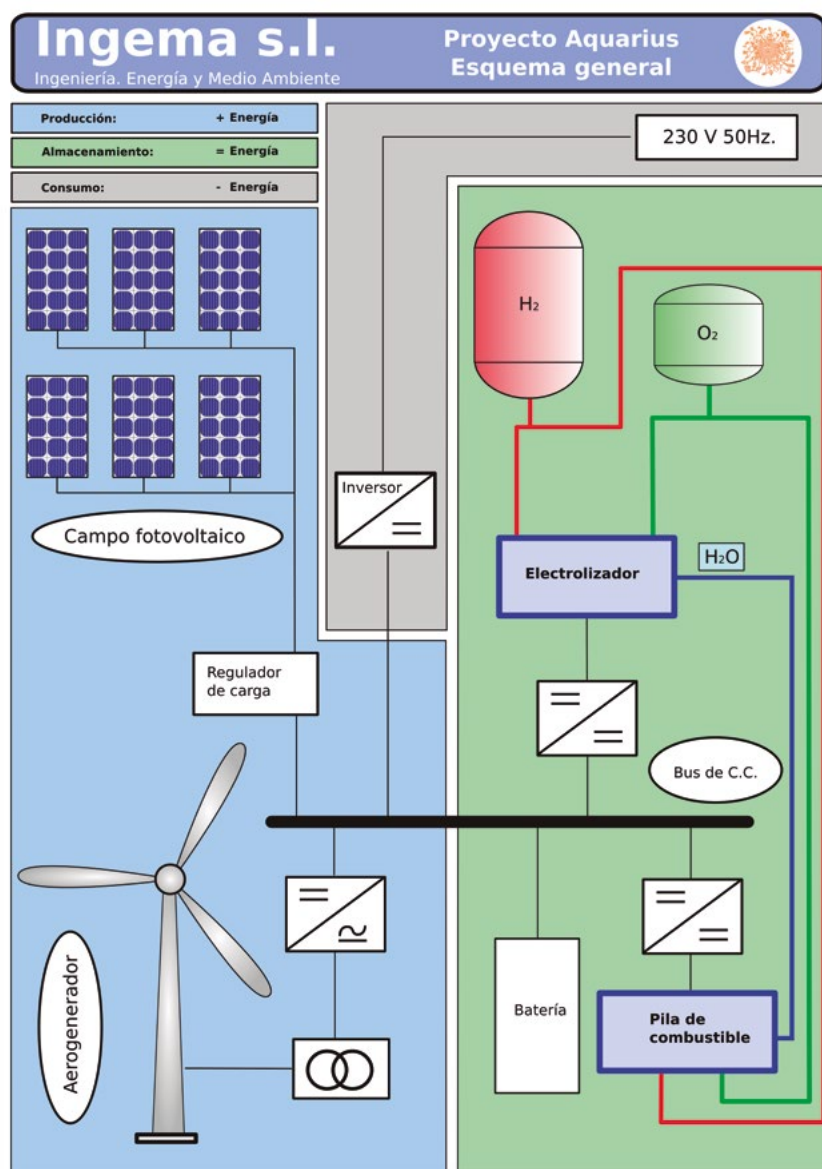




El Proyecto Aquarius o, dicho en extenso: Planta Piloto para el Estudio y Desarrollo de un Sistema Autónomo Basado en Hidrógeno para el Abastecimiento Continuo de Energía Eléctrica, trata de explorar la viabilidad, la casuística y las condiciones de la puesta en práctica de una idea sencilla: Paliar la discontinuidad de la producción solar fotovoltaica y eólica a base de producir un combustible como vector energético, que es, en sí mismo, un almacén de energía.

El caso ACUARIUS

Pedro Pazos Morán

Agricultor, empresario e ingeniero industrial.

La necesidad era patente puesto que en las instalaciones solares, eólicas y mixtas, aisladas de la red, que nuestra empresa, Ingema SL, viene ejecutando desde el año 1996, se producía el hecho recurrente de que por muy sobredimensionado que estuvieran y por muchos días que en verano, en primavera, o durante temporales, sobrara energía, cuando llegaba el invierno con sus cortos días, y muchos nublados, esas instalaciones, digo, entraban en crisis y era necesario recurrir al apoyo de un Grupo Elec-

trógeno, con lo que se rompía la línea del suministro autónomo renovable.

Por supuesto el almacenamiento en baterías no es viable para más de pocos días. Por otro lado, hay que decir que, así como en los campos de la captación y de la electrónica de potencia y de control se han dado grandes avances en las últimas décadas en cuanto a fiabilidad, prestaciones y bajada de precios, el desarrollo y el precio de las baterías se ha quedado estancado.

El reto que intenta abordar este proyecto es poder llevar la energía que no se aprovecha en verano hasta el invierno o, al límite, para su uso al cabo de años, por ejemplo. De este modo será posible dimensionar el Campo Fotovoltaico y/o el Aerogenerador de acuerdo a un balance anual de producción y consumo, y no semanal como hasta ahora.

El vehículo energético podría ser un combustible estable que se produjera *in situ* y fácilmente. La idea más obvia es pensar en la electrólisis y en el hidrógeno.

Tan temprano -temprano en nuestra escala de tiempo- como en 1997, nos pusimos a diseñar la producción de hidrógeno en un electrolizador, almacenarlo en un tanque a presión y quemarlo después en un turbogenerador.

Enseguida nos dimos cuenta de que el elemento más adecuado para restituir la energía eléctrica con un rendimiento mucho mayor, no era un turbo sino, la pila de combustible, tan antigua, de algún modo dejada de la mano en el s. XIX, estaba teniendo una segunda vida en la era espacial. El problema era que todavía no era un artículo comercial.

La objeción de que romper la molécula de agua requiera mucha energía, es más bien una ventaja a favor de considerar el hidrógeno como un buen combustible, puesto que su posterior reacción con el oxígeno la devolverá.

Sí es cierto, que su bajo peso específico complica su manejo en fase gas. Comprimirlo a altas presiones, e incluso licuarlo, supone una pérdida importante de rendimiento del ciclo, aunque se pueda contener en tanques de acero al carbono.

A pesar de que el bajo punto de ignición del hidrógeno representa un riesgo que hay que tener en cuenta, su alto poder de difusión y ligereza hace que resulte fácil evitar la formación de mezclas explosivas.

Aparte del almacenamiento a presión, hemos probado también a hacerlo en tanque de hidruros metálicos, por ser la variante más asequible para nosotros. Otros equipos basados en hidruro químico o en nanoestructuras de carbono pueden estar disponibles más adelante.

Muy sugerente parece la variante defendida con entusiasmo por el Prof. S. Schulien del laboratorio de Rüsselsheim (Alemania) de producir metanol o etanol capturando de



Vista general de las instalaciones del Proyecto Acuario.

paso el CO₂ en industrias donde se produzca (Plantas de biomasa, bodegas, cementeras etc). En este caso sí que tenemos un combustible líquido manejable con la infraestructura existente de gasolineras.

Antecedentes

Precisamente de los contactos con el Prof. S. Schulien surgió el Proyecto **DESEF** en el que incorporamos el uso del oxígeno producido, para la depuración de efluentes de granjas ganaderas. Dicho proyecto lo presentamos en el año 1999 en la convocatoria EESD del V Programa Marco de la Unión Europea. La Coordinación era INGEMA S.L. y los socios AGAFE (Alemania), KARL GRIESSER APPARATEBAU (Alemania) y la COOPERATIVA AGROGANADERA DE VALDECABALLEROS (BADAJOZ). El proyecto fue bien calificado en casi todos los criterios de la evaluación de la Comisión Europea, pero el dictamen final no resultó positivo pues se adujo que "... en este momento los equipos necesarios no están disponibles ". En parte tenían razón, aunque todos podíamos ver que se producían avances casi a diario. Tan era así, que en el año 2001 presentamos un nuevo Proyecto, **OASIS**, a la convocatoria PROFIT. Los socios en este caso: INABENSA(Abengoa), INGEMA, AIR LIQUIDE y CIEMAT. Proyecto que también fue valorado positivamente y, en este caso, además se le concedió apoyo financiero. Sin embargo, no se llevó a cabo por la renuncia de uno de los socios y no permitir las bases del Programa PROFIT su sustitución por otro.

Pasó el tiempo y volvimos a intentarlo en 2002 con el presente proyecto, **ACUARIUS**. Ingema volvía a ser la Promotora y en esta ocasión los socios, y sus representantes, fueron: El CIEMAT, Doctora Loreto Daza, AGAFE., Prof. S.Schulien, y la Universidad de Extremadura. Escuela Técnica Superior de II.II., Doctor Antonio Ramiro. Se acogió a la Línea ICO/IDAE de Financiación de Inversiones en Energías Renovables 2005 y le fue otorgada una subvención de 49 840 € y un crédito al 4% de 199 386 €, con lo que se pudo ejecutar.

Bases

La idea de partida es estudiar en la práctica el comportamiento de una instalación de producción y almacenamiento de hidrógeno con el fin de asegurar el suministro continuo de energía eléctrica a una Unidad Aislada de Referencia (UAR).

Puesto que se aprovechan los excedentes, el coste de la energía solar y eólica necesarias para la producción de hidrógeno se puede considerar cero.

La virtualidad económica hay que establecerla más bien en la amortización de la inversión en equipos. Inversión

alta en la actualidad si se compara con el coste de lo que sustituye: el grupo electrógeno. A favor está el que se elimina el consumo de combustible fósil y se ahorra en la capacidad de las baterías.

El cometido técnico del proyecto es introducir mejoras en el diseño e integración de los equipos, para conseguir un mejor rendimiento global del ciclo Producción-Almacenamiento-Restitución y conseguir así una instalación lo más pequeña y compacta posible, que, con el tiempo, pudiera ser comercial.

El primer paso es determinar el estado del arte en cuanto a disponibilidad de los equipos necesarios. En este aspecto hay que tener en cuenta la previsible evolución del mercado en cuanto a mejoras técnicas que los haga más fiables, y el abaratamiento de precios que modificará constantemente el estudio económico.

Como Unidad de Referencia Aislada (UAR) se estableció el caserío de una explotación agroganadera de tamaño medio, habitada permanentemente, similar a muchas que ha equipado la empresa.

De acuerdo con el balance energético producción/consumo resulta la siguiente instalación:

- Campo fotovoltaico de 2000 Wp, montado en bastidor con orientación automática en dos ejes. regulador de carga 60A/24V provisto de seguimiento del punto de máxima potencia.
- Aerogenerador de 1 kw. Con disipador de energía en caso de mal funcionamiento del electrolizador.
- Inversor 24V CC/230V CA de 5 kw con picos de 7 kw.
- Batería de 525Ah/24Vcc. Intencionadamente infradimensionada respecto a una instalación convencional. De todos modos, la capacidad ideal de la batería vendrá determinada por las características de las respuestas dinámicas del electrolizador y de la pila ante las variaciones de la demanda,

A diferencia de una instalación convencional se añaden el electrolizador, la pila de combustible y los almacenamientos, y se prescinde del grupo electrógeno.

Descripción de los equipos y líneas de investigación

Almacenamiento

Desde el principio se decidió almacenar tanto el H₂ como el O₂. Esto nos limitó las opciones en la elección del electrolizador pues muchos de ellos ventaban el oxígeno.

En una aplicación estacionaria el O₂ tiene otros usos posibles, p.e. mejorar el tratamiento de efluentes orgánicos, pero lo que más nos interesaba era tenerlo a disposición

para probar a usarlo directamente para alimentar la pila de combustible, o al menos para enriquecer el aire de entrada con el fin de mejorar su rendimiento.

Para almacenar el O_2 se contempló sencillamente el uso de un depósito a presión y no se consideró probar otros métodos.

Para el almacenamiento de H_2 , sin embargo, sí que nos pareció que merecía la pena probar y comparar los dos métodos que mejor se adaptan a una instalación estacionaria: Recipientes a presión e hidruros metálicos.

En el primer caso se dispuso un primer tanque de amortiguación de $0,5m^3$ conectado directamente al electrolizador con capacidad para 12 horas de funcionamiento y a continuación una estación de compresión que lo almacena a 30barg en un recipiente a presión de $6m^3$, que acumula la producción de 775 horas de marcha continuada. La estación de compresión se diseñó según el concepto de “bombeo solar/eólico conmutado directo” para que no supusiera una “carga” en el balance energético global. De hecho, cuando el electrolizador entra en funcionamiento es porque sobra sol o viento.

En consecuencia con la misma idea, en el segundo caso la camisa del tanque de hidruros se conectó con una instalación anexa de paneles solares térmicos, para regular los aportes y retirada de energía para los ciclos de absorción/desorción.

El tanque de hidruros metálicos en base a $LaNi_5$, fabricado por LABTECH INT. LTD. Sofía, Bulgaria, tiene una capacidad de almacenamiento de $5 Nm^3$ que corresponde a 4h de funcionamiento del electrolizador.

Otro asunto importante es el almacenamiento de energía necesario para salvar los periodos transitorios por pequeñas discontinuidades de funcionamiento y la inercia de arranque de la pila. Para este fin hemos previsto una pequeña bancada de baterías, cuya capacidad final se ajustará de acuerdo con el comportamiento de la instalación. En una segunda fase consideramos incluso la sustitución de la batería por un volante de inercia.

Pila de Combustible

Partimos de la única pila asequible en el mercado en ese momento: Ballard, de Membrana de Intercambio de Protones (PEM). No era la pila ideal para nuestra aplicación: Por lo tanto, las primeras acciones sobre ella estuvieron encaminadas a mejorar su rendimiento.

Algunas de estas “mejoras” afectan al diseño de la pila comercial que disponemos. Otras serán imposibles de incorporar en ella. Pero la experiencia adquirida nos permitirá valorar los avances tecnológicos que se produzcan y elegir el tipo que mejor se adecúe.

En una instalación estacionaria se puede pensar en alimentar la pila con el O_2 puro producido en el electrolizador

y almacenado a una cierta presión. Esto permitiría eliminar el compresor de aire que incorpora con lo que aumentaría el rendimiento. Pero al perder el efecto refrigerante del aire de alimentación lo tendríamos que resolver de otro modo. Hay que decir que sabemos de entrada que esto ya ha sido resuelto en los vehículos espaciales.

Electrolizador

El electrolizador es un equipo estándar que se puede elegir entre varios tipos con unas prestaciones parecidas. Como he comentado anteriormente requeríamos obtener ambos gases y a una cierta presión. Por esa razón y por la dimensión de nuestro proyecto nos inclinamos por un electrolizador de membrana de polímero.

Partir ya de una presión moderada de 3 barg a la salida del electrolizador, permite manejar los gases con holgura y dirigir el H_2 al tanque de hidruros o a un recipiente intermedio de almacenamiento, para ser usado directamente o para alimentar la estación de compresión.

A la vista de las ofertas recibidas, y tras algunos viajes de inspección, decidimos adquirir un modelo QL-5000, exento de alkali, fabricado por Shandong Saikesaisi Hydrogen Energy Co. Las características técnicas, la asistencia técnica y la disponibilidad de repuestos superaba con creces a la alternativa europea y el precio era diez veces menor (¡literal!). Incluso el fabricante introdujo las modificaciones necesarias para incorporar la recogida del oxígeno a 2,5 barg, como era nuestro requerimiento.

Durante el exitoso comisionado en Jinan, China, con la participación de nuestra parte de M.A, Peña y Aitor Pazos; y la Doctora G. Liu y Mrs Sara por parte de Shandong Saikesaisi Hydrogen Energy Co, establecimos excelentes relaciones e hicimos votos de cooperaciones futuras.

Dicho electrolizador ha funcionado a la perfección en Cañamero (Cáceres) sin necesidad de tener que recurrir a las piezas de recambio suministradas junto con el pedido.

La primera mejora que pensamos introducir en el electrolizador es modificar la fuente de alimentación. En lugar conectarse a la red de consumos de 220 V CA de la UAR, como está ahora, hacerlo directamente al bus de CC. Esto mejorará el rendimiento global.

Bus de continua

Así hemos llamado al punto de corriente continua donde confluyen y se realiza el intercambio de las energías, recibidas del campo solar, el aerogenerador, o el electrolizador y las enviadas a consumo o a la pila de combustible, así como de la que fluye en las dos direcciones de la batería. Lo hemos representado intuitivamente como una barra que une a todos ellos.



Sala principal Acuario.

Aparte de que se produce una cierta auto regulación, el sistema de control emite señales de mando a los diferentes elementos en base a los valores de la tensión del bus.

Cerrar el circuito del agua

Las especificaciones del agua de alimentación del electrolizador son muy estrictas en cuanto a pureza, y en concreto conductividad. Por otro lado, el agua caliente producida por la pila es, en principio, químicamente pura. Parece obvio que, evitando la contaminación y reponiendo las pérdidas por evaporación, esa misma agua podría cerrar el circuito.

Una condición es evitar el contacto con la atmósfera, pues, de las pruebas realizadas, resulta que un agua desmineralizada aumenta continua y apreciablemente su conductividad en un recipiente abierto. Seguramente depende del tipo de ambiente en el que se encuentre.

En todo caso hay que prever un cierto drenaje y reposición para compensar la concentración en sales por evaporación.

UAR

Para simular la Unidad Aislada de referencia dispusimos una estufa de potencia ajustable de 1 a 5 kw, un frigorífico y una bomba sumergible. Con estos elementos simulamos las cargas que corresponden a un consumo normal de una Granja Agroganadera habitada de modo permanente.

Sistema de Control y Supervisión

Coordina el funcionamiento de todos los subsistemas.

En cada una de las líneas se instalan medidores de tensión, intensidad, presión o caudal, según proceda, todos ellos conectados al sistema central de adquisición de datos y supervisión

Rendimiento global

El *quid* de la cuestión.

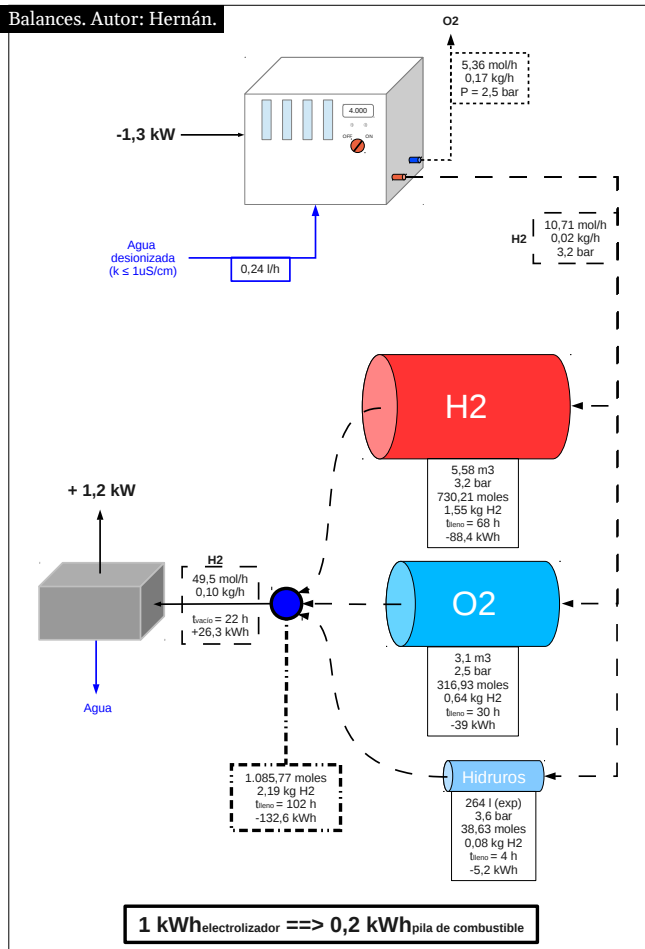
En los primeros balances de energía operando los equipos según llegaron sin introducir mejoras, resultó que por cada kWh consumido por el electrolizador, la pila de combustible entregaba a al bus de continua 0,2 kWh. Esto da un rendimiento global del 20%. No muy alto, pero aquí empieza el trabajo de Acuario.

Ejecución

El Proyecto se ubicó en el recinto de Ingema SL en Cañamero (Cáceres). Se aprovechó la infraestructura de la empresa para el suministro de agua, energía eléctrica y otros servicios, y se construyó una edificio ex profeso para contener los equipos y la oficina.

Durante los años 2008, 2009 y 2010, Ana Montero y Hernán Fernández, ambos Ingenieros Industriales por

Balances. Autor: Hernán.



las Universidades de Badajoz y Santiago de Compostela, respectivamente, fueron los principales encargados de operar la planta, evaluar el comportamiento y proponer mejoras.

Aunque el presupuesto inicial era limitado y se había establecido en base a tres años de ejecución, no tenía sentido dejar la planta parada posteriormente. De hecho, nuestra intención era mantenerla en servicio y acometer las mejoras necesarias, a costa de la cuenta de Investigación y Desarrollo de Ingema SL. Sin embargo, la crisis en el sector de las energías renovables, causada por los cambios regulatorios introducidos por el Gobierno con efecto retroactivo, se tradujo en una drástica disminución del volumen de negocio de la Empresa e hizo imposible mantener ese gasto. De todos modos, las instalaciones de la planta piloto se pusieron a disposición de distintas universidades para la realización de Proyectos Fin de Carrera. En ese caso Ingema proveería los servicios necesarios y una beca de manutención y alojamiento en Cañamero. La oferta sigue en pie.

Financiación	Miles de euros
Crédito ICO (al 4%)	199,36
Crédito ICO (al 4%)	199,36
Subvención IDAE	49,84
Fondos propios	106,8
Total	356



El equipo de Acuaris.

Conclusiones

Aunque la planta piloto Acuaris está disponible y lista para volver a funcionar con pocas reformas, en el tiempo que ha estado operativa nos ha permitido llegar a algunas conclusiones.

La primera, es que se ha demostrado que con la tecnología actual, una empresa pequeña como la nuestra, puede acceder a la producción y uso del hidrógeno con el fin de probar a resolver el problema de la autonomía energética.

La segunda, es que hemos comprobado lo que ya se sabía: que el precio de la energía restituida resulta muy alto debido a los elevados precios de los equipos necesarios y al bajo rendimiento combinado del conjunto. Pero no era nuestra intención llegar ya a un producto comercial competitivo, sino avanzar por el camino que llegue a ese objetivo en sucesivas aproximaciones.

Por otro lado, hemos visto que todo se simplifica en los casos en que la producción y el consumo se realizan en el mismo emplazamiento o cerca. A este respecto hay que mencionar la opción de redes locales de gaseoductos de hidrógeno (en sí mismos ya son almacenes); tanto para

producir electricidad en pilas de combustible, como para ser usado directamente como combustible.

Respecto al almacenamiento en instalaciones fijas, nos inclinamos por los recipientes a presión. La solución de tanques de hidruros metálicos es técnicamente atractiva pero muy cara de momento: un tanque para almacenar la producción de 4 horas, es decir 0,64 kg de H_2 , costó 7000 €. Seguramente este costo bajará drásticamente con el avance de la tecnología y el uso de materiales más corrientes.

Un comentario que creo viene al caso aquí es que, como en todas las sendas del llamado Progreso, hay que evitar las trampas. Es ilusorio mantener el sistema energético actual, e igualmente lo es sustituirlo tal cual con energías renovables. Se choca continuamente con los límites físicos del mundo natural y compromete el bienestar y la propia vida de las personas.

A nuestra pequeña escala hemos contribuido en lo posible a resolver el problema del abastecimiento energético. Estoy convencido de que, si hay una solución, los avances técnicos y el verdadero Progreso deben discurrir por el camino de la eficiencia y el ahorro, y potenciar el Decrecimiento.



Tanque de hidruros metálicos.