

Planta de generación de hidrógeno para vehículo de transporte urbano

Eduardo Soto Sepúlveda
edusotos@gmail.com

Resumen— Día a día, se movilizan millones de personas en dirección a su lugar de trabajo o bien donde realizan sus actividades cotidianas. Esto crea una dependencia de los medios de transporte ya que las ciudades tienen una extensión que incluso supera los límites normales en los tiempos de viaje. En este estudio se realiza un análisis económico de una planta aislada con energías renovables que permita cargar un tanque de hidrógeno para suministrar energía a una celda de combustible para un vehículo de 500W para moverse en un radio urbano de 12km.

Index Terms— hidrógeno, eólica, solar, celda de combustible

I. INTRODUCCIÓN

Este estudio se basa en el análisis energético realizado con anterioridad en el trabajo denominado “Programa de Simulación para la evaluación de la confiabilidad de Sistema de Transporte Solar” desarrollado en el marzo de 2006, donde se evaluó un vehículo liviano con dos fuentes principales de energía, un sistema fotovoltaico con un banco de baterías y la energía humana a través de pedales. El concepto se basa principalmente en las “bicicletas eléctricamente asistidas”. Durante la ejecución del proyecto se consideró la idea de dejar el sistema fotovoltaico en forma estática y acumular la energía durante el día en un sistema de almacenamiento como puede ser un banco de baterías o hidrógeno. La idea de tener una estación de generación de hidrógeno en casa para suministrar energía a un vehículo liviano, “aterriza” el uso del hidrógeno en los medios de transporte debido el peso, la potencia y la energía son variables críticas de diseño.



Fig. 1 Bicicleta eléctricamente asistida con hidrógeno
Fundación para el desarrollo de nuevas tecnologías del hidrógeno en Aragón
Parque tecnológico WALQA, Huesca - España

II. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

Durante la Expo Zaragoza 2008, la ciudad pudo disfrutar y conocer distintas tecnologías en transporte que funcionaban con hidrógeno. También se construyó una planta de generación de hidrógeno para cubrir las necesidades de los autobuses y otros transportes como bicicletas y motos eléctricas. Nos centraremos principalmente en describir las características de las bicicletas debido a que se acercan más a los requerimientos del sistema de transporte.

A continuación se presenta un cuadro resumen con la celda de combustible y características eléctricas de la bicicleta

Air-Cooled PEM fuel-cell
Rated Power: 240W
Rated Voltage: 24V
Rated Current: 10A
DC Voltage range: 20 – 38V
Efficiency: >=50%
Pure hydrogen: >= 99,95%
Pressure: 0,4 – 0,5 bar
Hydrogen consumption: 3lt/min
Oxidant/coolant: air
Pressure: ambient pressure
Mass: 760g

Estos valores permiten tener una referencia para el diseño del consumo de hidrógeno en la aplicación de transporte planteada en este estudio.

III. PROGRAMA DE SIMULACIÓN

Para diseñar un sistema aislado con energías renovables es necesario la ayuda de un software especializado que permita evaluar las condiciones de los recursos naturales disponibles, considerar los requerimientos energéticos y los costes asociados a la planta.

Para este estudio se utilizará el programa HOMER (NREL – National Renewable Energy Laboratory) que es robusto y sencillo que permite optimizar la planta de hidrógeno que se desea diseñar. Si bien, es posible utilizar otro tipo de software la decisión de utilizar este se debe a la gran cantidad de documentación y mejoras realizadas desde su versión inicial.

IV. OPERACIÓN DE LA PLANTA DE HIDRÓGENO

Para realizar la evaluación y encontrar un óptimo en el diseño

de la planta se definen algunos parámetros de operación tanto del consumo, como del método de recarga del hidrógeno en el vehículo.

Se consideran algunos aspectos previamente estudiados que se encuentran en el anexo en el trabajo de simulación de la tricicleta solar en una ruta de 12km en el radio urbano de Valparaíso – Chile (latitud 33° S, longitud 71,30°W).

El vehículo de transporte construido en el año 2007, tuvo modificaciones en cuanto al diseño original debido a que se utilizó un motor AC en vez que uno DC. Esto mejoró considerablemente la curva de par-velocidad y la eficiencia del sistema utilizando un convertidor DC/AC trifásico. El nuevo motor y convertidor tienen una potencia nominal de 500W.

La velocidad máxima de operación es de 40km/h y en este estudio se considerará el caso más desfavorable que sería recorrer el trayecto a máxima potencia.

Se utilizarán dos botellas para el almacenamiento de hidrógeno, una mientras se carga en casa, la otra se utiliza en el vehículo durante el día, esto permite desacoplar el problema de la carga y consumo y se puede diseñar de mejor forma el sistema con energías renovables debido a que el electrolizador no requerirá de gran potencia debido a que tendrá gran parte del día para la generación y almacenamiento de hidrógeno.

La energía total de ida y regreso estimada será entonces de 1000Wh. Una forma es que el perfil de carga sea constante durante el día y noche y que la suma total permita la carga del estanque para ser aprovechada al otro día. Por seguridad en el diseño se considerará una eficiencia del sistema de carga del 52% considerando el proceso de electrolisis (80%) y almacenamiento (65%). La eficiencia del sistema de conversión en el vehículo será de un 50%, pese a que puede ser mayor, se considerará un valor menor por aspectos de diseño. La energía total diaria requerida por el electrolizador es de 3,9 kWh.

Durante el día (8 a 18h00) se cargará un 80% de la energía debido a que se encuentra la energía solar fotovoltaica en combinación con la energía eólica generando y cargando el hidrógeno en el estanque. Fuera de esos horarios el sistema se operará con el aerogenerador. Debido a que el sistema debe ser confiable y existe la posibilidad de no cubrir el 100% del hidrógeno se utilizará un banco de baterías de apoyo.

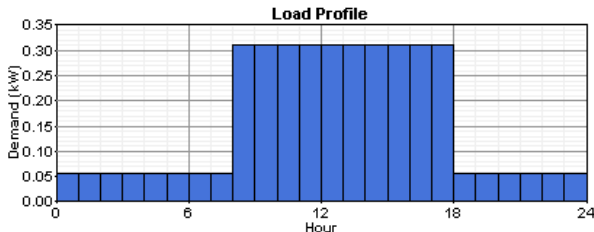


Fig.2 Perfil de carga del electrolizador

V. RECURSOS ENERGÉTICOS

Valparaíso cuenta con una estación meteorológica que funciona ininterrumpidamente desde los años 60's ubicada en el Laboratorio de evaluación solar de la Universidad Técnica

Federico Santa María. A partir de los datos de radiación y velocidad del viento medidos se ingresaron los valores al software de evaluación.

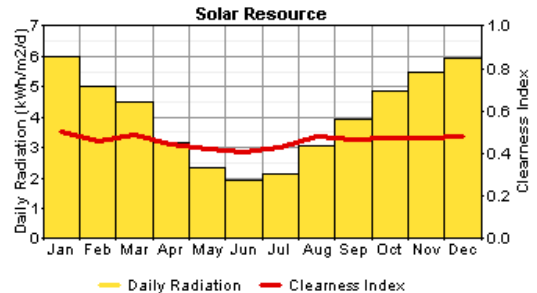


Fig.3 Radiación solar utilizada para la evaluación

Fuente: libro "Irradiancia solar en territorios de la República de Chile"

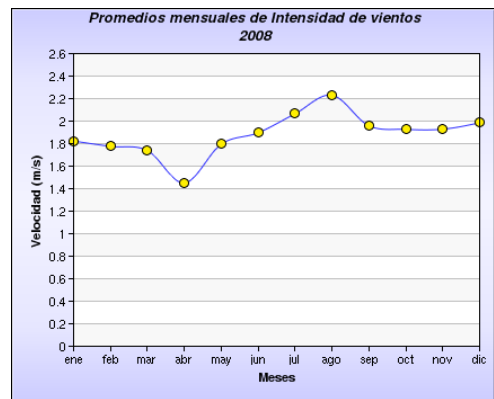


Fig. 4 Velocidad del viento

Fuente : www.labsolar.ufsm.cl

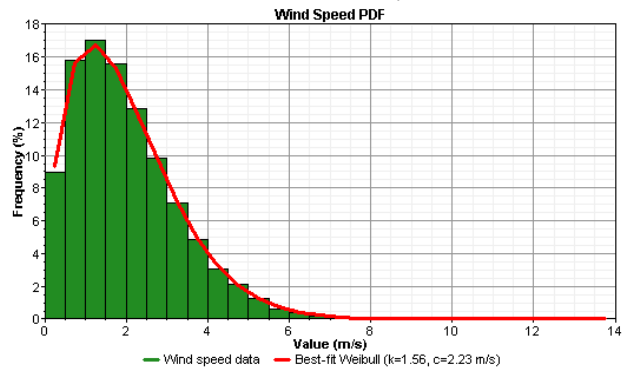


Fig. 5 Distribución Weibull generada por el software según los datos de entrada

VI. DISEÑO DE LA PLANTA DE ENERGÍAS RENOVABLES

Como se describió anteriormente, el sistema consta paneles fotovoltaicos, aerogenerador, un banco de baterías y un electrolizador. Los costes y diseño del electrolizador se realizarán por separado, debido a que el software posee un esquema predeterminado para estos componentes y no se desea utilizar este ya que es un caso especial y el objetivo es la producción de hidrógeno y no energía como sería normal en una simulación en HOMER.

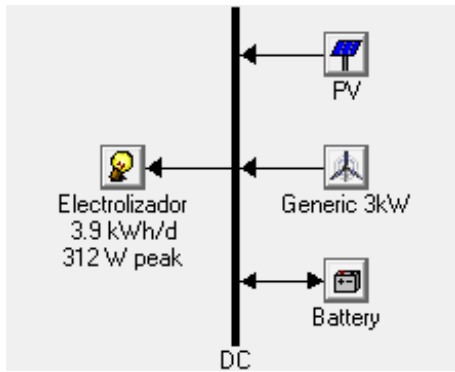


Fig. 6 Esquema de la planta aislada para generación de hidrógeno con energías renovables

El software realiza el cálculo energético y de costes y optimiza la mejor configuración de equipos minimizando los costes asociados a la inversión, mantenimiento y recambio de equipos. Para ello es necesario configurar los elementos para darle al software el rango de evaluación. A continuación se describirán los datos de entrada para cada uno de los elementos.

1. Paneles fotovoltaicos

Se consideraron 7 posibilidades de paneles fotovoltaicos en un rango de 0.1 a 2kWp. El coste del sistema instalado se estimó a 900 € por cada 200Wp con una vida útil de 20 años, que coincide con duración del proyecto.

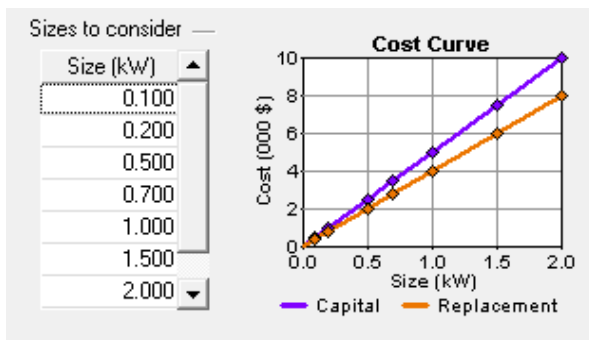


Fig. 7 Potencia de los sistemas fotovoltaicos y costes

2. Aerogeneradores

Debido a que los costes de los aerogeneradores en los rangos de baja potencia (1 a 5kW) no son muy diferentes, se utilizó para la simulación un aerogenerador de 3kW. Es importante destacar eso sí que las velocidades de arranque están por sobre la media del viento predominante en la zona por lo que se espera que el aporte eólico global no sea muy grande.

En la Fig. 8 se presenta la curva de potencia del aerogenerador simulado. Se probaron tres configuraciones de 0, 1 y 2 aerogeneradores de este tipo.

El coste de instalación se estimó a 1000 €/kW.

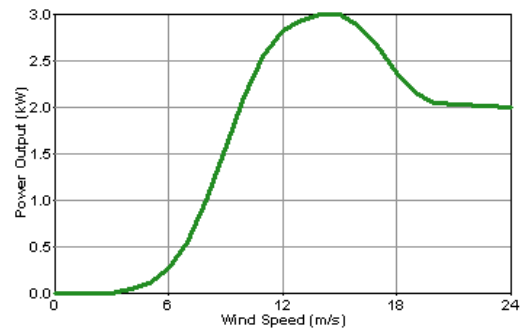


Fig. 8 Curva de potencia del aerogenerador 3kW

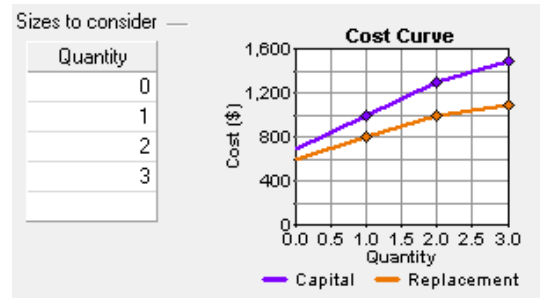


Fig. 9 Coste del aerogenerador

3. Baterías

El software posee una base de datos de baterías comerciales con las características físicas que son relevantes para la simulación. El único criterio de selección fue la energía total de almacenamiento que no fuera inferior al de un 30% de la energía almacenada (1,17kWh). Se seleccionó la batería Hoppecke 6OPzS 600 de 1,2kWh. La vida útil se consideró a 5 años.

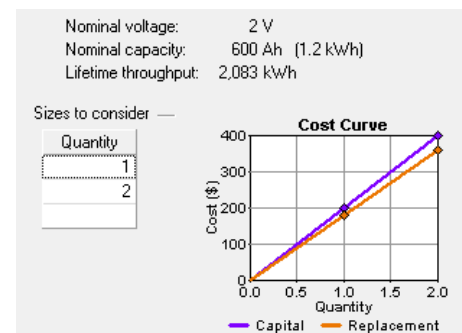


Fig. 10 Coste batería Hoppecke 6OPzS 600 de 1,2kWh

VII. SIMULACIÓN

Una vez definidas las variables de entrada, HOMER evalúa las distintas combinaciones de los equipos bajo las condiciones del recurso eólico y solar. En este caso ha realizado 56 simulaciones evaluando la sensibilidad de los resultados económicos frente a un cambio de la velocidad media del viento.

Como se esperaba, el recurso eólico es deficiente lo que hace encarecer el coste del proyecto debido a que el aporte solar debe ser mayor.

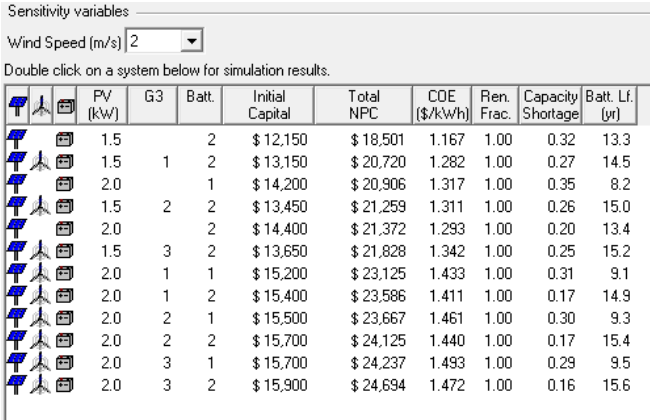


Fig. 11 Resultado de la simulación. Estudio de sensibilidad con velocidad media de 2 m/s

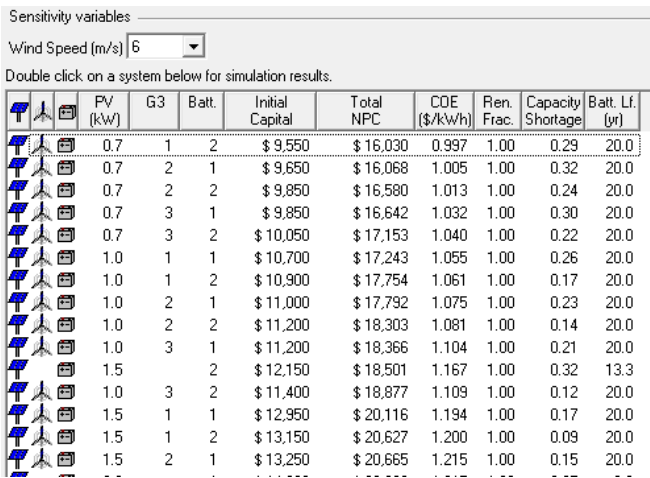


Fig. 12 Resultado de la simulación. Estudio de sensibilidad con velocidad media de 6 m/s

A medida que aumenta la velocidad media del viento se reducen los costes y el aporte solar es mayor. Claramente en esta zona es muy desfavorable el recurso eólico por lo que el óptimo es una planta solar de 1.5kWp con dos baterías (en las condiciones más desfavorables ver Fig.11)

Component	Initial	Annualized	Annualized	Annual	Annual	Total
	Capital	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Annualized
	(\$)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)
PV Array	6,750	542	-0.00	150	0	692
Battery	400	32	9.61	50	0	92
Other	5,000	401	0.00	300	0	701
Totals	12,150	975	9.61	500	0	1,485

Tabla 1 Coste anual de la planta

En la tabla 1 se muestran los costes asociados a cada uno de los elementos, la inversión, reemplazo, operación y mantenimiento. Se observa que el mayor coste de la planta con energías renovables esta en el sistema fotovoltaico y el banco de baterías representa una fracción menor de la inversión. Sin embargo, el coste de sustitución a los 5 años y el mantenimiento hace que el banco de baterías sea un equipo de gran importancia en los costes totales.

En se consideró una inversión de 5000€ para la implementación de la celda y electrolizador del vehículo.

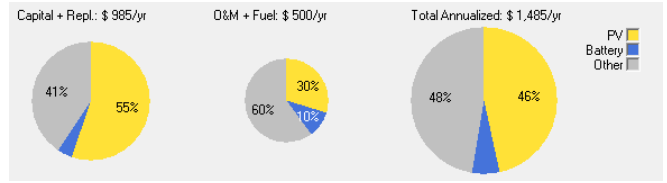


Fig. 13 Distribución de los costes de la planta

Para evaluar la importancia del banco de baterías se puede observar la gráfica en Fig. 14 que muestra las distintas variaciones de carga que sufre en el periodo de un año. Es por ello que este elemento es fundamental para el control de la energía que se debe suministrar al electrolizador.

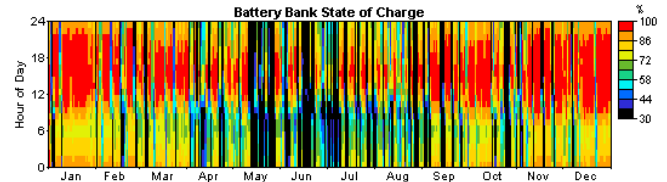


Fig. 14 Carga del banco de baterías

Podría pensarse que el exceso de energía se debe al sub dimensionamiento del electrolizador. Sin embargo limitar la potencia máxima en la producción y que sea baja permite reducir considerablemente los costes ya que a medida que aumenta la potencia nominal subirán los costes de generación de hidrógeno y en general los costes totales del proyecto.

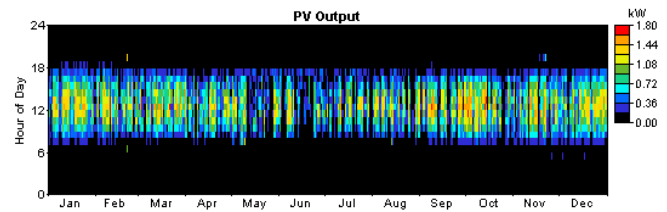


Fig. 15 Potencia generada en el año por el sistema fotovoltaico

La Fig. 15 muestra las horas de operación del sistema fotovoltaico. Se ve como coincide los horarios de mayor demanda configurados para el electrolizador (8 a 18h00) con las horas solares. El banco de baterías actúa como “buffer” y permite cumplir los requerimientos para la producción de hidrógeno.

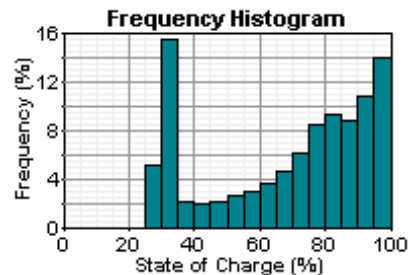


Fig. 16 Carga del banco de baterías en el año

El banco de baterías opera principalmente en rangos de carga sobre el 60%. Sin embargo existe una zona de operación crítica ya que un 15% del tiempo operara en rangos de carga

bajos como se observa en Fig. 16 funciona en un 30% de carga. Esto se puede solucionar optimizando la estrategia de almacenamiento en baterías ya que si se tienen dos baterías se puede definir un régimen de carga y descarga que impida que suceda esto.

VIII. OTRAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

Está claro que si existiera un mejor recurso eólico permitiría bajar los costes de la planta aislada y mejorar la disponibilidad haciendo que el banco de baterías fuera más pequeño. Para evaluar la hipótesis se cambiarán las condiciones de viento a 4,5 m/s y un factor de forma de la Weibull $k=2$.

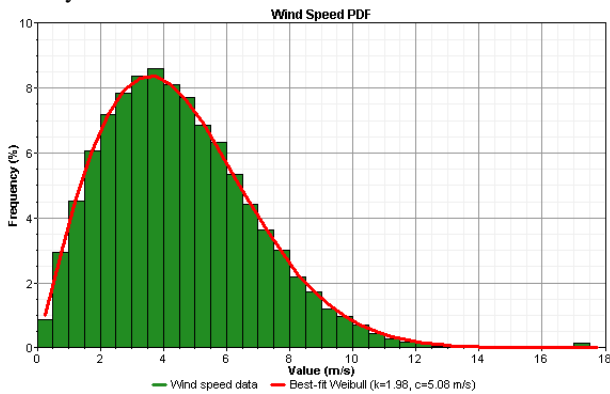


Fig. 17 Distribución Weibull con las nuevas condiciones de evaluación

Sensitivity variables
Wind Speed (m/s) 4.5

Double click on a system below for simulation results.

	PV (kW)	G3	Batt.	Initial Capital	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Batt. Lf. (yr)
	0.7	1	2	\$ 9,550	\$ 16,030	1.030	1.00	0.38	20.0
	0.7	2	1	\$ 9,650	\$ 16,068	1.027	1.00	0.39	20.0
	0.7	2	2	\$ 9,850	\$ 16,580	1.036	1.00	0.30	20.0
	0.7	3	1	\$ 9,850	\$ 16,642	1.050	1.00	0.35	20.0
	0.7	3	2	\$ 10,050	\$ 17,153	1.059	1.00	0.27	20.0
	1.0	1	1	\$ 10,700	\$ 17,264	1.081	1.00	0.33	17.2
	1.0	1	2	\$ 10,900	\$ 17,754	1.084	1.00	0.24	20.0
	1.0	2	1	\$ 11,000	\$ 17,796	1.092	1.00	0.27	19.4
	1.0	2	2	\$ 11,200	\$ 18,303	1.098	1.00	0.19	20.0
	1.0	3	1	\$ 11,200	\$ 18,366	1.117	1.00	0.24	20.0
	1.5	2	2	\$ 12,150	\$ 18,501	1.167	1.00	0.32	13.3
	1.0	3	2	\$ 11,400	\$ 18,877	1.123	1.00	0.16	20.0

Fig. 18 Resultados de la evaluación con el cambio de la velocidad del viento

Como se esperaba, la energía eólica permite reducir los costes y el tamaño del sistema fotovoltaico. Sin embargo, el sistema fotovoltaico no es prescindible para velocidades medias de viento cercanas a 8 m/s (ver Fig.19). Esto demuestra que el sistema eólico-solar es la mejor alternativa ya que da seguridad de abastecimiento de hidrógeno.

Sensitivity variables
Wind Speed (m/s) 8

Double click on a system below for simulation results.

	PV (kW)	G3	Batt.	Initial Capital	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Batt. Lf. (yr)
	0.1	2	1	\$ 6,500	\$ 12,046	0.794	1.00	0.38	20.0
	0.1	1	2	\$ 6,850	\$ 12,583	0.824	1.00	0.36	20.0
	1.5	2	2	\$ 12,150	\$ 18,501	1.167	1.00	0.32	13.3

Fig.19 Resultados óptimos del estudio de sensibilidad con v=8m/s

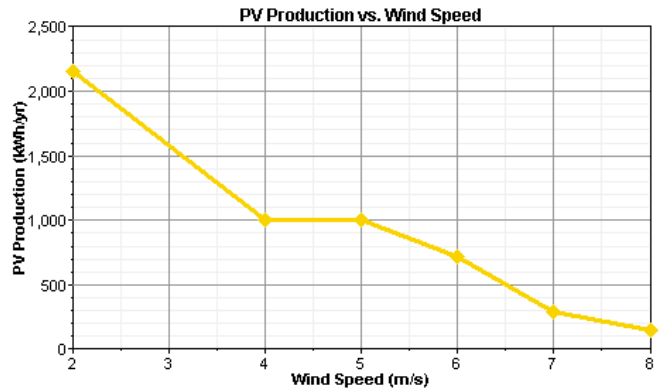


Fig. 20 Producción de energía solar fotovoltaica a medida que la velocidad media del viento aumenta

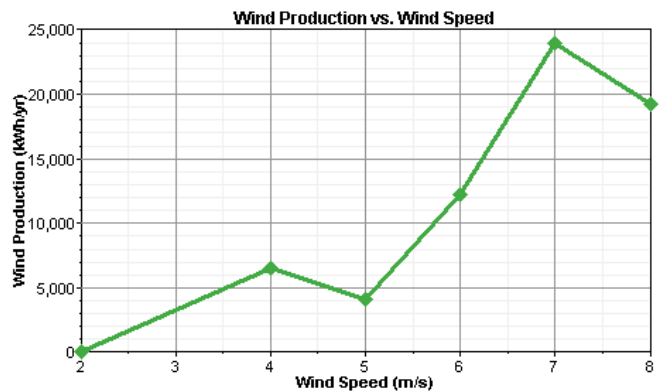


Fig. 21 Producción de energía eólica a medida que la velocidad media del viento aumenta

Para una velocidad de 7 m/s existe un máximo de energía producida como se ve en Fig. 21 y el aporte solar es bajo como se ve en Fig. 20.

IX. HIDRÓGENO Y BANCO DE BATERÍAS

Las nuevas tecnologías han solucionado algunos problemas de las baterías que limitaban su utilización. El peso, efecto memoria, rapidez de carga y descarga son sólo algunas de las tantas limitantes que gracias a nuevos electrolitos y tecnologías de los materiales se han mejorado. Sin embargo queda la interrogante sobre el uso de estas tecnologías comparándolas con las ventajas que ofrece el hidrógeno como vector energético.

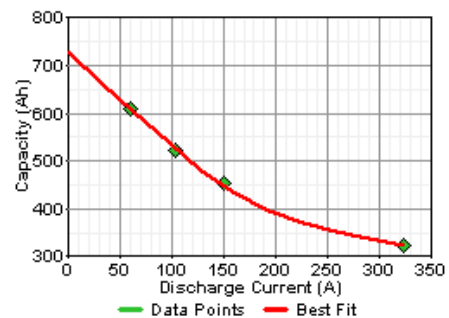


Fig. 22 Capacidad (Ah) en función de la corriente de descarga (A). Limitación en la descarga de la batería de plomo ácido.

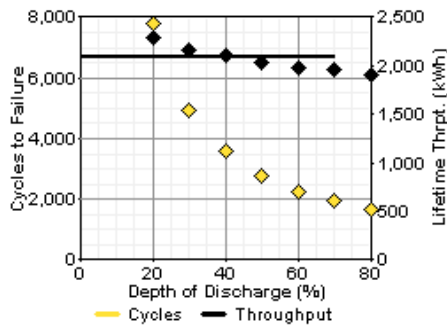


Fig. 23 Vida útil de la batería utilizada en las simulaciones. Curva obtenida desde el software HOMER

Está claro que no existe una sola respuesta para esta interrogante de ¿qué es mejor?

En este trabajo se quiere aportar una visión diferente al concepto de transporte, ya que las nuevas tecnologías apuntan a tratar de igualar los grandes vehículos de combustión interna sin primero mirar aspectos importantes de nuestra sociedad e impacto que tiene estos conceptos antiguos de que existirá un automóvil por persona.

La combinación de las tecnologías de almacenamiento puede ser la gran solución, ya que en la búsqueda del mejor fuente energética es una carrera que no sabemos dónde acabará, mientras que si aprovechamos las mejores características del hidrógeno, las baterías y los super condensadores podríamos estar dando respuestas inmediatas a los problemas del transporte de personas. Esta es sólo una visión de este problema y quise dedicarle un apartado para dejar algún pensamiento que le dé sentido a todo esto.

X. CONCLUSIONES

Este estudio permite ver la gran cantidad de variables que influyen en la evaluación de un proyecto con energías renovables. Además, cuando se plantean un nuevo desafío no existe un método estándar lo que complica en gran medida todo.

A través de este trabajo, se quiso plantear un ejemplo práctico de cómo podría aprovecharse el hidrógeno como una alternativa energética para el transporte utilizando un concepto amigable con el medio ambiente, reduciendo la huella ecológica que día a día crece con las ciudades y la mentalidad del “óptimo económico”.

El estudio a través de un software de optimización como HOMER (NREL), permite fácilmente analizar los problemas de las configuraciones de los sistemas eólicos y solares. No obstante, la etapa más importante del estudio se basa en la fiabilidad de los datos del recurso energético (datos solares y del viento). Otro aspecto, es tener un criterio adecuado para realizar las proyecciones económicas y de los costes de equipos, mantenimiento y operación.

Finalmente, se concluye de este estudio que los costes de los equipos son determinantes para que personas puedan ejecutar este tipo de proyectos, debido al alto coste de inversión que se requiere.