



4^{to} Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica



MODELO DINÁMICO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA AISLADO DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE FUENTES RENOVABLES

Gabriel Correa Perelmuter^a, Santiago Nolasco^b, Tomás Falaguerra^a y Griselda Jeandrevin^b

^aCentro de Investigaciones y Transferencia de Catamarca (CITCA), CONICET-UNCA, calle Prado 366, Catamarca - 4700 San Fernando del Valle de Catamarca, Argentina. +543834428648

^bDpto. Mec. Aer., Facultad de Ingeniería, Instituto Universitario Aeronáutico Av. Fuerza Aérea 6500 (IX5010JMX) Córdoba, Argentina. <http://www.iua.edu.ar>

Palabras Clave : Modelo dinámico, Hidrógeno, Electrolizador alcalino 5 kW, Paneles solares, Aerogenerador

Resumen

La reducción en los costos de producción de módulos fotovoltaicos y generadores eólicos de pequeña y mediana potencia abre la posibilidad en el corto plazo de ofrecer una solución económicamente competitiva para cargas eléctricas que estén aisladas de la red eléctrica. Por otra parte, el uso de la tecnología del hidrógeno como vector de almacenamiento de energía en sistemas de generación con fuentes renovables permitirá disponer de un suministro de energía de forma sustentable. El hidrógeno representa por lo tanto una solución para acumular energía proveniente de las fuentes renovables y tiene todas las ventajas de un combustible de alta eficiencia (acumulable, transportable, alta densidad de potencia, etc.) con un impacto ambiental nulo (su utilización sólo produce vapor de agua). Sin embargo, el diseño y configuración de estos sistemas de generación basados en fuentes renovables dependen de forma importante de las condiciones climáticas locales. Usualmente esta clase de sistemas de generación se sobre-dimensionan con la finalidad de poder satisfacer la carga eléctrica conectada a ellos, lo que implica un reducción de su eficiencia así como también eleva los costos de inversión, mantenimiento y operación. En este trabajo se realizó un modelo dinámico en simulink de un sistema completo de generación y almacenamiento para sistemas aislados. Dicho sistema está compuesto por un aerogenerado de 1,5 kW, un arreglo de paneles solares de 1kW, un paquete de baterías de gel-ácido y un electrolizador de 5 kW. Todos ellos conectados a un DC bus de 48volt. Además en este trabajo se propone el diseño óptimo de dicho sistema. El proceso de optimización tiene como objetivo determinar la mejor configuración del sistema de generación renovable de energía, que satisfaga el compromiso entre la energía suministrada por las fuentes y la confiabilidad del suministro de hidrógeno.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de fuentes de energía basadas en recursos renovables ya ha sido ampliamente reconocido como la alternativa más viable para resolver los problemas asociados con la combustión térmica convencional, tales como su ineficiencia operacional, el agotamiento de las reservas de los combustibles fósiles y el aumento de la contaminación ambiental. La incorporación masiva en el sector productivo local de sistemas de generación de electricidad por métodos alternativos no contaminantes, tales como convertidores solares fotovoltaicos o turbinas eólicas, contribuirá a reducir la demanda de combustibles derivados del petróleo, preservar el medio ambiente y mejorar la calidad de vida. No obstante, el eficaz aprovechamiento de estas fuentes de energías alternativas y renovables requiere, casi indefectiblemente, del desarrollo de vectores energéticos adecuados, prácticos y robustos.

Por sus características de funcionamiento intermitente estos sistemas deben complementarse con dispositivos electroquímicos de acumulación de electricidad, como baterías recargables avanzadas o sistemas de almacenamiento de hidrógeno producido por electrólisis a partir de excedentes de energía eléctrica, esto es, en base a la conversión de energía eléctrica en energía química del hidrógeno. Por otra parte la importancia de desarrollar sistemas aislados sostenibles se vincula con la capacidad de sostener energéticamente “puntos aislados”. Estos constituye una necesidad estratégica para el país ya sea desde la custodia de las fronteras en hasta los reclamos soberanos de nuestro territorio, pasando por la protección de parques y reservas naturales. Todos necesitan de formas autónomas de captación, almacenamiento y generación de energía. En este trabajo se describe el modelo de un sistema aislado de generación de Hidrógeno mediante fuentes sustentables. Dicho sistema está compuesto por un aerogenerador de 1,5 kW, un arreglo de paneles solares de 1kW, un paquete de baterías de gel-ácido, una carga fantasma y un electrolizador alcalino de 5 kW, todos ellos conectados a un DC bus de 48 volt (ver figura 1). En este tipo de sistemas, uno de los mayores problemas a resolver está vinculado a la condición fluctuante del recurso renovable (solar y eólico). Ésta fluctuación es directamente asociada a las condiciones estacionales y climáticas. Por lo tanto resulta necesario realizar un control de cada uno de los sistemas para garantizar: 1- que la operación de los electrolizadores se realice en forma correcta, tratando de hacer funcionar el mismo en condiciones de seguridad y de máxima eficiencia. 2- El máximo uso de las fuentes de energía (no utilización de la disipación de energía), 3- Que la batería no deba ser recargada mediante cargas externas al sistema. Los electrolizadores alcalinizador para garantizar la calidad del Hidrógeno producido (evitando la mezcla con O₂) suelen tener un límite inferior de operación que puede estar entre el 25 y 40 de su corriente nominal.

En este trabajo se propone un sistema de producción de H₂ mediante dos fuentes renovables (eólica y solar) y un sistema de backup (baterías) que sirva para erogar corriente cuando el requerimiento de H₂ por parte del electrolizador sea más elevado que el otorgado por las fuentes y para almacenar energía en el caso que la energía provista por las fuentes sea más elevada que la solicitada por el electrolizador. Como la producción de H₂ es directamente proporcional a la corriente eléctrica, el sistema debe garantizar controlar la corriente proporcionada al electrolizador, para que éste opere en los valores nominales (para maximizar la eficiencia).

La ventaja de este concepto es que posibilita la complementariedad de las fuentes y la operación del electrolizador a corriente nominal maximizando el uso de energía. Además el sistema cuenta con una carga fantasma que funciona en caso en que la corriente entregada por las fuentes sea mayor a la requerida por el electrolizador y la batería ya no pueda cargarse más. En este caso la corriente excedente es absorbida por la carga fantasma y disipada en calor por efecto joule.

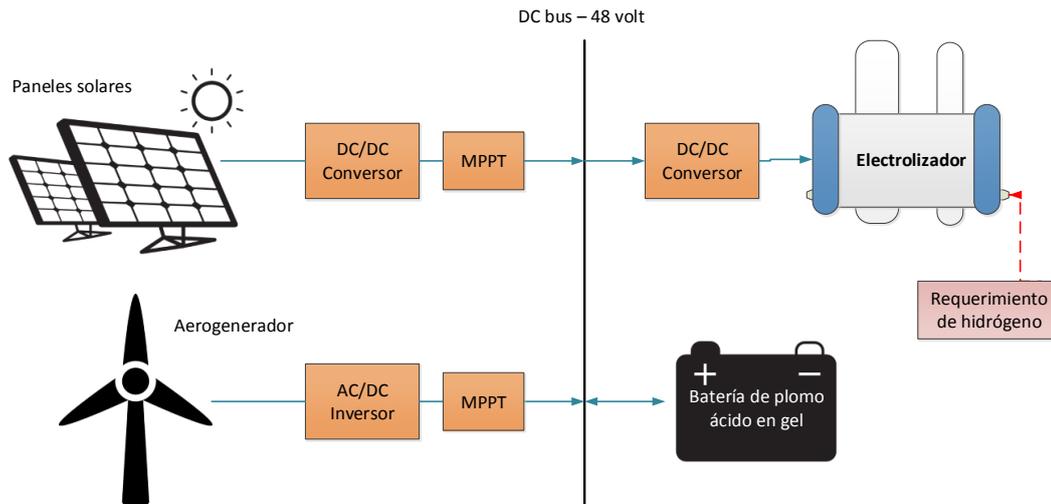


Figura 1: Esquema eléctrico sistema

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El principio de funcionamiento del sistema híbrido se muestra en el esquema de la Figura 1. La Tabla 1 presenta los componentes y características de funcionamiento de la instalación eólica-solar-batería para la generación de hidrógeno.

| componente | característica |
|----------------------------|----------------|
| Aerogenerador | 1 [kW] |
| Arreglo de paneles solares | 4 x 250 [W] |
| Electrolizador | 5 [kW] |
| Paquete de baterías | 4 x 55 [Ah] |

Tabla 1: Características de los componentes del sistema

El electrolizador de tipo alcalino es un desarrollo totalmente original realizado por el Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA). Es un equipo prototipo ya que es el resultado del trabajo de investigación y experimentación. Las principales características están detalladas en Tabla 2.

| Parámetro | Valores |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Alimentación de potencia | Trifásica, entre 40 V y 120 V |
| Alimentación de control | Monofásica, 220 V, 50 Hz |
| Consumo máximo | 5 KW |
| Presión máxima de operación | 30 bar |
| Presión máxima de almacenamiento | 25 bar |
| Electrolito | KOH 30 |
| Temperatura de operación | 60°C |
| Temperatura ambiente de operación | -5°C a 30°C |

Tabla 2: Características Electrolizador alcalino de 5 kW

2.1. SELECCIÓN DE LUGAR DE UBICACIÓN DE GENERADOR EOLICO

El análisis de las características del viento en el sitio considerado se hizo sobre la base de las series históricas de velocidad y dirección de viento relevadas en la estación meteorológica de la Escuela de Aviación Militar (87347) de los últimos 7 años. Datos facilitados por el Servicio Meteorológico Nacional.

La estación N° 87347 está ubicada en los predios de la Escuela de Aviación a 502 m de altura, la altura en que están montados los instrumentos de la estación es 10 m, sus coordenadas de posicionamiento global son 31 O 26' 31" de Latitud Sur y 64o 16' 50" de Longitud Oeste. Se determinó que los meses de mayor intensidad de vientos son septiembre, octubre y noviembre con una velocidad promedio de 5.0 m/s, el resto de los meses del año la velocidad promedio es de 4.1 m/s. La dirección predominante de viento es del NNE y N para las mayores intensidades registradas, y también del SSW y SSE para intensidades menores, pero de mayor frecuencia.

Para la selección del lugar donde se instaló el Generador Eólico se tuvo en consideración principalmente las direcciones predominantes de viento. Luego se buscó el lugar donde existe menor incidencia de la rugosidad del terreno según estas direcciones. Y por último, la ubicación de la pista de Escuela de Aviación Militar. Según estas consideraciones se seleccionó el punto marcado en la Figura 2. Cuyas coordenadas son 31 o 25' 53" de Latitud Sur y 64 o 16' 38" de Longitud Oeste.

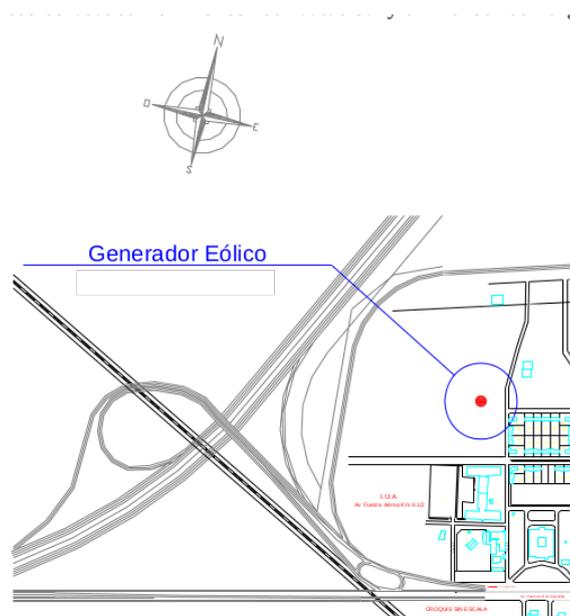


Figura 2: Ubicación eolico

3. DESCRIPCION DEL MODELO

3.1. Modelo Electrolizador

Los electrolizadores ampliamente difundidos son los electrolizadores de solución alcalina, en este caso se utiliza hidróxido de sodio (KOH) al 20-30 % p/p, esto brinda las condiciones óptimas de conductividad y el acero presenta resistencia a la corrosión en este rango de concentraciones. El rango de temperaturas y presiones de operación va de 60 a 100°C y de 1 a 30 bar respectivamente.

La cinética electroquímica de la reacción en la celda electrolítica puede modelarse a partir de ecuaciones empíricas corriente-potencial (I-V)[1, 2, 3], para el caso se ha obtenido la siguiente correlación empírica:

$$V = 43,67 - 0,006487 * I + 17,53 * \log(I) \quad (1)$$

Dicha correlación empírica se obtuvo a través del ensayo de polarización del electrolizador (Ver Figura 3).

A diferencia de los modelos precedentes donde se calcula el caudal de hidrógeno a partir de la corriente de alimentación, se busca proporcionar la información de la corriente apropiada y el potencial de trabajo a partir del caudal requerido de H₂. Para esto se parte de la ley de Faraday, considerando una pérdida debida a la eficiencia de Faraday:

$$\dot{m}_{H_2} = \eta_F \frac{IN}{zF} \quad (2)$$

Donde m_{H_2} : es el caudal total de hidrógeno generado; η_F : es la eficiencia de Faraday; z : es el coeficiente estequiométrico; I : la corriente de alimentación al electrolizador; N ; el número de celdas en serie; y F : la constante de Faraday. Para desarrollar I en función del caudal de H₂ buscado.

La eficiencia de Faraday es la relación entre la producción obtenida en el electrolizador y la producción máxima teórica de hidrógeno, se han elaborado diversas ecuaciones empíricas para el cálculo de esta eficiencia en función de la corriente de alimentación y la temperatura, sin embargo como estas condiciones se fijan constantes para el modelo, podemos asumir un valor constante de la eficiencia. Para una corriente mayor a 50 mA/cm^2 ésta eficiencia se puede estimar en 0,9.([1])

Reescribiendo la ecuación de la ley de Faraday obtenemos:

$$I = m_{H_2} \frac{zF}{N\eta F} \tag{3}$$

| parametro | magnitud | unidades |
|-----------------------------|----------|-----------------|
| Temperatura nominal | 363 | K |
| Área de electrodos | 100 | cm ² |
| cantidad de celdas en serie | 40 | |
| eficiencia de faraday | 0.9 | |

Tabla 3: Condiciones de simulación del electrolizador:

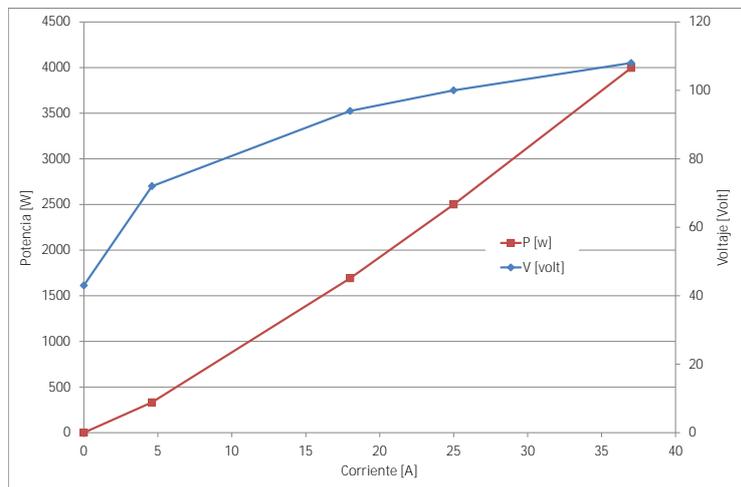


Figura 3: Curva de polarización del Electrolizador

3.2. Modelo Aerogenerador

El modelo de aerogenerador desarrollado en este trabajo es basado en un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG).

La potencia obtenida por turbina eólica puede ser expresado como:

$$P_T = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 c_p V^3 \tag{4}$$

donde ρ : densidad del aire (por lo general de $1,25 \text{ kg/m}^3$), R : radio de las palas, c_p : coeficiente de potencia y V : velocidad del viento. $C_p(\lambda, \beta)$ es el coeficiente de potencia, λ es la relación de velocidad punta de pala, β es el ángulo de paso y se toma la aproximación propuesta en [4].

Se utilizó un bloque de la biblioteca Simulink / Sim Power Systems de máquina síncrona de imanes permanentes para simular la máquina. Para simular la turbina eólica, se utiliza un bloque de la turbina de viento de la biblioteca Simulink / Sim Power Systems. Los datos de ingreso al sistema son velocidad del viento en m/s y son tomados desde las mediciones realizadas en los últimos 15 años por el Servicio Meteorológico Nacional en su estación de superficie ubicada en la Escuela de Aviación Militar de la Fuerza Aérea, lugar con mayor cercanía al emplazamiento del aerogenerador.

3.3. Modelo Paneles solares

El circuito equivalente más simple para describir el comportamiento de una celda fotovoltaica es una fuente de corriente en paralelo con un diodo una resistencia en paralelo (R_p) que expresa una corriente de fuga, y una resistencia en serie (R_s) que describe una resistencia interna al flujo de corriente. (Fig 4). La salida de la fuente de corriente es directamente proporcional a la luz que incide sobre la célula. El diodo determina las características de I-V de la célula [5]. El modelo no incluye dependencia de la temperatura. Las ecuaciones que describen las características I-V de la célula son:

$$I_{SC} - I_D - \frac{V_D}{R_P} - I_{PV} = 0 \quad (5)$$

$$I_D = I_0(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1) \quad (6)$$

$$V_{PV} = V_D - R_s I_{PV} \quad (7)$$

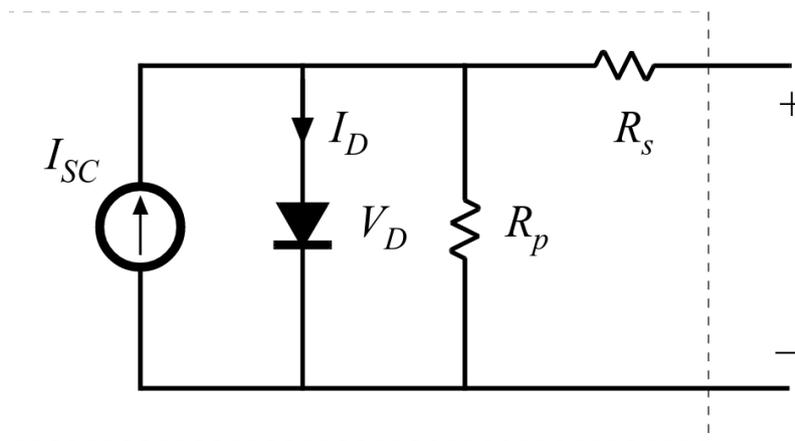


Figura 4: Modelo PV

3.4. Sistema de control

El sistema de control está diseñado para que se cumplan dos requerimientos básicos:

1. Que el estado de carga final de la batería sea igual al estado inicial, $SOC_{final} = SOC_{inicial}$.
2. Que no se disipe energía por medio de la carga fantasma.

Debido a variaciones estacionales en la velocidad del viento y la irradiación solar, el voltaje y la corriente del bus de CC (48v) varía a causa de falta de coincidencia entre las fuentes de energía y la carga (electrolizador). Por lo tanto, se requiere un sistema de almacenamiento y provisión de energía para mantener el correcto funcionamiento del sistema con independencia de las variaciones en la velocidad del viento y la radiación solar. La batería se utiliza para mantener el balance de energía del sistema.

En la Figura 5 se muestra el sistema de control del sistema.

- Si la suma de las corrientes de las fuentes de energía superan la corriente requerida por el electrolizador ($i_{req} < i_{pv} + i_w$) y si el estado de carga de la batería es menor que 0.9, entonces la batería se carga con el excedente de la corriente. Si el estado de carga de la batería es mayor que 0.9 (batería cargada) entonces el excedente de corriente se disipa por medio de la carga fantasma.
- Si la suma de las corrientes de las fuentes es menor que la corriente requerida por el electrolizador ($i_{req} > i_{pv} + i_w$), y si el estado de carga de la batería es mayor que 0,2; entonces la corriente faltante la aporta al sistema la batería. Si el $SOC < 0,2$ entonces la corriente requerida por el electrolizador será $i_{req} = i_{pv} + i_w$

Los límites de carga y descarga de la batería están dados por la profundidad de descarga aconsejada para éste tipo de baterías (DOC=70).

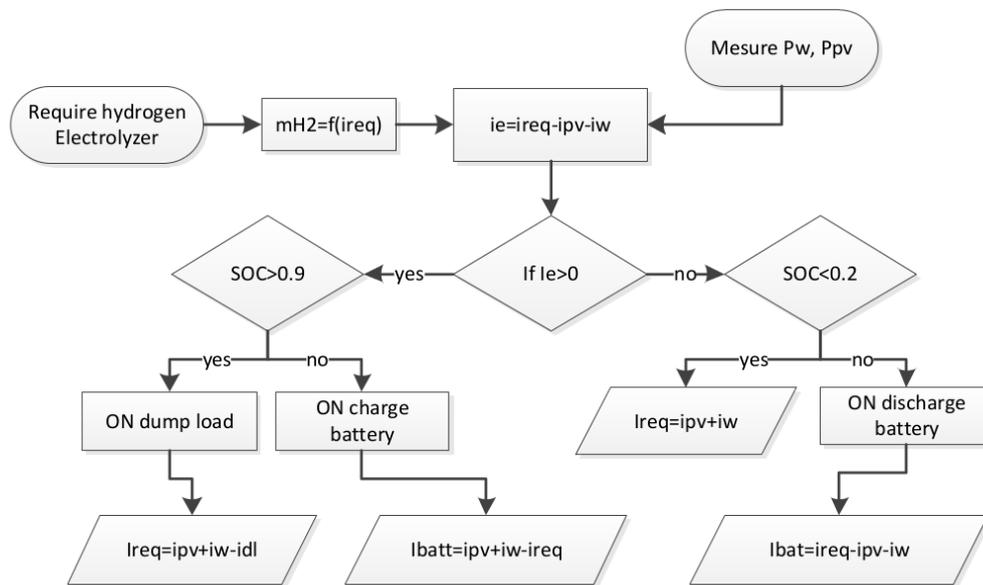


Figura 5: Sistema de control

4. RESULTADOS

La simulación del sistema completo se llevo a cabo utilizando Matlab/Simulink. Los estudios se realizaron en las condiciones menos favorables desde el punto de vista de la producción de energía eléctrico. Ésta situación se da en invierno. Las series de datos de la frecuencia de vientos, dirección y velocidad de vientos y irradiación solar para un día (24hs) fueron adquiridas desde datos provisto por la estación meteorológica de la Escuela de Aviación Militar y por la librería del software GEOSOL y son mostradas en la Figura 6

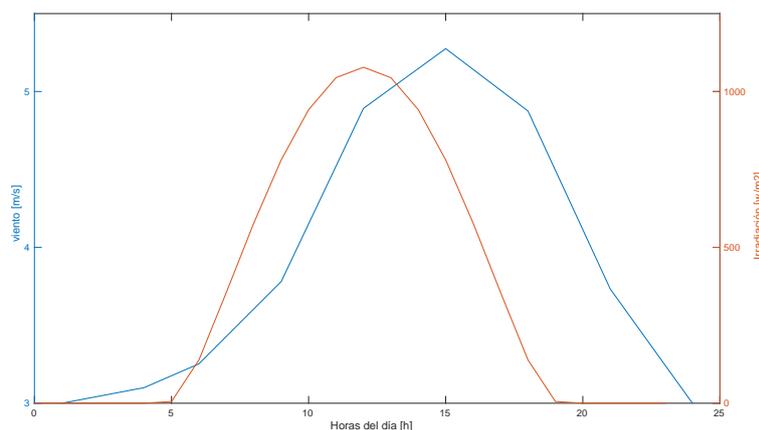


Figura 6: Fuentes

En la Figura 7 se muestra el resultado de la simulación para el desarrollo de las corrientes a lo largo de una día (24hs). La demanda de generación de hidrógeno es directamente proporcional a la corriente de carga que solicita el electrolizador (ver Modelo Electrolizador). Como el requerimiento de corriente del electrolizador se produce a las 8hs y como el SOC inicial de la batería es 50, desde las 4hs (momento en el cual comienza a producir potencia

el aerogenerador) la corriente generada por el aerogenerador carga la batería aumentando el SOC de la misma (ver Figura 10). Luego a las 5 hs inicia la producción de potencia desde el panel solar, y por ende aumenta la corriente de carga de la batería, aumentando la tasa de aumento del SOC. A las 7hs se activa la demanda de corriente del electrolizador y la batería pasa de estado de carga a estado de descarga. A las 8hs las fuentes de energía superan en corriente a la demanda de corriente y la batería empieza a cargarse nuevamente. Cerca de las 14hs la batería debe comenzar a otorgar corriente nuevamente hasta las 20hs horario en el cual se cierra el suministro de hidrógeno. Luego de las 20hs la energía proporcionada por el aerogenerador carga la batería para que ésta pueda terminar el ciclo con el $SOC_{final} = SOC_{ini} = 50$.

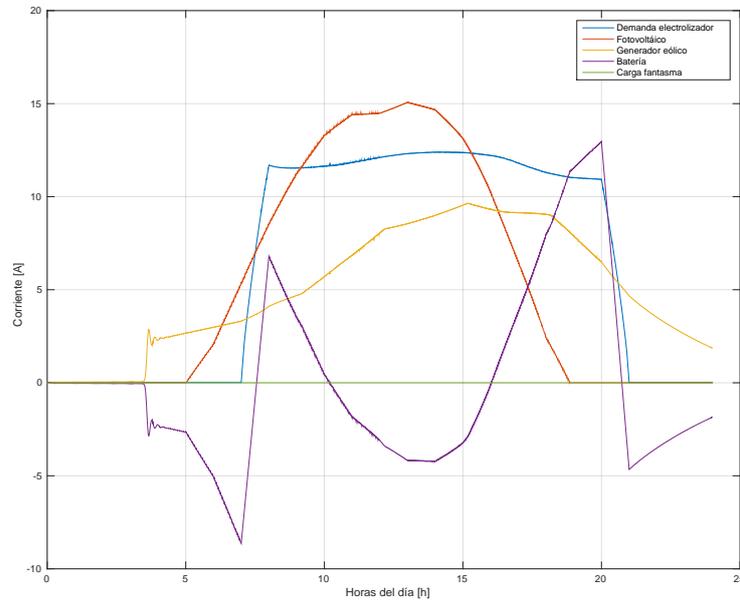


Figura 7: Corrientes

En la Figura 8 se puede ver el desarrollo de las distintas tensiones del sistema. Si bien la tensión de BUS de corriente es aproximadamente igual a 48 V, ésta tensión se ve levemente modificada por el estado de carga de la batería. Este fenómeno se debe a que con la configuración adoptada al ahorrar un convertidor de tensión (el de la batería), la tensión del BUS es gobernada por la tensión el paquete de baterías, como se puede ver en la figura.

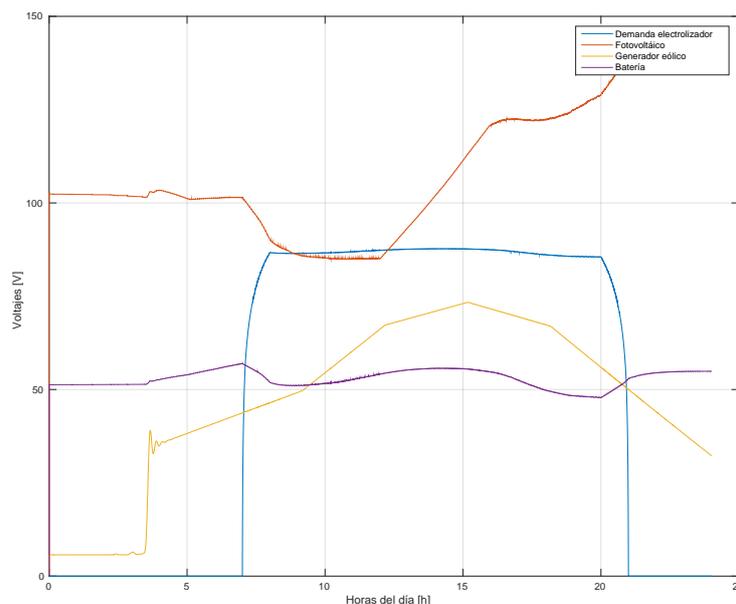


Figura 8: Tensión

En la Figura 9 se puede ver el comportamiento de las diferentes potencias a lo largo de un día.

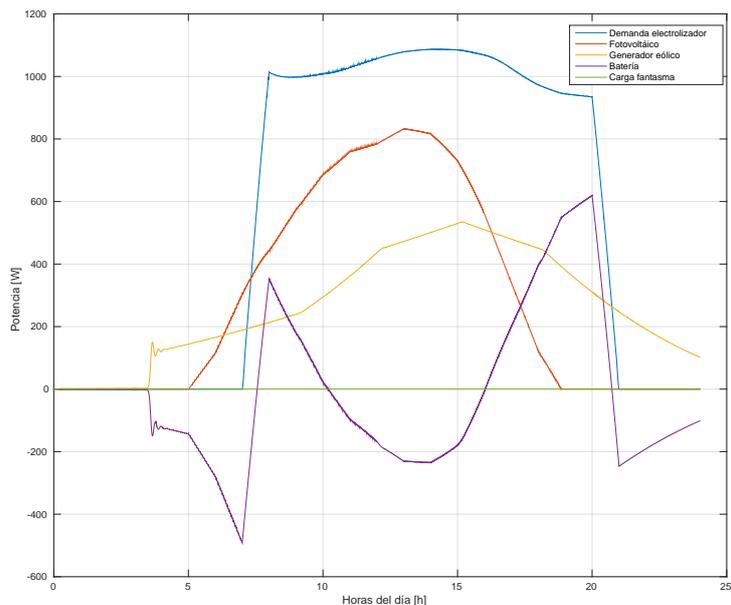


Figura 9: Potencias

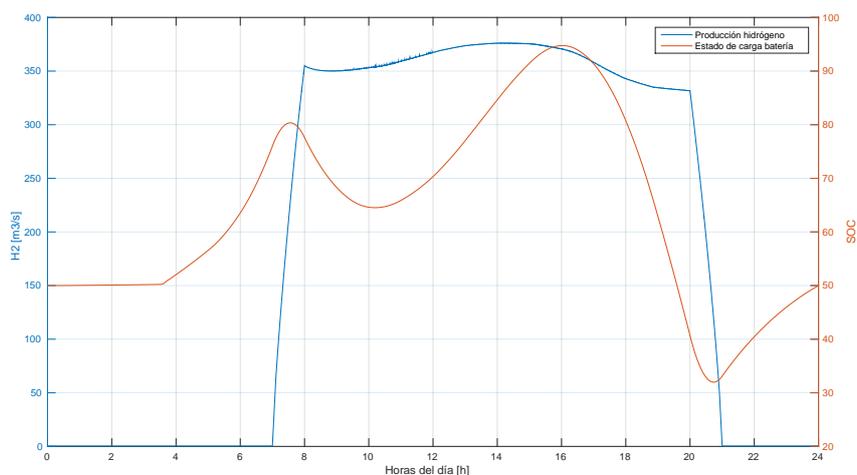


Figura 10: Producción H₂ y SOC batería

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió una configuración óptima para un sistema de generación limpia de producción de hidrógeno que gracias a la asistencia del banco de baterías garantiza que el sistema optimice la energía entregada por las fuentes. Para maximizar la potencia entregada por las fuentes se propuso un control que actuará tratando de no activar la carga fantasma (pérdida de energía por efecto joule) y que el estado final de carga de la batería sea igual al inicial. Esta última condición se debe a la propuesta de que este sistema opere en zonas aisladas, por lo tanto con imposibilidad de recarga de batería por medios externos al sistema.

REFERENCIAS

[1] C. Mittelsteadt, T. Norman, M. Rich, and J. Willey, *PEM Electrolyzers and PEM Regenerative Fuel Cells Industrial View*. Elsevier B.V., 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-62616-5>.

00011-5

- [2] K. Zeng and D. Zhang, “Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, no. 3, pp. 307–326, 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>
- [3] Ø. Ulleberg, “Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, no. 1, pp. 21–33, 2003.
- [4] M. Mercado-Vargas, D. Gómez-Lorente, O. Rabaza, and E. Alameda-Hernandez, “Aggregated models of permanent magnet synchronous generators wind farms,” *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 1287 – 1298, 2015. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115003201>
- [5] A. Sahbel, N. Hassan, M. M. Abdelhameed, and A. Zekry, “Experimental performance characterization of photovoltaic modules using daq,” *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 323 – 332, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213011235>