

**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE**  
23 y 24 de Junio 2022

---

**Evaluación técnica de un sistema híbrido Hidrógeno/Fuel Cell/Fotovoltaico**

**Lukas da Silva<sup>1</sup>, Gustavo Riveros-Godoy<sup>1,2</sup>, Rossana Galeano<sup>1</sup>, Ricardo Ferracin<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup> Universidad Privada del Este, Pdte Franco, Paraguay**

**<sup>2</sup> Parque Tecnológico Itaipu**

**Paraguay/Brasil**

***Resumen***

El estudio de sistemas energéticos renovables es de gran importancia en la actualidad, tecnologías como las Fuel Cell y los paneles solares se presentan como alternativas a los tradicionales generadores que utilizan combustibles fósiles. En este contexto, aparecen los sistemas híbridos, que hacen la integración entre dos o más fuentes de energía, estos aumentan la confiabilidad del sistema en general. Buscando la madurez de la tecnología híbrida es necesario responder dudas con respecto a la instalación eléctrica, eficiencia, comportamiento de la carga y la integración de los sistemas. Para responder a estas cuestiones se realizó el estudio de caso de un Sistema Híbrido basado en Hidrógeno/Fuel Cell y Energía Solar Fotovoltaico que alimenta una red de iluminación, con una carga nominal de 800 W. Se utilizó una Fuel Cell de 6 kW de potencia, alimentado por Hidrógeno gaseoso almacenado a 350 bar, 4 paneles solares de 150 Wp cada uno, 2 baterías estacionarias de ciclo profundo de 220 Ah cada uno. Durante la evaluación teórica se elaboraron gráficos utilizando el software de programación Python, utilizando la biblioteca Matplotlib, que permite realizar gráficos cartesianos. Las Simulaciones fueron hechas con el software CADe SIMU 3.0, que permitió la simulación de los disyuntores, contactores y temporizadores, con el objetivo de verificar el funcionamiento del sistema sin poner en riesgo los dispositivos. En las pruebas reales fueron detectados varios problemas, como el cableado incorrecto y algunos componentes dañados, que fueron subsanados. Durante el funcionamiento de la Fuel Cell y la línea de la red eléctrica se observaron picos de corriente hasta 4 veces mayor que la corriente nominal durante el cambio de fuente y hasta 15 veces mayor durante el encendido simultáneo de las luminarias, los picos de corriente durante el encendido no simultaneo fueron mucho menores y las distorsiones en la forma de onda se consideraron despreciables. La eficiencia del sistema Hidrógeno/Fuel Cell alcanzó 43%.

***Palabras claves***

Energías Renovables, Sistemas Híbridos, Fuel Cell, Hidrógeno, Energía Solar

**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE**  
**23 y 24 de Junio 2022**

---

## **1. Introducción**

Este trabajo busca definir las características técnicas de un Sistema Híbrido Hidrógeno/Fuel Cell/Fotovoltaico. Los Sistemas Híbridos son sistemas compuestos por dos o más fuentes energéticas, en este caso Hidrógeno/Fuel Cell y Fotovoltaico, esto aumenta la confiabilidad de la instalación eléctrica [1], es necesario conocer las características del sistema para asegurar su correcto funcionamiento. Se realizarán pruebas prácticas donde se medirán la demanda de la carga, el consumo en las fuentes y la forma de onda de la corriente eléctrica del sistema en funcionamiento, con el objetivo de obtener datos que permitan un mayor entendimiento del comportamiento de este tipo de sistema energético. El trabajo se limita a analizar características técnicas, teniendo como principal foco las características eléctricas del sistema.

## **2. Definición del Problema**

Existen ciertas dificultades técnicas que surgen a la hora de realizar la implementación de un sistema eléctrico con más de una fuente energética, como problemas en el diseño del circuito eléctrico que impidan el funcionamiento del sistema, el incorrecto dimensionamiento de las fuentes causaría que la carga no pueda ser suplida y los picos de corriente y deformaciones de onda que pueden causar daños al sistema.

## **3. Delimitación del Trabajo**

El trabajo detalla de manera técnica la instalación y el funcionamiento de un Sistema Híbrido Hidrógeno/Fuel Cell/Fotovoltaico que alimenta el sistema de iluminación de un estacionamiento ubicado en las instalaciones del Parque Tecnológico Itaipu margen izquierda, dando foco a las características eléctricas del sistema. Los fenómenos electroquímicos serán mencionados para facilitar el entendimiento de algunos dispositivos, pero estos no serán profundizados en este trabajo. Los datos de las pruebas que se analizaron fueron tensión, corriente, temperatura y presión con el objetivo de definir la eficiencia.

## **4. Sistemas Energéticos Híbridos**

Los Sistemas Híbridos son sistemas energéticos que combinan una o más fuentes energéticas en un único sistema. Estos sistemas presentan la ventaja de ofrecer una mayor confiabilidad comparados a los sistemas tradicionales, debido a la independencia de una fuente con las otras, la falla de una no implica el paro total del sistema. Los Sistemas Híbridos también presentan una complejidad mayor, debiendo utilizarse métodos para controlar la integración de las fuentes [1]. Generalmente estos sistemas son diseñados con una aplicación en mente, por ejemplo, zonas aisladas, cuando una única fuente energética no puede suplir la carga o cuando se busca independencia energética de la red. Muchas industrias están utilizando Sistemas Híbridos con el objetivo de desarrollar mejoras técnicas que permitan aumentar la viabilidad de estos sistemas [2].

## **5. Unidad de Análisis**

El estudio fue realizado sobre un único Sistema Híbrido, que está compuesto de los Sistemas Hidrógeno/Fuel Cell y Solar Fotovoltaico. La Fuel Cell se encuentra dentro de la Planta de Producción de Hidrogeno en el Parque Tecnológico de Itaipu en Brasil, los paneles fotovoltaicos y la carga se encuentran instaladas en un estacionamiento de vehículos próximo a la planta, la carga está compuesta por 10 luminarias LEDs, con una potencia nominal total de 800W, que se encienden automáticamente al anochecer para la iluminación del estacionamiento. Este sistema es denominado híbrido ya que la carga puede ser alimentada por más de una fuente de energía. El sistema fue construido con la intención de demostrar en la practica una posible

#### XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

aplicación de las energías renovables, pero nunca ha sido puesto en funcionamiento hasta la realización de este trabajo. El Sistema Híbrido se divide en tres partes Hidrógeno/Fuel Cell, Fotovoltaico y la parte que realiza la conmutación entre estos en el momento de alimentar la carga, en total existen dos cuadros eléctricos. El sistema cuenta con 4 conjuntos de cilindros para el almacenamiento del hidrógeno, con una capacidad de 350 bares cada.

#### 6. Perfil de Inclusión y Exclusión

Se incluyo en este proyecto los parámetros técnicos del Sistema Híbrido Hidrógeno/Fuel Cell y Solar Fotovoltaico durante su funcionamiento. No fueron incluidos aspectos referentes a la pérdida de eficiencia debido al desgaste de las Fuel Cell y los paneles Fotovoltaicos, ni las reacciones químicas en estos.

#### 7. Técnicas de Recolección de Datos

Para calcular la eficiencia el Sistema Híbrido Hidrógeno/Fuel Cell y Solar Fotovoltaico fue puesto en funcionamiento durante un largo periodo de tiempo, con el objetivo de lograr mediciones desde el anochecer hasta el amanecer, luego se midió el consumo de hidrógeno, para compararlo con el consumo teórico, para determinar el valor de la eficiencia, fue considerado la energía total consumida por el sistema, incluyendo inversor y transformador, no solo la carga. La Fuel Cell presento problemas durante las pruebas, solo tres pruebas tuvieron una duración de más de 1 hora, estas serán utilizadas para realizar el análisis. Las baterías del Sistema Fotovoltaico no permitieron la realización de las pruebas de eficiencia, durante la realización del trabajo no fue posible adquirir nuevas baterías. Los datos necesarios para la realización de los esquemas fueron obtenidos mediante el seguimiento del cableado del sistema y la revisión de los manuales de los dispositivos.

#### 8. Técnicas de Procesamiento de Datos

Los datos fueron procesados con ayuda de planillas electrónicas en el formato CSV, estas planillas contenían datos registrados automáticamente durante las mediciones. Los gráficos fueron generados con el uso del software de programación Python, utilizando la biblioteca Matplotlib que permite rápidamente realizar gráficos cartesianos. Simulaciones fueron hechas con el software CADE SIMU 3.0, que permite la simulación de los disyuntores, contactores y temporizadores, con el objetivo de verificar el funcionamiento del sistema sin poner en riesgo los dispositivos del sistema.

#### 9. Cálculo de las Mediciones

Fue utilizado el osciloscopio modelo Keysight DSOX2012A para realizar las mediciones de corriente, la sonda utilizada fue una sonda para tensión, conectada a una resistencia de  $200\Omega$  al secundario del sensor de corriente SCT013, este tiene una relación de transformación de 100/0,05 amperios, una corriente  $i$  de 50A en el primario, la corriente en el secundario sería de 0,025A, el osciloscopio indicaría una tensión nominal  $U$  de 5V en la resistencia. Para calcular la corriente se utilizó la siguiente ecuación:

$$i = \frac{100 \cdot U}{0,05 \cdot 200} \quad (1)$$

El osciloscopio Keysight DSOX2012A tiene funciones de captura de picos, lo que permite capturar picos de corriente durante eventos específicos del sistema, por ejemplo, el encendido de las luminarias. Para realizar la medida de la tensión del sistema se utilizó la pinza amperimétrica, así como para corroborar los valores de corriente nominal leídos en el osciloscopio.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE  
23 y 24 de Junio 2022

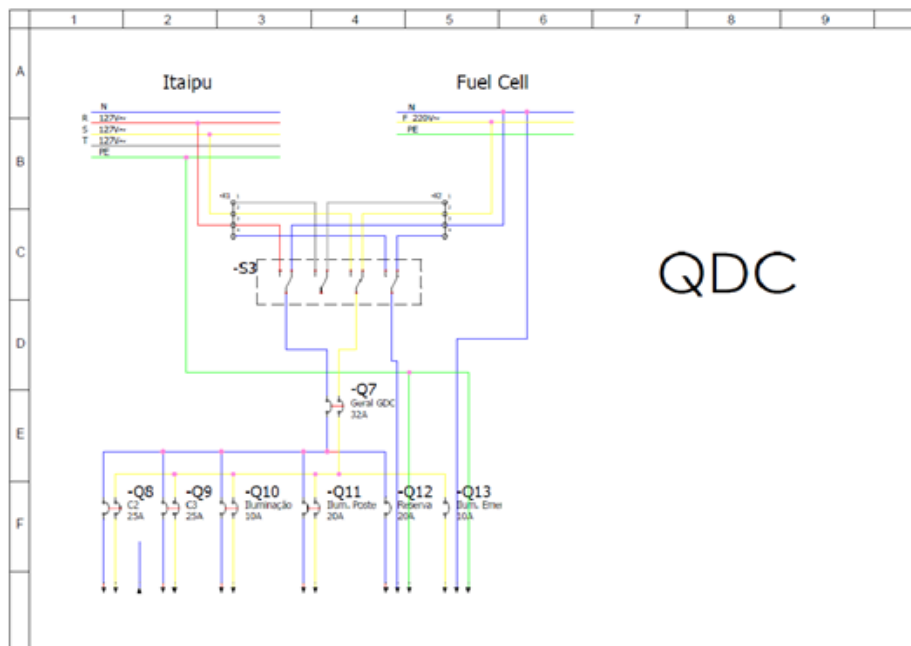
La eficiencia se calcula dividiendo la energía real producida por la energía teórica [3].

$$\eta = \frac{E_r}{E_t} \quad (2)$$

## 10. Resultados

### 10.1. Funcionamiento y configuración del Sistema Híbrido

Realizado el esquema eléctrico en el cuadro QDC (Figura 1), se observó que el cuadro es alimentado por dos fases de 127Vac de la red eléctrica del PTI y la Fuel Cell alimenta el cuadro a 220Vac, esto es un problema, ya que las luminarias en el estacionamiento requieren de 127Vac, además, el disyuntor de 20A denominado “Reserva”, el único relevante para el Sistema Híbrido, es el disyuntor por donde pasa la línea que va al estacionamiento, tiene una conexión errónea, al utilizar la llave conmutadora para transferir la carga a la Fuel Cell, este disyuntor estaría conectado al neutro del transformador y al neutro de la red del PTI, conectando a la carga del estacionamiento sin fase.



**Figura 1: Esquema Eléctrico Cuadro QDC**

Para solucionar los problemas encontrados fueron realizados cambios en el cuadro eléctrico QDC, se conectó el disyuntor Q12 a la salida del transformador, en una línea separada del resto de los disyuntores del cuadro, esto permitió el correcto funcionamiento del Sistema Fuel Cell/ Hidrógeno.

El cuadro del estacionamiento, contiene el circuito de carga de las baterías del Sistema Fotovoltaico y el circuito de control y potencia del Sistema Hidrógeno/Fuel Cell/Fotovoltaico. En el circuito de carga de las baterías (Figura 2) los paneles solares están conectados a la entrada del controlador de carga, este se encarga

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE  
23 y 24 de Junio 2022

de cargar las baterías y de alimentar al inversor del Sistema Fotovoltaico cuando esté conectado a la carga. El circuito también contiene un dispositivo de protección contra corriente de surto, en caso de descargas atmosféricas.

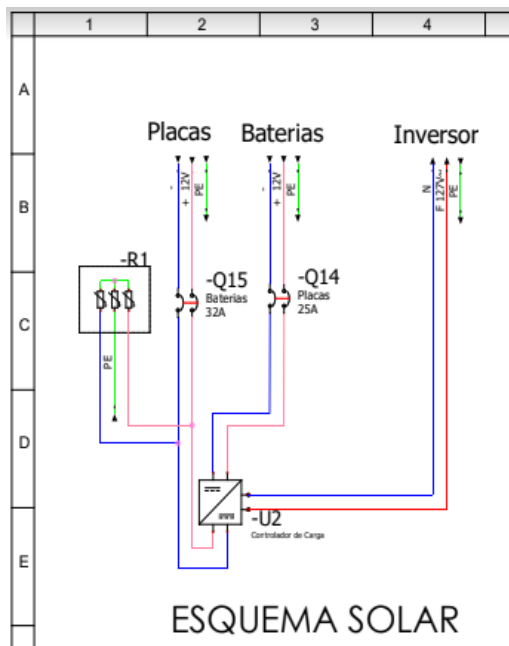


Figura 2: Esquema de carga solar

El circuito de potencia (Figura 3) está compuesto por tres disyuntores y tres contactores, solamente un contactor puede estar cerrado de cada vez, alimentando la carga con las fuentes Hidrógeno/Fuel Cell, Fotovoltaico, o la red del PTI, este control es realizado por el circuito de control.

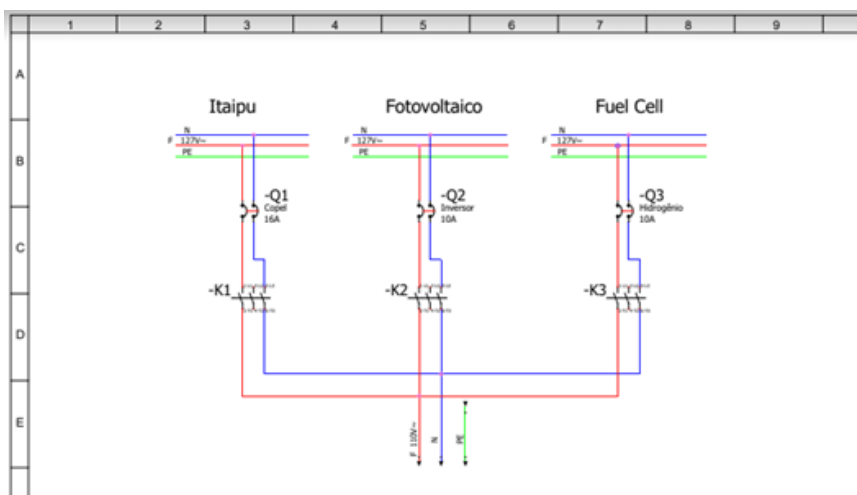
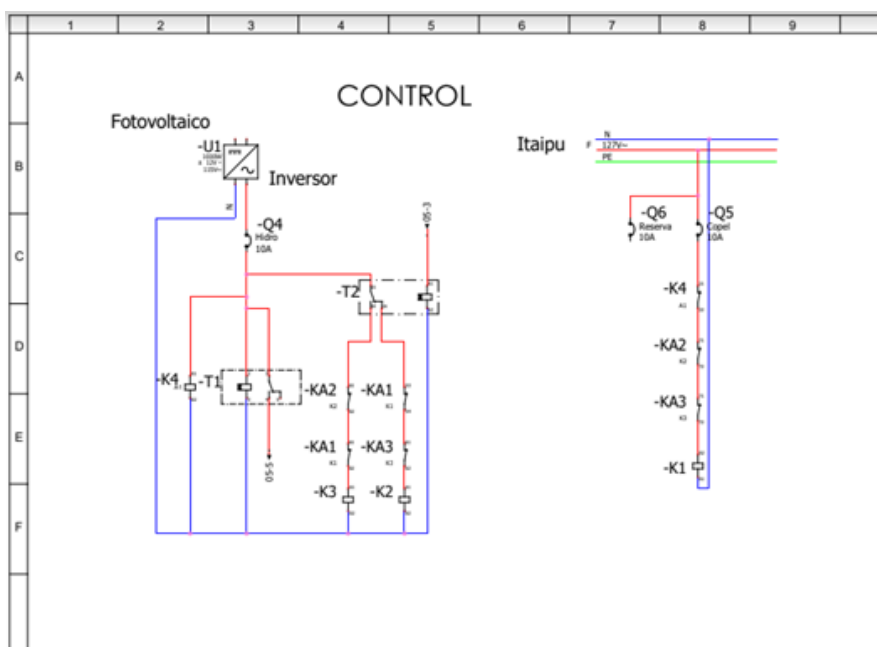


Figura 3: Circuito de Potencia

**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE**  
**23 y 24 de Junio 2022**

El circuito de control (Figura 4) es el encargado de controlar la conmutación entre las fuentes Hidrógeno/Fuel Cell, Fotovoltaico y la red del PTI. El disyuntor Q5 protege una parte del circuito, la línea pasa por los contactos normalmente cerrados del contactor K4 y de los contactores auxiliares KA1 u KA2, mientras estos contactos permanezcan cerrados la bobina del contactor K1 es alimentada y la red del PTI estará conectada a la carga, este es el estado en el cual el circuito funciona cuando el inversor del Sistema Fotovoltaico está apagado.

Esta parte del circuito de control es alimentado por el inversor del Sistema Fotovoltaico, el disyuntor Q4 se encarga de proteger al circuito, pudiendo cortar la alimentación de este. La bobina del contactor K4 cuando alimentada abre los contactos normalmente cerrados, cortando la alimentación de la bobina del contactor K1. El temporizador T1, cuando cumpla su tiempo configurado, alimenta a la bobina del temporizador T2 que se encarga de conmutar entre la bobina del contactor K2, que cuando activo conecta al Sistema Fotovoltaico a la carga, y la bobina del contactor K3, que cuando activo conecta al Sistema Hidrógeno/Fuel Cell a la carga. Las líneas que conectan a las bobinas pasan por los contactos auxiliares normalmente cerrados de los demás contactores.



**Figura 4: Circuito de Control**

Como el circuito de control nunca había sido puesto en funcionamiento fueron realizadas simulaciones en el software CADe SIMU 3.0 (Figura 5) para corroborar el funcionamiento del circuito de control. Antes de la realización de cualquier cambio en el sistema, se ha utilizado este software.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE  
23 y 24 de Junio 2022

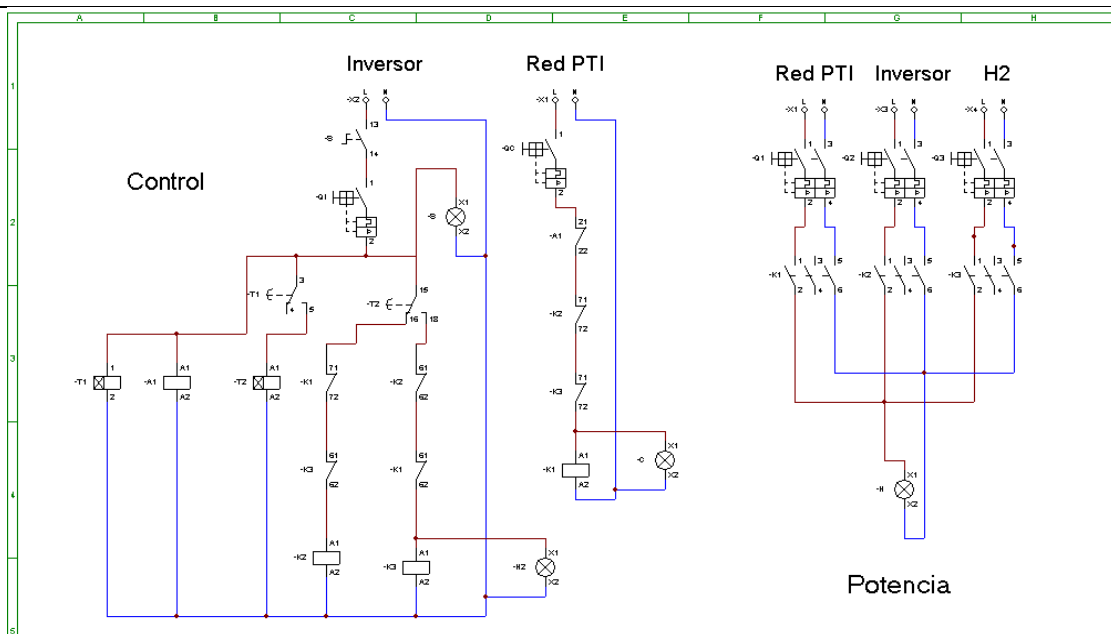


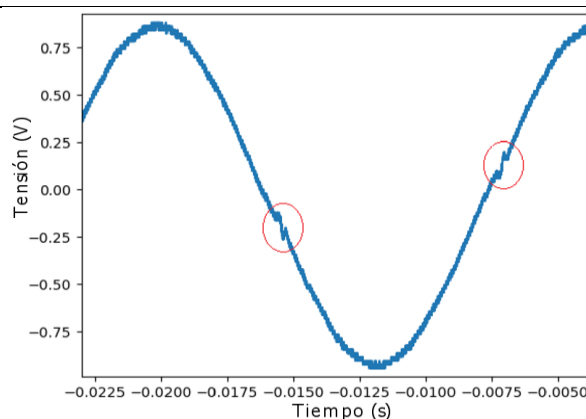
Figura 5: Simulador CA De SIMU 3.0

10.2. Medición de las formas de onda

La primera prueba fue realizada en el circuito de control, esta depende principalmente del funcionamiento del inversor del Sistema Fotovoltaico y del controlador de carga para su alimentación. El circuito no entro en operación al encender el inversor, se verificaron los niveles de tensión en los bornes del controlador de carga y del inversor, también se conectó el inversor directamente a las baterías de 12Vdc, se llegó a la conclusión de que ambos, el inversor y el controlador de carga, estaban dañados y requerirían ser reemplazados. Las baterías del Sistema Fotovoltaico perdieron su capacidad y no consiguieron alimentar la carga, durante la realización de estas pruebas no se pudo reemplazarlas. Los siguientes resultados y análisis se realizaron utilizando el Sistema Hidrógeno/Fuel Cell, y la red eléctrica del PTI.

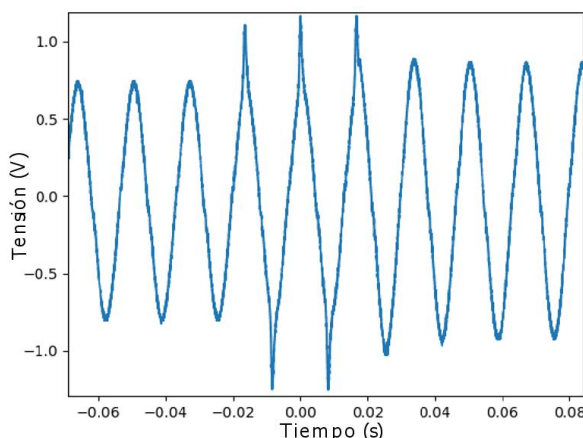
En el Figura 6 se observa la forma de onda al alimentar la carga, la corriente de pico máxima es de 8,25A y la corriente RMS es de 6,25A, se puede observar distorsiones debido a los efectos armónicos, no se disponía de un analizador de redes para profundizar el estudio de estas distorsiones, pero son de pequeñas proporciones y no deberían causar grandes pérdidas en el sistema.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE  
23 y 24 de Junio 2022



**Figura 6: Distorsión en la forma de onda**

Las luminarias del tipo LED encienden de manera automática, fue observado que las luminarias no encienden todas de una vez, encienden en orden aleatoria dependiendo de sus sensores de iluminación. Se trató de encontrar el pico máximo durante el encendido de estas luminarias, que fue de 11.6A, con un pico mínimo de -12.5A, el surto tuvo una duración de 0.06s como se puede observar en el Figura 7.

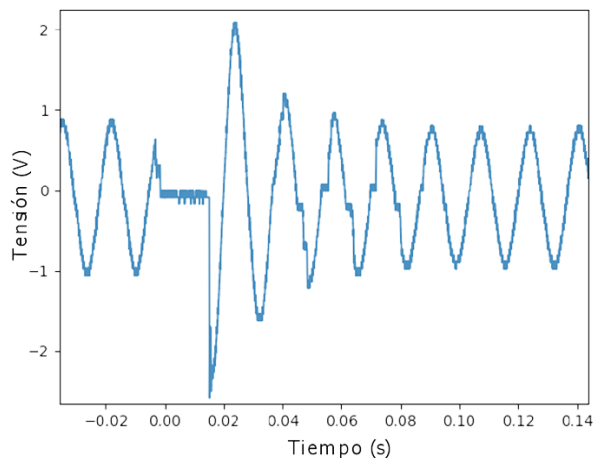


**Figura 7: Forma de onda durante el encendido de una luminaria**

Se realizaron mediciones durante el cambio de fuente, del Sistema Hidrógeno/Fuel Cell a la red eléctrica del PTI, esto permitiría medir el pico de corriente sin riesgo de daño a algún inversor o controlador de carga. En el Figura 8 se observa la forma de onda medida, el pico máximo fue de 20,8A, el pico mínimo fue de 25,7A, estos dos picos solo se presentan durante un ciclo, seguido de picos menores hasta la normalización del sistema, este evento tiene una duración de 0.10 segundos.

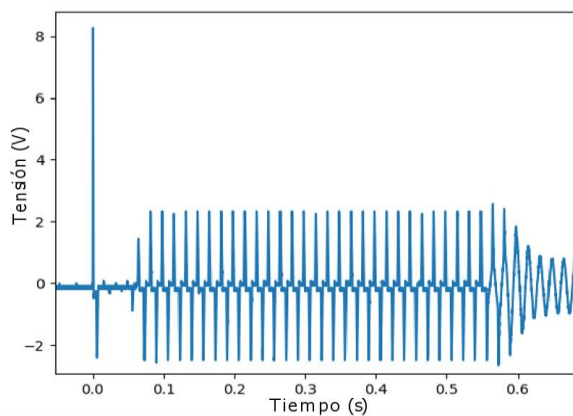


**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE**  
23 y 24 de Junio 2022



**Figura 8: Picos de corriente durante el cambio de fuente**

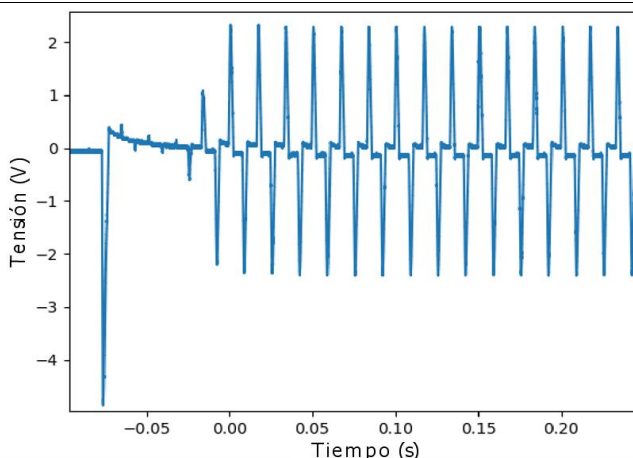
También se realizaron pruebas con las luminarias primeramente apagadas y luego el encendido simultaneo de todas ellas, en el caso del sistema de iluminación estudiado, esto no debería suceder durante su funcionamiento normal, solo en caso de caída y restablecimiento de la red eléctrica del PTI durante la noche. En el Figura 9 se observa un pico máximo de 83,4A, e un pico mínimo de -26,4A, el pico máximo es alcanzado una sola vez, los picos posteriores son de 25,8A, el sistema pierde su forma senoidal, este evento tiene una duración de 0.64s.



**Figura 9: Forma de onda durante el encendido simultáneo de todas las luminarias (1)**

Un resultado diferente puede observarse en el Figura 10, el pico mínimo es de 48,9A, y el máximo de 25,8A, esta diferencia se debe a la dirección de la onda senoidal antes del encendido de las luminarias.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE  
23 y 24 de Junio 2022



**Figura 10: Forma de onda durante el encendido simultáneo de todas las luminarias (2)**

**10.3. Cálculo de los valores de eficiencia**

En la primera prueba las mediciones muestran una presión inicial de 122,08 bares y temperatura de 29°C, una presión final de 106,28 bares y temperatura de 20,6°C, con una duración de 5 horas y 20 minutos. Primero se calculó la cantidad de moles consumidos, encontramos los moles totales al inicio y al final de la prueba, obtenemos 2673,15 moles y 2419,06 moles, respectivamente. Se consumieron 254,06 moles, la potencia en la salida de la Fuel Cell era de 1353,7 W, esto debido al propio consumo de la Fuel Cell y a pérdidas en el transformador e inversor, durante la prueba la energía consumida total fue de  $E_r = 7,217$  KWh. Obtenemos que la eficiencia de la Fuel Cell en la prueba fue del 43%. Se realizó los mismos cálculos en las siguientes pruebas, que tuvieron una duración de 7 horas con 46 minutos y de 11 horas con 45 minutos. Los resultados de las tres pruebas, y la información de cuales conjuntos de cilindros fueron utilizados se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1 Resultado de las Pruebas de Eficiencia

Duración	Energía Real (KWh)	Moles Consumidos	Eficiencia	Conjunto de Cilindros
5:20	7,217	254,09	43%	3
7:46	10,518	414,71	38%	4
11:45	17,054	649	40%	4

Con el test de mayor duración fue posible determinar que la cantidad de hidrógeno necesario para alimentar al sistema desde el anochecer hasta el amanecer es 649 moles o 1298 g.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE  
23 y 24 de Junio 2022

---

## II. Conclusión

La integración del sistema híbrido estudiado se realiza con el uso de temporizadores y contactores, pero también es posible el uso de controladores lógicos. El principal factor a tener en cuenta es que nivel de automatización se desea lograr, el uso de temporizadores permite un cambio automático entre los diferentes sistemas, pero no verifica si estos están en condiciones de alimentar la carga, requiriendo que una persona verifique si el funcionamiento esta normal.

Pudo observarse que el tipo de carga que alimenta el sistema, luminarias tipo LED, causan picos de corriente durante el encendido, que llegan a ser hasta 14 veces mayores que la corriente nominal, por eso se debe verificar cual es el valor de corriente de pico que soporta el inversor instalado. Los picos de corriente durante el cambio de fuente de alimentación llego a ser 4 veces mayor que la corriente nominal.

El principal factor que afecta la eficiencia de la Fuel Cell fue la presión en los cilindros, ya que la Fuel Cell necesita 7 bares para su funcionamiento, los cilindros de almacenamiento de hidrógeno necesitan ser capaces de mantener esa presión constante durante el funcionamiento de la Fuel Cell, el nivel de pureza del hidrogeno también afecta la eficiencia. Para el Sistema Fotovoltaico los niveles de incidencia de luz solar causan la variación de eficiencia, es importante tomar los cuidados necesarios según lo indicado por los fabricantes de las placas solares.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Rekioua, *Hybrid Renewable Energy Systems Optimization and Power Management Control*, Bejaia: Springer, 2020, pág. 1.
- [2] B. Zohuri, *Hybrid Energy Systems - Driving Reliable Renewable Sources of Energy Storage*, Albuquerque: Springer, 2018, pág. 3.
- [3] R. J. Ferracin, A. A. Quispe, V. A. R. Balbuena, C. B. Jakubiu, M. Miguel, I. Ubaque y L. P. Silva, 22 World Hydrogen Energy Conference, "Evaluation and calculation on the Global Energy Efficiency of the Hydrogen Experimental Power Plant installed in Itaipu Technological Park", 2018, pág. 490.