

Informe de proyecto: sistema de generación y acumulación de energía eólica en forma de hidrógeno

Abril de 2013



PARQUE EÓLICO EXPERIMENTAL SOTAVENTO

INFORME DE PROYECTO: SISTEMA DE GENERACIÓN
Y ACUMULACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA EN FORMA DE HIDRÓGENO



Fecha

Abril de 2013

Edita

SOTAVENTO GALICIA S.A.

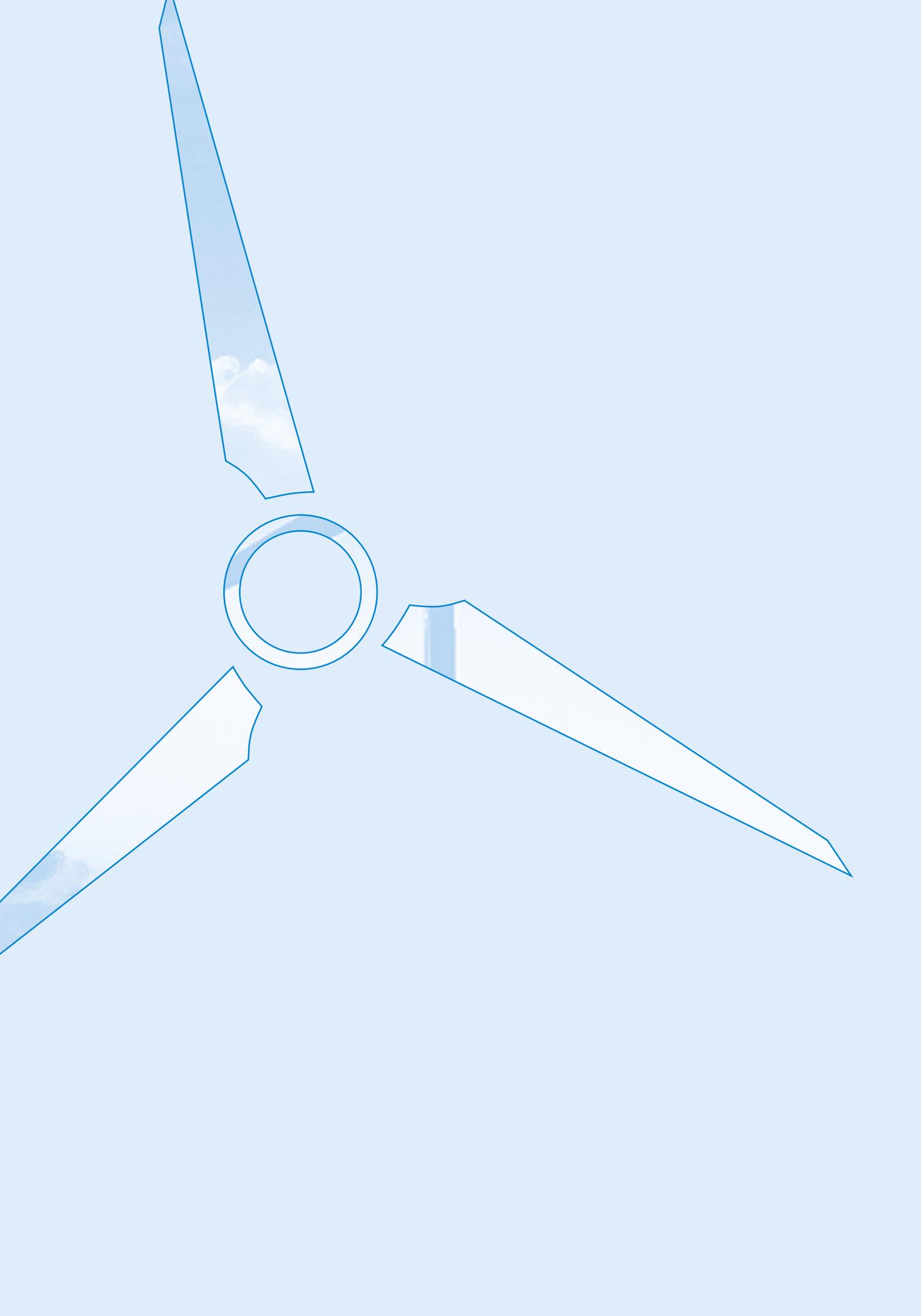
Copyright

SOTAVENTO GALICIA S.A.

Diseño, maquetación

LÚDICA 7 SL

CAPÍTULO 1	ORIGEN DEL PROYECTO	■ 5
CAPÍTULO 2	OBJETIVO DE LA INSTALACIÓN	■ 7
	2.1 FUNCIONES DE LOS COLABORADORES DEL PROYECTO	■ 7
CAPÍTULO 3	FASES DEL PROYECTO	■ 9
CAPÍTULO 4	CONTEXTO ENERGÉTICO ACTUAL	■ 11
	4.1 EL SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL	■ 14
CAPÍTULO 5	ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO EN FORMA DE HIDROGENO	■ 17
	5.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	■ 17
	5.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMA BASADOS EN HIDRÓGENO	■ 17
	5.3 SISTEMAS DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA-HIDRÓGENO	■ 19
CAPÍTULO 6	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DE SOTAVENTO	■ 23
	6.1 ELECTROLIZADOR	■ 25
	6.1.1 SALA DE PROCESO	■ 25
	6.1.2 SALA DE CONTROL	■ 30
	6.1.3 SALA DE ELEMENTOS AUXILIARES	■ 30
	6.2 COMPRESOR	■ 30
	6.3 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	■ 32
	6.4 MOTOGENERADOR	■ 32
	6.5 SISTEMA DE CONTROL	■ 33
CAPÍTULO 7	ESTRATEGIAS DE OPERACIÓN DE LA PLANTA	■ 37
	7.1 ESTRATEGIA “PEAKING”	■ 37
	7.2 ESTRATEGIA “BALANCING”	■ 37
	7.3 ESTRATEGIA DE NIVELACIÓN DE CARGA	■ 38
	7.4 ESTRATEGIA DE AUMENTO DEL FACTOR DE CAPACIDAD DEL PARQUE	■ 38
CAPÍTULO 8	RESULTADOS Y CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS	■ 39
	8.1 ELECTROLIZADOR	■ 39
	8.2 COMPRESOR-ELECTROLIZADOR	■ 41
	8.3 MOTOGENERADOR	■ 43
	8.4 RESUMEN DE EQUIPOS Y ETAPAS	■ 44
CAPÍTULO 9	EXPERIENCIA Y CONCLUSIONES DEL PROYECTO	■ 45
CAPÍTULO 10	DIVULGACIÓN Y DIFUSIÓN	■ 49
	10.1 SOPORTES Y MEDIOS MATERIALES DIDÁCTICOS	■ 49
	10.2 ORGANIZACIÓN DE EVENTOS Y DIFUSIÓN	■ 51
ANEXO A	CRONOGRAMA DEL PROYECTO	■ 53
ANEXO B	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE EQUIPOS Y ANEXO FOTOGRÁFICO	■ 55





1. ORIGEN DEL PROYECTO

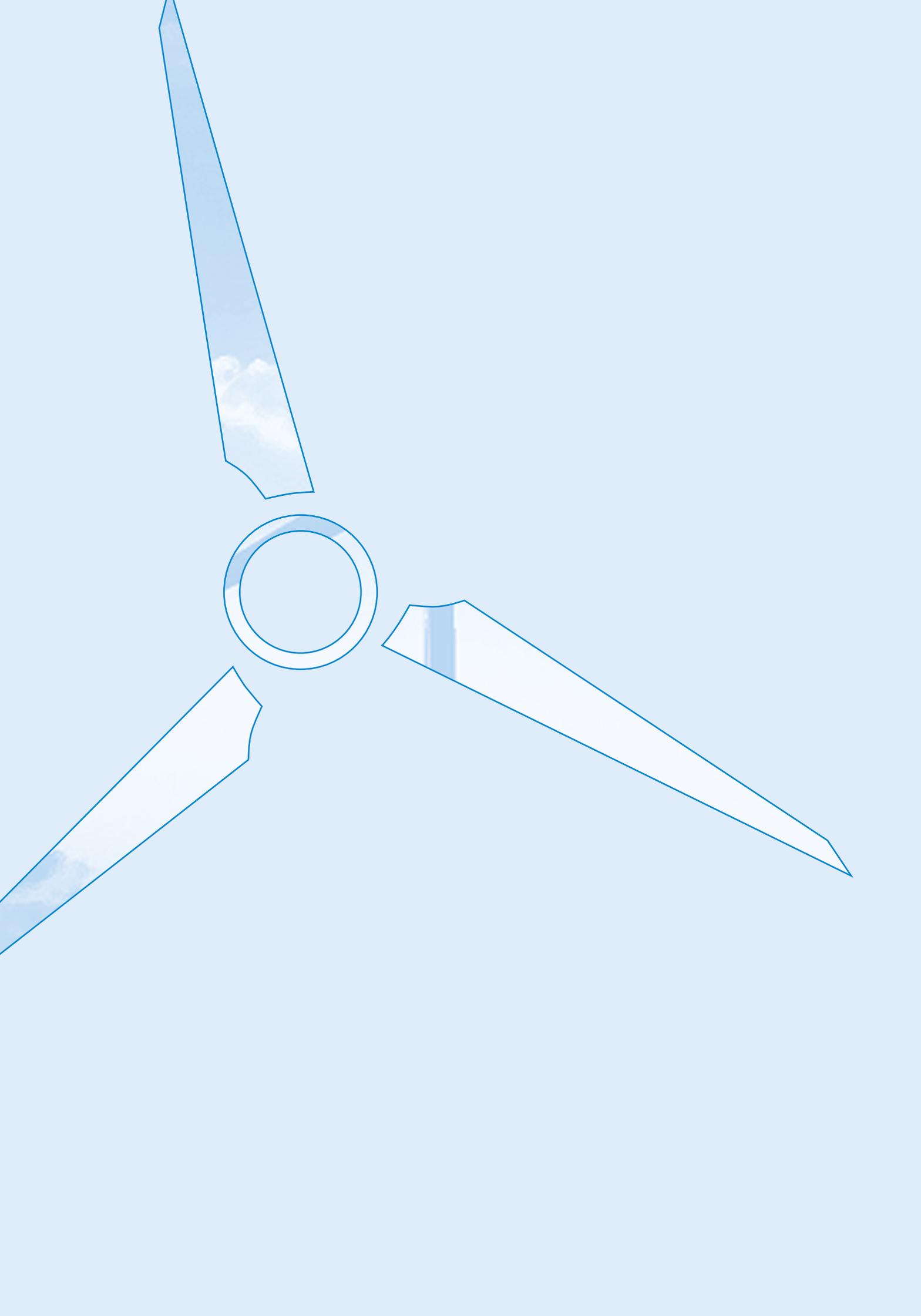
Las fuentes de energía basadas en los combustibles fósiles empiezan a mostrar tímidamente signos de agotamiento. Al mismo tiempo, crece la preocupación de nuestra sociedad al respecto del impacto que estas ocasionan sobre el medioambiente y el clima.

Las alternativas al sistema tradicional fósil pasan el desarrollo de las energías renovables, las cuales presentan como principal característica su irregularidad o carácter aleatorio; es decir, son consideradas como no gestionables. Ante esta situación, los sistemas que permitan acumular la energía de esta procedencia jugarán un papel vital, y su desarrollo se plantea como uno de los grandes retos del presente siglo.

El Parque Eólico Experimental Sotavento, con una potencia instalada de 17,56 MW distribuidos en nueve modelos de cinco tecnologías diferentes para un total de 24 aerogeneradores, viene desarrollando actividades de I+D+i en el ámbito de las energías renovables desde su fundación en el año 1997, constituyendo un marco inmejorable para el desarrollo de proyectos que analicen la viabilidad de emplear hidrógeno como forma de almacenamiento energético. Surge así la colaboración entre Gas Natural Fenosa, la Consellería de Economía e Industria y de la Fundación Sotavento Galicia en un proyecto para exploración tecnológica empleando hidrógeno como vector energético.

El proyecto comienza su andadura en el año 2005, con una duración prevista inicialmente de tres años. Sin embargo, la problemática en el desarrollo, y demás complejidades propias de una instalación pionera de estas características, así como causas ajenas a la misma pero que condicionaron la parada del parque eólico durante un año por el fallo en el transformador principal de la subestación del parque, dilataron la fecha planificada en un principio (septiembre de 2007) hasta diciembre de 2011.

El presente informe, elaborado desde la Fundación Sotavento Galicia, y tras la finalización del proyecto, se plantea en parte como una recopilación de la información generada a raíz del mismo, enriquecido desde la perspectiva del Parque Eólico Experimental Sotavento.





2. OBJETIVO DE LA INSTALACIÓN

El proyecto nace y es desarrollado mediante un convenio específico entre la Consellería de Economía e Industria, Gas Natural Fenosa y la Fundación Sotavento Galicia. Se concibe como la realización de una experiencia piloto, a escala y en operación real, con la finalidad de generar energía eléctrica mediante un grupo motogenerador alimentado con el hidrógeno obtenido mediante electrólisis, empleándose en el proceso energía eléctrica de origen eólico.

Los objetivos adoptados inicialmente comprendían:

- ▶ Exploración tecnológica y económica. Estudiar la viabilidad de los sistemas integrados eólica-hidrógeno
- ▶ Adquirir experiencia en la manipulación de sistemas de hidrógeno, así como en la normativa y necesidades de seguridad asociadas a este tipo de instalaciones
- ▶ Incrementar los conocimientos sobre las tecnologías que emplean hidrógeno, principalmente los relativos a los electrolizadores funcionando con potencias eléctricas variables, y su contribución a la integración de la energía eólica en la red eléctrica
- ▶ Operar una planta experimental de almacenamiento y gestión de energías renovables
- ▶ Desarrollar modelos que describan el comportamiento de los equipos que constituyen este tipo de sistemas (renovables-hidrógeno) y validación de los mismos

2.1 FUNCIONES DE LOS COLABORADORES DEL PROYECTO

En el desarrollo del proyecto, las entidades colaboradoras han aportado:

CONSELLERÍA DE ECONOMÍA E INDUSTRIA DE LA XUNTA DE GALICIA

- ▶ Apoyo financiero e institucional del proyecto
- ▶ Proponer al Parque Eólico Experimental Sotavento como emplazamiento de las instalaciones

GAS NATURAL FENOSA

- ▶ Financiación del proyecto
- ▶ Prospecciones tecnológicas previas
- ▶ Aporte de conocimientos específicos en materia de generación de hidrógeno
- ▶ Medios materiales, humanos, equipos y logística
- ▶ Gestión, tramitación administrativa y de licencias necesarias del proyecto
- ▶ Medios técnicos, ingeniería civil, mecánica y eléctrica asociada a la fase de ejecución
- ▶ Mantenimiento de la planta durante la duración del proyecto

FUNDACIÓN SOTAVENTO GALICIA

- ▶ Emplazamiento físico de las instalaciones
- ▶ Infraestructura del parque y la energía eléctrica necesaria para operar la planta
- ▶ Experiencia y recursos humanos para la optimización en la gestión de la instalación
- ▶ Divulgación y difusión del proyecto entre los colectivos que visitan el parque (20.00 personas/año)



3. FASES DEL PROYECTO

La duración del proyecto comprende desde el 2005 hasta diciembre del 2011. Las fases en la que se dividió el mismo para lograr los objetivos establecidos han sido las siguientes:

ANTECEDENTES Y REDACCIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN

Mar-2005 Firma del convenio de colaboración entre la Xunta de Galicia, Gas Natural Fenosa y la Fundación Sotavento Galicia

2006 Redacción de la documentación del proyecto

Mar-2007 Concesión de la licencia de obras

EJECUCIÓN DE LAS INSTALACIONES Y PUESTA EN MARCHA

Jul-2007 Ejecución de la obra civil asociada al proyecto

Ago-2007 Análisis de los datos de producción y previsiones de generación eólica del parque. Realización de un primer informe con las posibles estrategias de operación y control de la planta. Definición de las necesidades de volumen de almacenamiento

Sep-2007 Recepción de equipos en el Parque Eólico Sotavento

Sep-2007 Interconexión eléctrica entre el parque eólico y la planta. Cableado de equipos

Oct-2007 Comienzo de los trabajos de puesta en marcha de cada uno de los equipos. Acceso y habilitación a los SCADA's de cada fabricante

INAUGURACIÓN DE LA INSTALACIÓN

Feb-2008 Inauguración oficial de la instalación por el Vicepresidente de la Xunta de Galicia y el Conselleiro de Economía e Industria

OPERACIÓN Y CONTROL DE LA INSTALACIÓN

Nov-2007 Inicio de los ensayos de operación de los equipos. Detección de problemática de distorsión armónica durante la operación de la planta

Feb-2008 Contingencia en el transformador principal del Parque Sotavento. El parque quedó inoperativo hasta Feb-2009 y la planta hasta Abr-2009. La usencia de energía eléctrica en el parque imposibilitó el mantenimiento, desembocando en daños en los equipos

- Feb-2009** Acuerdo de Colaboración con el CENER (Departamento de Integración de Energías Renovables en la Red) para estudio y solución de los problemas de armónicos de la planta
- Abr-2010** Habilitación del acceso remoto para operación y supervisión de la planta. Instalación del SCADA propio que integra las variables de estudio y posibilita el control
- May-2010** Instalación de un bypass para facilitar el control del conjunto electrolizador/compresor
- Jun-2010** Según directrices del CENER, y como solución al problema de armónicos, instalación de un centro de transformación de 630 kVA, exclusivo para la planta de hidrógeno directamente desde la red de media tensión del parque en 20 kV
- Jul-2010** Propuesta de Sotavento del protocolo de operación de la planta empleando la energía generada por el parque y la consumida por la planta de hidrógeno
- Mar-2011** Implantación de un sistema de envío de consignas programadas a cada uno de los equipos de la planta
- Abr-2011** Realización de los ensayos de caracterización de equipos y de las estrategias de operación de la planta hasta diciembre de 2011

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

- Dic-2011** Análisis de los datos experimentales y publicación de diversos informes con resultados y conclusiones al respecto por parte de Gas Natural Fenosa

Tras la finalización del proyecto, en diciembre de 2011 y a petición de la Xunta de Galicia, Gas Natural Fenosa continuó efectuando los trabajos de mantenimiento de las instalaciones, permaneciendo la planta con capacidad de operar y a la espera de nuevas actuaciones o proyectos que pudiesen aprovechar la infraestructura ya existente.



4. CONTEXTO ENERGÉTICO ACTUAL

La energía es un elemento esencial para el desarrollo económico y social en el mundo en que vivimos. En la actualidad, nuestro planeta demanda energía a unos ritmos cada vez mayores, particularmente debido al fuerte crecimiento que están experimentando países en desarrollo como China e India, los cuales albergan aproximadamente un tercio de la población mundial.

Las fuentes de energía primaria que tradicionalmente han sido empleadas por el hombre y sobre las que en gran medida se ha construido nuestro desarrollo, los combustibles fósiles, presentan la problemática de ser limitados y que su uso produce la emisión de gases y sustancias que resultan nocivos para el medioambiente. Además, gran parte de las reservas actuales están localizadas en zonas geográficas de inestabilidad política. La Figura 1 muestra la evolución del consumo energético a nivel mundial en TWh (1TWh=10⁹kWh) referenciada a su fuente de origen durante las tres últimas décadas.

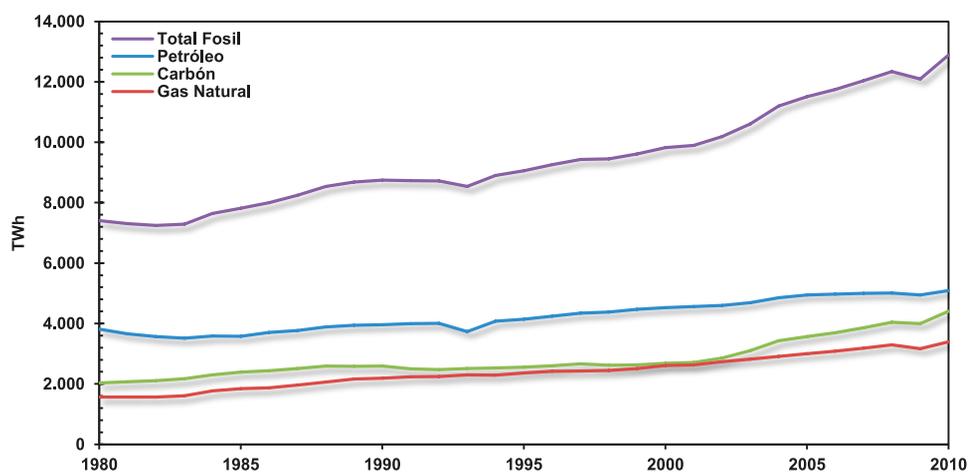


Figura 1. Evolución del consumo mundial de combustibles fósiles¹ (1TWh=10⁹kWh)

El incremento medio anual en la demanda de combustibles fósiles en este período ha sido del 1,8%, propiciando una escalada en los precios de los mismos. Para el caso del petróleo, la Figura 2 indica el precio medio anual para el barril de crudo según el índice de la OPEP y el consumo en TWh de energía primaria en forma de crudo para última década. Referenciándonos al año 2000, la demanda se ha incrementado un 13,5 % hasta el 2011, y el precio del barril ha multiplicado su precio casi por cuatro.

¹ U.S. Energy Information Administration, International Statistics. <http://www.eia.gov/>

El contexto económico global en el que actualmente nos encontramos complica todavía más efectuar cualquier estimación relativa a la evolución del precio de los combustibles fósiles; sin embargo, lo que sí parece asegurado es el creciente consumo por parte de los países emergentes, es decir que la demanda continuará en crecimiento y sus reservas menguando.

Sin ceñirnos en exclusiva al ámbito económico y de disponibilidad de las materias primas, en términos de sostenibilidad energética, el aumento en el consumo de los combustibles fósiles y otras energías no renovables incrementa el coste medioambiental y compromete la disponibilidad energética de las generaciones futuras. Por todo ello, cada vez existe un mayor interés en desarrollar nuevos modelos energéticos que nos permitan incrementar nuestra independencia respecto de este tipo de fuentes.

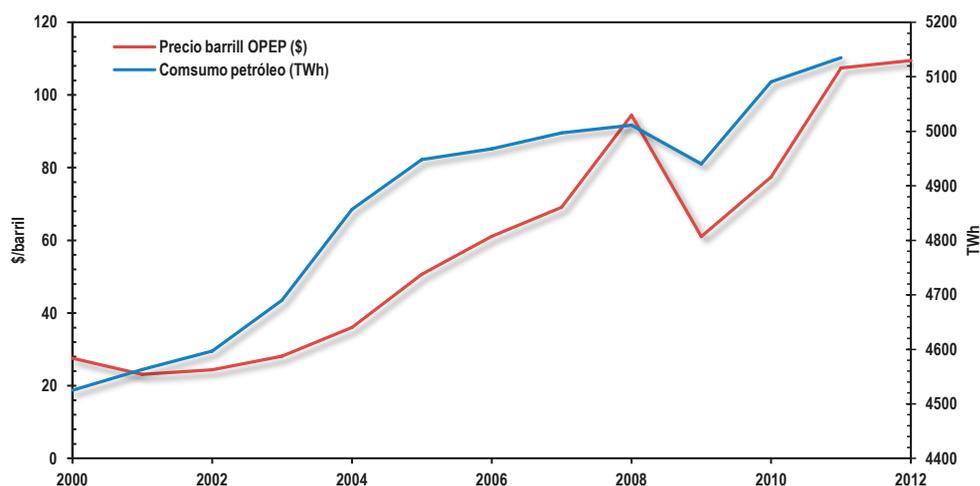


Figura 2. Precio del barril de petróleo índice OPEP² (\$/barril) y demanda mundial de petróleo (TWh)³

El comportamiento para las energías primarias ya transformadas, o también energías secundarias, ha experimentado una evolución análoga a la de las materias primas energéticas. En el caso particular de la energía secundaria en forma de energía eléctrica, las alternativas al modelo energético actual que conjugan lo expuesto anteriormente, se centran en la búsqueda de soluciones que reduzcan el empleo de combustibles fósiles, potenciando la obtención de electricidad a través de tecnologías que promuevan la energía sostenible (energías renovables) y optimizar la gestión y eficiencia energética.

Las energías renovables constituyen en efecto una parte de la solución al problema energético. Sin embargo, es cierto que presentan ciertos impedimentos que dificultan su óptimo aprovechamiento, fundamentalmente su carácter irregular.

Esta característica hace que a día de hoy las fuentes tradicionales sean casi imprescindibles en cualquier sistema eléctrico, pues sin ellas y empleando únicamente energías renovables difícilmente se podría realizar un ajuste entre la generación y demanda eléctrica. La Figura 6 ejemplifica este comportamiento, en ella se muestra para un día tipo en España la demanda eléctrica diaria y la generación eléctrica de origen renovable procedente de la eólica.

² Organización de Países Exportadores de Petróleo http://www.opec.org/opec_web/en/

³ U.S. Energy Information Administration, International Statistics. <http://www.eia.gov>

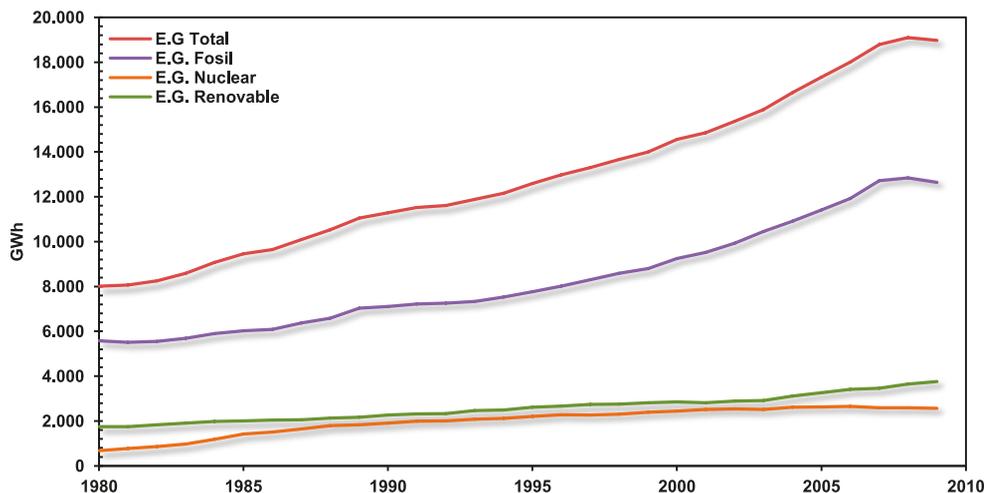


Figura 3. Generación eléctrica mundial según el origen de energía primaria⁴ (1GWh=10⁶kWh)

El principal problema radica en que la energía eléctrica no puede acumularse como tal. Sin acumulación, es necesario disponer de la capacidad de generación instantánea necesaria para adaptar generación y demanda, evitando fenómenos que afecten a la calidad del suministro y que comprometan el mismo. En el escenario actual, las energías renovables cada vez están cobrando un mayor protagonismo, y en el medio plazo presentan potencial de mejora tecnológica y de viabilidad económica.

La gestión de la generación/demanda y optimizar del aprovechamiento de la energía eléctrica de origen renovable constituye una de las problemáticas más arduas, ya que salvo en casos concretos, el sistema no posee suficiente capacidad de acumulación (a excepción del bombeo hidráulico) para hacer frente a las variaciones a muy corto plazo necesarias para absorber las fluctuaciones que se dan entre la generación y consumo.

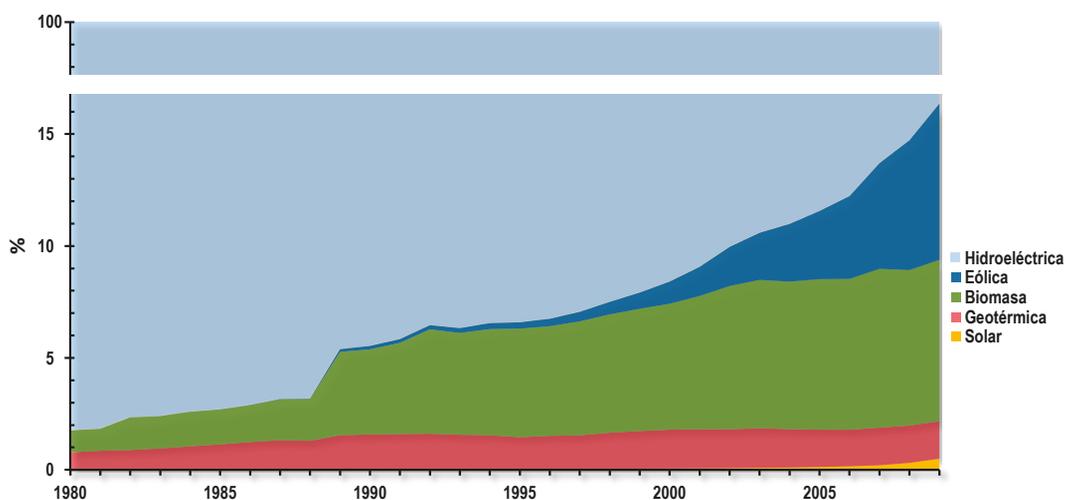


Figura 4. Procedencia de energía renovable generada según su origen a nivel mundial⁵

Nos encontramos así ante un futuro en el que los combustibles fósiles continuarán incrementando su precio al mismo tiempo que sus reservas disminuyen, cada vez existirán mayores restricciones medioambientales a su empleo, y la generación mediante tecnologías renovables elevará progresivamente su grado de penetración

⁴ U.S. Energy Information Administration, International Statistics. <http://www.eia.gov/>

⁵ U.S. Energy Information Administration, International Statistics. <http://www.eia.gov/>

en el mercado. Durante la última década (Figura 4) la energía solar y eólica, especialmente esta última, han experimentado un desarrollo muy notable. Por todo ello, se antoja imprescindible contar con sistemas de almacenamiento de energía que permitan el cambio de modelo energético.

4.1 EL SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL

Para el caso español, en el año 2012 la energía eléctrica generada tuvo la procedencia y contribución porcentual indicada en la Figura 5. La cobertura de la demanda de origen renovable ascendió al 32%⁶, en donde la eólica supuso un 18% del total.

A finales 2012 en España había más de 22.213 MW eólicos instalados. A la elaboración del presente informe, durante el momento de máxima integración en el sistema de la eólica, esta aportó una cobertura del 64% de la demanda energética total. Con esta potencia instalada y el crecimiento esperado, se convierte en indispensable optimizar la energía inyectada a la red por las turbinas eólicas.

Este tipo de energía está basada en el viento, y por tanto sujeta a la aleatoriedad del mismo. Su empleo en el futuro en combinación con sistemas de almacenamiento es especialmente interesante pues permitiría mejorar el aprovechamiento y gestión de los recursos renovables.

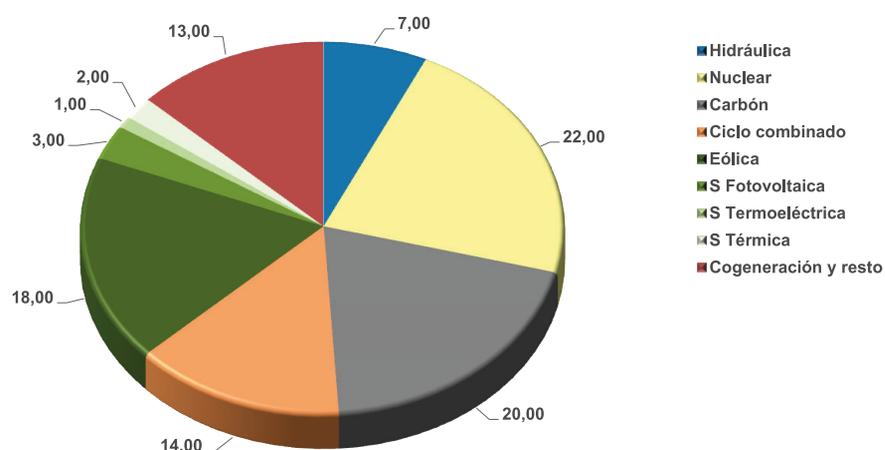


Figura 5. Contribución al sistema eléctrico español según la generación⁷

Como hemos visto, actualmente en España el 32% de la energía eléctrica generada es de origen renovable. El sistema nacional presenta las circunstancias que permiten el empleo del bombeo hidráulico para almacenar energía eléctrica de modo indirecto (energía potencial). Sin embargo, la contribución de las renovables al mix energético no puede garantizarse de un modo continuo, por ello se emplean principalmente ciclos combinados de turbinas de gas en las que se mantiene una determinada potencia en reserva para cubrir los huecos de la generación renovables.

En los próximos años, parece lógico que se incremente todavía más el nivel de penetración de las renovables, si los sistemas de almacenamiento tradicionales no poseen suficiente capacidad, han de producirse cortes de producción renovable, desechándose esta potencial energía. A modo de ejemplo de estas circunstancias, sólo en marzo de 2013, en donde la coincidencia de una demanda energética más baja de lo previsto y las abundantes lluvias caídas durante el invierno obligaron a desembalsar pantanos, desembocaron en restricciones a la eólica y en 456 GWh perdidos, suficiente electricidad autóctona y limpia como para cubrir la demanda mensual de electricidad de dos millones de hogares españoles.

⁶ Incluye hidráulica, fotovoltaica, termoeléctrica, solar térmica y eólica

⁷ Red Eléctrica Española <http://www.ree.es>

En la Figura 6 se muestra la generación eólica y la demanda eléctrica para un día tipo en España que deja patente el carácter azaroso de la energía eólica.

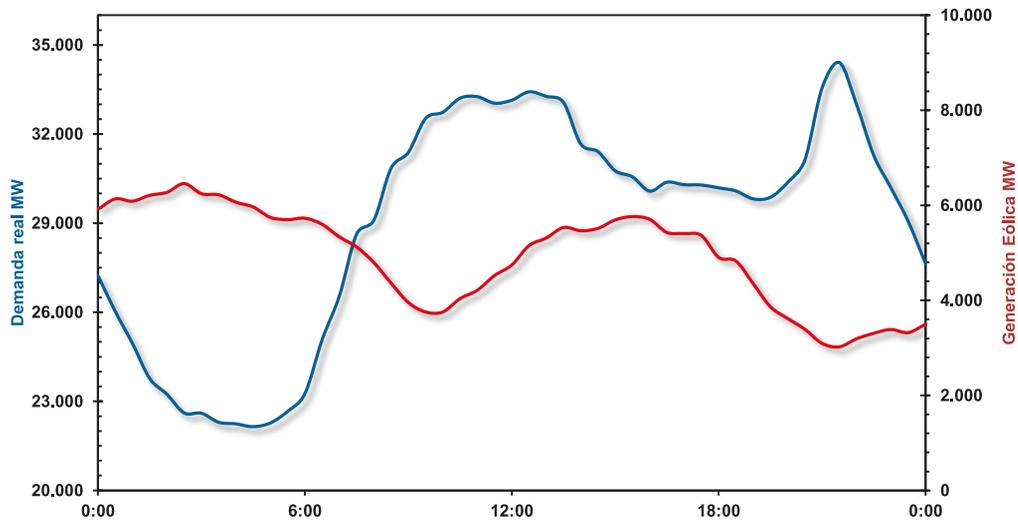
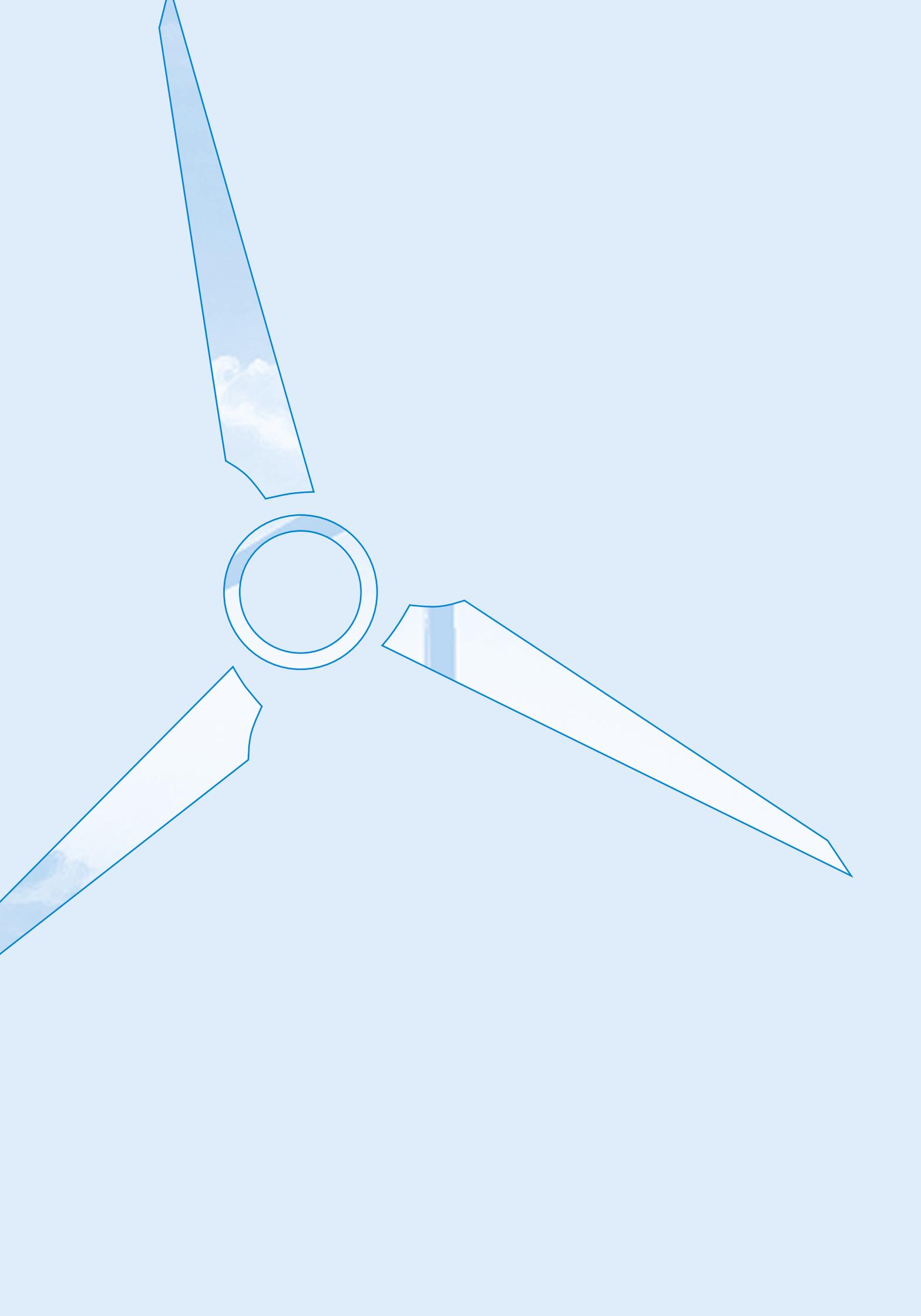


Figura 6. Perfil de demanda real y generación eólica en España⁸

⁸ Red Eléctrica Española <http://www.ree.es>





5. ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO EN FORMA DE HIDRÓGENO

5.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El concepto de generar hidrógeno a partir de energía eólica tiene su origen en año 1891, cuando el físico danés Poul la Cour, dentro del proyecto Askov, propuso y desarrolló el almacenamiento de energía eléctrica de origen eólico en forma de hidrógeno a partir de la electrolisis del agua para contribuir al desarrollo de la zona rural de Folk, Dinamarca. En los años posteriores la evolución tecnológica se centró en crear generadores que permitiesen el empleo del hidrógeno como combustible. A partir de mediados de siglo pasado, se comienzan a utilizar aerogeneradores de elevada potencia y a estudiar la electrólisis con energía solar. Desde entonces y hasta la fecha, esta tecnología de almacenamiento de energía ha continuado su proceso de mejora tecnológica.

5.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMA BASADOS EN HIDRÓGENO

Antes de analizar las características de estos sistemas, repasemos las principales formas de almacenamiento de energía eléctrica en la actualidad:

- ▶ Energía térmica
- ▶ Energía mecánica
 - Presión. CAES
 - Cinética. Volantes de inercia
 - Potencial. Bombeo hidráulico
- ▶ Energía química
 - Baterías
 - Hidrólisis de agua, obtención de hidrógeno
 - Pilas de combustible regenerativas
- ▶ Energía electromagnética
 - Almacenamiento por superconducción. SMES
 - Supercondensadores

En el sistema energético del futuro, no basado en combustibles fósiles, el hidrógeno desempeñará un importante papel, complementándose y compitiendo con otras soluciones de almacenamiento energético de acuerdo a diversos criterios (seguridad, requerimientos de volumen, ubicación geográfica, etc.) y en función de la amortización de la instalación. El empleo de energías renovables como fuentes de energía, y el uso del hidrógeno y electricidad como portadores de energía es técnicamente factible; por ello, el binomio que conforman el hidrógeno y las renovables muy posiblemente suponga uno de los pilares clave en el desarrollo energético a largo plazo.

El hidrógeno es el elemento más abundante en número de átomos del universo, en la corteza terrestre representa únicamente el 0,03 %, sin embargo es el elemento más abundante del océano, suponiendo un 66% de sus átomos. La casi totalidad del mismo no se encuentra en estado molecular, si no enlazado con otros elementos y formando compuestos, principalmente agua. Para obtenerlo es necesario romper los enlaces de las moléculas que integra mediante el aporte de energía. En el caso del agua, la disociación en sus elementos constituyentes mediante energía eléctrica se conoce como electrólisis, es un proceso que consume una elevada cantidad de energía por unidad de masa y que permite el almacenamiento en forma de energía química.

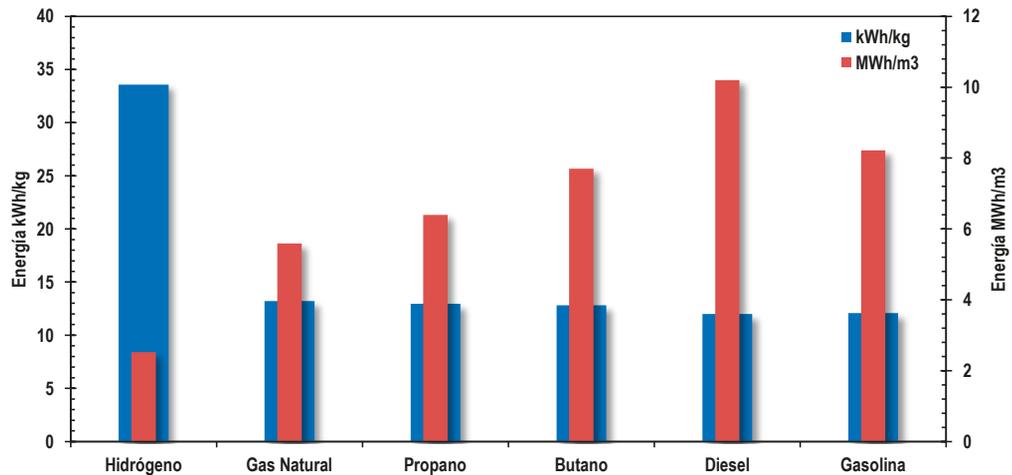


Figura 7. Energía por unidad de masa y volumen en diversos combustibles. Hidrógeno a 200 bar

Como se observa de la Figura 7, la principal desventaja del hidrógeno es su bajo contenido energético por unidad de volumen (a la presión de 200 bar) y las dificultades técnicas y energéticas de su licuefacción. Se requieren así grandes volúmenes de almacenamiento, hasta cuatro veces superiores si lo comparamos con el diesel y del doble frente al gas natural.

El empleo del hidrógeno como vector energético presenta las siguientes ventajas:

- ▶ La mayor energía por unidad de masa de los combustibles
- ▶ Barrera energética baja para la reacción de ignición
- ▶ Atóxico
- ▶ Alta temperatura de combustión espontánea

Además están sus ventajas ambientales, ya que su combustión apenas produce emisiones contaminantes. Si se obtiene mediante energías renovables, el impacto ambiental que provoca es mínimo. Actualmente casi la totalidad del hidrógeno consumido en el mundo se obtiene a través del reformado con vapor del gas natural por ser el método más económico.

La generación y almacenamiento de hidrógeno se puede realizar en zonas con gran recurso eólico pero sin infraestructura eléctrica. En este caso el recurso eólico se emplearía exclusivamente para generar hidrógeno, lo que requerirá diseños tecnológicos específicos que permitan la conexión directa aerogenerador y el electrolizador. Además el electrolizador tiene que trabajar con potencias de entrada fluctuantes sufriendo la mínima degradación posible.

El hidrógeno producido empleando energías renovables puede ser generado con un objetivo distinto al de la gestión energética. Es muy interesante la producción de hidrógeno como combustible para automoción en un emplazamiento cercano al de su consumo. En el sistema energético del futuro, el hidrógeno jugará un papel fundamental en la economía, en el almacenamiento energético a gran escala, como combustible para el transporte, y en el sector residencial y terciario en cogeneraciones.

A modo resumen, la producción de hidrógeno presenta las siguientes ventajas:

- ▶ Posibilita una operación flexible, permite consumir en momentos de precios bajos en el mercado eléctrico
- ▶ En redes de distribución débiles, si se emplea el hidrógeno como vector de la energía eólica producida se disminuye la necesidad de reforzar la red. Este planteamiento es muy útil en áreas con un gran potencial eólico pero donde la implantación de más potencia eólica está limitada por las redes
- ▶ El factor de capacidad de la red se aumenta, se suavizan los picos de producción eólica. En momentos de exceso de producción esta energía puede ser consumida en el electrolizador sin necesidad de cortes
- ▶ El sistema de almacenamiento puede ser descargado completamente

Como principales desventajas cabe destacar:

- ▶ El pequeño tamaño de la molécula de hidrógeno incrementa el riesgo de fugas en los sistemas de almacenamiento
- ▶ Grandes dificultades para licuar el hidrógeno. Proceso con gran demanda energética
- ▶ La baja barrera energética para la combustión le convierte en altamente explosivo
- ▶ Arde en forma de una tenue llama azul, casi invisible con luz solar
- ▶ La exposición prolongada de los dispositivos de almacenamiento al hidrógeno puede producir la fragilización de los mismos, pudiendo ocasionarse fugas
- ▶ Su manejo requiere medidas especiales de seguridad
- ▶ La baja eficiencia global para los procesos de almacenamiento, ligeramente superior si emplean pilas de combustible en lugar de motores de combustión adaptados
- ▶ El proceso de electrolización requiere de refrigeración, disminuyendo la eficiencia
- ▶ Elevado coste actual de la tecnología

5.3 SISTEMAS DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA-HIDRÓGENO

A continuación se realiza un breve recorrido por los principales proyectos y sistemas eólica/hidrógeno desarrollados a nivel mundial de los que tenemos conocimiento:

CANADÁ

Isla Ramea, Terranova

Ramea es una pequeña isla localizada en la costa sur de Terranova, en la zona este de Canadá. En ella se ubica desde 2004 el primer proyecto demostrativo de generación eléctrica formado por un grupo electrógeno diesel y aerogeneradores en territorio canadiense. En un intento de incrementar la proporción de energía eléctrica generada de origen eólico se desarrolló un proyecto para el almacenamiento de energía en forma de hidrógeno. El sistema consiste en la adición de tres nuevas turbinas eólicas de 100 kW, además de las seis ya existentes de 65 kW cada una, para un total de 690 kW, un electrolizador de tipo alcalino de 90 m³/h y un sistema de almacenamiento de 2.000 m³ a 10 bar.

El hidrógeno almacenado es transformado en energía eléctrica según demanda a través de cuatro motogeneradores adaptados de 62,5 kW cada uno.

Isla Príncipe Eduardo

Esta isla acoge la sede del Instituto Canadiense de Energía Eólica, posee una potencia instalada de 44 MW, planeando instalarse 34 MW más en los próximos años. Las instalaciones del proyecto demostrativo se sitúan en propio instituto, en Cabo Norte.

Los componentes del sistema de almacenamiento consisten en:

- ▶ Aerogenerador de 60 kW
- ▶ Electrolizador unipolar alcalino de 66 Nm³/h
- ▶ Sistema de almacenamiento de 4.000 Nm³/h (a 17 bar)
- ▶ Motogenerador adaptado de 120 kW

El electrolizador está conectado directamente a la turbina. Es además el único proyecto en marcha que emplea un electrolizador tipo unipolar. Los datos y experiencia del mismo proporcionarán información acerca de la durabilidad y comportamiento de los mismos frente a entradas variables características de la generación eólica.

GRECIA

Proyecto RES2H2

Encuadrado dentro del proyecto europeo RES2H2. En el proyecto griego, el electrolizador empleado posee una potencia de 25 kW y opera a 20 bar. Está conectado a un generador de síncrono ENERCON E40 de 500 kW. La unidad electrolítica ha sido desarrollada específicamente con unas celdas capaces de soportar variaciones en la potencia nominal desde el 15% hasta el 100% en un segundo. El electrolizador es capaz de operar de acuerdo a distintas estrategias empleando la energía procedente de la turbina. Antes de ser almacenado el hidrógeno es purificado. El sistema de almacenamiento consta de dos partes, un almacenamiento a baja presión y otro en alta presión a 220 bar.

REINO UNIDO

Proyecto HARI

El proyecto Integración del Hidrógeno y Renovables (HARI-Hydrogen and Renewables Integration) tiene su origen en el año 2001 en Leicestershire, Inglaterra. Los dos objetivos principales eran crear un proyecto demostrativo y adquirir experiencia en la integración de los sistemas de almacenamiento de energía mediante hidrógeno que permitan desarrollar modelos que puedan ser usados en el diseño de futuras plantas.

La generación de energía renovable se efectúa a través de dos turbinas eólicas de 25 kW, 13 kWp fotovoltaicos y de dos microturbinas hidráulicas de 1,5 kW. A estos sistemas de generación, ya existentes, se le añadió un electrolizador alcalino de 36 kW (presión de salida 25 bar), un sistema de almacenamiento de 2.856 Nm³ (a la presión de 137 bar), y dos pilas de combustible de 2 kW y 5 kW.

Proyecto PURE

El sistema aislado eólico-hidrógeno de pequeña potencia del proyecto PURE actúa como nexo de dos proyectos de Unst (comunidad de las islas Shetland): siGEN y AccaGen. El objetivo del proyecto es verificar la medida en que la energía eólica y el hidrógeno pueden combinarse para satisfacer las necesidades energéticas de las áreas rurales. PURE ha sido concebido como un proyecto test del uso a largo plazo de este tipo de instalaciones. Los componentes principales son:

- ▶ Aerogeneradores: dos turbinas de 15 kW
- ▶ Electrolizador alcalino de 15 kW, presión de operación 55 bar
- ▶ Sistema de almacenamiento: 44 Nm³
- ▶ Pila de combustible de 5 kW

ESPAÑA

Proyecto RES2H2

Se enmarca dentro del proyecto RES2H2 europeo, las instalaciones españolas se ubican en el Instituto Tecnológico de Canarias. Los componentes principales del sistema son:

- ▶ Generador de síncrono de 500 kW ENERCON E40
- ▶ Electrolizador de 5 Nm³/h, presión de operación 20 bar
- ▶ Compresor de hidrógeno de 7,5 kW y 220 bar

El objetivo de este proyecto es triple: optimizar la energía producida por el aerogenerador, producir agua potable a través de un proceso de osmosis inversa, y generar hidrógeno mediante el electrolizador que será almacenado y usado en una pila de combustible.

Proyecto IHER

La pretensión de este proyecto es testar la generación de hidrógeno a través de electrolisis, empleando para ello electricidad procedente únicamente de energías renovables y que cubran la mayor diversidad tecnológica posible, principalmente de fotovoltaica y eólica. El proyecto trata de abarcar toda la cadena del hidrógeno: gestión, almacenamiento y uso eficiente.

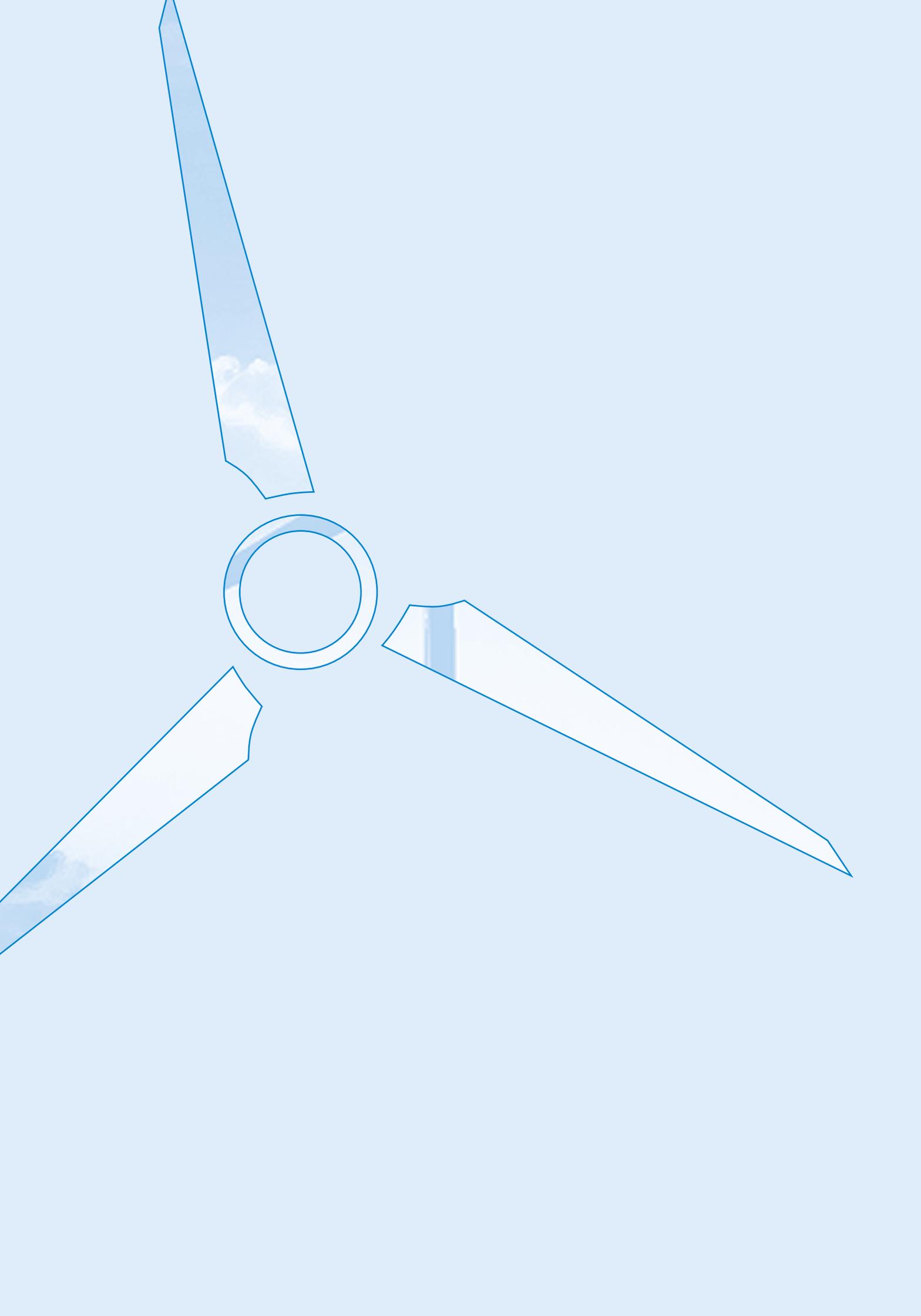
Las infraestructuras del proyecto están integradas por tres turbinas, cada una de ellas de tecnología y rango de potencia diferente (80 kW, 225 kW y 330 kW).

Para el almacenamiento del hidrógeno la planta consta de tres depósitos de 7 Nm³ cada uno. Existen además dos sistemas de almacenamiento alternativos, uno de ellos consiste en el almacenamiento a 45 bar, en el segundo el hidrógeno se acumula a 200 bar, la capacidad total es de 400 Nm³. El hidrógeno se emplea en dos pilas de combustible de 1,2 kW.

Proyecto Tahivilla

El proyecto comprende una planta piloto de hidrógeno-eólica, localizada en Cádiz e integrada dentro de un proyecto de investigación liderado por ENDESA. El sistema está conectado a un parque de 80 MW con 1.900 horas equivalentes por año. Las características de los equipos son:

- ▶ Electrolizador, potencia eléctrica de 41 kW
- ▶ Sistema de almacenamiento a baja presión (15 bar) y alta (200 bar)
- ▶ Pila de combustible de 12 kW





6. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DE SOTAVENTO

La instalación de producción y almacenamiento de hidrógeno se encuentra ubicada en el Parque Eólico Experimental Sotavento, sito entre los términos municipales de Xermade (Lugo) y Monfero (A Coruña). El parque tiene una potencia nominal de 17,56 MW con 24 aerogeneradores de 9 modelos diferentes pertenecientes a 5 tecnologías distintas. La planta se encuentra conectada en paralelo a la red de media tensión en 20 kV del parque.

Los principales equipos que conforman esta instalación son (Figura 8):

- ▶ [1] Electrolizador
- ▶ [2] Buffer electrolizador-compresor
- ▶ [3] Compresor
- ▶ [4] Sistema de almacenamiento
- ▶ [5] Panel de descompresión
- ▶ [6] Buffer de aspiración del motogenerador
- ▶ [7] Motogenerador
- ▶ [8] Centro de transformación de la planta



Figura 8. Vista general de la planta de almacenamiento de almacenamiento de energía

La filosofía con la que opera la planta consiste en consumir exclusivamente energía generada por el parque en el electrolizador. Este equipo demanda agua desmineralizada y energía eléctrica en la disociación de la molécula de agua en sus elementos constituyentes, obteniendo de modo separado hidrógeno y oxígeno.

El hidrógeno es producido a una razón máxima de 60 Nm³/h, la presión de salida de la corriente gaseosa oscila entre los 7,5 y 10 bar. Posteriormente, pasa por un proceso de purificación y secado hasta obtenerlo con una pureza superior al 99,9998 %, mientras que el oxígeno se expulsa directamente a la atmósfera.

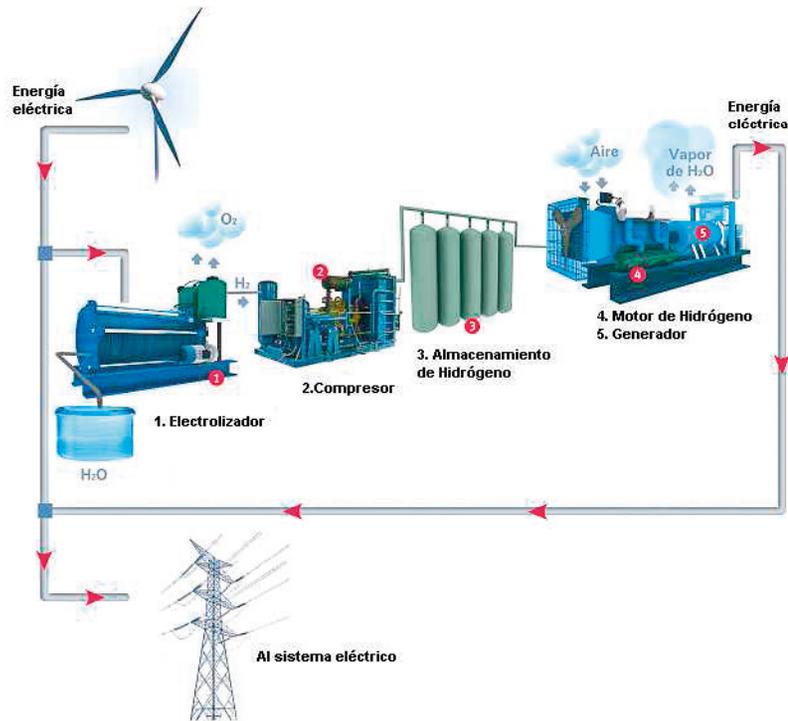


Figura 9. Esquema funcional de la planta

Con el fin de aumentar la capacidad de almacenamiento, el hidrógeno generado se comprime a 200 bar a través de dos grupos compresores que admiten hasta 61,8 Nm³/h. Entre el electrolizador y los compresores se encuentra un tanque de 1.000 litros, su finalidad es estabilizar la presión de aspiración del compresor. El hidrógeno se almacena en un conjunto de 7 bloques con 28 botellas cada uno, proporcionando una capacidad total de 1.725 Nm³ de hidrógeno. Cada uno de estos bloques se encuentra interconectado con el resto formando dos grupos que permiten el aislamiento individual de cada uno.

El hidrógeno almacenado puede ser consumido según distintas estrategias. La instalación consta de un grupo motogenerador con un potencia de salida de 55 kW eléctricos. Previo a la combustión es necesario descomprimir el gas desde la presión de almacenamiento hasta la de combustión del motor, existe así un panel de descompresión con dos etapas, de tal modo que la presión pasa de 200 bar a 14 bar y en una segunda etapa desde 14 bar hasta la de aspiración del motor. Previo al motogenerador se ha dispuesto de otro depósito de 1.000 litros. El motogenerador presenta un consumo máximo de 70 Nm³/h de hidrógeno y opera a una presión de 25-60 mbar.

6.1 ELECTROLIZADOR

El electrolizador del fabricante Hydrogenics, modelo HySTAT-1000Q-60-10, es un equipo basado en la tecnología alcalina, con una configuración de cuatro stack's de celdas electrolíticas. Las principales características del mismo son las indicadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Características principales del electrolizador

CARACTERÍSTICAS	
Nº de stacks	4
Nº de celdas por stack	90
Caudal nominal de H ₂ [Nm ³ /h]	32-60
Presión de salida H ₂ [bar]	6-10
Pureza del H ₂ con Deoxo-Drier [%]	99,9998
Eficiencia por stack [kWh/Nm ³ H ₂]	4,2
Eficiencia global del equipo [kWh/Nm ³ H ₂]	4,8
Consumo de agua [litros/Nm ³ H ₂]	1
Conductividad max del agua [µS/cm]	5
Tipo de electrolito	30% KOH v/v
Volumen de electrolito [litros]	650

El equipo está montado en un contenedor, diferenciándose en él a su vez tres salas distintas:

- ▶ Sala de proceso
- ▶ Sala de control y potencia eléctrica
- ▶ Sala de los elementos auxiliares

6.1.1 SALA DE PROCESO

En la sala de proceso se encuentran los cuatro stack's de celdas. Cada uno de ellos está constituido por una serie de celdas electrolíticas circulares interconectadas, 90 por stack. La celda está formada a su vez por un cátodo, un ánodo y una membrana inorgánica de intercambio iónico (tecnología patentada IMET) que separa a ambos (ver Figura 10). La membrana evita el contacto y reacción entre el oxígeno e hidrógeno que se producen en los electrodos. A estas celdas llega el agua previamente desmineralizada, en donde se mezcla con hidróxido potásico hasta crear una solución con la conductividad requerida en la operación.

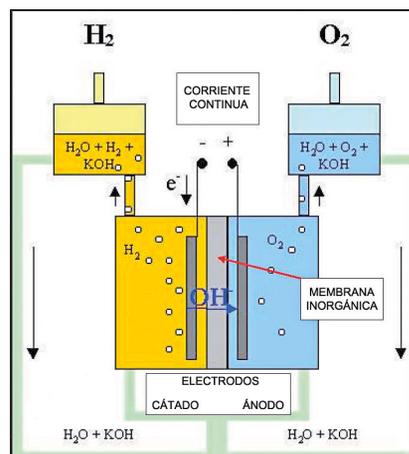
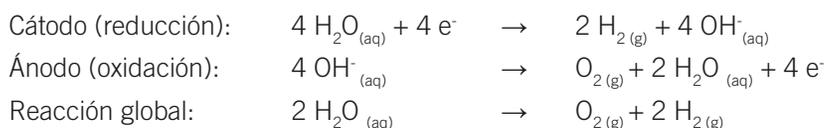


Figura 10. Esquema del proceso Redox de la celda electrolítica

Como electrolito se utiliza una solución acuosa básica de hidróxido potásico al 30% en volumen. El proceso se produce aproximadamente a una presión de 10 bar y una temperatura de 70°C. Al aplicar una corriente continua a los electrodos se dan las siguientes reacciones electroquímicas:



El hidrógeno y oxígeno en estado gaseoso se originan en forma de burbujas. Las burbujas viajan a lo largo del electrolito hasta la parte superior de la celda, en donde son recogidas de modo diferenciado, Figura 11.

El flujo creado por el ascenso de las burbujas provoca un “arrastre” de electrolito, lo que hace necesario separar gas y líquido. Para ello, el hidrógeno y el oxígeno salen del stack hacia su separador de gas correspondiente. En la Figura 11 se representa de modo esquemático el proceso de separación y lavado, y el flujo del electrolito y gases.

A continuación los gases pasan a un depósito dónde el contacto a contracorriente con el agua desmineralizada se arrastran los restos de electrolito. El agua empleada es la de alimentación al proceso y que será electrolizada posteriormente. Seguidamente, los gases pasan a un enfriador para disminuir su temperatura y condensar el agua que arrastren en un filtro de coalescencia. El agua más los restos de electrolito condensados se conducen por gravedad pasando desde el lavador a través del separador de gas hasta llegar a la celda.

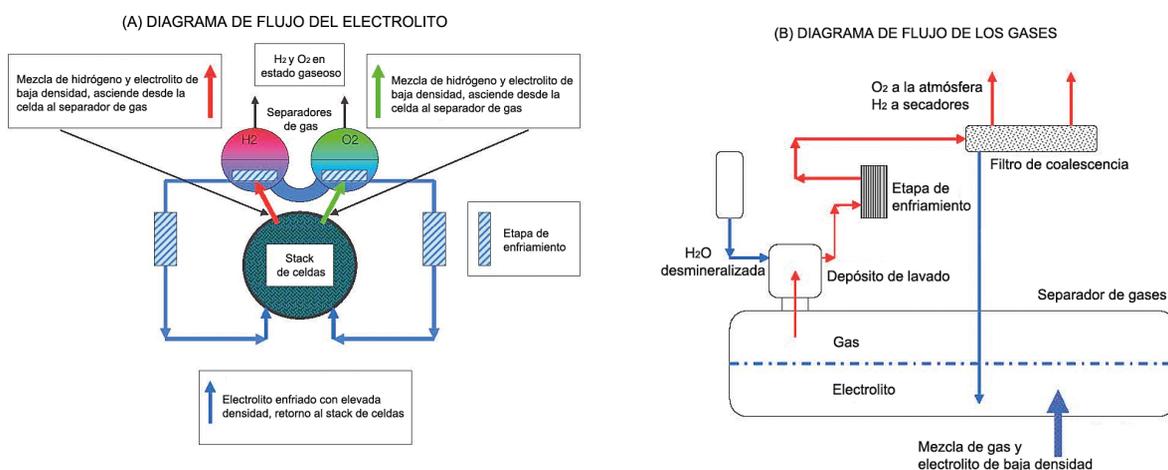


Figura 11. Diagrama de flujo del electrolito y de los gases en la celda electrolítica

El agua es desmineralizada a través de ósmosis inversa. La electrólisis se produce a una presión de 10 bares, empleándose el propio hidrógeno para presurizar.

Hasta aquí el oxígeno y el hidrógeno siguen caminos análogos. A partir de este punto (superado el filtro de coalescencia) el oxígeno es liberado directamente a la atmósfera, ya que no va a ser utilizado. En cambio al hidrógeno se le aplican una serie de procesos para incrementar su pureza.

El flujo de los fluidos dentro de la celda se efectúa sin circulación forzada, Figura 11. En el caso de los gases se produce siempre por diferencia de densidades. Para el electrolito, este circula desde los stack's de las celdas electroquímicas a los separadores de gas arrastrado por las corrientes gaseosas y por fenómenos de convección debidos al gradiente de temperaturas existentes en su seno. En la Figura 12 se muestra una imagen de la sala de proceso identificándose los principales elementos que la componen.

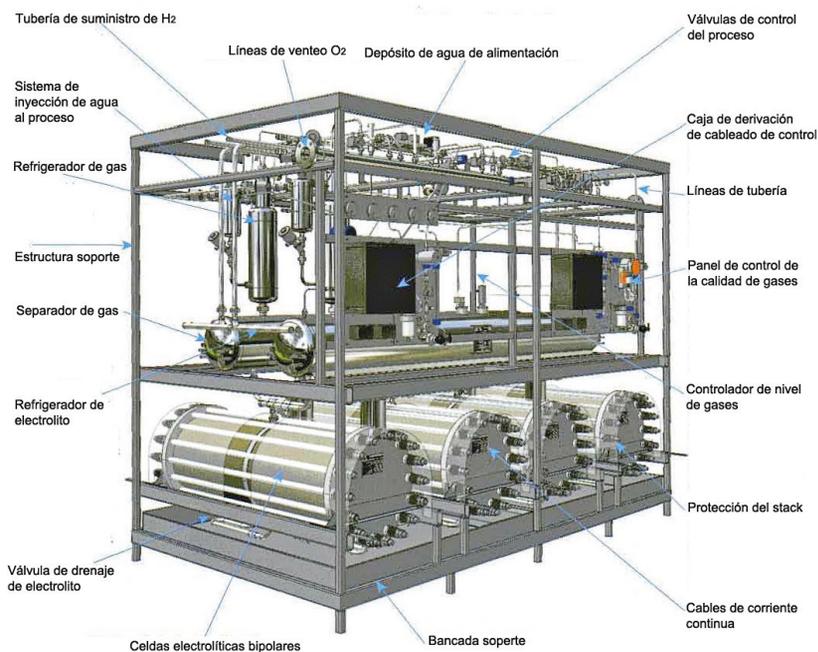


Figura 12. Sala de proceso del electrolizador

6.1.1.1 STACK DE CELDAS

Es el componente principal del electrolizador. Como se ha comentado, está constituido por una serie de celdas electrolíticas colocadas en serie, 90 por stack 360 en total. Cada una de ellas consta a su vez de dos anillos estructurales diferenciados, el anillo de hidrógeno y el de oxígeno. Estos anillos forman dos cámaras, en las cuales que tiene lugar la electrolisis. Ambos anillos cuentan además con un canal que permite la circulación del electrolito y la evacuación de los gases generados. Entre estos elementos estructurales existe un anillo de teflón que evita fugas. El resultado con esta disposición es la conexión hidráulica de las celdas en paralelo y en serie eléctricamente, Figura 13.



Figura 13. Secciones y disposición de la celda electrolítica en el stack

Dentro de esta estructura se encuentran el ánodo, el cátodo y la membrana inorgánica. El hidrógeno y el oxígeno se originan en el cátodo y en el ánodo respectivamente, la membrana evita el contacto y la reacción entre ambos. Cada stack está dividido en dos partes simétricas a través de una brida central. La corriente continua, positiva y negativa, se aplica en los extremos del stack, y la brida central se conecta a tierra.

6.1.1.2 SEPARADOR DE GAS

Estos elementos permiten producir de modo separado hidrógeno y oxígeno. Los separadores de gas se encuentran parcialmente llenos de electrolito (aprox. un 50%). Tanto el hidrógeno como el oxígeno son menos densos que el electrolito, de modo que ascenderán vía colectores hasta los separadores de gas.

El nivel de electrolito en los separadores de gas es crucial para un correcto funcionamiento del equipo, para ello las presiones han de ser las mismas en ambos. Los separadores se encuentran interconectados en su parte inferior, de modo que una variación en uno provocará un cambio en el nivel en el otro y viceversa. Es necesario mantener estos niveles constantes para evitar que el hidrógeno y el oxígeno entren en contacto creando una atmósfera explosiva. Esta es la etapa de control más importante y peligrosa del proceso que se efectúa en el electrolizador.

Los separadores de gas se emplean además para refrigerar el electrolito antes de devolverlo a la celda a través de intercambiadores de calor ubicados en la propia tubería de retorno del electrolito, Figura 11. Las necesidades de refrigeración del electrolito son debidas a que el proceso de electrolisis no transcurre con una eficiencia del 100%; por ello, estas pérdidas se traducen en calor que debe disiparse. La temperatura de operación del electrolito ha de mantenerse en torno a 70°C durante el proceso.

6.1.1.3 SISTEMA DE LLENADO

Consiste principalmente en un pequeño acumulador para el agua de suministro, aquí el agua es presurizada antes de su entrada al sistema. Mediante un juego de válvulas el propio equipo proporciona la presión necesaria sin necesidad de equipos adicionales, alcanzada la consigna el agua fluye por gravedad hasta el depósito de lavado y el separador de gas.

6.1.1.4 DEPOSITO DE LAVADO

El depósito de lavado es necesario para separar el KOH del hidrógeno generado. En él, el gas pasa a través de un relleno y agua a una elevada presión, “lavándose” con el agua procedente del aporte al sistema.

6.1.1.5 INTERCAMBIADORES DE CALOR

El gas procedente del depósito de lavado está saturado en agua, para reducir su contenido, el hidrógeno pasa a través de un intercambiador que reduce su temperatura hasta el punto de rocío, provocando la condensación del agua. La baja velocidad del gas a través del intercambiador permite además que el condensado no sea arrastrado por la corriente gaseosa.

6.1.1.6 FILTRO DE COALESCENCIA

Tras el enfriamiento de la etapa anterior, el gas atraviesa un pequeño filtro de coalescencia en donde se elimina casi completamente el agua que presente. El agua recogida, nuevamente es conducida por gravedad hasta el separador de gas. El hidrógeno a la salida de este equipo posee una pureza del 99,9%.



Figura 14. Vista general del electrolizador. (1) stack de celdas, (2) separador de gas, (3) depósito de lavado (4) intercambiador de calor, (5) sistema de llenado

6.1.1.7 DEOXO-DRIER

En esta última etapa, se elimina cualquier resto de impurezas consistentes en la presencia de oxígeno o de agua. La purificación se consigue a través de dos etapas:



Figura 15. Columnas de secado (1) y DEOXO (2)

DESOXIGENACIÓN

El primer paso comprende una reacción química en una columna de conversión catalítica. El metal noble del catalizador provoca la reacción entre el oxígeno residual y el hidrógeno para dar agua y energía térmica. El agua generada se añade a la corriente de hidrógeno. La temperatura de operación de la columna es de 60 - 80°C, previniendo cualquier condensación en el lecho de la columna.

SECADO

En una segunda fase, el agua es eliminada mediante un mecanismo de adsorción. La porosidad y naturaleza del material empleado como adsorbente permite eliminar las impurezas de agua en un grado muy alto. A la salida de esta etapa, la corriente gaseosa de hidrógeno posee una pureza del 99,9998%.

La etapa de secado posee dos columnas que son regeneradas térmicamente. Mientras una de las columnas está en operación la otra se encuentra regenerando.

6.1.2 SALA DE CONTROL

La sala de control y de potencia eléctrica contiene el cuadro eléctrico, dos armarios EPS (Electrolyser Power Suply), y el sistema de control de la unidad. En esta sala también se ubica el SCADA que posibilita el control, adquisición de datos y visualización de los parámetros de funcionamiento del electrolizador.

6.1.3 SALA DE ELEMENTOS AUXILIARES

La sala de elementos auxiliares alberga el sistema de purificación del agua de red mediante filtración y ósmosis inversa. También se localiza en su interior la unidad evaporadora del equipo de refrigeración destinado a enfriar la corriente de hidrógeno producida y el electrolito, y una soplante que acciona las válvulas neumáticas de la instalación.

6.1.3.1 PROCESO DE OSMOSIS INVERSA

El agua desmineralizada necesaria en el proceso y obtenida mediante osmosis ha de poseer como mínimo las siguientes especificaciones:

Tabla 2. Características del agua desmineraliza para electrólisis

CARACTERÍSTICA	
Índice de saturación Langlier	- 0,15 / + 0,15
Conductividad max [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	5
Alcalinidad max [ppm CaCO_3]	< 5
Max concentración sílice [ppb SiO_2]	< 50
Max concentración calcio [ppb Na^+]	< 50

6.2 COMPRESOR

Los componentes de la etapa de compresión están ubicados dentro de una caseta de hormigón insonorizada, contando con sistema de ventilación y calefacción. El compresor es del tipo pistón, está formado por dos grupos Bauer Modelo HFS 15.4-13-DUO II. Cada uno de estos compresores posee una capacidad de compresión de 30,9 Nm^3/h de hidrógeno, para un total de 61,8 Nm^3/h . Entre la salida del electrolizador y la aspiración de compresor se ha dispuesto un depósito de 1.000 l para estabilizar la presión entre ambos procesos. En la Tabla 3 se muestran algunas de las características del equipo.

Tabla 3. Características del grupo de compresión

CARACTERÍSTICAS	
Nº de grupos de compresión	2
Caudal por grupo de compresión [Nm ³ /h a 2 bar]	18,0
Caudal por grupo de compresión [Nm ³ /h a 4 bar]	30,9
Presión de aspiración [bar]	2-4
Presión de descarga [bar]	200
Etapas de compresión	3
Nº de cilindros	4
Consumo eléctrico a 2 bar [kWh]	7,4
Consumo eléctrico a 4 bar [kWh]	12,4

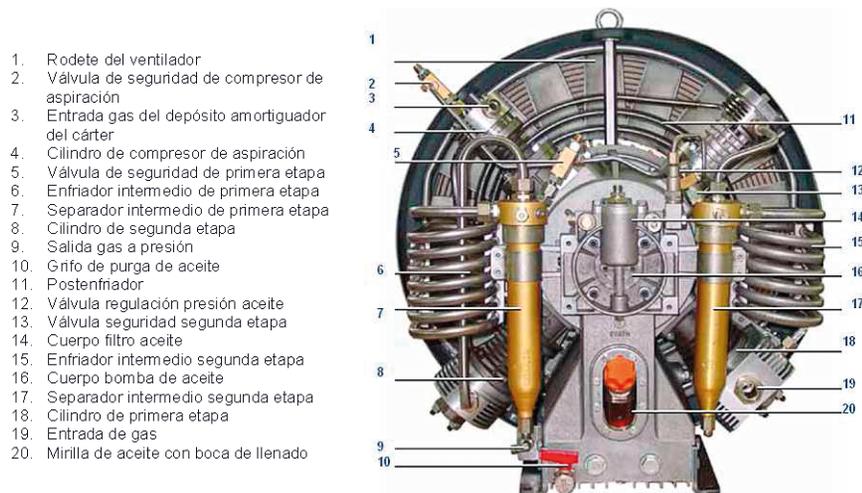


Figura 16. Principales elementos del motor del compresor



Figura 17. Vista general de los grupos de compresión

6.3 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

El sistema de almacenamiento está integrado por 7 bloques, cada uno con 28 botellas de 50 litros, es decir un total 9.800 litros a una presión máxima de 200 bares. La capacidad equivalente de almacenamiento de la planta en condiciones estándar sería de 1.725 Nm³ de hidrógeno. El volumen almacenado permite:

- ▶ Horas de funcionamiento del motogenerador consumiendo H₂ 26,4 h
- ▶ Horas de funcionamiento del electrolizador generando H₂ 28,75 h

Previo a la combustión del hidrógeno en la siguiente fase es necesaria la descompresión del mismo desde la presión de almacenamiento. Para ello se rebaja la presión en dos etapas:

- ▶ Etapa 1. Descompresión desde 200 hasta 14 bar
- ▶ Etapa 2. Descompresión desde 14 bar hasta 60 mbar



Figura 18. Sistema de almacenamiento y panel de descompresión

6.4 MOTOGENERADOR

El grupo motogenerador está formado por un motor de combustión adaptado para hidrógeno y acoplado a un generador eléctrico. Los equipos se encuentran en el interior de un contenedor habilitado al efecto, en donde el calor del motor se disipa al ambiente a través de un radiador. La potencia eléctrica de salida del grupo es de 55 kW. Las características de cada uno de estos equipos se indican en la Tabla 4. El motogenerador aspira el hidrógeno de un depósito de 1.000 litros que ya se encuentra a la presión adecuada tras su etapa anterior de descompresión.

Tabla 4. Características del grupo motogenerador

CARACTERÍSTICAS MOTOR	
Fabricante, modelo	SCANIA 12 G
Consumo de combustible [$\text{Nm}^3 \text{H}_2/\text{h}$]	70
Potencia mecánica de salida [kW]	60
Configuración, cilindros	6 en línea
Velocidad [rpm]	1.500
Volumen total cilindros [cm^3]	11.700
Ciclo	4 tiempos
Presión de suministro [mbar]	28-60
CARACTERÍSTICAS GENERADOR	
Fabricante	STAMFORD
Modelo	UCI 274 D
Tipo generador	Síncrono, 4 polos
Velocidad [rpm]	1.500
Frecuencia [Hz]	50
Potencia eléctrica [kW]	55
Tensión [V]	400



Figura 19. Vista general del grupo motogenerador

6.5 SISTEMA DE CONTROL

Cada uno de los equipos principales de la instalación posee un sistema de control propio, que a su vez se integra en un sistema de gestión centralizado. La adquisición de los datos y demás señales de la instalación se realiza mediante un controlador autónomo SNAP-PAC-S, el protocolo de comunicaciones empleado es MODBUS. Las señales procedentes del motogenerador, grupo de compresión, electrolizador, analizadores de red por cada uno de los respectivos equipos y del conjunto de la planta se integran en un servidor común.

Para la integración de las señales se ha desarrollado un SCADA específico, permitiendo disponer de variables eléctricas, caudales, presiones y funcionamiento de cada elemento. De la misma forma permite ejecutar órdenes de operación sobre los distintos elementos sin necesidad de presencia de personal.

El listado completo de las variables monitorizadas para toda la planta es el siguiente:

Tabla 5. Listado de parámetros monitorizados

ELECTROLIZADOR	
Consigna Presión Hidrógeno Salida Electrólisis	Consumo específico STACK 2
Producción total de hidrógeno por hora	Producción total de hidrógeno STACK 3
Producción total de hidrógeno STACK 1	Temperatura de celda, STACK 3
Temperatura de celda, STACK 1	Corriente eléctrica STACK 3
Corriente eléctrica STACK 1	Consumo específico SSTACK 3
Consumo específico SSTACK 1	Producción total de hidrógeno STACK 4
Producción total de hidrógeno STACK 2	Temperatura de celda, STACK 4
Temperatura de celda, STACK 2	Corriente eléctrica STACK 4
Corriente eléctrica STACK 2	Consumo específico SSTACK 4
COMPRESOR	
Presión de hidrógeno entrada	Presión Intermedia etapa 1 C1
Presión de aceite C1	Presión Intermedia etapa 2 C1
Presión de aceite C1	Presión Intermedia etapa 3 C1
Temperatura etapa final C1	Presión Intermedia etapa 1 C2
Temperatura etapa final C1	Presión Intermedia etapa 2 C2
Temperatura del agua de refrigeración C1	Presión Intermedia etapa 3 C2
Temperatura del agua de refrigeración C2	Presión Hidrógeno Salida Electrólisis
MOTOGENERADOR	
Tensión trifásica del generado	Coseno de phi
Potencia eléctrica fase 1	Frecuencia del generador
Potencia eléctrica fase 2	Caudal de Hidrógeno Entrada Motogenerador
Potencia eléctrica fase 3	
PARQUE EÓLICO SOTAVENTO	
Producción eléctrica real	Velocidad del viento real
Producción eléctrica prevista	Precio Pool
Velocidad del viento real	Precio Eólico
ANALIZADORES DE REDES DE PLANTA	
Tensión trifásica de la planta	Energía Importada por el motogenerador
Intensidad trifásica de la planta	Distorsión armónica intensidad del electrolizador
Planta Potencia	Tensión del compresor
Energía Exportada por la planta	Intensidad del compresor
Energía Importada por la planta	Potencia eléctrica del compresor
Planta THD V1 (%)	Energía Exportada por el compresor
Planta THD V2 (%)	Energía Importada por el compresor
Distorsión armónica tensión de la planta	Distorsión armónica tensión del compresor
Distorsión armónica tensión de la planta	Distorsión armónica intensidad del compresor
Distorsión armónica intensidad de la planta	Tensión del motogenerador
Tensión del electrolizador	Intensidad del motogenerador
Intensidad del electrolizador	Potencia eléctrica del motogenerador
Potencia eléctrica del electrolizador	Energía exportada por el motogenerador
Energía exportada por el electrolizador	Distorsión armónica tensión del motogenerador
Energía importada por el electrolizador	Distorsión armónica intensidad del motogenerador
Distorsión armónica tensión del electrolizador	

Todas estas variables han sido almacenadas durante la operación de la planta conforme a diferentes estrategias en una base de datos. El sistema también contiene información acerca de precios del mercado eléctrico y parámetros de operación del parque eólico. Los datos del parque son depositados por el sistema de supervisión en ficheros dentro de un servidor de archivos utilizando protocolo FTP, permitiendo la descarga y disposición de la información relevante para la interfaz gráfica. Las variables almacenadas posibilitan efectuar un análisis de los equipos, del proceso y su interacción con el parque eólico y el mercado eléctrico. El grueso del período de toma de datos abarcó desde abril hasta diciembre del año 2011.

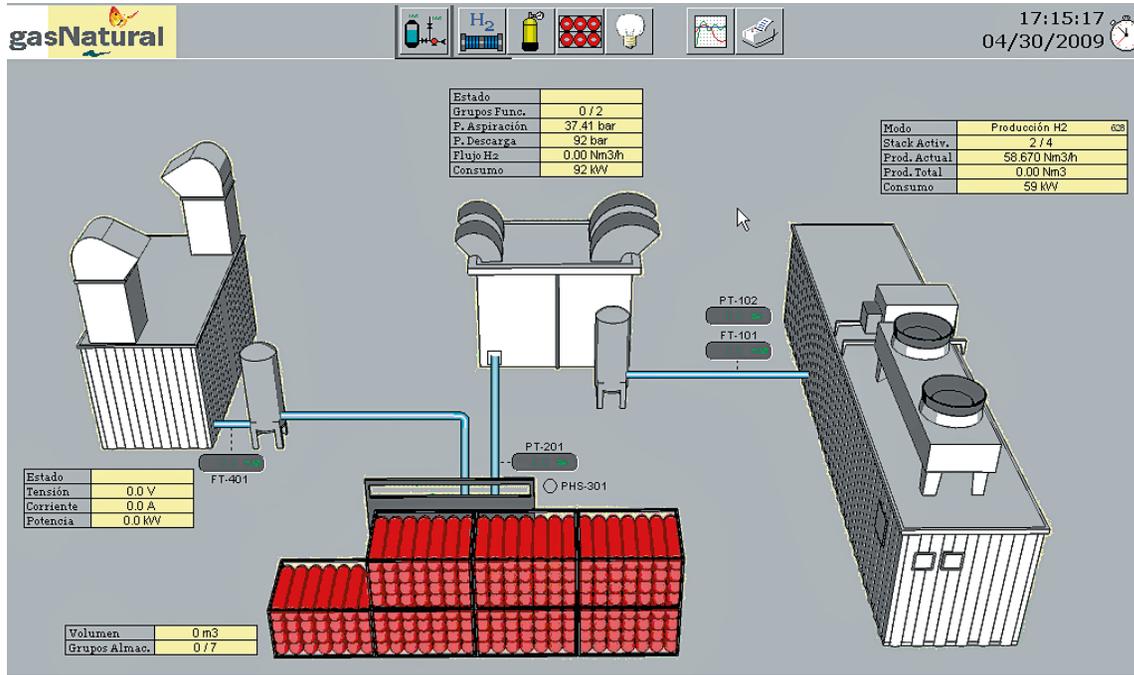
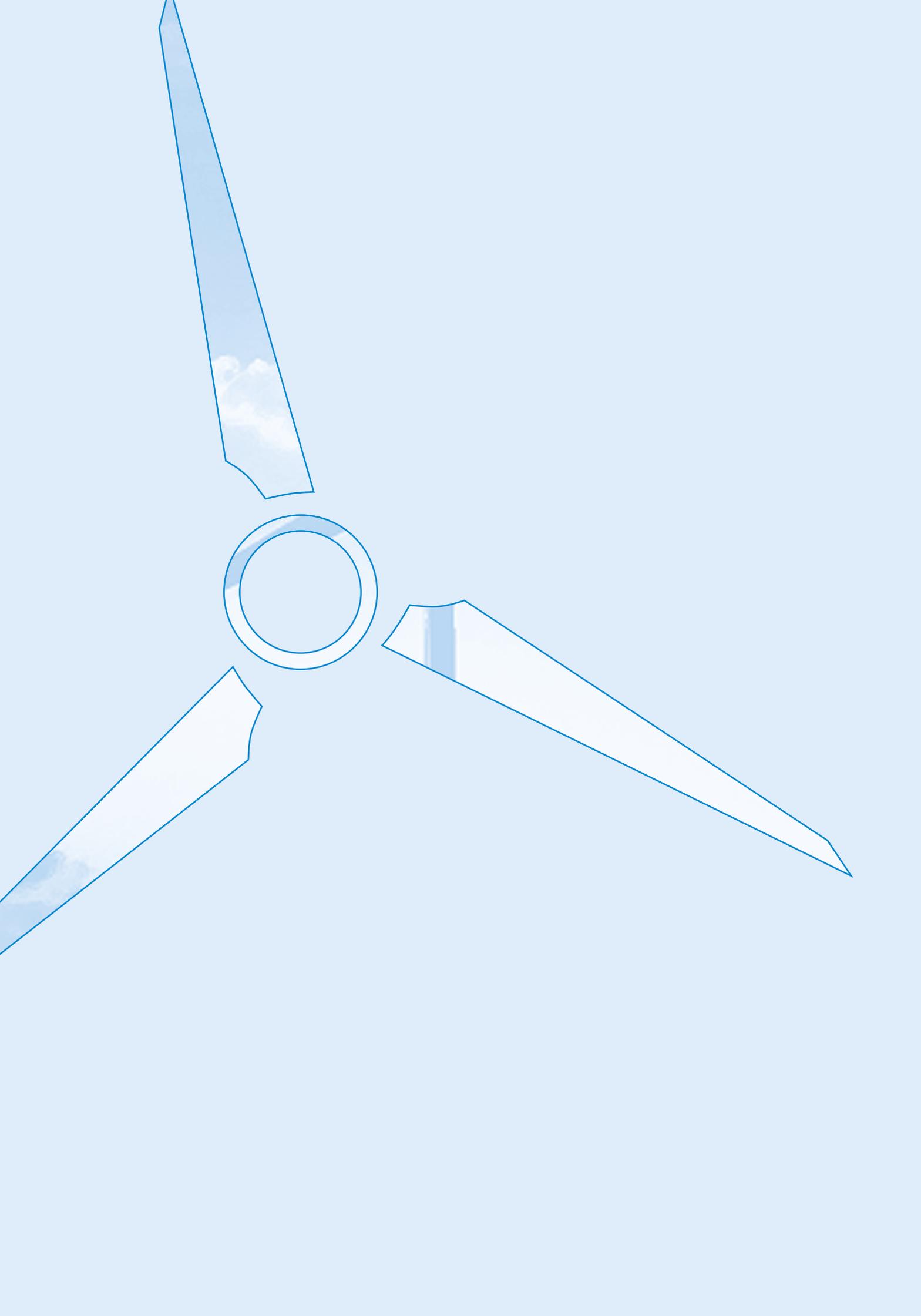


Figura 20. Pantalla del SCADA de la planta de generación y almacenamiento de energía





7. ESTRATEGIAS DE OPERACIÓN DE LA PLANTA

Empleando el hidrógeno como sistema de gestión energética en la producción de un parque eólico, se puede optar por gestionar la energía conforme a diferentes estrategias. En la planta de generación y acumulación de energía en forma de hidrógeno ubicada en el Parque Eólico Sotavento se han ensayado diferentes opciones que en cada momento optimizaban la gestión energética, particularizando y atendiendo las posibilidades del mercado o de acuerdo las exigencias puntuales. A continuación se indica brevemente en qué consiste cada de cada una de ellas.

7.1 ESTRATEGIA “PEAKING”

En esta estrategia se consume la energía eléctrica generada por el parque producida en las horas valle, generando hidrógeno y almacenándolo. Posteriormente en horas punta, cuando el consumo energético es elevado, se inyecta electricidad a la red obtenida a partir de la combustión del hidrógeno previamente almacenado.

Esta estrategia de gestión será más adecuada cuanto mayor sea la diferencia entre el precio en hora punta y valle, esta diferencia depende las particularidades de cada mercado eléctrico.

7.2 ESTRATEGIA “BALANCING”

Esta opción de gestión consiste básicamente en minimizar las desviaciones entre la energía prevista y la energía real generada por el parque. Desde el Real Decreto 436/2007 se obliga a las instalaciones eólicas a efectuar una predicción de la producción energética, penalizándose económicamente los desvíos. Esta estrategia permitiría adecuar a corto plazo la inyección de energía del parque a la red respecto a la predicción; pudiendo la planta absorber y acumular energía o bien entregarla según las necesidades.

Recientes cambios en la normativa acontecidos a inicios de 2013 han modificado sustancialmente el sistema retributivo de las energías en régimen especial. Para el caso de la energía de procedencia eólica se han eliminado las primas, dejando como mejor opción económica actual la tarifa regulada. Con anterioridad a estos cambios en la legislación, esta opción de venta no era la elegida mayoritariamente por los productores eólicos, ya que los beneficios económicos eran más elevados si se optaba por la venta en el mercado a través de un agente. El representante solía englobar a varios productores, encargándose de la gestión en los desvíos e intentando compensarlos. Ante estas circunstancias, el empleo de una planta de almacenamiento de energía que permita gestionar los desvíos de varios productores, maximizando su beneficio económico puede resultar interesante.

7.3 ESTRATEGIA DE NIVELACIÓN DE CARGA

La estrategia de nivelación de carga, a nivel de parque eólico o a nivel de subestaciones (para un grupo local de parques eólicos), consiste en la gestión de la energía eólica de acuerdo con el perfil de la demanda eléctrica en ese punto. Cuando la demanda es baja y hay un exceso de producción eólica, se produce hidrógeno y se almacena. Cuando la demanda es alta, se cubre mediante producción eólica e hidrógeno si fuese necesario.

Este tipo de estrategia cobra importancia en sistemas de generación distribuida basados principalmente en energías renovables y conectadas a redes de distribución con cargas máximas en el orden de MW. La nivelación de carga, en este tipo de sistemas, podría ser descrita como una gestión de la generación eólica y de la demanda de los electrolizadores en función de su distribución y consumo. Estos equipos estarían distribuidos en puntos estratégicos y absorberían la energía excedentaria en generar hidrógeno, posteriormente el gas generado podría ser empleado en cubrir las necesidades locales, tales como: combustible de automoción, fuente primaria de energía en cogeneraciones del sector residencial, aplicaciones industriales, enriquecimiento del gas natural, etc.

7.4 ESTRATEGIA DE AUMENTO DEL FACTOR DE CAPACIDAD

El aumento de capacidad de evacuación de la red no es estrictamente una estrategia de gestión energética en sí misma sino que trata de solventar la problemática del aumento de la potencia eólica instalada en algunos nodos de la red, que podría dar lugar problemas de evacuación. Esta estrategia de operación tiene sentido en parques antiguos que tienen aerogeneradores de bajas potencias y algunos de los mejores emplazamientos están subexplotados.

En España, el criterio aplicado por REE, limita la potencia nominal de los parques eólicos al 5% potencia de cortocircuito en los nudos de conexión. En las ocasiones que la generación exceda este límite el parque eólico recibirá la consigna de reducir la energía inyectada, perdiéndose esta generación. La energía podría derivarse hacia un electrolizador que produjese hidrógeno, almacenarlo y reconvertirlo en electricidad en los períodos en los que no se supere las restricciones.

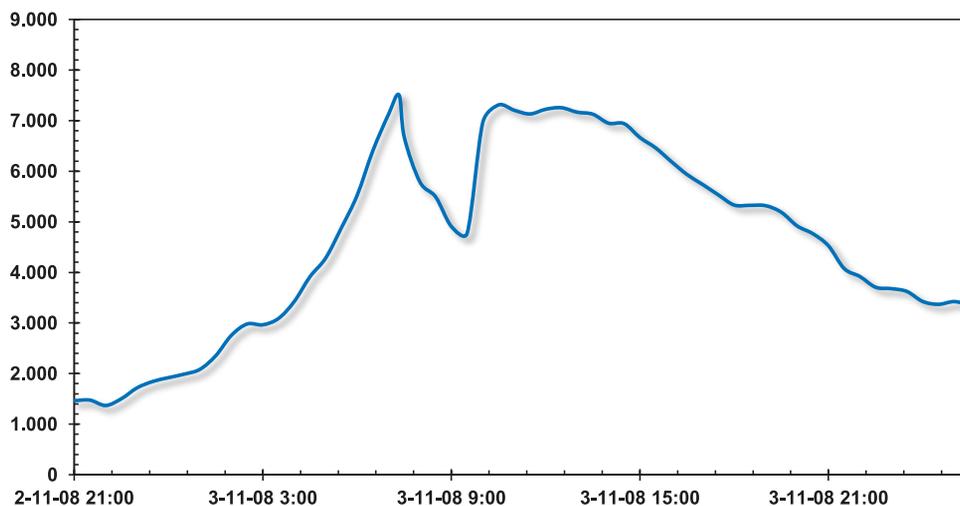


Figura 21. Ejemplo de las restricciones aplicadas a la energía de origen eólico (02/11/2008)⁹

⁹ Red Eléctrica Española <http://www.ree.es>



8. RESULTADOS Y CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS

En este apartado se resumen los resultados de caracterización, los consumos específicos y la eficiencia del proceso obtenida tras el estudio de los datos experimentales, analizando cada etapa y equipo en condiciones nominales de operación.

8.1 ELECTROLIZADOR

El electrolizador está diseñado para proporcionar un caudal constante de hidrógeno. Tradicionalmente las industrias que lo demandan poseen un consumo estacionario, estable en el tiempo. El equipo puede emplear de modo diferenciado cada uno de los cuatro stack's de celdas, modulando desde el 40% hasta el 100% de su potencia nominal. En función del stack operativo, el caudal varía del siguiente modo:

- ▶ 1 Stack → 6 - 15 Nm³/h H₂
- ▶ 2 Stack's → 12 - 30 Nm³/h H₂
- ▶ 3 Stack's → 18 - 45 Nm³/h H₂
- ▶ 4 Stack's → 24 - 60 Nm³/h H₂

El objetivo de la planta es la gestión de la energía eléctrica de origen renovable, por lo que la estrategia de operación ha de estar basada en el empleo de la misma. El empleo de energía variable de entrada no se adapta al diseño actual de los equipos electrolizadores, presentándose en este sentido dificultades en la instalación. Los parámetros experimentales para el comportamiento de cada uno de los cuatro stacks, operando a carga nominal se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Características por stack de celdas electrolíticas

	STACK 1	STACK 2	STACK 3	STACK 4
Producción de H ₂ (Nm ³ /h)	15,1	15,1	15,1	15,1
Temperatura media (°C)	71,7	72,3	70,6	70,7
Tensión (V)	156,8	159,0	153,0	154,5
Intensidad (A)	429,7	429,4	430,5	429,5
Consumo eléctrico (kWh)	67,4	68,3	65,9	66,4
Consumo específico (kWh/Nm ³)	4,47	4,53	4,36	4,40

El fabricante indica un consumo específico por stack de 4,2 kWh por cada metro cúbico de hidrógeno generado en condiciones estándar para gases (10⁵ kPa, 0°C). Los resultados experimentales han proporcionado valores entre un 4 - 8% superiores.

Desde el punto de vista termodinámico, la energía potencialmente disponible tras el proceso de electrolisis que puede obtenerse a partir de la combustión completa del hidrógeno con oxígeno en las condiciones de temperatura 25°C y presión 10⁵ kPa, depende si el producto, en este caso únicamente agua, se produce en forma de vapor o líquida. Estos valores son conocidos como entalpía estándar de formación, o también más comúnmente como poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI), y se corresponden con la reacción [1] y [2] respectivamente.



Tradicionalmente en EEUU se emplea el PCS para referenciar la eficiencia, por el contrario en Europa suele emplearse el PCI. En este documento se expondrán los valores obtenidos de acuerdo a ambos criterios.

La densidad del hidrógeno en condiciones estándar¹⁰ es de:

$$\rho_{H_2} = 44,004 \text{ mol } H_2/m^3$$

De este modo los poderes caloríficos pueden reescribirse como, PCS = 3,605 kWh/Nm³ y PCI = 3,053 kWh/Nm³. La eficiencia (η) se define mediante la expresión inferior:

$$\eta = \frac{\text{Energía útil}}{\text{Energía invertida}}$$

De acuerdo a la Tabla 6 y a expresión anterior, la eficiencia por stack sería:

Tabla 7. Eficiencia de por stack, referenciado a PCI y PCS

	STACK 1	STACK 2	STACK 3	STACK 4
PCS (%)	78,2	77,2	80,0	79,4
PCI (%)	66,2	65,3	67,7	67,2

EFICIENCIA DE LA TENSIÓN ELECTROLÍTICA EN LA CELDA

Durante la combustión del hidrógeno la energía es liberada al ambiente únicamente en forma de calor (cambio de entalpía). En cambio, en el proceso electrolítico, reacción química idéntica pero en sentido inverso, se consume energía calorífica y trabajo eléctrico. En la ruptura de un mol de agua en condiciones estándar se requieren de 285,6 kJ, de los cuales 237,2 kJ han de aportarse en forma de electricidad y 48,6 kJ en forma de calor. El parámetro termodinámico que nos indica el trabajo eléctrico que se ha de realizar sobre el sistema para llevar a cabo la disociación es la energía libre de Gibbs. En la práctica, el electrolizador aporta toda la energía. En los de tipo alcalino el suministro de calor se consigue gracias a la propia resistencia que ofrecen los iones al flujo de la corriente eléctrica (efecto Joule).

El potencial electroquímico por celda que suministraría esta energía mínima de activación teórica (eléctrica + calorífica) a una temperatura de operación de la celda de 72°C sería $E_{min} = 1,479 \text{ V}$, ligeramente inferior al potencial estándar del agua ($E_0 = 1,481 \text{ V}$).

La eficiencia de la tensión electrolítica obtenida para cada stack teniendo en cuenta lo anterior y los datos de la Tabla 6 se indica a continuación:

Tabla 8. Eficiencia de la tensión electrolítica

	STACK 1	STACK 2	STACK 3	STACK 4
E real (V)	1,742	1,767	1,700	1,717
E _{min} /E _{real} (%)	84,90	83,70	87,0	86,2

Los ensayos nos indican que la intensidad de corriente a través del stack es extremadamente sensible a la tensión, ajustándose este comportamiento a una dependencia lineal entre ambas variables en el intervalo de intensidades de 150-450 A. Si asumimos que todas las celdas que componen el stack son iguales, y dado que eléctricamente están conectadas en serie tenemos:

¹⁰ <http://hydrogen.pnl.gov/cocoon/morf/hydrogen>

$$i_{\text{stack}} = i_{\text{celda}}$$

$$\frac{V_{\text{stack}}}{n^{\circ} \text{ celdas}} = V_{\text{celda}}$$

La expresión que describe el comportamiento experimental para una celda en base a las mediciones de los stack's es la siguiente:

$$V = k_1 i + k_2 \quad [\text{Ec.1}]$$

En donde:

- ▶ V Tensión del stack [V]
- ▶ i Intensidad de stack [A]
- ▶ k1 $563 \cdot 10^{-6}$ [V/A]
- ▶ k2 1,507 [V]

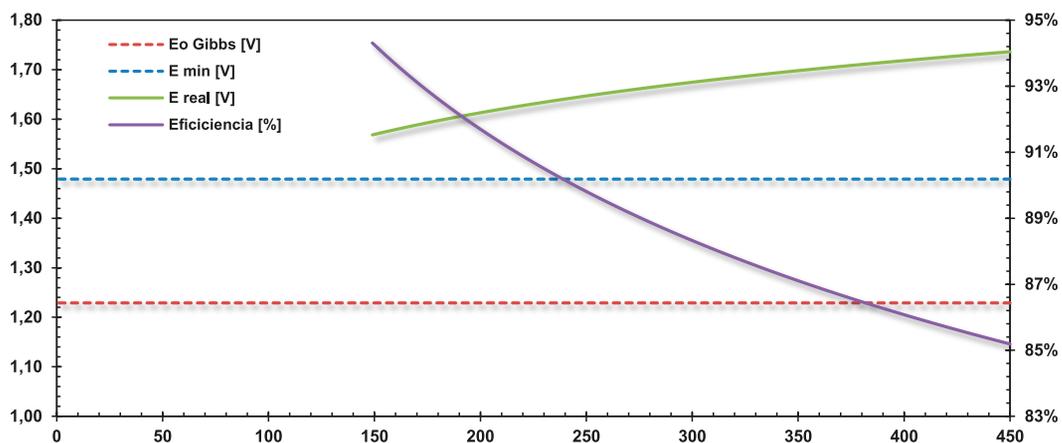


Figura 22. Tensión-Intensidad y eficiencia en celda electrolítica

En la Figura 22 se representa la tensión frente a la intensidad para la celda electrolítica de acuerdo a Ec.1. También se indica el potencial electroquímico de activación para la reacción de electrolisis ($E_{\text{min}} = 1,479$ V), y el potencial asociado al mínimo trabajo eléctrico requerido (E_{oGibbs} , relacionado con la energía libre de Gibbs). La diferencia entre E_{real} y E_{min} es debida a las pérdidas por efecto Joule y a fenómenos de sobrepotencial que dificultan el proceso que tiene lugar en los electrodos. En la Figura se observa además que esta barrera energética es proporcional a la intensidad, menor corriente implica menor tensión y por tanto mayor eficiencia, conforme aumenta la intensidad se incrementa también la tensión disminuyendo la eficiencia.

En cuanto al consumo específico, resaltar que los valores de la Tabla 6 se refieren exclusivamente al de stack, no teniendo en cuenta el resto de consumos eléctricos de los equipos auxiliares:

- ▶ Sistemas de refrigeración del electrolito y del gas
- ▶ Etapas de secado y desoxigenación
- ▶ Sistema de osmosis inversa
- ▶ Soplante y sistema de control

Contemplando todos estos consumos eléctricos, el consumo específico medio de la etapa electrolización sería de 5,2 kWh/Nm³.

8.2 COMPRESOR-ELECTROLIZADOR

Como ya hemos comentado, la presión de operación del electrolizador está en torno a 10 bar, y el equipo es capaz de modular su caudal entre los 24 - 60 Nm³/h H₂. Para la configuración de control de la planta, el electrolizador

modifica, en su rango de operación, el caudal para adecuar su generación al consumo del compresor y mantener la presión estabilizada. Entre ambos equipos se ha dispuesto un depósito de 1.000 litros que contribuye a mejorar este comportamiento.

El caudal de aspiración del compresor depende de si operan uno o los dos grupos de compresión y de la presión de succión, a mayor presión de succión mayor caudal de hidrógeno comprimido. Es decir, existe una dependencia entre la presión de succión del compresor y la energía eléctrica disponible para electrolisis. De este modo, en la operación entre electrolizador y compresor pueden presentarse los siguientes casos:

CONSUMO DEL COMPRESOR > PRODUCCIÓN ELECTROLIZADOR

En estas circunstancias el electrolizador se aislará del conjunto cuando la presión descienda de 7,5 bar en el depósito de 1.000 litros, cerrándose la válvula de suministro y pasando a generar hidrógeno a la mínima capacidad (40% del caudal nominal). El compresor continuará trabajando hasta que la presión del buffer descienda a 2 bar, efectuando entonces una parada por baja presión de entrada y requiriendo de un reinicio manual del equipo. Esta circunstancia dificulta la operación automática del proceso.

CONSUMO DEL COMPRESOR < PRODUCCIÓN ELECTROLIZADOR

Cuando ocurre esta situación la presión en el electrolizador sobrepasa la de operación (10 bar), el electrolizador interpreta este incremento como la inexistencia de consumo de hidrógeno, cierra la válvula de suministro y pasa a producir el caudal mínimo, venteando el hidrógeno generado con las consecuentes pérdidas energéticas.

CONSUMO DEL COMPRESOR = PRODUCCIÓN ELECTROLIZADOR

Bajo estas circunstancias el conjunto es estable. El electrolizador es capaz de trabajar en el rango de 7,5-9,5 bares. Esta condición, el depósito de 1.000 l y la modulación del electrolizador permiten operar ambos equipos evitando el venteo de hidrógeno y el reinicio manual del compresor.

De acuerdo con lo expuesto, las combinaciones de stack's y grupos de compresión que permitirían la operación estable de la planta serían:

- ▶ 2 Stack's + 1 Grupo de compresión
- ▶ 3 Stack's + 1 Grupo de compresión
- ▶ 3 Stack's + 2 Grupo de compresión
- ▶ 4 Stack's + 1 Grupo de compresión
- ▶ 4 Stack's + 2 Grupo de compresión

En la Figura 23 se refleja de modo conjunto datos de producción del electrolizador, presiones en el electrolizador, buffer y de aspiración del compresor, número de stack's operativos y caudal entrada al compresor. Se diferencian 3 regiones, correspondiéndose cada una a las siguientes combinaciones de stack's y grupos de compresión:

- ▶ [1] 2 Stack's + 1 Grupo de compresión
- ▶ [2] 3 Stack's + 1 Grupo de compresión
- ▶ [3] 4 Stack's + 2 Grupos de compresión

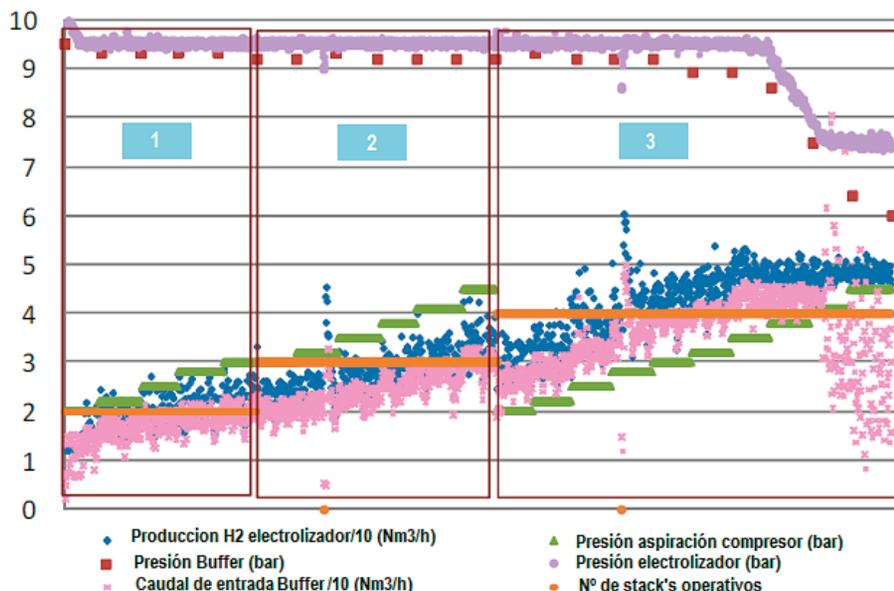


Figura 23. Operación del electrolizador y compresor bajo distintas consignas

En condiciones nominales, cada grupo de compresión presenta un consumo específico de 0,50 kWh/Nm³ de hidrógeno, que para el grupo compresor-electrolizador supondrían (5,2 + 0,5) kWh/Nm³.

8.3 MOTOGENERADOR

El motogenerador, de Continental Energy Systems, es un motor diesel adaptado para hidrógeno, el cual es aspirado tras su descompresión. El consumo del equipo es de 70 Nm³/h a máxima carga. La potencia mecánica de salida del motor (de entrada al generador eléctrico) es modulable desde aproximadamente el 50% de la potencia nominal.

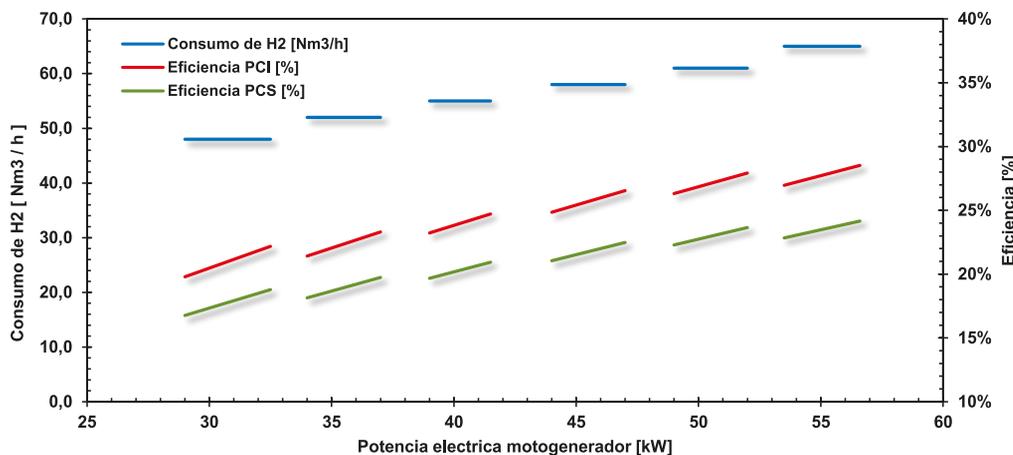


Figura 24. Potencia eléctrica y eficiencia del motogenerador frente al consumo de H₂ (Nm³/h)

En la Figura 24 se representa la potencia eléctrica entregada por el grupo para diferentes consumos de hidrógeno. También se refleja la eficiencia, tanto referenciada al PCI como al PCS, observándose una disminución de la misma trabajando a cargas parciales, y alcanzando el máximo con el equipo en condiciones nominales.

8.4 RESUMEN DE EQUIPOS Y ETAPAS

En este apartado se resume lo expuesto en los tres anteriores, proporcionando una visión global del comportamiento de la planta, de cada etapa y por equipo.

En las Figuras 25 - 26 se muestra de modo gráfico el balance de energía del proceso y del hidrógeno, referenciándose las eficiencias al PCS y PCI, en donde:

- ▶ $W_{\text{CONSUMIDO}}$ Energía en forma de trabajo eléctrico aportado
- ▶ Q_{PERDIDAS} Energía térmica cedida al ambiente

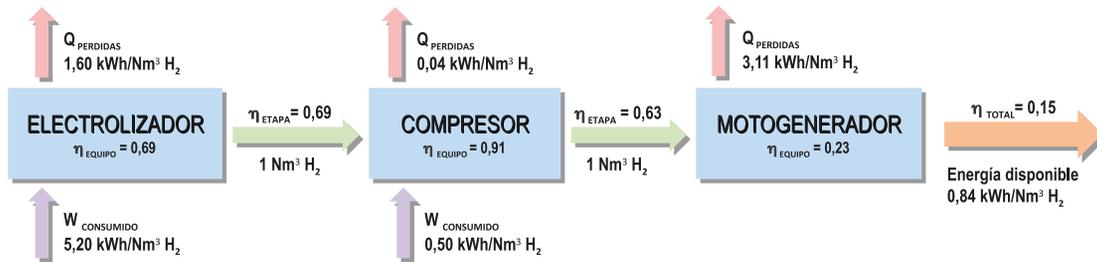


Figura 25. Balance energético del proceso, respecto del PCS del hidrógeno ($T=0^\circ\text{C}$, $P=10^5 \text{ kPa}$)

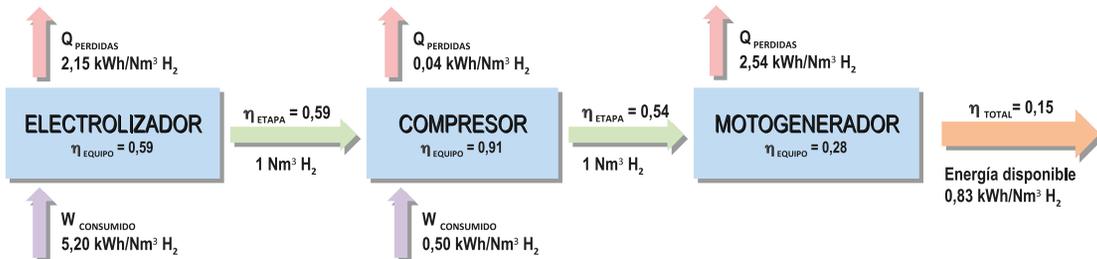


Figura 26. Balance energético del proceso, respecto del PCI del hidrógeno ($T=0^\circ\text{C}$, $P=10^5 \text{ kPa}$)



9. EXPERIENCIA Y CONCLUSIONES DEL PROYECTO

La experiencia y conocimientos adquiridos en el proyecto nos permiten concluir lo siguiente

- ▶ Necesidad de desarrollar una normativa específica que regule este tipo de instalaciones, así como establecer un protocolo para los trámites administrativos. El proceso de obtención de la licencia de explotación ha sido muy dilatado por la inexperiencia del sector y de la propia administración.
- ▶ La normativa actual no contempla la generación eléctrica mediante el empleo de hidrógeno, dificultando la venta en el mercado de la electricidad con esta procedencia.
- ▶ El objetivo de la instalación era la gestión de la energía eléctrica de origen renovable. Esta filosofía de uso de energía variable de entrada no se adapta al diseño actual de los equipos electrolizadores, los cuales están destinados a su empleo industrial en circunstancias estacionarias.
- ▶ La instalación de un depósito de mayor volumen entre el electrolizador y el compresor que desacoplase el funcionamiento de ambos solucionaría buena parte de la problemática encontrada en el proyecto. Se eliminaría la dependencia existente entre la presión de succión del compresor y la energía disponible para electrolisis.
- ▶ Los fabricantes de electrolizadores y compresores no plantean el diseño de sus equipos de modo que se facilite su integración y operación en plantas de estas características.
- ▶ El problema de armónicos detectado a posteriori, debido al efecto del electrolizador, dilató la duración del proyecto y obligo a la instalación de un transformador específico para la instalación.
- ▶ Es necesario desarrollar y mejorar la tecnología y fiabilidad de los equipos.
- ▶ La eficiencia global del proceso es baja, aproximadamente del 15%. Este valor no tiene en cuenta los consumos en espera derivados de mantener la planta operativa cuando no existe generación o acumulación, consumos que reducirían significativamente el valor anterior. En este aspecto existe margen de mejora por parte de los fabricantes.
- ▶ El empleo de una pila de combustible del tipo alcalina incrementaría la eficiencia. Sin embargo, la tecnología está en un estado inicial de desarrollo y los costes son muy elevados. La eficiencia de los equipos actuales está en torno al 50%, pudiendo alcanzarse el 70% (referenciado al max. trabajo eléctrico realizable por el sistema, E_{Gibbs}), y necesitan de un inversor electrónico ($\eta = 0,92$). Para estos valores, la eficiencia del proceso sería aproximadamente:

Tabla 9. Eficiencias de proceso global, motogenerador vs pila combustible

CONFIGURACIÓN	$\eta_{PC/PCS}$
Motogenerador + Compresor + Electrolizador	14,8
Pila de combustible ($\eta = 0,50$) + Inversor + Compresor + Electrolizador	23,4
Pila de combustible ($\eta = 0,70$) + Inversor + Compresor + Electrolizador	32,8

En general los sistemas de acumulación presentan márgenes de mejora, tanto tecnológicos como económicos. De las estrategias ensayadas, la más interesante desde la perspectiva de los sistemas de almacenamiento energético es la referenciada como peaking. En base a los resultados de caracterización de la planta y operando con esta estrategia, se ha evaluado su comportamiento durante un mes (Diciembre de 2012). El resultado permite ubicar el estado de la tecnología en las circunstancias actuales y bajo las siguientes hipótesis:

- ▶ No se considera la inversión inicial en los equipos, ingeniería, obra civil, etc.
- ▶ No se contempla el coste del mantenimiento
- ▶ El consumo en espera de la planta no se tiene en cuenta
- ▶ La energía procedente de la planta no posee ningún incentivo económico
- ▶ Disponibilidad total de energía eléctrica de procedencia eólica durante todo el mes

Bajo estas condiciones, la acumulación será factible en una situación de mercado A respecto de una condición B siempre que se satisfaga la expresión:

$$E PM_A \leq E PM_B \eta$$

En donde:

- ▶ E Energía puesta en juego
- ▶ PM_A Precio de mercado en consumo de energía, generación de hidrógeno
- ▶ PM_B Precio de mercado en venta de energía, consumo hidrógeno
- ▶ η Eficiencia global del proceso

Las siguientes imágenes ayudan a comprender como se comportaría una instalación de estas características. En la Figura 27 se representa cada precio de mercado (energía consumida) frente al precio mínimo a partir del cual sería interesante la acumulación y posterior venta. La línea punteada indica una aproximación del límite tecnológico si en lugar de un motogenerador se emplease una pila de combustible alcalina ($\eta = 0,70$) y un inversor continua/alterna ($\eta = 0,92$), para una eficiencia global de 32,8% en todo el proceso.

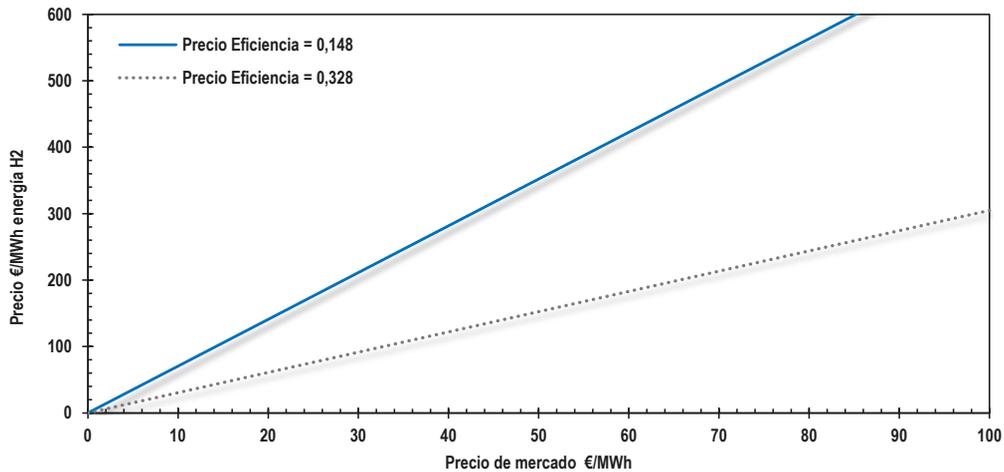


Figura 27. Precio de mercado vs precio energía procedente hidrógeno

En la Figura 28 se muestra en azul el precio del mercado registrado en diciembre en orden descendente. En rojo y en orden ascendente el precio €/MWh de la energía procedente de hidrógeno como función del precio de mercado y de la eficiencia ($PM_A / \eta = PM_B$) que igualaría el coste de la energía consumida. La intersección de ambas líneas marca el punto a la izquierda del cual sería rentable la acumulación con las hipótesis anteriores. Para el mes analizado, un 8% de los valores del precio de mercado permitiría la acumulación. Si la eficiencia fuese del 0,328 este valor se incrementaría hasta el 17% de los casos, línea punteada.

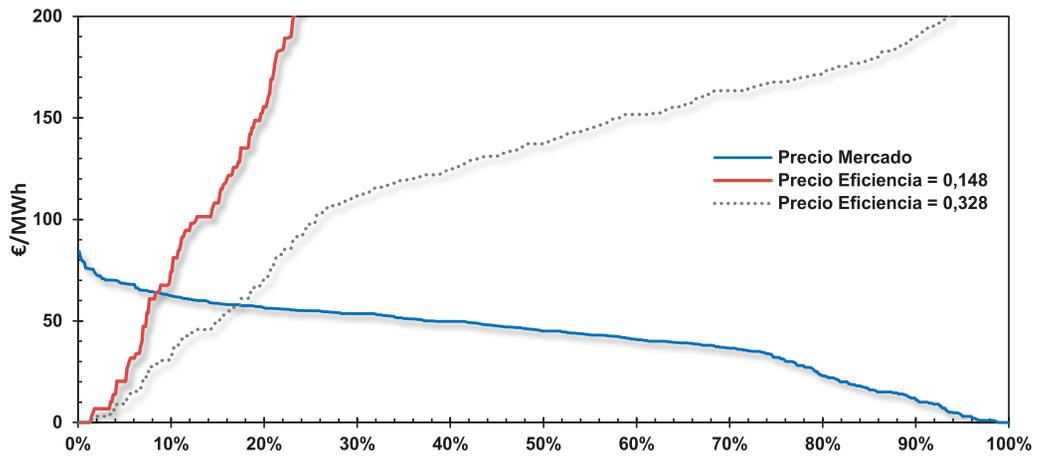
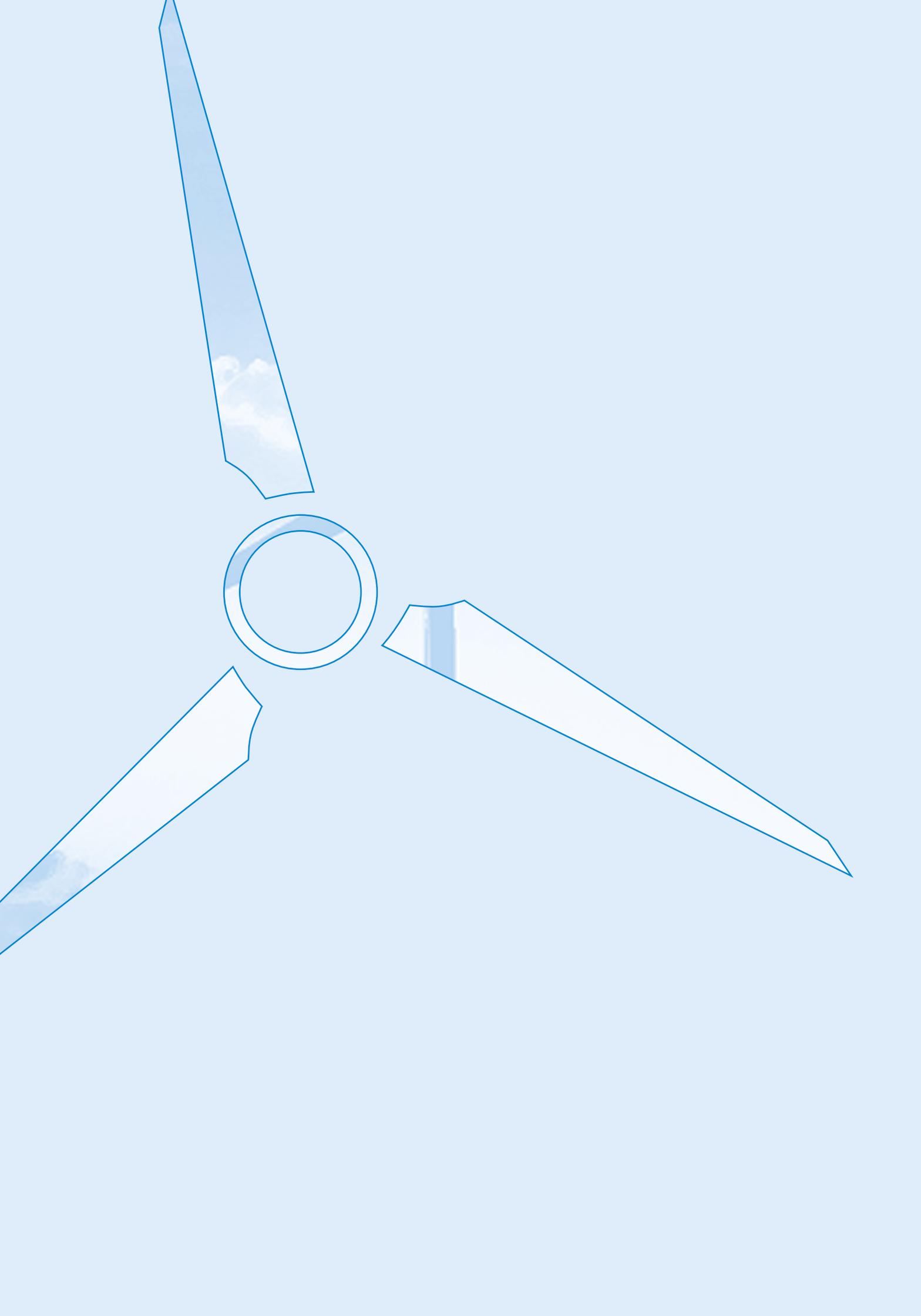


Figura 28. Precio de mercado vs precio energía procedente hidrógeno para diciembre 2012





10. DIVULGACIÓN Y DIFUSIÓN

Por último, realizaremos un breve recorrido a través de las actividades de difusión y promoción llevadas a cabo desde el área Educativa Divulgativa del Parque Eólico Experimental Sotavento.

Estas actividades se asientan sobre las mismas premisas en las que se apoya el Plan Educativo-Divulgativo desarrollado desde el año 2002. El Plan trata de dar a conocer el mundo energético al público en general, está basado en la practicidad de las experiencias, en la significatividad de los contenidos, en el aprendizaje lúdico aunque no exento de rigurosidad científica, en el fomento del pensamiento crítico y en la autoevaluación constante. Las principales acciones llevadas a cabo pueden resumirse en:

- ▶ Diseño y elaboración de soportes y materiales didácticos con el fin de facilitar la comprensión del proyecto al público en general: maquetas, paneles interpretativos, aplicaciones, esquemas, etc.
- ▶ Organización de eventos de difusión específicos: seminarios, jornadas de puertas abiertas, presentaciones, etc.

10.1 SOPORTES Y MEDIOS MATERIALES DIDÁCTICOS

Referenciamos en este punto algunos medios que permiten interpretar, divulgar y facilitar la comprensión del proyecto. Han sido varios y elaborados específicamente. En ellos se muestra el proyecto desde distintas ópticas de aproximación. El material incluye esquemas, gráficos, publicaciones, paneles, maquetas, etc. La Figura 29 sirve de ejemplo de alguno de ellos.

Funcionamento dos electrolizadores

Proxecto de Xeración de Hidróxeno
Parque Eólico Experimental Sotavento

gasNatural fenosa

CREACIÓN SOTAVENTO GALICIA

XUNTA DE GALICIA
CONSELLERÍA DE ECONOMÍA E INDUSTRIA

1 Aporte de enerxía

• Os catro stacks de celas electrolíticas consumen como máximo 204 kWh de enerxía procedente dos transformadores.

2 Aporte de auga

• Realízase un proceso de purificación, que permite eliminar elementos presentes na auga que podían danar as celas electrolíticas.

3 Electrolito

• Utilízase unha mestura de auga e potasio hidróxido ao 30% para incrementar a condutividade da auga.

4 Celas electrolíticas

• No seu interior prodúcese a electrolise, e teñen un rendemento superior ao 75%.

5 Separadores de gas

• Contéñen o Hidróxeno e o Oxíxeno procedentes dos stacks.

6 Sistemas de refrixeración

• Existen dous sistemas de refrixeración independentes para o gas (6) e o electrolito (7). O seu obxectivo é manter estable a temperatura do proceso.

7 Saída do Hidróxeno

• Unha vez separado, o hidróxeno gase para un proceso de purificación que elimina a humidade e os restos de O₂.

• Posteriormente é almacenado en botellas para volver a transformarse en electricidade cando seña necesario.

Electrólise da auga Este proceso consiste en separar a molécula de auga nos seus compoñentes, Hidróxeno e Oxíxeno, mediante unha corrente eléctrica.

$$H_2O + \text{enerxía} \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$$

Figura 29. Material didáctico creado para a divulgación del proyecto

MAQUETAS Y TALLERES

La divulgación del hidrógeno y de sus posibilidades se ha realizado, entre otros, mediante talleres y experiencias prácticas, promocionando además el proyecto entre todos los segmentos de población. De este modo se han elaborado maquetas, experimentos de electrólisis y pila de combustible que facilitasen su comprensión, algunos de los cuales se muestran en la Figura 30.



Figura 30. Maquetas y experiencias divulgativas del proyecto

APLICACIONES Y SIMULACIONES INFORMÁTICAS

Aprovechando la experiencia acumulada en la elaboración de este tipo de herramientas, y con la financiación de Gas Natural Fenosa, el Parque Eólico Sotavento ha creado una aplicación que permite a los usuarios conocer el funcionamiento del proyecto desde distintas ópticas de aproximación. Su funcionalidad y flexibilidad hace posible además su empleo en grupos con diferentes edades y formación. Permite conocer el funcionamiento de la planta y subsistemas, procesos, reacciones químicas y lógicas de funcionamiento. La aplicación también simula la operación de la planta a nivel divulgativo en función de la demanda eléctrica y la producción de la eólica.

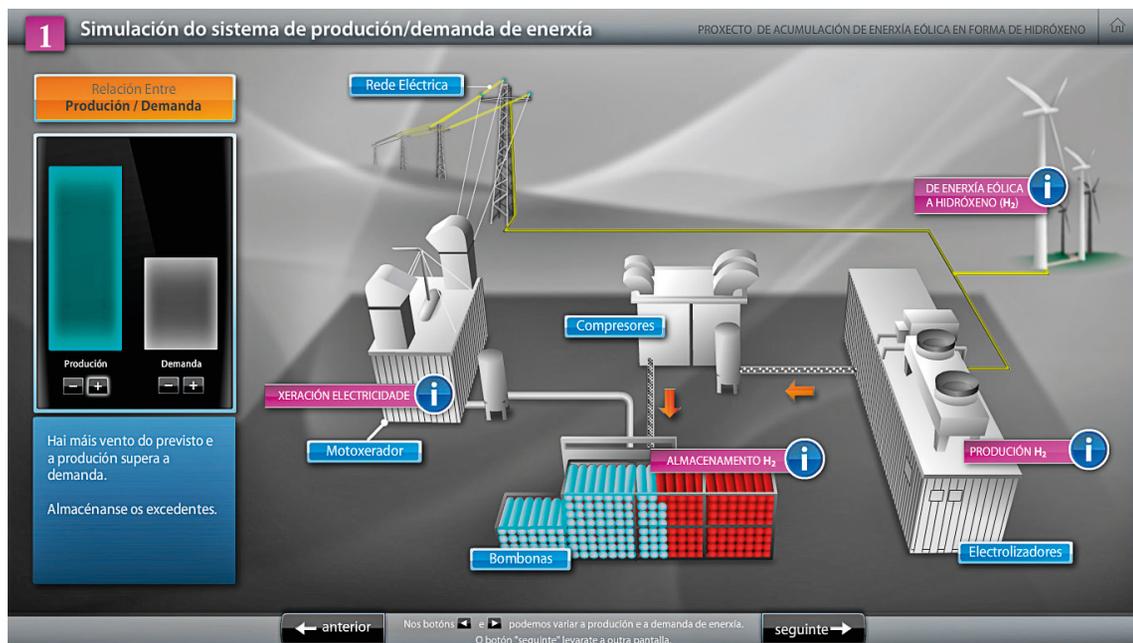


Figura 31. Aplicación divulgativa del proyecto desarrollada por el Parque Eólico Sotavento

10.2 ORGANIZACIÓN DE EVENTOS Y DIFUSIÓN

Han sido varias las actividades de difusión y formación llevadas a cabo en torno a este proyecto. Entre ellas cabe destacar siguientes:

SEMINARIO DE H₂ Y GESTIÓN ENERGÉTICA

El principal objetivo del seminario era poner en valor el sistema de generación y acumulación de energía en forma de hidrógeno a través de una jornada que dibujaba el escenario de origen del proyecto y sus capacidades. Además, se pretendía dar a conocer la problemática de la producción renovable y su gestión, así como las distintas posibilidades de uso del hidrógeno como vector energético



Figura 32. Seminario de H₂ desarrollado en el Parque Eólico Sotavento

A la cita acudieron profesionales y expertos de diferentes ámbitos, las ponencias y ponentes fueron los siguientes:

- ▶ Sistema de generación y almacenamiento de energía en forma de hidrógeno, experiencia de Sotavento. Gas Natural Fenosa
- ▶ Energías renovables en España: situación y previsiones futuras. Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía
- ▶ Gestión para la integración segura de la generación eólica en la red de transporte de energía eléctrica. Red Eléctrica de España
- ▶ Problemática del almacenamiento energético a gran escala y posibles soluciones. Centro Nacional de Energías Renovables
- ▶ Integración de la eólica e hidrógeno. Fundación para el desarrollo de nuevas tecnologías del hidrógeno en Aragón
- ▶ Otras aplicaciones del hidrógeno y futuros escenarios. Centro Nacional del Hidrógeno

OTROS EVENTOS

Han sido numerosas las actuaciones realizadas con el objetivo de dar a conocer este proyecto. Incluimos a continuación algunas de las más significativas:

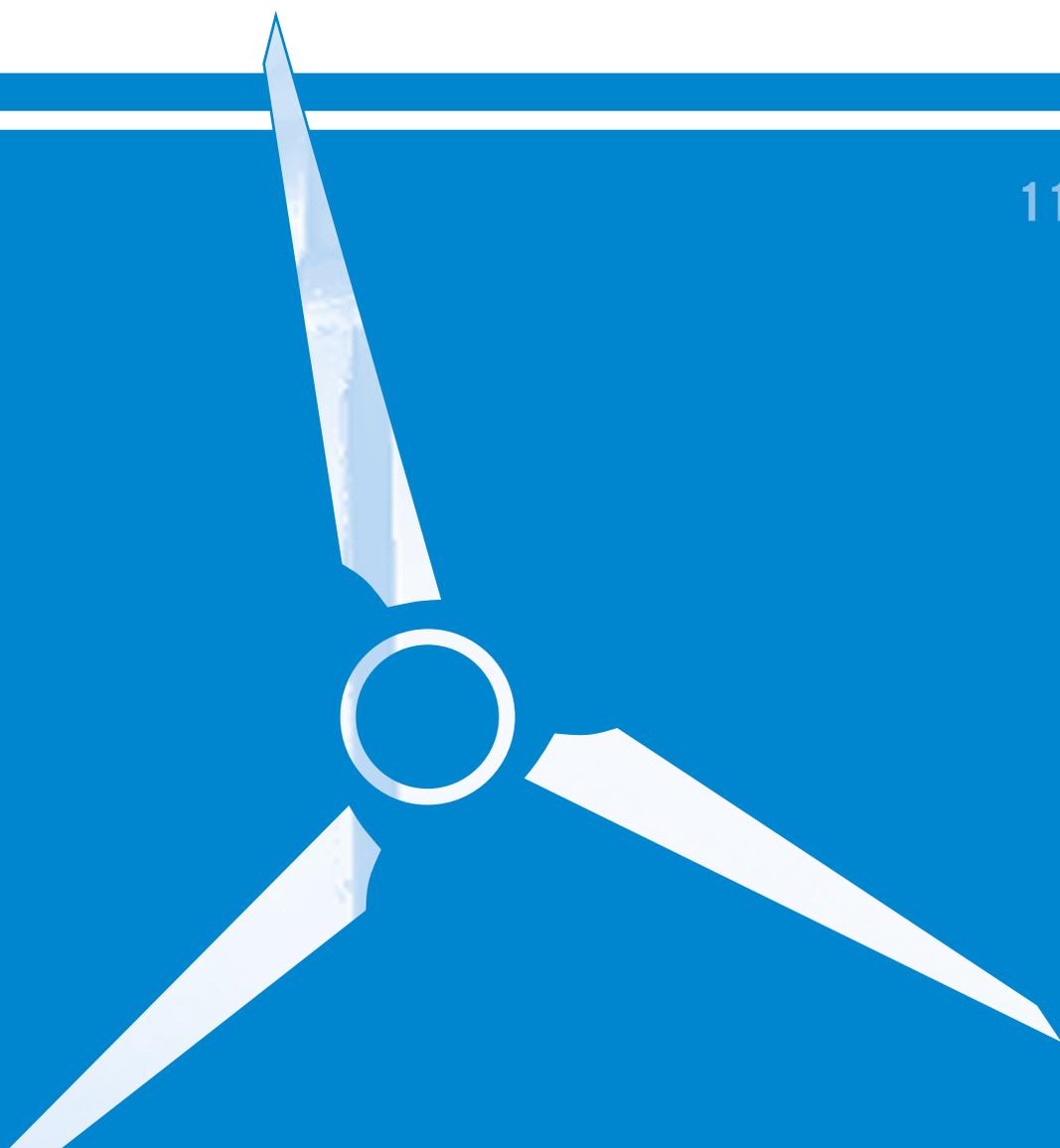
- ▶ Jornadas de puertas abiertas, los visitantes pudieron observar los novedosos equipos que incorpora el proyecto
- ▶ Participación en las jornadas “O reto enerxético actual”. Escuela Politécnica de Serantes (Ferrol)

- ▶ Participación en el XLVI CONGRESO DE SALUD AMBIENTAL, dentro del programa gallego de municipios sostenibles y saludables
- ▶ Una de las jornadas del Forum Euro-Latinoamericano de desarrollo regional que se llevó a cabo del 1 al 3 de abril del 2009, tuvo lugar en Sotavento donde se presentaron los últimos proyectos de investigación del parque, destacando el proyecto de hidrógeno
- ▶ Participación en las jornadas sobre energías renovables enmarcadas en el proyecto europeo Nexus Rede

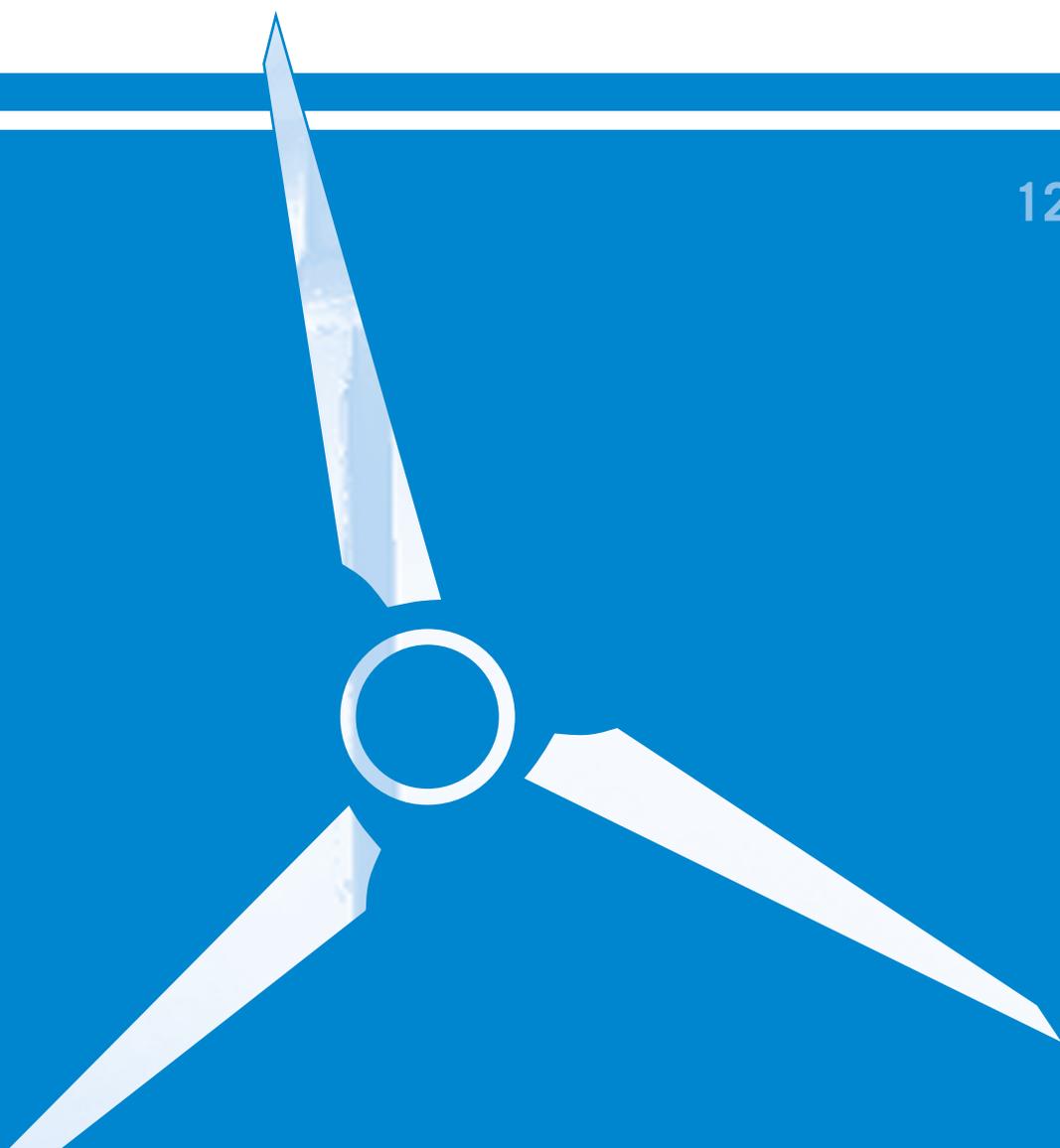
VISITAS

No menos destacable es la labor de divulgación entre las más de 50.000 personas que han visitado la planta desde su inauguración, lo que nos muestra el interés que genera este proyecto. En su mayoría las visitas recibidas interesadas en la planta se corresponden a grupos técnicos pertenecientes al sector eólico y universidades, aunque cada vez es mayor el número de personas de cualquier colectivo interesadas por el almacenamiento de energía.

11. ANEXO A



12. ANEXO B



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE EQUIPOS

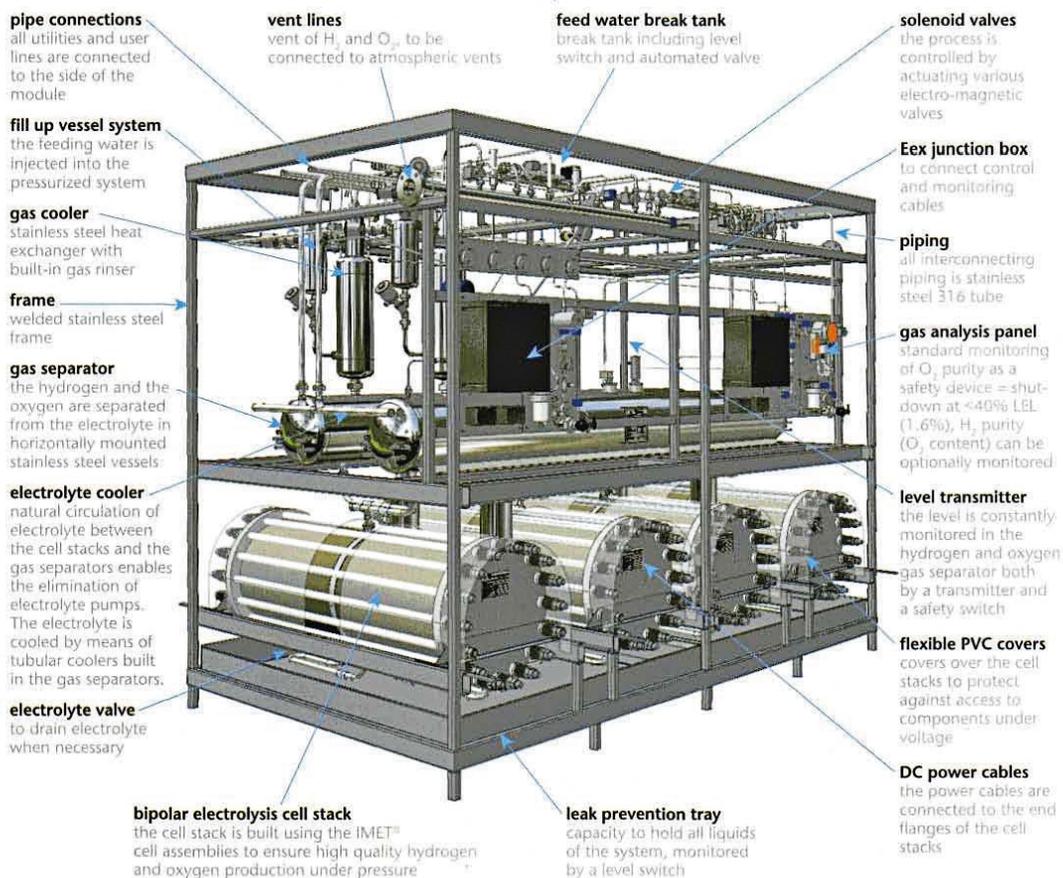


HySTAT™-A 1000Q-60-10

Hydrogen Station

based on alkaline technology in a quadruple cell stack configuration

Hydrogen and oxygen are produced in the process module by the pressurized IMET® electrolysis cell stacks. The process module is designed as a zone II (Class 1, Div 2) compliant equipment and contains all necessary devices to control and monitor the entire electrolysis process. The DC power supply as well as the control cabinet are provided with the process module and can be integrated or installed remotely.



The following items are also included:

- **Hydrogen in atmosphere analyzer (HTA).** This safety device needs to be installed at the highest point in the room where the hydrogen generator will be installed. Shutdown of the unit at 20% LEL.
- **Electrical Power Supply EPS** consisting of Control and Power Modules (see separate description "scope of supply EPS")
- **Set of interconnection cables** (DC power-, control & monitoring-) between the EPS and the Process Module for a maximum length of 5 meters
- **Set of documentation** (certificates, as built file, manuals, etc..) in the English language

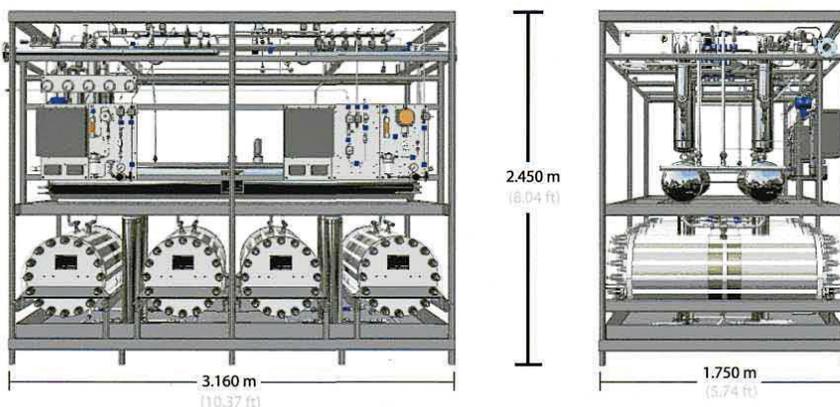
HySTAT™-A 1000Q-60-10

Hydrogen Production	Number of Cell Stacks	4
	Nominal Flow Rate	32 – 60 Nm ³ /h
	Flow Range	25 – 100 %
	Output Pressure Range	6 to 10 Bar (90 to 150 psi)
	Standard Purity ⁽¹⁾	99.9 %
	Water content	saturated gas
	Purity with Deoxo-Drier	99.9998 %
	Dew Point with Deoxo-Drier	up to -75°C
Oxygen Production ⁽²⁾	Nominal Flow Rate	50% of H ₂ flow
	Min & Max Flow Rate	25 – 100 %
	Output Pressure Range	1 to 8 bar (15 to 115 psi)
Conversion Efficiency	Cell Stack Conversion Efficiency	4.2 kWh/Nm ³ (12.4 kWh/100 scf)
	HySTAT Conversion Efficiency	4.8 kWh/Nm ³ (13.9 kWh/100 scf)
Electrical Power Supply (EPS)	Voltage	400 VAC
	Frequency	50 or 60 Hz
	Phase	3 phase
Cooling water	Maximum Temperature	30°C (86°F)
	Pressure Range	3 to 7 bar (44 to 100 psi)
	Flow	Approx. 8 m ³ /h
Feeding Water Supply	Consumption	< 1l/Nm ³ of Hydrogen (0.7 Gallons/100 scf)
	Conductivity	max 5 µS/cm
Electrolyte	Type	30% KOH in H ₂ O
	Quantity	Approx. 650 l (172 Gallons)
Operating Conditions	Location	Sheltered Area
	Ambient Temperature Range ⁽³⁾	2°C to 35°C (36°F to 95°F)
Weight	Empty Weight	Approx. 3300 kg (7275 lbs)
	Operational Weight	Approx. 4200 kg (9259 lbs)

(1) The hydrogen produced has 2 major impurities: oxygen (typically < 1000 ppm) and water (saturated)

(2) The produced oxygen is typically ventilated to the atmosphere.

(3) Maximum relative humidity of 90% without condensation



© Hydrogenics Corporation, Mississauga, Ontario, Canada. All specifications and illustrations contained in this brochure are based on the latest product information available at the time of printing. Hydrogenics Corporation reserves the right to make changes at any time without notice. Illustrations, equipment, specifications and models. Printed in Canada. 04/2022

www.hydrogenics.com

Hydrogenics Corporation
tel: 905.361.3660
fax: 905.361.3626
sales@hydrogenics.com

Hydrogenics Europe N.V.
tel: +32 (0) 14 46.21.10
fax: +32 (0) 14 46.21.11
europe@hydrogenics.com

Hydrogenics GmbH
tel: +49 2043.944.133
fax: +49 2043.944.146
europe@hydrogenics.com

Hydrogenics Japan
tel: +81 3.5733.8315
fax: +81 3.5733.8316
japan@hydrogenics.com

Hydrogenics USA
tel: 661.253.2593
usa@hydrogenics.com

Hydrogenics Russia
tel: +7 495.206.81.14
fax: +7 495.710.46.56

Hydrogenics China
tel: +86 20 84.30.95.83
fax: +86 20 84.31.71.78

Hydrogenics India
tel: +91 (11) 2664.23.88
fax: +91 (11) 2664.35.47

Hydrogenics Corporation 04/2022

ANEXO FOTOGRÁFICO



AF 1. Vista general de la planta de acumulación de energía en forma de hidrógeno

Los equipos indicados en la imagen superior según su referencia se corresponden con:

- ▶ [1] Electrolizador
- ▶ [2] Buffer electrolizador-compresor
- ▶ [3] Compresor
- ▶ [4] Sistema de almacenamiento
- ▶ [5] Panel de descompresión
- ▶ [6] Buffer de aspiración del motogenerador
- ▶ [7] Motogenerador
- ▶ [8] Centro de transformación de la planta

Tabla de contenidos	
IMAGEN	Equipo-referencia
AF 2. Armario de relés y contactores	[1]
AF 3. Armario del controlador	[1]
AF 4. Armario de protecciones de los stack's	[1]
AF 5. Armario de rectificadores de los stack's	[1]
AF 6. Sistema de filtración físico, químico y bacteriológico del proceso de osmosis	[1]
AF 7. Intercambiador refrigeración del electrolito y compresor del sistema neumático	[1]
AF 8. Vista general de los stack's de celdas electrolíticas	[1]
AF 9. Stack's de celdas electrolíticas	[1]
AF 10. Detalle de stack de celdas electrolíticas	[1]
AF 11. Separadores de gas, depósito de lavado y sistema de alimentación de agua	[1]
AF 12. Detalle del stack de celdas electrolíticas	[1]
AF 13. Columnas de secado y DEOXO	[1]
AF 14. Vista general de los grupos de compresión	[3]
AF 15. Vista del grupo de compresión	[3]
AF 16. Vista en detalle del motor del compresor	[3]
AF 17. Sistema de almacenamiento, panel de descompresión y buffers	[2], [4], [5], [6]
AF 18. Detalle sistema de descompresión	[6]
AF 19. Vista del motogenerador (i)	[7]
AF 20. Vista motogenerador (ii)	[7]

ELECTROLIZADOR

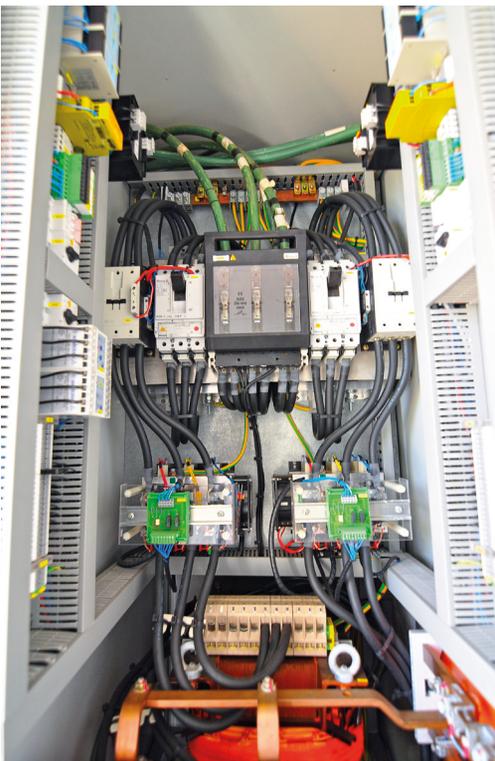
Sala de Control



AF 2. Armario de relés y contactores



AF 3. Armario del controlador



AF 4. Armario de protecciones de los stack's



AF 5. Armario de rectificadores de los stack's

Sala de equipos auxiliares



AF 6. Sistema de filtración físico, químico y bacteriológico del proceso de osmosis

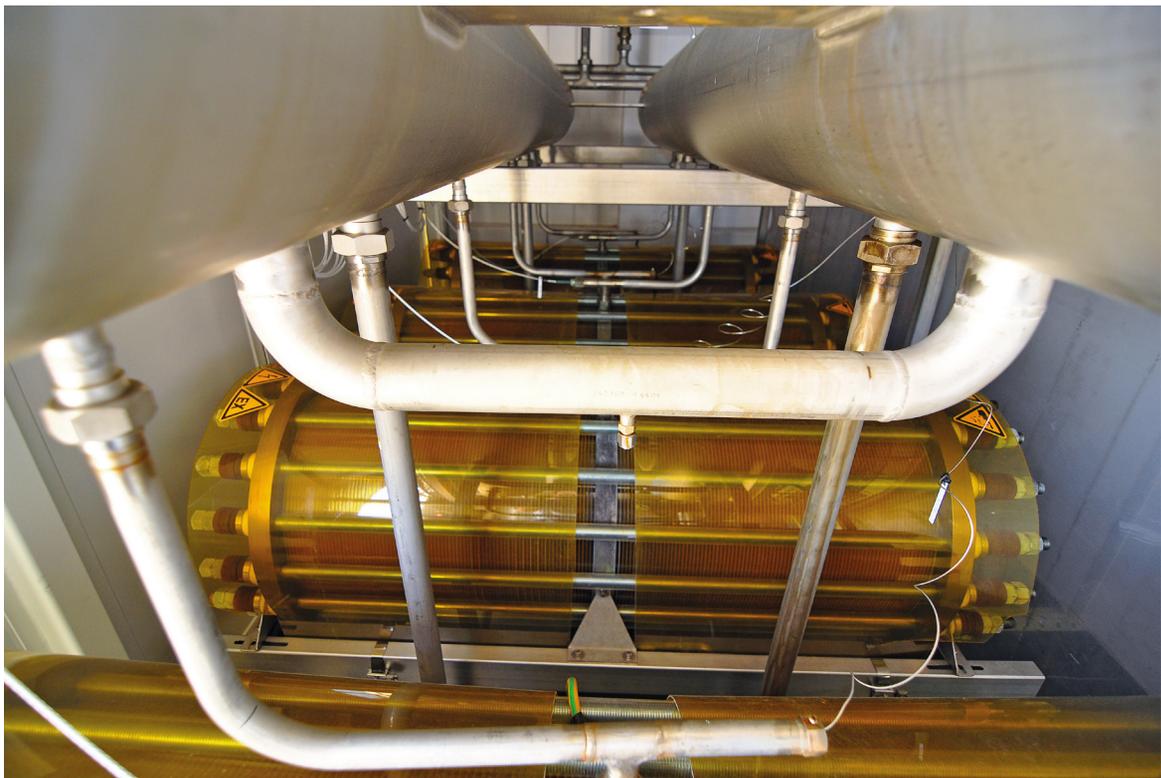


AF 7. Intercambiador refrigeración del electrolito y compresor del sistema neumático

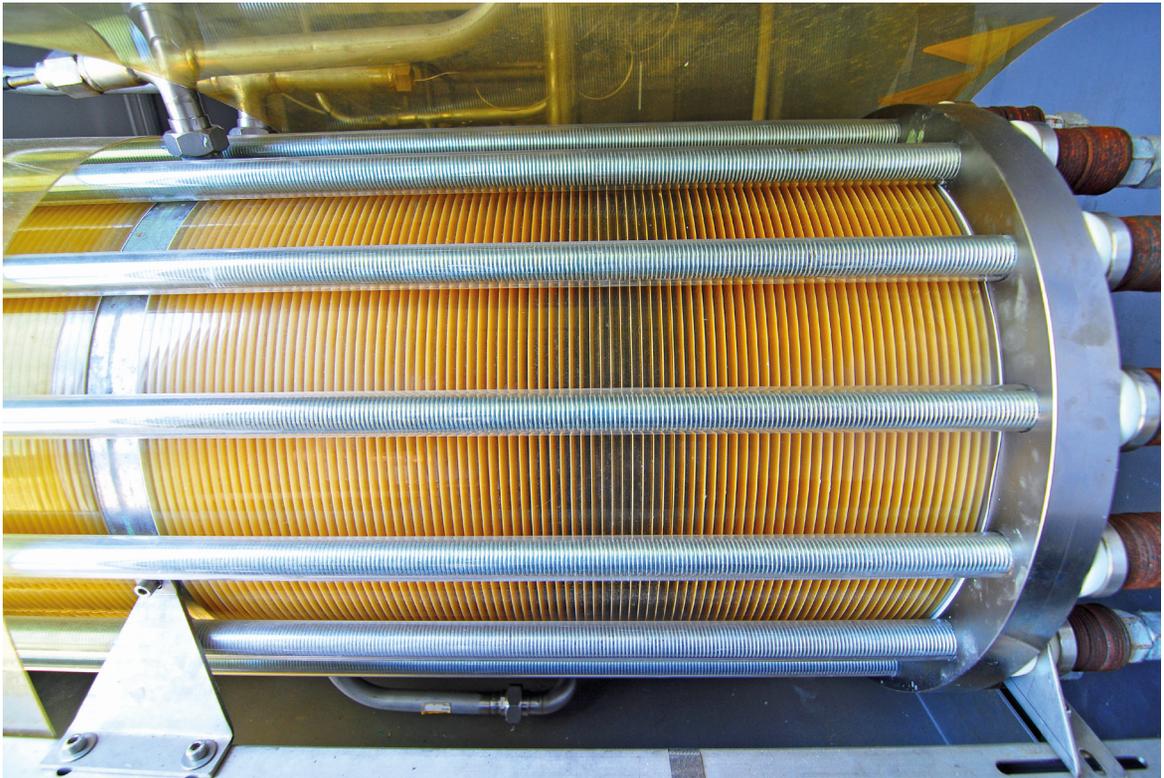
Sala de Proceso



AF 8. Vista general de los stack's de celdas electrolíticas



AF 9. Stack's de celdas electrolíticas



AF 10. Detalle de stack de celdas electrolíticas



AF 11. Separadores de gas, depósito de lavado y sistema de alimentación de agua



AF 12. Detalle del stack de celdas electrolíticas

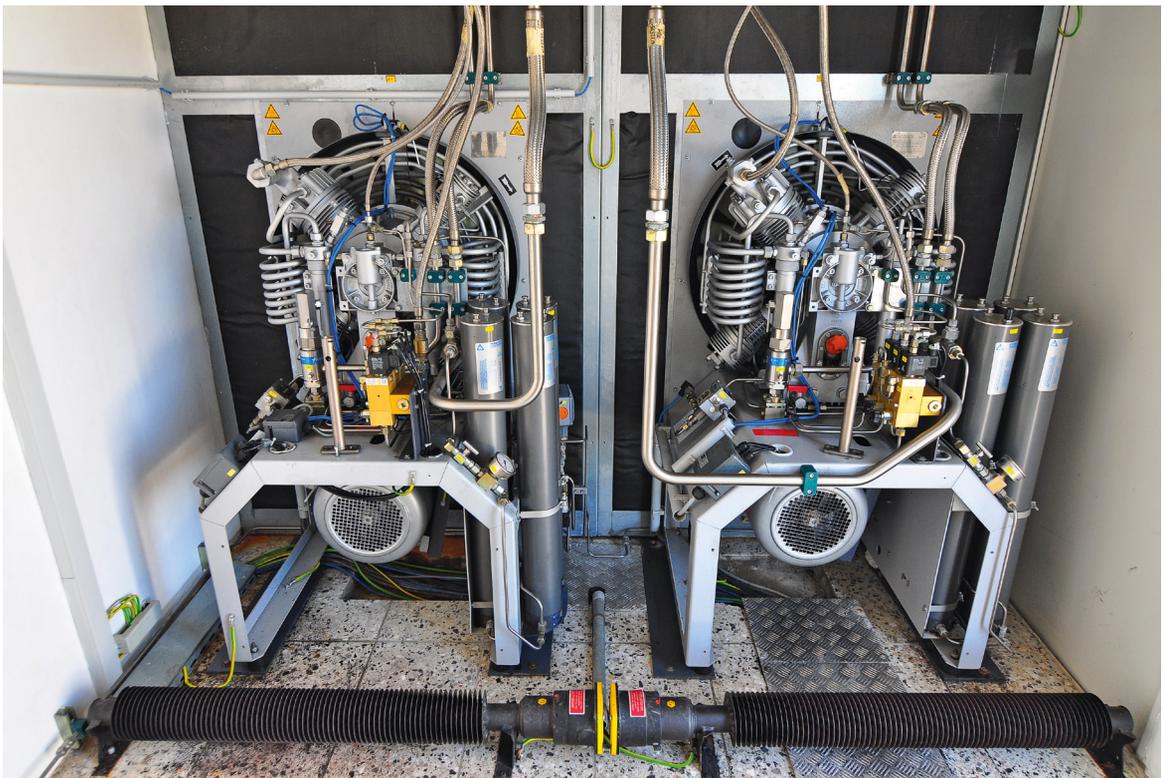


AF 13. Columnas de secado y DEOXO

COMPRESOR



AF 14. Vista general de los grupos de compresión



AF 15. Vista del grupo de compresión



AF 16. Vista en detalle del motor del compresor

SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

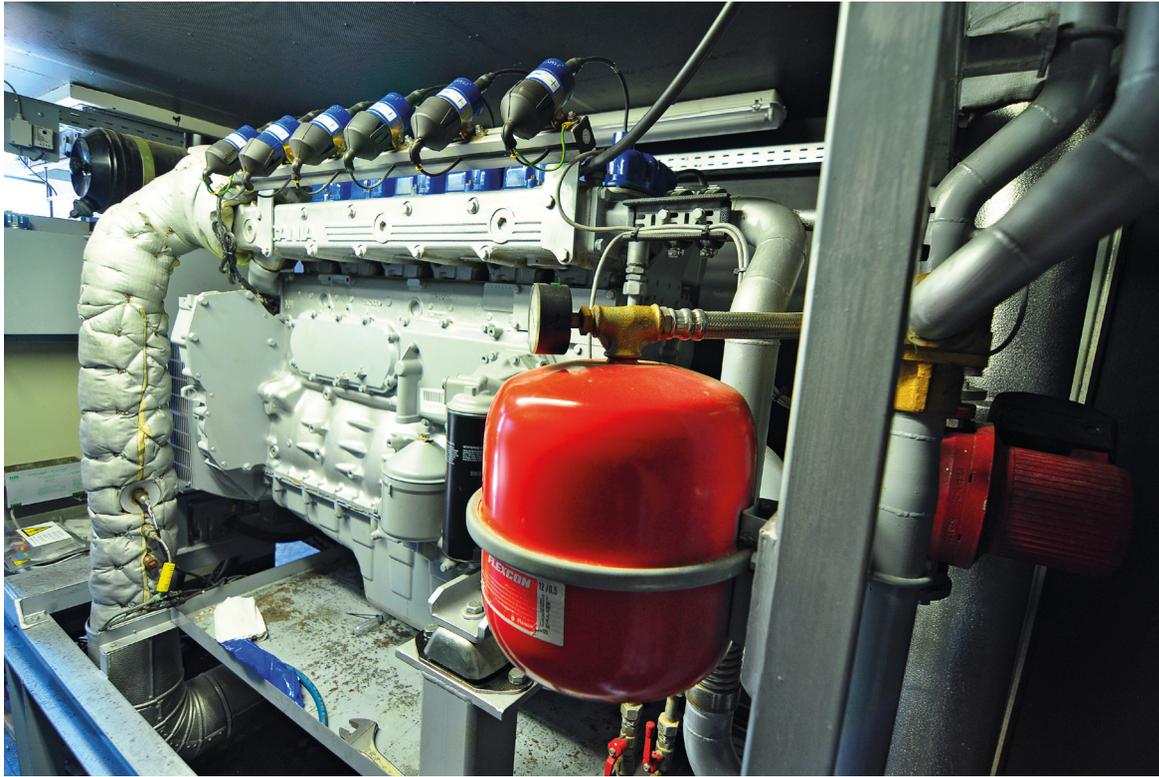


AF 17. Sistema de almacenamiento, panel de descompresión y buffers



AF 18. Detalle sistema de descompresión

MOTOGENERADOR



AF 19. Vista del motogenerador (i)



AF 20. Vista motogenerador (ii)



www.sotaventogalicia.com