas de funcionamiento del booster.

$$\sum_{i=1}^n F_i = P_{c1} \times S1 + P_{ab} \times S - P_{at} \times S - P_{c2} \times S2 = M \frac{d^2x}{dt^2} (a) \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^n F_i = P_{c2} \times S2 + P_{ab} \times S - P_{at} \times S - P_{c1} \times S1 = M \frac{d^2x}{dt^2} (b)$$

Resolviendo las condiciones diferenciales, donde M es la masa del émbolo y x representa el desplazamiento del pistón, se obtiene el modelo de comportamiento del booster. No obstante, debido a la complejidad de la dinámica no es posible obtener una solución analítica que pueda ser utilizada en el algoritmo de control. Por este motivo, en una primera aproximación se han resuelto las ecuaciones para diferentes presiones de carga de botella y diferentes presiones de aire de pilotaje, obteniendo la velocidad de pistoneo correspondiente. Se ha realizado un ajuste polinómico de las parejas de valores obtenidos (presión de pilotaje, velocidad de pistoneo) para el rango de presión de botella entre 4 y 200 bar, con un intervalo de 1 bar. Se obtiene de esta forma una familia de

curvas analíticas para ser utilizadas en el algoritmo de control, tal y como se muestra en la Figura 19.

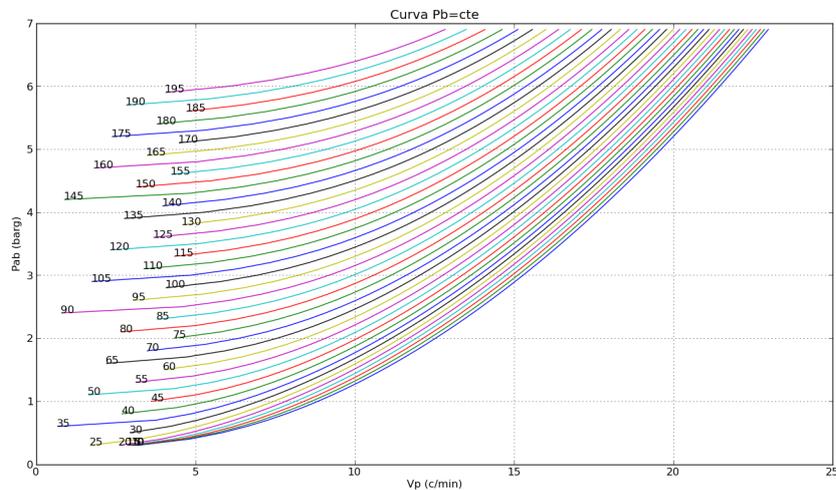


Figura 19. Familia de curvas obtenidas del modelo dinámico del booster, que relaciona la presión de pilotaje (P_{ab}) con la velocidad de pistoneo (V_p) para diferentes presiones de la botella (de 4 a 200 bar en intervalos de 5 bar).

En la Figura 20 se representa la velocidad de pistoneo del booster en función de la presión de carga de la botella y la presión de aire de pilotaje, a partir del modelo simplificado utilizado para la familia de curvas. Puede observarse que la presión de aire de pilotaje necesaria para mantener una velocidad de pistoneo determinada se incrementa con la presión de carga de la botella.

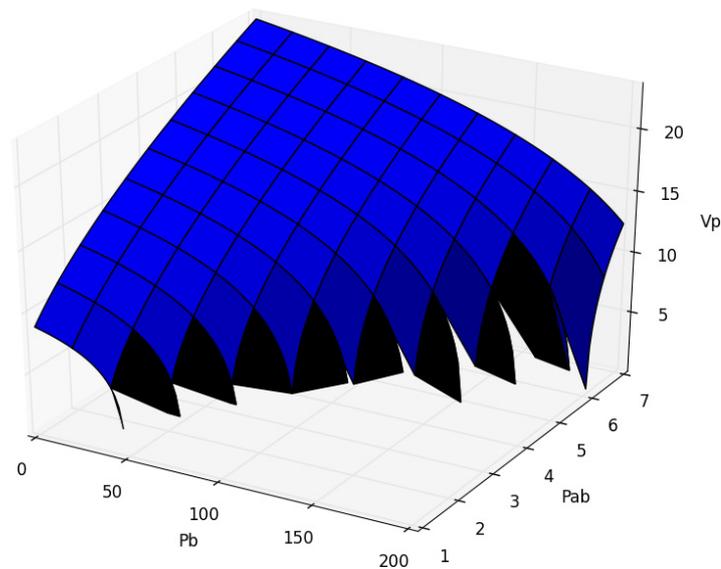


Figura 20. Límites de operación del booster. V_p es la velocidad de pistoneo, P_b es la presión de carga de la botella y P_{ab} es la presión de aire de pilotaje.

6. Implementación del control y resultados

El algoritmo de control se ha implementado físicamente sobre el autómatas programable ILC 150 ETH, al igual que el módulo de comunicación con la red de control distribuido. El nuevo esquema del algoritmo implica la necesidad de integrar en el sistema de control la lectura de presión de la botella y la actuación sobre la presión de pilotaje, así como la lectura de parámetros del electrolizador y la potencia activa consumida. Para ello es necesario realizar modificaciones sobre el subsistema de generación y sobre la topología de la red.

En esta fase del proyecto no se dispone de un medidor de presión de gas en la botella, por lo que se adopta la solución de estimar teóricamente [14] el volumen de hidrógeno en la botella a partir del número de ciclos de pistoneo acumulados. Se ha programado por lo tanto en el PLC una rutina de cálculo de la presión de la botella que actúa como entrada al algoritmo de control.

La capa de control distribuido tampoco está terminada en esta fase del proyecto, por lo que ha sido necesario implementar una solución provisional. Se ha desarrollado como parte del sistema de adquisición de datos un módulo denominado DCSim que simula ser el elemento de la red de control distribuido que contiene la consigna de potencia a consumir. Este módulo permite al usuario programar valores fijos, escalones y rampas de potencia a consumir. DCSim implementa un servidor Modbus TCP que almacena el valor de consigna en tiempo real.

Para la lectura de las variables del booster desde el PLC, ha sido necesario en primer lugar integrar físicamente en la red Ethernet el autómatas del electrolizador. Se han realizado varias pruebas con dispositivos comerciales para convertir la red RS-232 a Ethernet, sin resultados satisfactorios. Finalmente se ha optado por diseñar una pasarela Modbus RTU a Modbus TCP, que integra tanto la conversión física de señales como la implementación de una arquitectura cliente-servidor de Modbus. Se ha utilizado la plataforma hardware Arduino para programar un cliente Modbus RTU que lee las variables del electrolizador y un servidor Modbus TCP que almacena dichas lecturas. La conexión física a la red Ethernet se realiza a través de un módulo Shield Ethernet con puerto RJ45, y la conversión de niveles RS-232/TTL a través de una placa electrónica diseñada para tal fin, tal y como se muestra en la Figura 21.

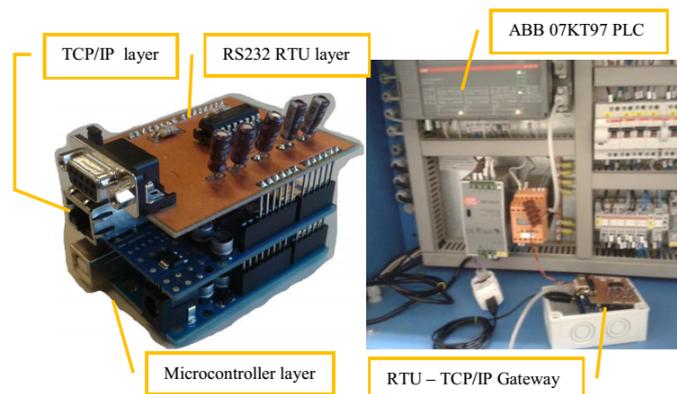


Figura 21. Pasarela (gateway) de Modbus RTU a Modbus TCP/IP (izquierda) y sus conexiones en el PLC del electrolizador (derecha).

En esta nueva estructura de la red de comunicaciones, los datos procedentes del medidor Sentron, del electrolizador (a través de la pasarela) y de la capa de control distribuido se encuentran disponibles en los correspondientes servidores Modbus. Por lo tanto, se ha realizado en el autómatas la implementación software de tres clientes Modbus TCP para consultar las variables.

Por otra parte, se ha instalado un regulador de presión VVPM de Festo a la entrada de aire del compresor booster, con el fin de realizar el control de la presión de pilotaje desde el autómatas. La presión del regulador, en el rango de 0 a 10 bar, se controla a través de una tensión continua 0-10V proporcionada por el módulo de salida analógica IB IL AO 2/U/BP-PAC instalado en el PLC. Este módulo dispone de dos canales de salida, utilizando el otro para regular el grado de apertura de la válvula electroneumática.

El servidor Modbus TCP anteriormente implementado en el PLC se ha extendido para almacenar las variables leídas por los clientes Modbus, así como las demás variables gestionadas por el PLC (booster, electroválvula, regulador de presión, variables internas de cálculo, etc). El número de parámetros disponibles para lectura asciende ahora a 78 variables.

El sistema de adquisición de datos debe realizar ahora consultas solamente al PLC, que centraliza todas las variables de proceso, por lo que se han adaptado los módulos SAD y PLOT a la nueva estructura descrita.

Implementado el algoritmo de control, se ha procedido a analizar el comportamiento dinámico del sistema ante un requerimiento de potencia a consumir, diseñando el regulador PID adecuado para su funcionamiento óptimo en lazo cerrado. Debido a la complejidad del sistema conjunto no ha sido posible obtener una expresión analítica del comportamiento dinámico, por lo que se ha utilizado el método de identificación basado en la respuesta en lazo abierto a una entrada escalón.

En la Figura 22 se representa la respuesta del sistema modelizado como un sistema de primer orden con un retardo puro, obteniendo una constante de tiempo de 63 segundos y un retardo de 23 segundos.

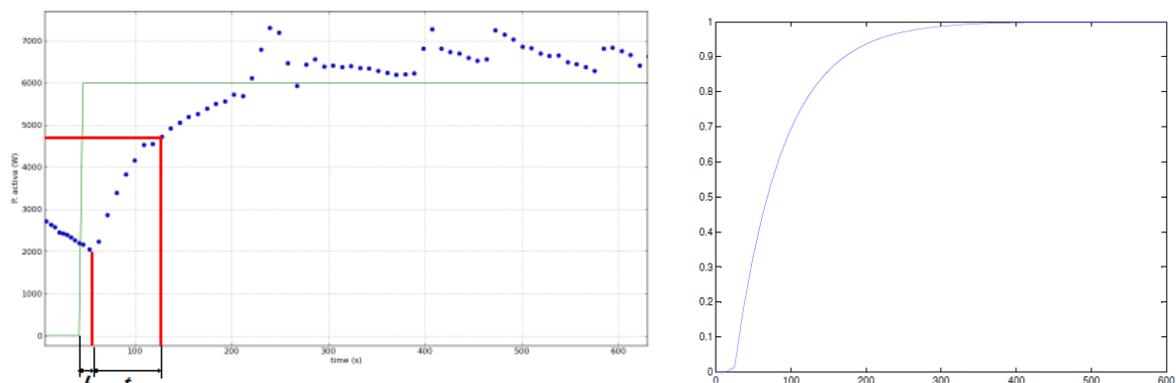


Figura 22. Respuesta en bucle abierto ante una entrada escalón del sistema físico (izquierda) y del modelo del sistema en Matlab (derecha).

Una vez conocida la respuesta del sistema, los parámetros del regulador PID pueden ser determinados fácilmente por el método de Ziegler-Nichols. La ecuación 4 muestra la expresión general de un regulador PID [15]:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

donde $u(t)$ es la acción de control y $e(t)$ es el error entre la potencia de consigna y la potencia consumida medida por el electrolizador. K_p es la constante proporcional, T_i es la constante de tiempo integral y T_d es la constante de tiempo derivativa. La ecuación 5 muestra la función de transferencia del regulador PID usando la transformada de Laplace:

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (5)$$

donde $G(s)$ es la relación entre $u(s)$ y $e(s)$, K_i incluye las constantes K_p y T_i , y K_d incluye las constantes K_p y T_d .

También se han calculado los parámetros del regulador PID utilizando la herramienta de autosintonización de Matlab, que ha proporcionado un mejor ajuste que Ziegler-Nichols. Las constantes del PID obtenidas son $K_p = 0.9477$, $K_i = 0.0204$ y $K_d = 0$, correspondiendo realmente a un regulador de tipo PI.

Finalmente se ha optado por realizar un control de tipo digital, implementando el regulador en el código en el autómatas. Para ello el regulador continuo ya calculado ha sido transformado a un regulador discreto [16], cuya función de transferencia se muestra en la ecuación 6:

$$G(z) = \frac{u_k}{e_k} = \frac{k_1 + k_2 \cdot z^{-1} + k_3 \cdot z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (6)$$

donde u_k es la acción de control discreto y e_k es la señal de error discreto, estando definidas las constantes de acuerdo con las siguientes equivalencias:

$$k_1 = K_p + \frac{K_p}{T} + K_i \cdot T; \quad k_2 = K_i \cdot T - \frac{2 \cdot K_d}{T}; \quad k_3 = \frac{K_d}{T - K_p} \quad (7)$$

El periodo de muestreo T es el tiempo entre dos mediciones de consumo de potencia. Teniendo en cuenta la constante de tiempo (63 segundos) y considerando que el PLC completa una secuencia de lectura en 100 ms, se ha seleccionado para la implementación del regulador un tiempo de muestreo de 2 segundos.

La ecuación 8 puede ser expresada como una ecuación en diferencias considerando que los términos z^{-1} y z^{-2} corresponden a los dos periodos de muestreo previos, tal y como se muestra en la ecuación 8, donde los subíndices k , $k-1$ y $k-2$ corresponden al muestreo actual y los dos muestreos previos.

$$u_k = u_{k-1} + k_1 \cdot e_k + k_2 \cdot e_{k-1} + k_3 \cdot e_{k-2} \quad (8)$$

Utilizando el control discreto se han realizado diversos ensayos para determinar el comportamiento del sistema. En la Figura 23 se muestra la respuesta del sistema ante diferentes consignas de consumo de potencia, en forma de secuencia de escalones.

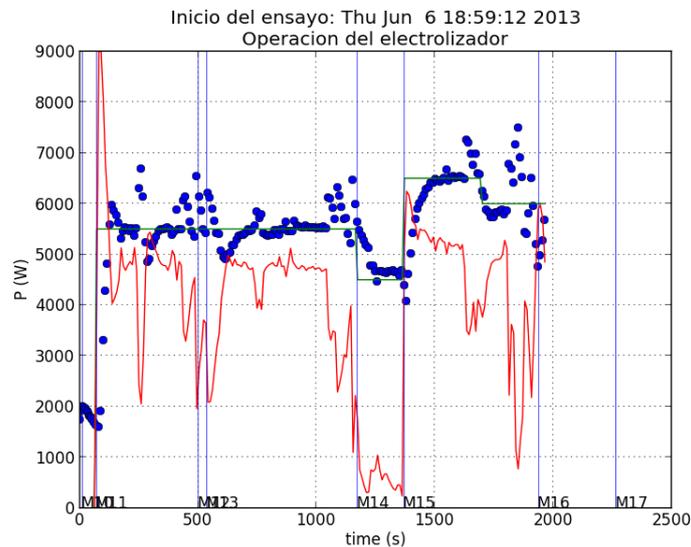


Figura 23. Respuesta del sistema en bucle cerrado ante diferentes consignas de consumo de potencia. Potencia de consigna: línea verde; potencia consumida (puntos azules); acción del PID ($K_p = 0.9477$, $K_i = 0.0204$, $K_d = 0$): línea roja.

La línea de puntos azules representa la potencia activa consumida y la línea de color rojo representa la acción de control del regulador PID. Se observa que el regulador actúa bruscamente ante las fluctuaciones de la potencia consumida, debidas a las perturbaciones introducidas por el depurador, y que son procesadas por el algoritmo de control.

Para evitar este comportamiento se decide introducir un efecto derivativo en el PID, incrementando a 36 segundos el tiempo de retardo. Las constantes del PID obtenidas en ese caso son $K_p = 1.6028$, $K_i = 0.0163$ y $K_d = 3.2389$. En los ensayos realizados se ha comprobado que la acción derivativa causa mayores oscilaciones que en el caso anterior, aumentando la inestabilidad del sistema.

Los resultados muestran que el sistema responde con un seguimiento adecuado ante la consigna de potencia activa a consumir, produciéndose no obstante errores puntuales que alcanzan valores próximos al 30% y con duración inferior a 250 segundos. Se ha comprobado que la respuesta brusca de la acción de control coincide con las perturbaciones introducidas por el depurador de hidrógeno, así como con el cambio de curva (de la familia de curvas) utilizada por el algoritmo de control conforme varía la presión de carga de la botella.

7. Conclusiones

La caracterización del comportamiento del sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno ha arrojado valiosa información de cara al control de la producción. Los resultados han identificado las variables a tener en cuenta en el diseño del algoritmo de control del sistema, siendo principalmente la presión de carga de la botella, la velocidad de pistoneo del booster y la presión de aire de pilotaje.

En esta fase del proyecto se ha implementado la automatización de la lectura de la velocidad de pistoneo y la regulación de la presión de aire de pilotaje, que son las variables que suponen mayor dificultad en el control. Los ensayos realizados han mostrado resultados satisfactorios, con desviaciones aceptables para las etapas iniciales del sistema de control.

El control de producción de hidrógeno se ha llevado a cabo desde el autómatas programable instalado, que debe establecer un intercambio de datos con los distintos componentes del sistema implicados. Para ello ha sido necesario realizar la integración de dichos elementos en la red de comunicaciones Ethernet, teniendo que resolver diversos problemas de tipo técnico debido a las particularidades de cada fabricante. Cabe destacar el caso particular del electrolizador, que ha requerido el diseño y construcción de una pasarela específica de Modbus RTU a Modbus TCP/IP.

En los ensayos realizados el sistema muestra una respuesta aceptable ante diferentes requerimientos de potencia a consumir, aunque presenta desvíos puntuales debido a la influencia del depurador de hidrógeno y a las imprecisiones del algoritmo de control, principalmente relacionadas con la familia de curvas utilizada. Ambos factores deben ser mejorados para ajustar el comportamiento del sistema de control.

8. Líneas de trabajo actuales y futuras

En la fase actual del proyecto se está trabajando en el desarrollo de un nuevo modelo del booster más exacto, con el fin de obtener una familia de curvas más precisa que reduzca en lo posible los errores observados en el algoritmo de control. Los resultados parciales obtenidos del nuevo modelo, junto a un mayor conocimiento del sistema de producción de hidrógeno tras los ensayos realizados, están permitiendo definir con mayor exactitud el espacio de operación viable del sistema y plantear nuevos modos y zonas de control.

Asimismo se ha completado la instalación de un medidor automatizado de presión de hidrógeno en la botella, cuya lectura se realiza a través de una entrada analógica al autómatas del control. Los ensayos deberán cuantificar la mejora del algoritmo de control usando presiones reales en los cálculos.

En cuanto al sistema de adquisición de datos, la nueva versión en desarrollo sustituye el actual almacenamiento de datos en ficheros csv por una base de datos relacional tipo MySQL en una arquitectura cliente-servidor. Entre otras ventajas permite realizar consultas complejas SQL sobre los datos experimentales.

En una línea más teórica se está realizando un estudio de los distintos escenarios del almacén de energía usando el software de simulación de sistemas energéticos TRNSYS, con el fin de definir las estrategias óptimas de gestión del almacenamiento. Los

resultados parciales serán de gran importancia en el diseño del sistema de control del subsistema de producción de hidrógeno.

Las líneas de trabajo futuras son numerosas. Para una medición más precisa del caudal de hidrógeno se propone la instalación de depósitos intermedios de inercia para limitar el efecto de las perturbaciones introducidas por el proceso de depuración. Como solución alternativa se propone la instalación de un medidor del caudal de hidrógeno aguas abajo del depurador.

Se propone incluir en el sistema de control la medición de la temperatura ambiente, así como la detección de los ciclos de funcionamiento y parada del compresor de aire Puska. Por otra parte, el compresor booster en su configuración actual mantiene el pistoneo en vacío después de un fallo en el sistema. Se plantea el diseño e instalación de un mecanismo que detenga su funcionamiento de forma automática si fuese necesario.

En un ámbito más enfocado a la investigación, se propone construir el modelo teórico de los elementos más importantes del sistema con herramientas tipo Matlab/Simulink o Scilab/Xcos, y su posterior validación en la instalación real.

Otra línea de investigación que se propone es el estudio de las posibles mejoras del actual sistema de generación, utilizando electrolizadores de alta presión que tienen un mayor rendimiento, o realizando el almacenamiento de hidrógeno en depósitos de gran capacidad y baja presión, con el correspondiente ahorro en energía de compresión.

Finalmente, otra alternativa es la utilización de sistemas de recuperación de energía del actual sistema de producción de aire comprimido, cuyo consumo energético se presume importante en el actual esquema de regulación.

9. Bibliografía

[1] Copyright © 2012. Red Eléctrica de España, S.A. *Sistema Eléctrico Español. Avance del informe 2008.*

[2] Copyright © 2010. World Wind Energy Association. *World Wind Energy Report 2010.*

[3] Copyright © 2006 Ministerio de Educación y Ciencia. Asociación Empresarial Eólica (AEE), Programa Profit. *Ejercicio de Predicción: Informe final.*

[4] A. Pérez-Navarro, D. Alfonso, C. Álvarez, F. Ibáñez, C. Sánchez, and I. Segura. Copyright © 2010. Renewable Energy, 35. *Hybrid biomass-wind power plant for reliable energy generation.* 1436-1443.

[5] Carlos Sánchez, Belén Abad, Stefan Hübner, David Alfonso, Isidoro Segura. *Wind park reliable energy production based on a hydrogen compensation system. Part I: Technical viability.* International Journal of Hydrogen Energy 2011; 36: 15548-60.

[6] José Luis Aprea. *Two years experience in hydrogen production and use in Hope Bay, Antarctica.* International Journal of Hydrogen Energy 2012; 37: 14773-80.

[7] M. Calderón, A.J. Calderón, A. Ramiro, J.F. González. *Automatic management of energy flows of a stand-alone energy supply with hydrogen support.* International Journal of Hydrogen Energy 2010; 35: 2226-35.

- [8] J.C. Campelo, F. Rodríguez, A. Rubio, R. Ors, P.J. Gil, L. Lemus, J.V. Busquets, J. Alvadalejo, and J.J. Serrano. Copyright © 1999. *Microprocessors and Microsystems*, 23. *Distributed industrial control: a fault-tolerant architecture*. 103-112.
- [9] B.G. Penaflo, J.R. Ferron, D.A. Piglowski, R.D. Johnson, M.L. Walker. *Real-time data acquisition and feedback control using Linux Intel computers*. Fusion Eng. and Des. 2006; 81: 1923-6.
- [10] H.P. Langtangen. Copyright © 2009. Springer. *A Primer on Scientific Programming with Python (Texts in Computational Science and Engineering)*.
- [11] H. Wang, W. Xiong, and X. Wang. Copyright © 2008. Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, TOYAMA 2008, September 15-18. *Research on the static characteristics of air driven gas booster*. P2-23.
- [12] Carlos Sánchez, Domingo González. *Experimental Characterization of a grid-connected hydrogen energy buffer: Hydrogen production*. International Journal of Hydrogen Energy 2013, 38: 9741-54
- [13] H. Wang, W. Xiong, and Z. Li. Copyright © 2008. Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, TOYAMA 2008, September 15-18. *Dynamic simulation and experimental research on charge of gas booster*. P1-30.
- [14] O. Ulleberg. Copyright ©2003. International Journal of Hydrogen Energy 28. *Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach*. 21-33.
- [15] Katsuhiko Ogata. *Modern control engineering*. 2nd ed. London: Prentice Hall; 1993.
- [16] Katsuhiko Ogata. *Discrete time control systems*. 2nd ed. London: Prentice Hall; 1996.