

GENERACIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE ENERGÍA SOLAR PARA SU USO EN VEHÍCULOS CON CÉLULA DE COMBUSTIBLE

SERRANOCASARES, Francisco; CANAQUIJADA, Juan

fserranoc@uma.es

Universidad de Málaga, E. T. S. de Ingeniería Industrial

Grupo de Energética

RESUMEN

Tradicionalmente se ha considerado a los combustibles fósiles como fuente de energía barata y abundante. Sin embargo, la disminución de las reservas y el aumento de la demanda mundial de energía, además de la contaminación que producen, hacen insostenible el modelo energético basado en este tipo de combustibles. Por ello se hace necesario un nuevo modelo basado en el empleo de fuentes de energía renovable.

El principal inconveniente de las energías renovables es el desfase entre producción y demanda, por lo que muchas veces es necesario acumular la energía producida para tenerla disponible en el momento en el que se demanda. Hasta ahora, la forma más extendida de acumular energía en instalaciones de energía renovable es mediante el empleo de baterías. Sin embargo, el problema de la acumulación de grandes cantidades de energía puede superarse mediante la tecnología del hidrógeno.

El hidrógeno no es una fuente de energía sino un vector energético puesto que no existen yacimientos. Por lo tanto hay que obtenerlo a partir de otras sustancias. La manera más sencilla y limpia de extraer hidrógeno es del agua mediante la electrolisis, empleando energías renovables para generar la energía eléctrica necesaria. En este proceso no se generan emisiones contaminantes.

En este trabajo se ha diseñado una estación de repostaje de vehículos de pila de combustible en un campo de golf. La estación emplea energía solar fotovoltaica para generar el hidrógeno necesario mediante electrolizadores. El hidrógeno se almacena en estado gaseoso en depósitos a presión y se comprime empleando también energía solar fotovoltaica.

Se ha calculado que para satisfacer la demanda anual de hidrógeno hacen falta 117 módulos alimentando a 6 electrolizadores. El modelo de módulo fotovoltaico escogido es el SUNTECH STP320S. El electrolizador es el ACTA EL1000, que produce 1 Nm³/h de hidrógeno a 30 bar consumiendo 4,78 kW. El modelo de inversor de red escogido es el SunnyTripower 15000 TL HE del fabricante SMA.

Debido a que la demanda de hidrógeno no coincide con su producción, es necesario acumular el hidrógeno producido. El hidrógeno que se debe tener disponible requiere un volumen para los depósitos de baja presión de 118 m³ y 12,2 m³ para los de alta presión. A partir de la demanda energética y la generación de hidrógeno, se ha obtenido, con un programa desarrollado en MatLab, la curva de la cantidad de hidrógeno que se debe tener acumulada cada día del año. Los resultados muestran que el sistema de generación diseñado cubre la demanda anual de hidrógeno para el funcionamiento de las células de combustible de los vehículos.

1. Introducción

Tradicionalmente se ha considerado a los combustibles fósiles como fuente de energía barata y abundante. Sin embargo, la disminución de las reservas mundiales y el aumento de la demanda mundial de energía, además de la contaminación que producen, hacen insostenible el modelo energético basado en este tipo de combustibles. Por ello se hace necesario el empleo de fuentes de energía renovable.

El principal inconveniente de las energías renovables es la falta de control de cuándo se genera la energía, puesto que dependen de fenómenos naturales. Por lo tanto es necesario acumular la energía producida para tenerla disponible en el momento en el que se demanda. Hasta ahora, la forma más extendida de acumular energía en instalaciones de energía renovable es mediante el empleo de baterías, principalmente las de plomo y ácido sulfúrico. Esta tecnología es aceptable para aplicaciones fijas en las que no es necesario acumular mucha energía, pero se hace económicamente inviable para acumular grandes cantidades de energía. Además, para las aplicaciones móviles, las baterías tienen el inconveniente de ser muy pesadas y voluminosas.

Entre las aplicaciones móviles con baterías, se encuentran los vehículos eléctricos que se utilizan en los campos de golf para el transporte de los jugadores. La Costa del Sol, en la que se encuentra la Universidad de Málaga, dispone de un gran número de instalaciones que utilizan este tipo de vehículos. Estos vehículos son limpios, y energéticamente sostenibles, cuando la fuente de energía que se usa para la recarga de las baterías es una fuente renovable. No obstante, según información personal aportada por los responsables de mantenimiento de estas instalaciones, la carga y descarga diaria de las baterías que normalmente utilizan estos vehículos requiere su sustitución en un periodo medio de dos años, lo que ocasiona un gasto importante y problemas de gestión medioambiental al tener que reciclar un número importante de baterías cada año, que debe ser gestionado por una empresa autorizada de acuerdo con la legislación medioambiental.

Como alternativa al uso del vehículo eléctrico movido por baterías, en colaboración con la empresa Invisiblergy S.L., se propone la tecnología del hidrógeno para superar el problema de la acumulación de energía. Esta solución también representa un modelo energético sostenible ya que se puede basar en el empleo de fuentes de energía renovable en combinación con las tecnologías del hidrógeno que es limpio, versátil y eficaz.

El hidrógeno no es una fuente de energía sino un vector energético puesto que no existen yacimientos. Por lo tanto hay que obtenerlo a partir de otras sustancias como los combustibles fósiles o el agua, el compuesto más abundante en la superficie terrestre. El proceso de producción de hidrógeno más extendido es el reformado de hidrocarburos con vapor de agua, siendo el gas natural el más adecuado. Esta tecnología es hoy en día la más económica para producir hidrógeno pero no elimina la dependencia energética de los combustibles fósiles y además producen emisiones de dióxido de carbono. Hay otros métodos de obtención de hidrógeno, como la oxidación parcial y la gasificación del carbón, pero son menos eficientes y tienen los mismos inconvenientes que el reformado con vapor de agua. La manera más sencilla y limpia de extraer hidrógeno es del agua mediante la electrolisis, empleando energías renovables para generar la energía eléctrica necesaria. En este proceso no se generan emisiones contaminantes.

Una vez producido el hidrógeno se debe almacenar en grandes cantidades para emplearlo en la producción de energía cuando esta sea necesaria. Al ser un gas puede almacenarse sin grandes dificultades en depósitos a presión. También existe la opción de licuar el hidrógeno para almacenar cantidades mayores en comparación con el gas comprimido, pero esto requiere una cantidad de energía mayor para mantenerlo a temperaturas muy bajas. Los hidruros metálicos se pueden emplear como método de almacenamiento, puesto que absorben y liberan el hidrógeno con cierta facilidad.

Una forma limpia de producir energía empleando el hidrógeno es mediante una pila de combustible. Estos dispositivos son capaces de generar energía eléctrica a partir del hidrógeno suministrado y del oxígeno del aire, produciendo además agua. Uno de los usos de esta tecnología del hidrógeno es en la industria de la automoción. Los vehículos de pila de combustible emplean el hidrógeno para generar

electricidad y alimentar motores eléctricos que producen la tracción necesaria. Este tipo de vehículos está a punto de salir al mercado pero su gran limitación es que no hay suficientes estaciones para repostar. Por lo tanto, para que estos vehículos puedan funcionar con normalidad se hace necesaria la creación de una infraestructura que genere y suministre el hidrógeno que consumen [1].

2. Objetivos

En este trabajo se plantea el diseño de una estación de repostaje de vehículos de pila de combustible en un campo de golf, situado en la provincia de Málaga. Los vehículos a los que se suministrará el hidrógeno serán los que componen la flota de carritos del campo de golf, que se supone que están dotados de una pila de combustible. Dicha estación empleará energía solar fotovoltaica para generar el hidrógeno necesario mediante varios electrolizadores. El hidrógeno se almacenará en estado gaseoso en depósitos a presión y se comprimirá empleando también energía solar fotovoltaica.

Solamente se generará y comprimirá el hidrógeno cuando haya energía solar disponible, minimizando las baterías de la instalación, que siguen siendo necesarias para garantizar un funcionamiento homogéneo de la instalación. Por lo tanto las baterías evitarán pequeñas paradas y arranques de la maquinaria en los momentos en los que la radiación solar disminuye a causa del paso de una nube aislada en un día soleado. La instalación producirá hidrógeno y lo comprimirá sin producir emisiones de CO₂, y éste se empleará en vehículos que tampoco contaminarán.

3. Método de trabajo

En esta sección se muestran los cálculos que se han empleado para obtener los resultados. Estos se han llevado a cabo en base anual puesto que la demanda de hidrógeno no coincide con su producción.

3.1. Demanda anual de hidrógeno

La demanda anual de hidrógeno depende de la cantidad de vehículos alquilados en el campo de golf así como del consumo energético de cada vehículo. En los campos de golf de la Costa del Sol la afluencia de clientes es máxima en primavera, muy elevada en otoño, mediana en verano y mínima en invierno. Teniendo en cuenta este hecho, se ha estimado que la cantidad diaria de vehículos alquilados será de 15 en primavera, 8 en verano, 12 en otoño y 3 en invierno.

El consumo de hidrógeno de cada vehículo se ha calculado de manera que estos tengan la misma autonomía que los convencionales eléctricos, muy abundantes en el mercado. De este modo, el consumo de hidrógeno se obtiene mediante la expresión

$$C_{H_2} = \frac{V C Pd}{\eta_{FC} F}$$

siendo C_{H_2} la cantidad de hidrógeno consumida por cada vehículo, V la tensión nominal de las baterías, C la capacidad de las baterías, Pd la profundidad de descarga máxima de éstas, η_{FC} el rendimiento de la pila de combustible y F la equivalencia entre cantidad de hidrógeno y energía producida, siendo ésta de 3000 Wh por Nm³ de hidrógeno [2].

La demanda diaria de hidrógeno se obtiene multiplicando la cantidad diaria de vehículos alquilados por la cantidad de hidrógeno consumida por cada vehículo. Sumando la demanda de cada día del año se obtiene la demanda anual de hidrógeno.

3.2. Producción de hidrógeno

La producción de hidrógeno se lleva a cabo mediante un campo fotovoltaico que alimenta a una serie de electrolizadores. En lugar de instalar un único electrolizador se instalan varios de menores dimensiones para aprovechar de manera más eficiente la energía eléctrica generada. El número de electrolizadores funcionando de forma simultánea dependerá de la energía disponible.

Componentes de la instalación

El modelo de módulo fotovoltaico que se ha escogido para la instalación es el SUNTECH STP320S-24/Vem, ya que el campo fotovoltaico resultante es de grandes dimensiones y este módulo es de superficie y potencia relativamente elevadas y además posee un buen rendimiento. Tiene una superficie (S_M) de $1,94 \text{ m}^2$ y una potencia pico de 320 W con un rendimiento de $0,165$. En condiciones TONC genera una potencia máxima de 233 W con un rendimiento (η_{TONC}) de $0,15$.

El modelo de electrolizador que se ha escogido es el ACTA EL1000 puesto que es un modelo económico y de bajo consumo energético en comparación con otros disponibles en el mercado. Este produce 1 Nm^3 de hidrógeno por hora consumiendo una potencia eléctrica de 4780 W .

La instalación eléctrica incluye inversores Sunny Island H8.0 y SunnyTripower 15000 TL HE de SMA. Los primeros generan una red eléctrica con los parámetros de funcionamiento adecuados mientras que los segundos inyectan la potencia fotovoltaica a la red. Estos tienen un rendimiento de $0,98$ y admiten una tensión en la parte de corriente continua de hasta 1000 V , con lo que se reducen las pérdidas energéticas y la sección del cableado considerablemente.

Energía solar disponible

Los módulos fotovoltaicos tienen la orientación óptima, hacia el sur, y su inclinación (β)varía a lo largo del año, como se muestra en la tabla 1, para aumentar la energía eléctrica producida. En la tabla 1 también se muestra la irradiancia global horizontal (I_{GH}) [3] y el factor de corrección (K) [4] empleado para obtener la irradiancia global sobre la superficie inclinada (I_G).

Tabla 1: Inclinación de los módulos fotovoltaicos, irradiancia global horizontal y factor de corrección.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
β	60°	45°	30°	30°	15°	15°	15°	30°	30°	45°	60°	60°
$I_{GH}(\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{dia})$	2,78	3,6	4,85	6,15	7,0	7,87	7,97	7,05	5,76	4,07	2,92	2,36
K	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33

A partir de la irradiancia global sobre la superficie de los módulos fotovoltaicos y empleando la ecuación de Collares-Pereira y Rabl [5], se obtiene una distribución de la energía solar horaria a lo largo del día promedio de cada mes (I_H). Con dicha distribución se obtiene una aproximación de la potencia eléctrica generada por el campo fotovoltaico en cada hora.

Dimensionado

El número de módulos fotovoltaicos y electrolizadores necesarios se ha obtenido mediante uncálculo iterativo. Inicialmente se supone un número de módulos instalados (N_M) y se obtiene la energía eléctrica media que se puede generar durante cada hora del día promedio de cada mes mediante la expresión

$$W_H = I_H S_M \eta_{TONC} \eta_i N_M$$

Esta expresión tiene en cuenta el rendimiento del cableado y los inversores de la instalación (η_i) por lo que la potencia eléctrica obtenida es la disponible para los inversores.

A continuación, se calcula el número de electrolizadores que pueden trabajar en cada momento. Este es la parte entera de la división de la potencia eléctrica disponible entre la potencia eléctrica consumida por cada electrolizador. Multiplicando el número de electrolizadores funcionando en cada momento por el caudal de hidrógeno que produce cada uno, se obtiene la cantidad de hidrógeno producida.

Finalmente, sumando la producción diaria, se obtiene la cantidad de hidrógeno que se generará a lo largo del año y se compara ésta con la demanda anual. Si no se satisface la demanda, hay que incrementar el número de módulos fotovoltaicos en la instalación y se vuelve a iniciar el proceso de

cálculo. En la instalación final el número de módulos será el que satisfaga la demanda y el número de electrolizadores será el máximo de los que trabajan simultáneamente.

3.3. Almacenamiento de hidrógeno

Debido a que la demanda de hidrógeno no coincide con su producción, es necesario acumular el hidrógeno producido. El volumen de hidrógeno acumulado el día i del año se obtiene con la expresión

$$V_i = V_{i-1} + P_i - C_i$$

donde V es la cantidad de hidrógeno acumulada, P es la producción de hidrógeno y C es la demanda de hidrógeno. Esta expresión da una curva, que en caso de tener una parte negativa se deberá trasladar verticalmente hasta que sea positiva. Una parte del hidrógeno acumulado se deberá comprimir para elevar su presión hasta la adecuada para el suministro a los vehículos.

Depósitos de almacenamiento

La cantidad de hidrógeno acumulada a alta presión será la demandada durante los 7 días de mayor consumo. Esto permitirá, en caso de avería del compresor, continuar con el suministro de hidrógeno a una presión adecuada. El hidrógeno restante se acumula a baja presión por motivos de seguridad. Por lo tanto, los depósitos de baja presión se dimensionan a partir del día de máxima acumulación. Estos deberán albergar la máxima cantidad de hidrógeno que se tendrá acumulada restándole la parte acumulada a alta presión.

El volumen de hidrógeno en condiciones normales en un depósito de volumen V_D viene dado por

$$V_{CN} = \frac{V_D P T_{CN}}{z P_{CN} T}$$

Las variables V , P , T y z representan respectivamente volumen, presión, temperatura y factor de compresibilidad. El subíndice CN significa que la variable que acompaña está en condiciones normales. Por lo tanto, la cantidad de hidrógeno acumulada entre las presiones máxima y mínima es

$$V_{H_2} = V_{CN_{max}} - V_{CN_{min}} = \frac{V_D P_{max} T_{CN}}{z_{max} P_{CN} T} - \frac{V_D P_{min} T_{CN}}{z_{min} P_{CN} T} = \left(\frac{P_{min}}{z_{min}} - \frac{P_{max}}{z_{max}} \right) \frac{V_D T_{CN}}{P_{CN} T}$$

Despejando el volumen del depósito, se obtiene la expresión que se ha empleado para dimensionar los depósitos:

$$V_D = \frac{V_{H_2} P_{CN} T}{\left(\frac{P_{max}}{z_{max}} - \frac{P_{min}}{z_{min}} \right) T_{CN}}$$

Los depósitos de baja presión no superarán los 30 bar puesto que es la máxima presión que pueden entregar los electrolizadores y no descenderán de 20 bar puesto que es la presión de aspiración mínima del compresor. Por otro lado, la presión máxima de los depósitos de alta presión será 200 bar puesto que esa es una presión adecuada para los vehículos del campo de golf, y no deberán descender de 160 bar para asegurar que los vehículos tengan una autonomía adecuada tras repostar hidrógeno.

Compresión de hidrógeno

El compresor escogido para la instalación es el Hydro-PacC03-03-300/600LX. Este consume una potencia eléctrica de 2,3 kW que será generada por el campo fotovoltaico, por lo que se instalarán módulos fotovoltaicos adicionales con este propósito. El número de módulos necesarios para la compresión se ha calculado con un método iterativo similar al empleado para dimensionar la producción de hidrógeno y descrito anteriormente. Se comienza suponiendo un determinado número de módulos instalados y se calcula el tiempo de funcionamiento del compresor y la cantidad de hidrógeno que comprime en dicho tiempo. El número de módulos se va incrementando hasta que la cantidad de hidrógeno que se puede comprimir cada mes supere a la producción mensual.

4. Resultados obtenidos

Teniendo en cuenta las hipótesis mencionadas en la sección de metodología, la demanda anual de hidrógeno asciende a 11297 Nm³ y la demanda diaria de hidrógeno depende de la estación del año como se puede observar en la figura 1. Realizando el cálculo iterativo descrito anteriormente, la demanda anual se puede satisfacer con 6 electrolizadores alimentados por 115 módulos fotovoltaicos. Este número de módulos fotovoltaicos se incrementa hasta 117 por motivos relacionados con el conexionado eléctrico de los módulos y los inversores de red. La producción diaria de hidrógeno que se puede obtener con esta instalación se puede observar en la figura 1.

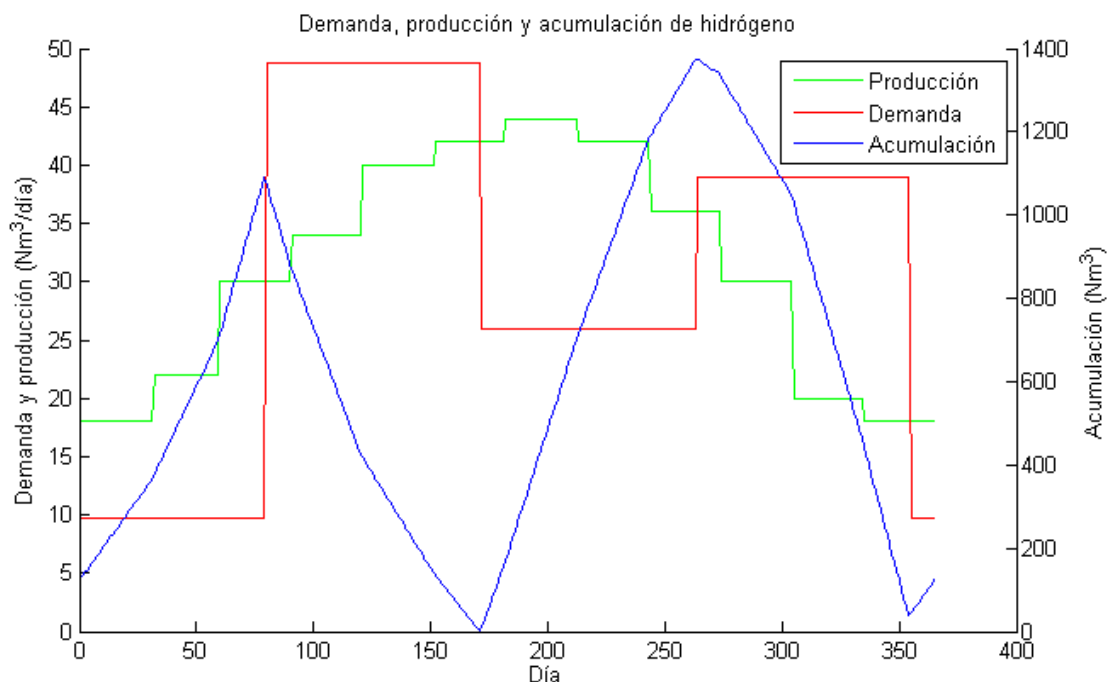


Figura 1: Demanda y producción diarias junto con la acumulación de hidrógeno en un año.

En la tabla 2 se puede observar la potencia eléctrica media generada con el campo fotovoltaico de 117 módulos, en función de la hora solar para el día promedio de cada mes. En función de esta potencia eléctrica varía el número de electrolizadores que pueden trabajar simultáneamente en cada momento, mostrados en la tabla 3. De este modo se puede alcanzar una producción máxima de 11458 Nm³ de hidrógeno, suficiente para satisfacer la demanda anual.

La acumulación de hidrógeno en la instalación varía en función del día, como se puede observar en la figura 1, y alcanza el máximo de 1375 Nm³. Los depósitos de alta presión deberán albergar 341 Nm³, suficiente para satisfacer 7 días de máxima demanda, entre las presiones de 160 bar y 200 bar. En el día de máxima acumulación los depósitos de baja presión contendrán 1034 Nm³ entre las presiones de 20 y 30 bar. Con estas condiciones impuestas, los depósitos de alta presión suman un volumen de 12,2 m³ y los de baja presión 118 m³.

Para poder comprimir la producción de hidrógeno de todos los meses, el compresor dispone de 17 módulos fotovoltaicos, que se incrementan a 18 por motivos relacionados con el conexionado eléctrico de los módulos y los inversores de red. La máxima cantidad diaria de hidrógeno que se puede comprimir se muestra en la figura 2, junto con la cantidad que se debe comprimir cada día para lograr que los depósitos de alta presión estén los más cerca posible de los 200 bar y en ningún caso descender de 160 bar.

Tabla 2: Potencia eléctrica (kW) disponible para los electrolizadores en cada hora de cada día promedio.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
4,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,5	0	0	0	0	1,77	2,92	2,61	0,83	0	0	0	0
6,5	0	0	1,55	4,17	6,19	7,65	7,52	5,63	2,99	0,08	0	0
7,5	1,72	3,83	6,61	9,33	11,30	13,01	13,14	11,31	8,83	5,45	2,50	1,10
8,5	6,93	9,31	12,26	14,83	16,59	18,50	18,91	17,28	15,21	11,65	8,21	6,11
9,5	12,24	14,73	17,65	19,93	21,40	23,44	24,13	22,76	21,23	17,70	13,98	11,26
10,5	16,57	19,06	21,89	23,87	25,07	27,20	28,11	26,97	25,92	22,50	18,66	15,49
11,5	19,00	21,47	24,22	26,02	27,05	29,22	30,25	29,26	28,49	25,16	21,28	17,87
12,5	19,00	21,47	24,22	26,02	27,05	29,22	30,25	29,26	28,49	25,16	21,28	17,87
13,5	16,57	19,06	21,89	23,87	25,07	27,20	28,11	26,97	25,92	22,50	18,66	15,49
14,5	12,24	14,73	17,65	19,93	21,40	23,44	24,13	22,76	21,23	17,70	13,98	11,26
15,5	6,93	9,31	12,26	14,83	16,59	18,50	18,91	17,28	15,21	11,65	8,21	6,11
16,5	1,72	3,83	6,61	9,33	11,30	13,01	13,14	11,31	8,83	5,45	2,50	1,10
17,5	0	0	1,55	4,17	6,19	7,65	7,52	5,63	2,99	0,08	0	0
18,5	0	0	0	0	1,77	2,92	2,61	0,83	0	0	0	0
19,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3: Electrolizadores trabajando simultáneamente en función de la hora solar.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,5	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
7,5	0	0	1	1	2	2	2	2	1	1	0	0
8,5	1	1	2	3	3	3	3	3	3	2	1	1
9,5	2	3	3	4	4	4	5	4	4	3	2	2
10,5	3	3	4	4	5	5	5	5	5	4	3	3
11,5	3	4	5	5	5	6	6	6	5	5	4	3
12,5	3	4	5	5	5	6	6	6	5	5	4	3
13,5	3	3	4	4	5	5	5	5	5	4	3	3
14,5	2	3	3	4	4	4	5	4	4	3	2	2
15,5	1	1	2	3	3	3	3	3	3	2	1	1
16,5	0	0	1	1	2	2	2	2	1	1	0	0
17,5	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
18,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

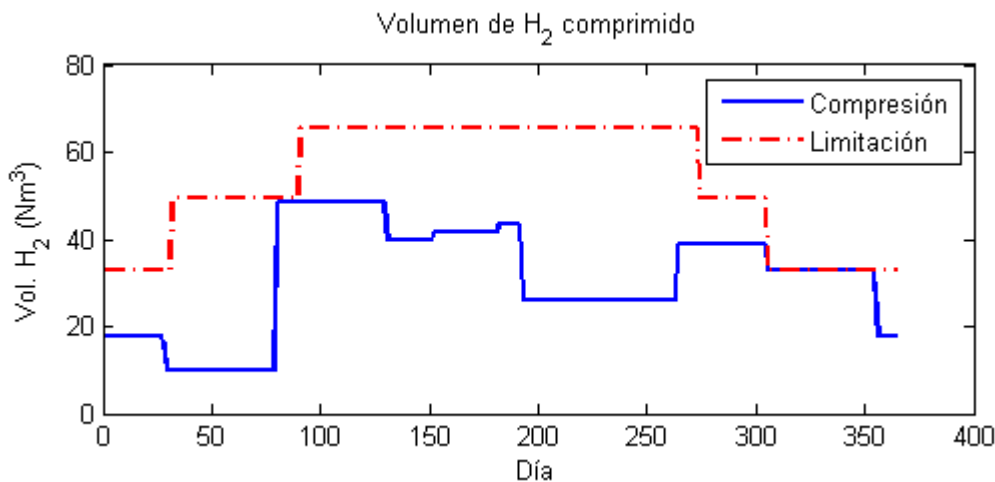


Figura 2: Volumen de hidrógeno comprimido diariamente (línea continua y azul) y máximo volumen que se podría comprimir por limitación energética (línea discontinua y roja).

5. Conclusiones y consideraciones finales

El sistema de generación diseñado cubre la demanda anual de hidrógeno para el funcionamiento de las células de combustible de los vehículos. La demanda de hidrógeno que se ha planteado es la necesaria para que estos vehículos tengan la misma autonomía que los convencionales. El método de cálculo seguido se puede emplear para dimensionar una instalación similar para cualquier otro campo de golf con una flota de vehículos distinta. También se puede emplear para dimensionar instalaciones de generación de hidrógeno para otros propósitos, siempre que se pueda cuantificar la demanda anual.

El principal inconveniente de la instalación diseñada es la gran cantidad de hidrógeno que se acumulará. Sin embargo, esto es inevitable puesto que el sistema de acumulación es el que asegura el suministro de hidrógeno en el momento demandado a pesar de estar completamente desfasadas las curvas de producción y demanda. Otro inconveniente es que el equipo necesario para la instalación es muy costoso en comparación con las fuentes energéticas convencionales.

Con la instalación que se ha diseñado, se satisface una demanda energética sin producir emisiones contaminantes gracias a la tecnología del hidrógeno en combinación con una fuente de energía renovable.

6. Referencias

Spiegel, C. *Designing and building fuel cells*. New York: McGraw-Hill, 2007. 496 p.

Asociación Española del Hidrógeno, www.aeh2.org.

Sancho Ávila, J.M. et al. *Atlas de Radiación Solar en España*. AEMET.

www.cleanergysolar.com

Duffie, J.A., Beckman, W.A. *Solar engineering of thermal processes*. Hoboken, NJ:Wiley, 2013. 936 p.