

Capítulo 5.

CASO DE ESTUDIO DE LA CELDA DE COMBSUTIBLE

5.1 Introducción.

Se plantea la simulación de una celda de combustible de hidrógeno para cubrir el requerimiento energético de una estación de campo, para así poder evaluar su comportamiento a lo largo de un tiempo definido, en este caso se realizarán pruebas independientes una de la otra en función de las necesidades energéticas demandadas por la estación sensora de campo en un estado típico de operación sin mensaje de eventos, y en un estado atípico. De igual modo se harán simulaciones para la estación repetidora de campo.

Al final se espera tener un comparativo entre la demanda energética en operación típica y en operación atípica, que pueda validar la utilización de la celda de combustible como una forma alterna y confiable de cubrir el requerimiento energético de cada una de las estaciones de campo y de las estaciones repetidoras.

Para realizar dicha simulación se tomo comó base el modelo referido en el libro “*Fuel Cells, Modeling, Control and Applications*” [1]. Lo que se hizo fue tomar como base la simulación que se presenta en [1] y ajustar esa simulación al tipo de carga que se requiere alimentar, pues lo que realmente interesa es evaluar el desempeño de la celda a lo largo del periodo de operación con sus respetivas variaciones.

En los casos de estudio lo que se pretende analizar es el comportamiento de la corriente y tensión eléctrica durante la simulación que garantice la demanda energética, de tal manera que la celda de combustible pueda ser vista como una opción para suministrar energía al Sistema de Alerta Sísmica.

5.2 Definición de los casos de estudio.

El primer objetivo de la simulación es evaluar la operación de las celdas de combustible en un sistema aislado, cuya operación constante debe garantizar que el Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca opere, con el menor número de supervisión y sea prácticamente libre de mantenimiento, quizá en un trabajo futuro se pueda hacer la integración con un sistema híbrido, pero en este trabajo no es la idea presentar dicha simulación, sólo basta con conocer el comportamiento de la celda de combustible con la carga demandada por una estación de campo y una estación repetidora.

Se realizaron cuatro simulaciones, dos de ellas para una estación tipo ESDECA y dos para la tipo ESREPE. La simulación se obtuvo a partir del estudio del comportamiento en la demanda

energética requerida por la estación de campo en un periodo típico de operación, el periodo de estudio se compone de 24 horas, se dividió en dos periodos, las primeras 12 horas corresponden a una operación típica, y las siguientes 12 horas representan una operación atípica. Además para fines demostrativos de esta simulación se tomaron algunas consideraciones extras las cuales son que la temperatura y el nivel de humedad son constantes a lo largo de todo el intervalo de estudio.

El diseño de la simulación típica se basa partiendo de que las estaciones mandan un mensaje de presencia cada 12 horas, es decir presenta un comportamiento cíclico. Por otro lado en el comportamiento atípico se representa un tiempo de 12 horas en el que la estación presenta un comportamiento de mayor demanda.

Se definirá como **caso 1** al comportamiento típico de la estación de campo, en el que debe de enviar mensajes únicamente de presencia. Cabe señalar que más del 65% del tiempo de operación anual de cada estación se comporta de esta manera, se espera que no se presenten variaciones en la corriente y voltaje, sólo en el momento en que la estación envía su mensaje de presencia el cual dura 2 segundos y los voltajes retornan a su valor nominal.

En la siguiente simulación **caso 2**, se presenta el comportamiento atípico de una estación de campo. La simulación se realizará partiendo de que la estación envía un número elevado de transmisiones que puedan darse durante el ciclo de estudio, como son: mensajes de presencia, mensajes de alerta ó mensajes de aviso de alguna falla, además se simularon los valores de demanda máxima en un periodo corto de tiempo para poder determinar si la celda es capaz de poder suministrar dicha demanda energética y además mantener el voltaje ya la corriente nominales.

En el **caso 3**, se simula a una estación repetidora de campo en su estado típico, para dicha simulación se tomaron valores reales de una estación repetidora que es la que más recibe información de otras estaciones de campo lo cual implica que el consumo en esta estación sea mayor, al mismo tiempo que es imprescindible que esta estación no quede fuera de operación por falla en el suministro energético pues recibe la información de las estaciones cercanas a ella, en este caso se caracterizó el repetidor San Miguel Tenango R05 figura 2.1, donde para este caso se simulará que se reciben únicamente mensajes de presencia de las 6 estaciones de campo. Estas 6 ESDECAS dependen de que la estación repetidora opere correctamente para hacer llegar su información a la estación central.

Para el **caso 4** se simula el comportamiento de la misma estación repetidora pero en operación atípica, donde se contempla que todas las estaciones de campo que se reportan en este repetidor, envíen varios mensajes incluida la misma estación, en un periodo de 12 horas. Escenario que se puede presentar ante un eventual sismo con replicas en la zona cubierta por estas estaciones.

Los diferentes casos de estudio permitirán observar y analizar el comportamiento de la celda ante los cambios bruscos de demanda energética y en periodos cortos de tiempo.

La simulación toma en cuenta dos aspectos fundamentales del comportamiento de una estación de campo los cuales son la demanda y el tiempo de suministro de dicha demanda, por un lado se muestra la gráfica de demanda de una estación típica y por el otro la de una estación repetidora, como se ha mencionado el consumo es mayor en la estación repetidora, por lo que se espera que la celda de combustible pueda cubrir dicha demanda.

5.2.1 Modelo de la PEMFC.

El modelo dinámico para el control de la celda de combustible ha sido desarrollado utilizando MATLAB/Simulink [2]. Simulink es una herramienta de extensión de MATLAB, es una aplicación sumamente poderosa en el modelado y representación matemática de sistemas eléctricos. Se simuló una celda de combustible tipo PEM, donde para fines de la simulación la temperatura y niveles de agua no entran en esta simulación y se consideran constantes, para tener un sistema ideal [3]. La figura 5.1 ilustra el diagrama de bloque del sistema de una celda de combustible tipo PEM.

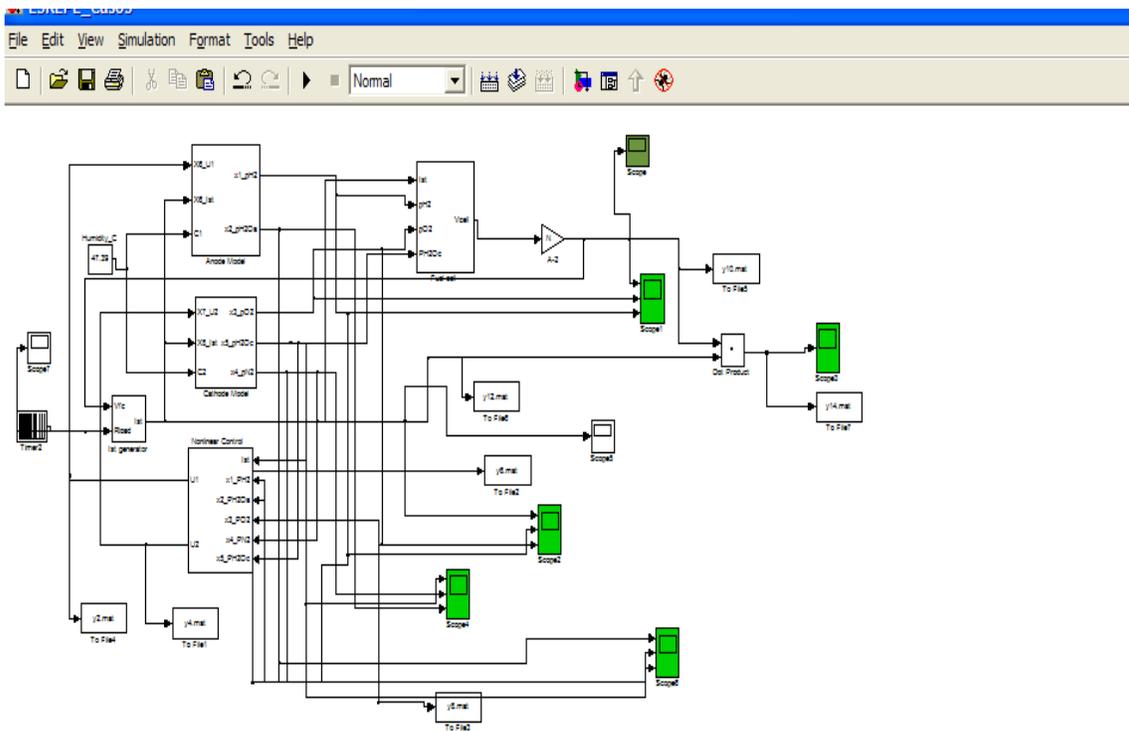


Figura 5.1 Diagrama de bloques de la celda PEMFC utilizada.

El sistema de la celda está compuesto por cuatro bloques, los cuales son modelo del ánodo, modelo del cátodo, modelo de voltaje de la celda y un bloque de control.

La salida en la celda de combustible, es el voltaje que entrega la celda V_{st} el cual es definido en función de la corriente de celda, reactancia parcial de presurización, temperatura de la celda y humedad de la membrana.

$$V_{st} = E - V_{activación} - V_{resistencia} - V_{concentración} \quad (5.1)$$

Donde:

$$E = N[V + \left(\frac{RT}{2F}\right) \ln \left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O_c}}\right)] \quad (5.2)$$

Esta es la potencia termodinámica en la celda con voltaje reversible basada en la Ecuación de Nernst.

$V_{activación}$ es el voltaje que se pierde durante la reacción dentro de los bornes a causa de los electrodos.

$V_{resistencia}$ es el voltaje resistivo es causado por el protón al fluir hacia el electrolito.

$V_{concentración}$ es el voltaje que se pierde desde la reducción de gases hasta la formación de oxígeno e hidrógeno

Los valores son calculados a partir de las siguientes ecuaciones:

$$V_{activación} = N \times \frac{RT}{2\alpha F} \times \ln\left(\frac{I_{fc} + I_n}{I_o}\right) \quad (5.3)$$

$$V_{ohm} = N \times I_{fc} \times r \quad (5.4)$$

$$V_{concentración} = N \times m \exp(n \times I_{fc}) \quad (5.5)$$

En la simulación la formula general para obtener el voltaje es la ecuación de Nerts, dado que conviene utilizar esa ecuación porque como se mencionó el agua y la temperatura son factores que se consideran constantes a lo largo de todo del tiempo de análisis. En la figura 5.2 se observa el modulo correspondiente a la ecuación de Nerts.

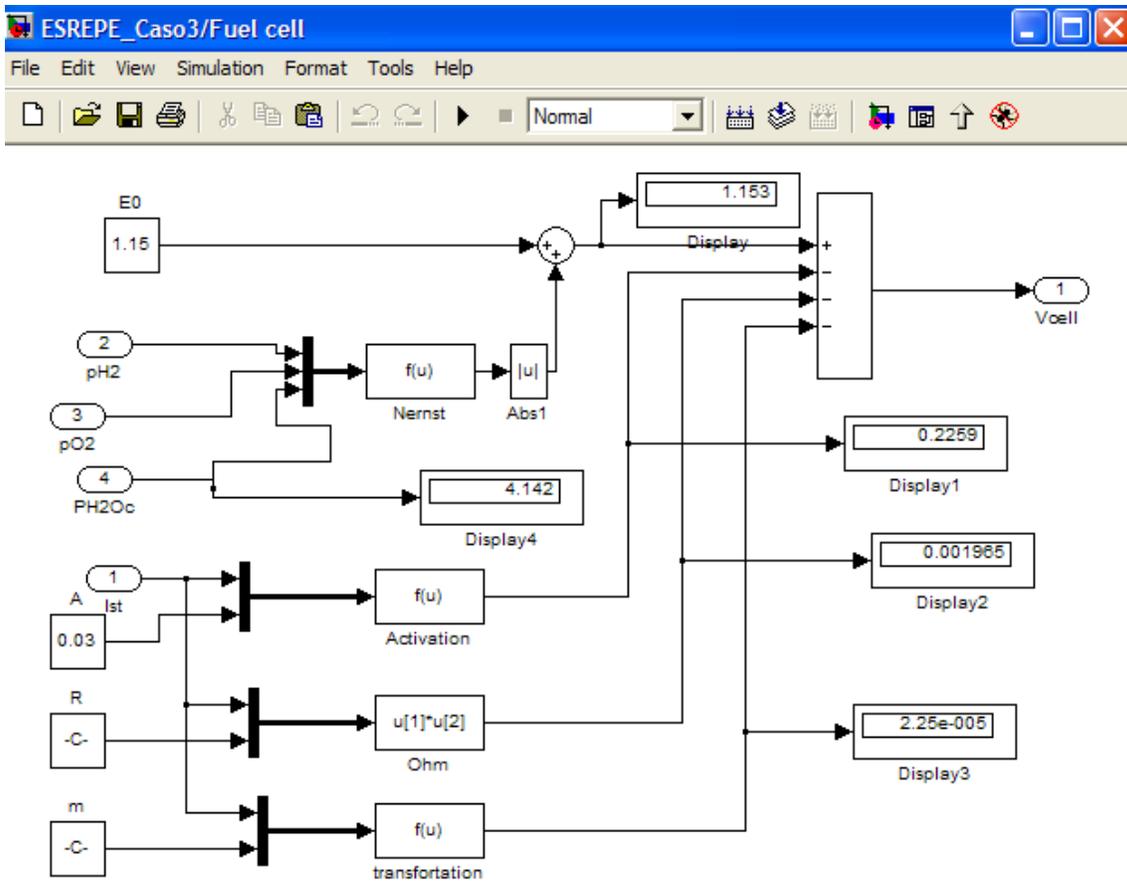


Figura 5.2 Módulo de la celda de combustible, basado en la ecuación de Nerts.

Para el cálculo de la presurización se utiliza la ley de gases ideales, el bloque del ánodo consiste en el modelo de hidrógeno y del agua. El modelo del cátodo involucra al oxígeno, agua y nitrógeno.

Con las simulaciones se pretende, representar con la mayor semejanza la operación y comportamiento de una ESDECA y una ESREPE, tomando en cuenta todos los factores posibles, dentro del intervalo de estudio se consideraran, puntos donde la demanda energética aumentará, debido a causas de la operación del sistema como pueden ser, el envío de datos de presencia, el envío de datos de detección de sismos, datos del repetidor entre otros.

La finalidad de este trabajo de simulación es conocer los parámetros eléctricos entregados a la salida de la celda. Los cuales serán discutidos y analizados para una valoración integral del sistema. Se representara en la simulación el requerimiento energético demandado por las estaciones.

5.3 Caso 1: Comportamiento típico de la ESDECA.

La demanda energética en una estación de campo típica en operación normal es de 1.5 W. Cuando la estación de campo envía su transmisión se presenta un incremento de la carga pasando de 1.5 a

1.8 W. La figura 5.3 muestra la gráfica de demanda energética durante un periodo de operación típica, en esta se puede observar como la ESDECA mantiene un consumo plano de potencia de 1.5 W, excepto en el minuto 59 durante el cual envía su mensaje de presencia. Tomando esta consideración se realizó la simulación. Y se obtuvieron los siguientes resultados:

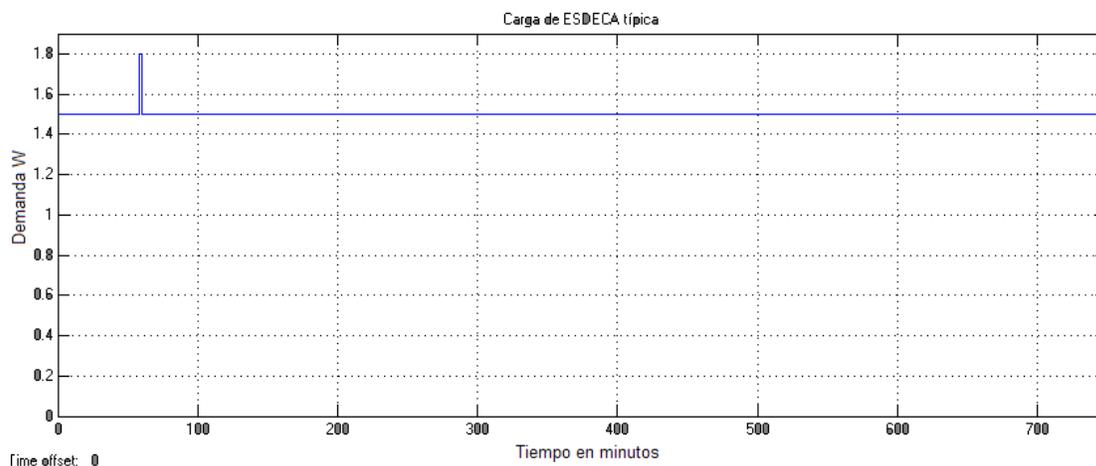


Figura 5.3 Curva de demanda de la estación sensora de campo.

La figura 5.4 muestra el comportamiento de la corriente de la celda durante el periodo de análisis en operación típica, donde se puede observar que la corriente se mantiene constante, menos en el momento que se realiza la transmisión alcanzando un valor de 6.75 A; sin embargo, se recupera una vez terminada la transmisión. Con este comportamiento de demanda de corriente en operación típica se puede observar que la celda de combustible cumple con el suministro requerido por la ESDECA.

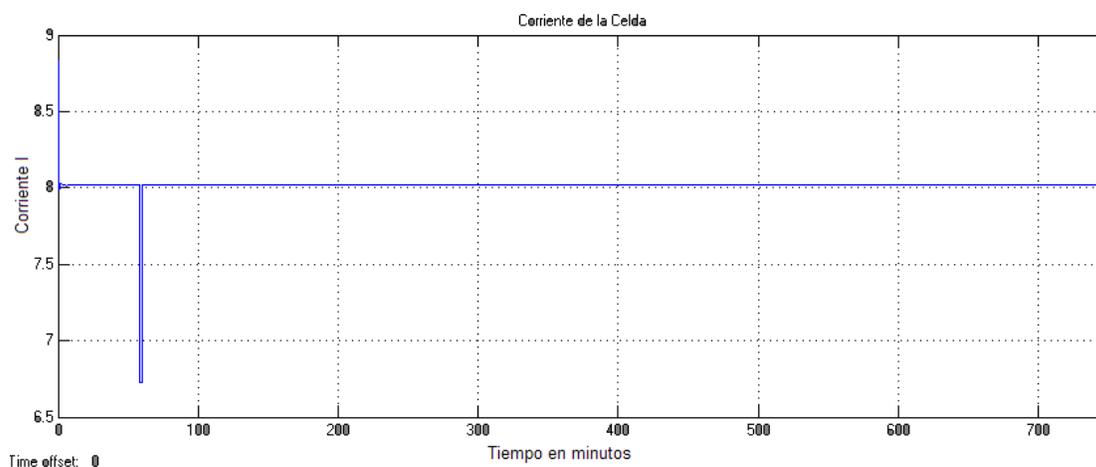


Figura 5.4 Gráfica de variación en la corriente entregada por la celda.

La figura 5.5 muestra la variación del voltaje en la celda de combustible durante el comportamiento típico de una estación sensora de campo. Se observa que únicamente se presenta una muy ligera variación de éste cuando se realiza la transmisión, y se cubre al cien por ciento con los requerimientos de voltaje de la estación de campo, pues el voltaje se mantiene constante en 12 V.

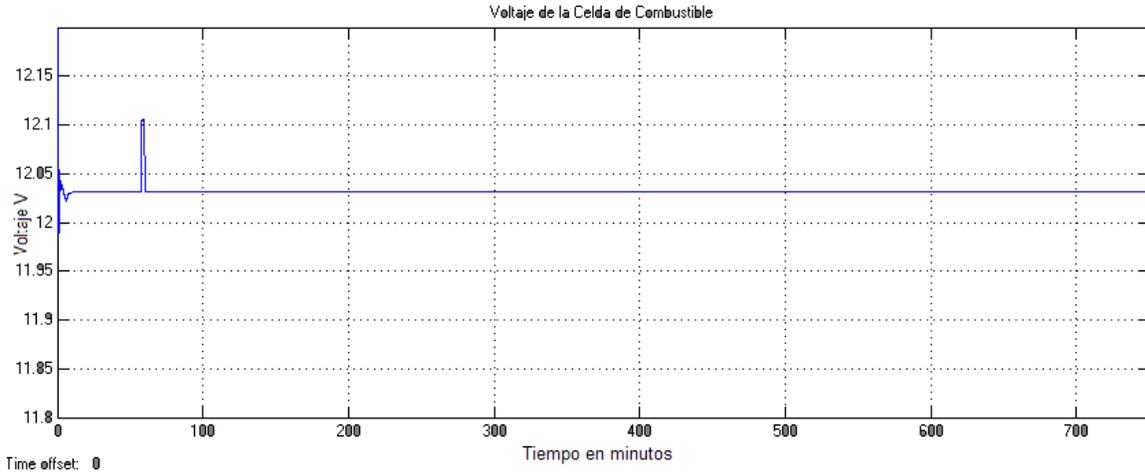


Figura 5.5 Variación del voltaje entregado por la celda.

Finalmente la figura 5.6 muestra la potencia entregada por la celda de combustible a lo largo del periodo de estudio. Como se puede observar los niveles de potencia se mantienen constantes y además en los periodos de más consumo se recupera y vuelve a su estado estable, el cual nunca se encuentra por debajo de 82.5 W, lo cual garantiza que la carga podrá ser alimentada correctamente. Como puede observarse de las gráficas anteriores la celda de combustible permite suministrar sin contratiempos, en un estado típico, pues una vez que el mensaje de presencia es enviado los parámetros regresan a sus valores nominales.

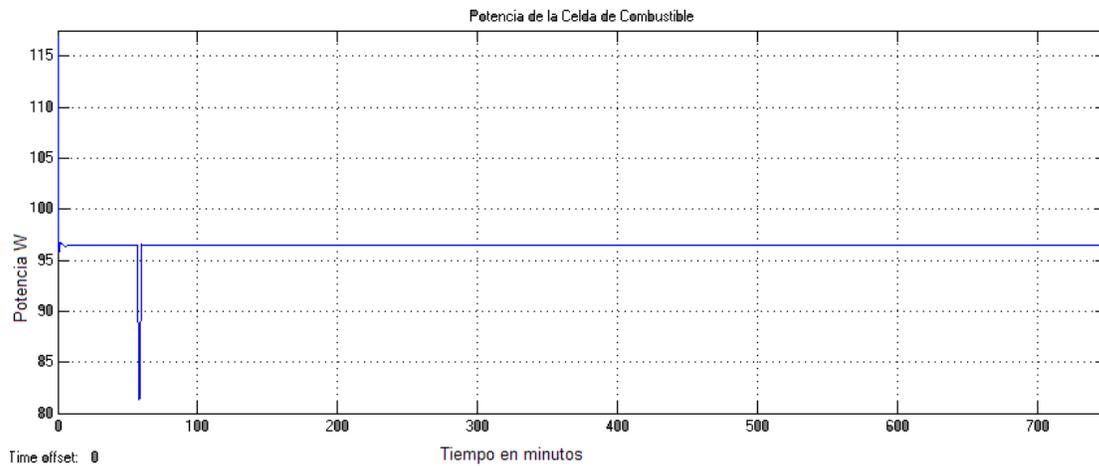


Figura 5.6 Potencia entregada por la celda de combustible. caso 1

5.4 Caso 2: Comportamiento Atípico en ESDECA.

Este caso de estudio muestra el comportamiento de una estación sensora de campo con una operación atípica, la figura 5.7 muestra la gráfica de la carga para este caso. Como se mencionó previamente en este caso se simula basado en múltiples mensajes que la estación envía, estos pueden generarse por registrar un sismo o por algún tipo de falla. La simulación arrojó los siguientes resultados:

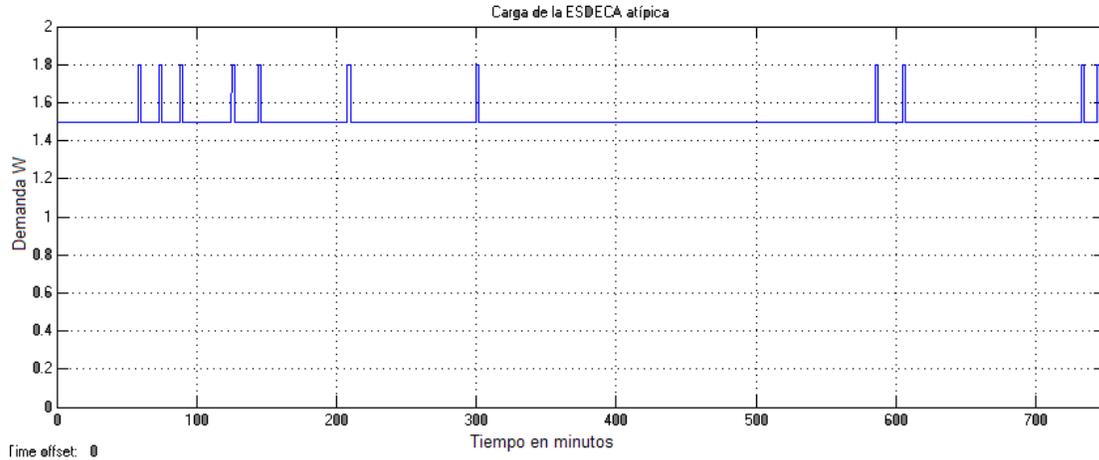


Figura 5.7 Demanda de la estación sensora de campo en operación atípica.

La figura 5.8 muestra las variaciones en la corriente de la celda ante las constantes variaciones en la demanda energética. Se observa que cada decremento en la corriente corresponde a la transmisión de un dato, y que a pesar de no presentar un comportamiento estable, la celda es capaz de soportar las variaciones energéticas en periodos cortos de tiempo, pues como se observa la corriente se recupera después de cada transmisión y que ésta nunca está por debajo de 6.75 A, lo que garantiza la operación correcta de la estación.

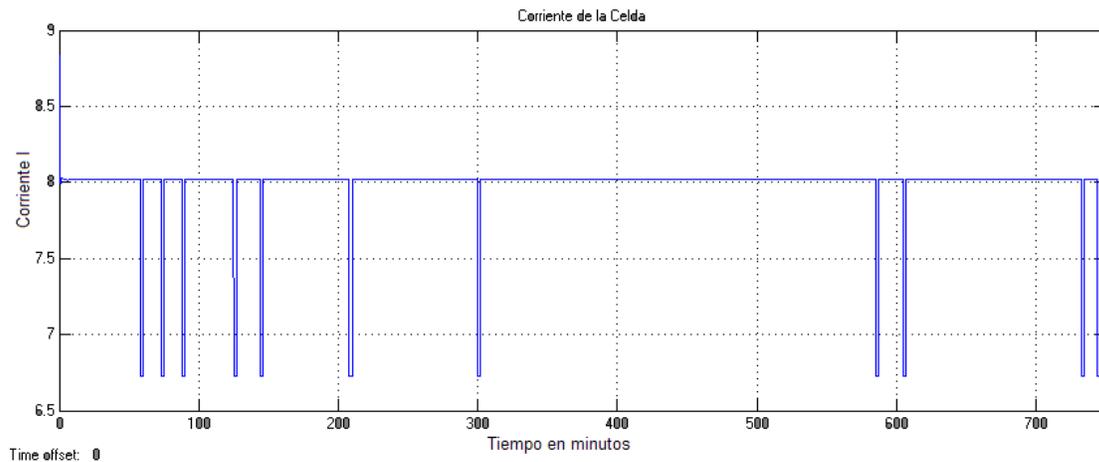


Figura 5.8 Corriente entregada por la celda de combustible caso 2.

La figura 5.9 muestra el comportamiento del voltaje entregado por la celda a lo largo de la simulación, se puede analizar que las variaciones en el voltaje son casi despreciables, pues no representan una variación mayor a 0.02 V, se observa que a pesar de estas variaciones el nivel de voltaje regresa a su valor nominal. Además, el nivel de voltaje nunca se encuentra por debajo de los 12 V, lo que garantiza la operación de la estación.

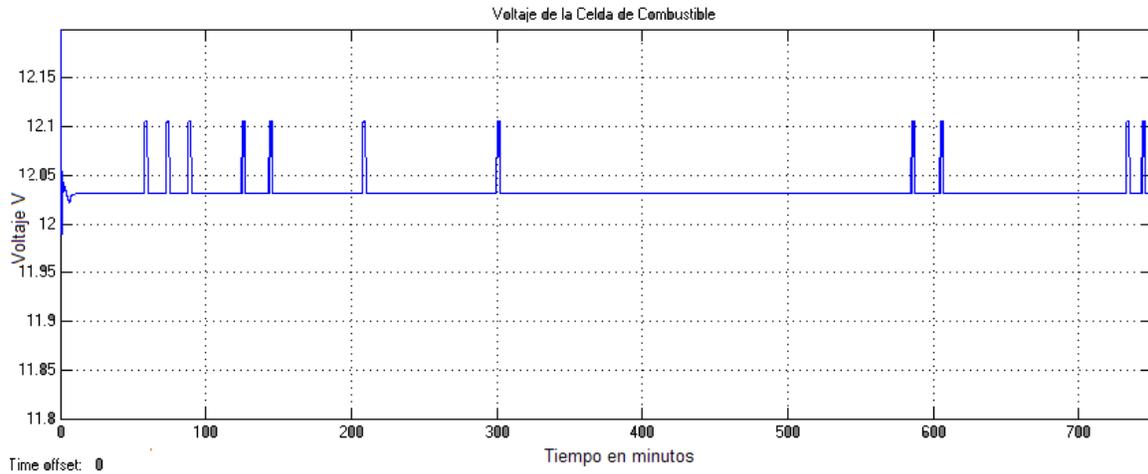


Figura 5.9 Voltaje entregado por la celda.

La figura 5.10 muestra el comportamiento de la potencia de la celda de combustible a lo largo del periodo de estudio. Se puede destacar que la potencia a pesar de sufrir variaciones cuando se presenta un incremento en el consumo energético se recupera y se mantiene constante al no bajar de 80 W.

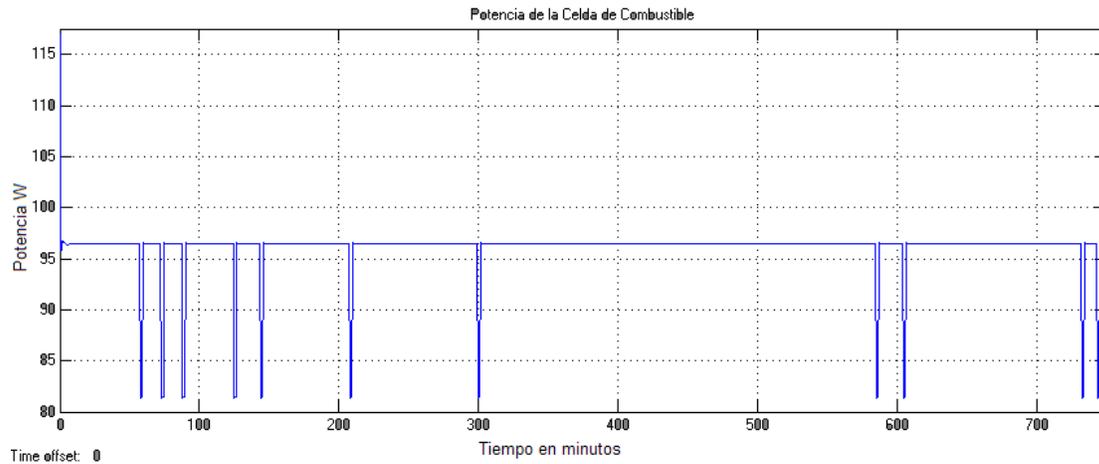


Figura 5.10 Potencia entregada por la celda de combustible caso 2.

5.5 Caso 3: Comportamiento típico de una ESREPE.

En este caso se plantea la simulación de una estación repetidora que recibe información de otras estaciones además de la que ella misma envía. La figura 5.11 muestra el comportamiento de las variaciones de la carga durante el periodo de la simulación, cada incremento en la carga representa el envío de información de una estación de campo, se tienen seis variaciones correspondientes a las transmisiones de mensajes de las seis estaciones que de ella dependen, y una más que corresponde a la transmisión que la estación repetidora envía.

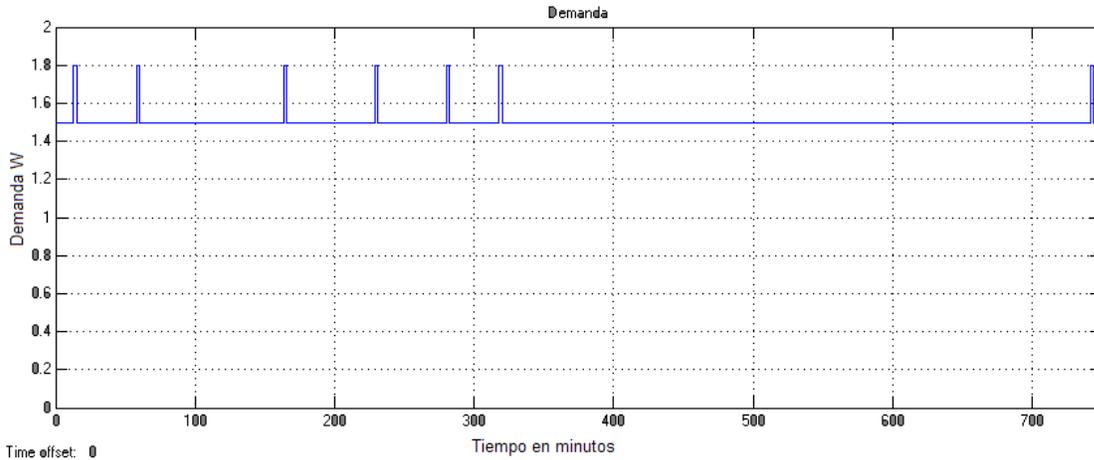


Figura 5.11 Demanda de la carga de la estación repetidora caso 3.

En el presente caso se plantea la simulación del consumo típico de una estación repetidora, se caracterizó el consumo de la estación que recibe un alto número de datos de otras estaciones de campo. Se obtuvieron los siguientes resultados:

La figura 5.12 muestra el comportamiento en la corriente de la celda ante las variaciones que presenta la carga. Se observa que esta gráfica es parecida a la que se obtuvo al simular la estación atípica, esto es porque la carga de 1.5 W cubre la carga requerida tanto por una estación de campo como para una estación repetidora, igual sucede en los periodos de transmisión ambas estaciones requieren 1.8 W en transmisión. Lo que hay que recordar es que la estación repetidora tiene una mayor demanda porque debido a que requiere mandar más mensajes, propios y de las estaciones que de ella dependen. A diferencia de la estación sensora de campo típica, la estación repetidora en su estado típico presenta un consumo mayor porque debe retransmitir los datos que a ella le llegan, se observa que la celda de combustible cubre con dicha demanda pues después de cada transmisión la corriente se recupera y se mantiene constante y nunca esta por debajo de los 6.75 A.

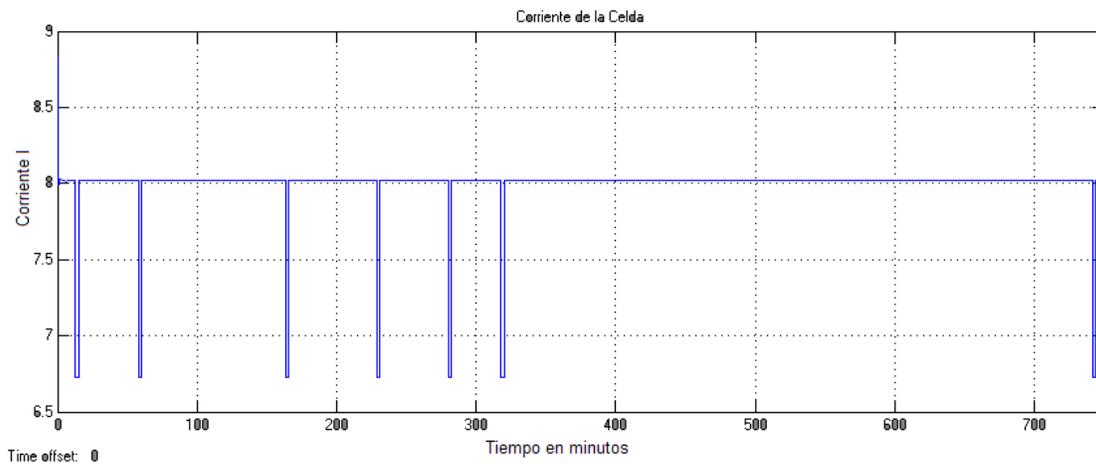


Figura 5.12 Corriente entregada por la celda de combustible caso 3.

La figura 5.13 muestra la variación en el voltaje suministrado por la celda de combustible a lo largo del periodo de estudio. Se observa que las variaciones en el voltaje durante los periodos de mayor demanda son muy pequeñas, casi despreciables, y que el voltaje se mantiene constante en 12 V.

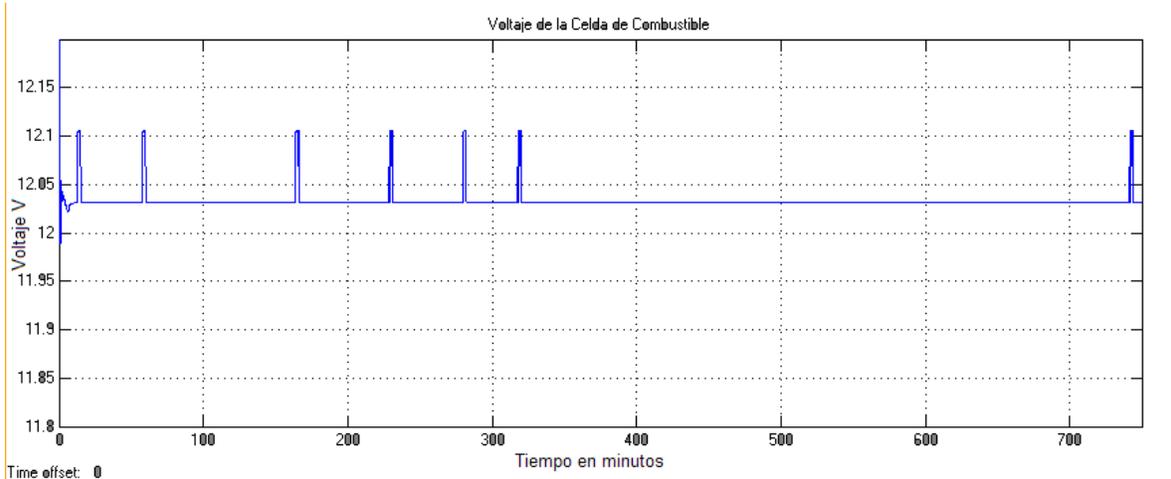


Figura 5.13 Voltaje entregado por la celda de combustible caso 3.

La figura 5.14 muestra las variaciones en los niveles de potencia entregados por la celda de combustible. Se observa que la celda de combustible, a pesar de las variaciones en la demanda energética no baja de los 80 W.

Como puede observarse de las figuras anteriores a pesar de que la ESREPE requiere una operación más demandante, la celda de combustible sigue suministrando los requerimientos energéticos sin problemas.

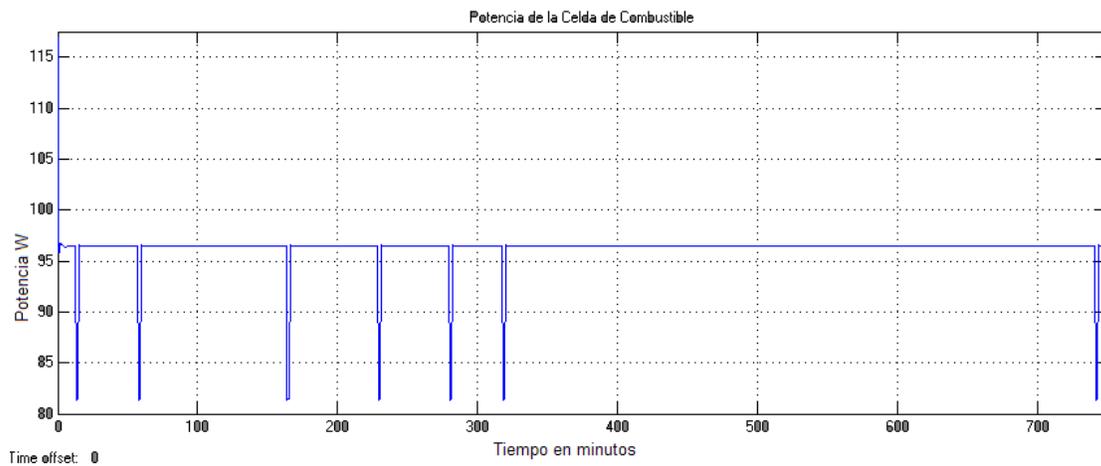


Figura 5.14 Potencia entregada por la celda de celda de combustible caso 3.

5.6 Caso 4: Comportamiento atípico de una ESREPE.

En este caso se representa el comportamiento de una estación repetidora con una operación atípica, como se mencionó seis estaciones envían información a esta, misma que tiene que retransmitir, lo cual implica un mayor consumo energético. La figura 5.15 muestra el comportamiento de la carga a lo largo del periodo de estudio. Para este caso se plantea que las estaciones de campo envíen datos en periodos de tiempo corto, cada incremento en la carga representa una transmisión. Se simuló pensando en que alguna estación, de las que se reportan al repetidor, presente una falla como es la de estar transmitiendo datos incorrectos, lo que genera que se tenga que estar transmitiendo varios mensajes en periodos muy cortos de tiempo, además de que se presenten varios mensajes de sismo, mensajes de presencia y mensajes de falla.

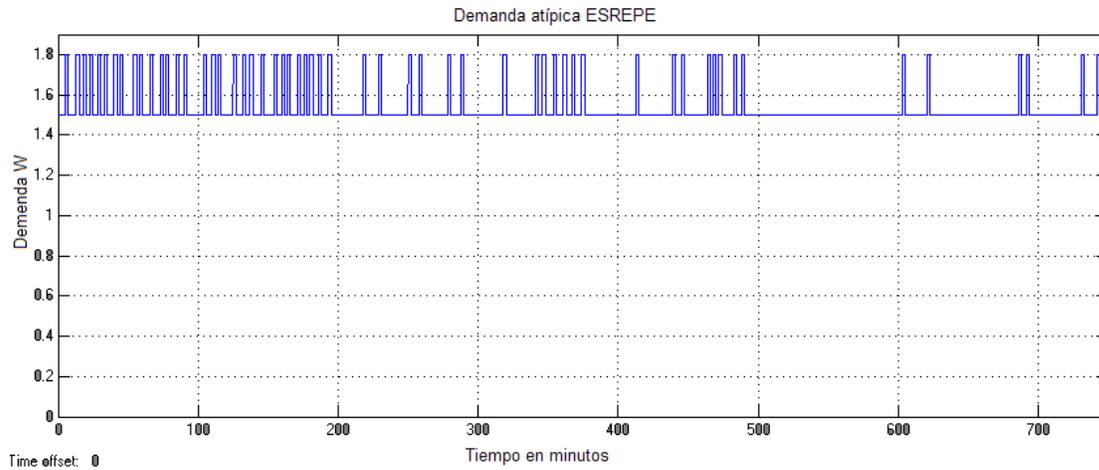


Figura 5.15 Curva de demanda de la ESREPE atípica.

La figura 5.16 muestra la corriente entregada por la celda a lo largo de la simulación, se observa que a pesar de las constantes variaciones en la carga, la corriente nunca está por debajo de 6.5 Amperes, y una vez que el mensaje se ha enviado la corriente regresa sin problemas a su valor nominal.

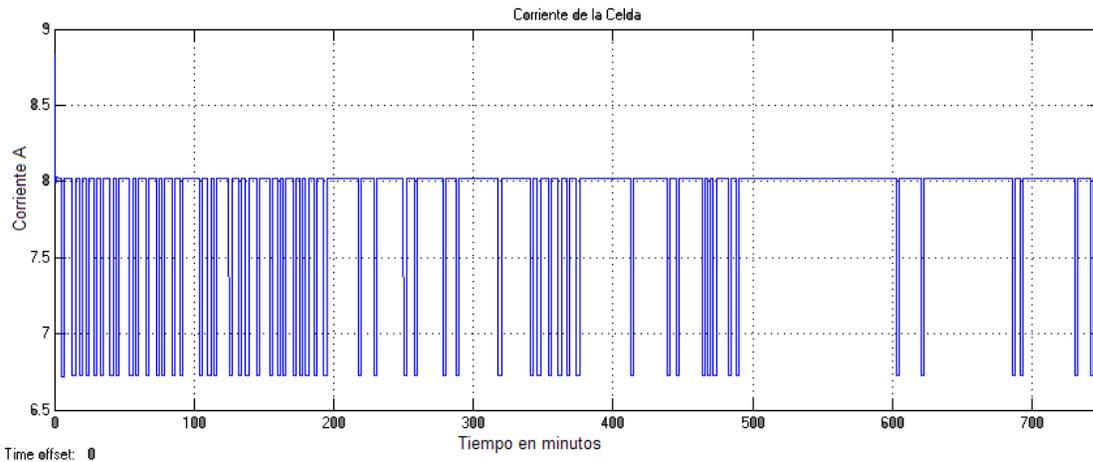


Figura. 5.16 Corriente entregada por la celda.

La figura 5.17 muestra el comportamiento del voltaje de la celda de combustible, se puede observar que el voltaje se mantiene prácticamente en los 12 Volts con variaciones despreciables cuando se

presenta la transmisión del dato, lo que asegura que la carga se mantenga operando dentro de sus parámetros normales.

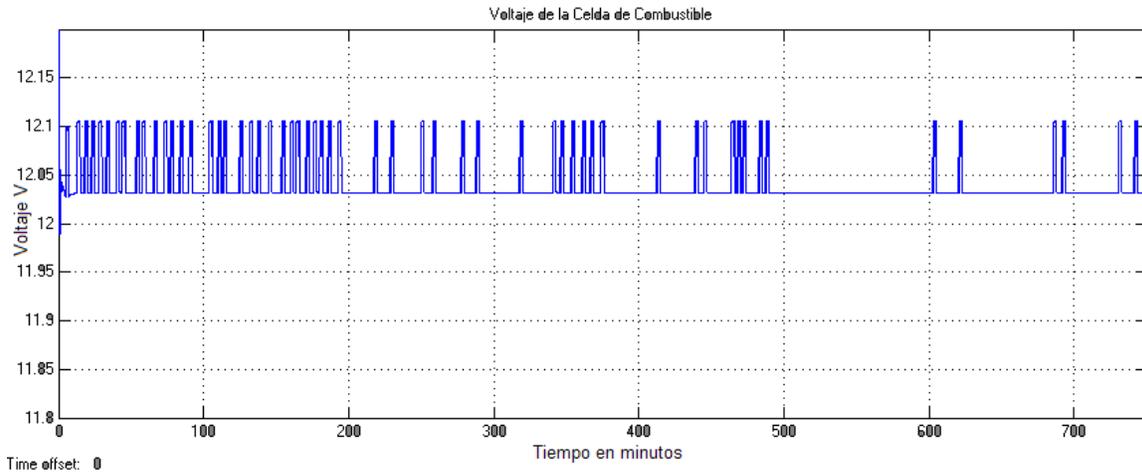


Figura 5.17 Voltaje entregado por la celda de combustible caso 4.

La figura 5.18 muestra la potencia entregada por la celda de combustible a lo largo de la simulación. La potencia entregada por la celda mientras un mensaje es enviado alcanza un valor de casi 80 W, pero regresa a su valor nominal una vez finalizado el envío independientemente del número de transmisiones enviadas.

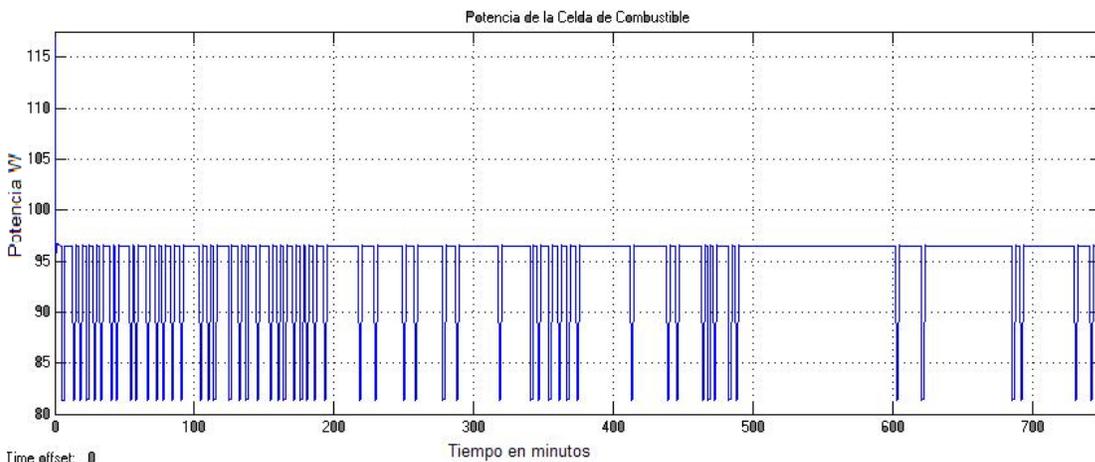


Figura 5.18 Potencia entregada por la celda de combustible caso 4.

Se puede observar que a pesar de las constantes variaciones en la carga, la celda de combustible puede soportar la demanda y mantener en operación a la estación repetidora sin mayor problema.

5.4 Discusión.

La simulación se ejecuta en la versión completa de Matlab 6.5 con la librería de "PowerSystem". Como resultado de las simulaciones se obtuvieron datos que permiten evaluar de forma más concreta la operación de la celda. Los valores donde se desea analizar

la corriente de salida fueron acotados por el “*timmer*”, donde se establecen el tiempo de evaluación y el valor de la carga. La figura 5.1 muestra el “*timmer*”. Todas las simulaciones mostradas fueron en un periodo de 720 minutos, en intervalos de 1 minuto. Las perturbaciones presentadas durante los primeros 0.5 segundos de la simulación son generadas por inadecuaciones de las condiciones iniciales.

En función de estos parámetros, se acotaron tiempos de análisis, los cuales son recabados de la operación de la estación y del análisis de campo. Cada estación de campo envía dos mensajes de presencia al día, además de mensajes de alerta cuando se detecta algún movimiento. Los valores de la carga se tomaron en base a las especificaciones técnicas de la estación sensora de campo y de la estación repetidora, tomando en consideración que las transmisiones duraran 1 minuto, esto con el fin de poder analizar el comportamiento de la celda ante un panorama no típico, donde la demanda energética sea por un tiempo más largo del convencional, que es de 0.2 segundos.

Una de las principales variables a observar es que el nivel de corriente se mantenga constante a lo largo de toda la simulación. Los valores de la carga se incrementan en forma de picos partiendo de un consumo promedio de 1.5 W.

Para tener una estimación con mayor validez del comportamiento de la celda con una carga que sea más demandante se utilizaron los valores de la carga en estado atípico, con variaciones en periodos de tiempos muy cortos y recurrentes.

El resultado de estas simulaciones arrojan que la celda mantiene constante el nivel de corriente hasta que se presentan las rápidas y grandes variaciones de carga pero recupera su valor constante cuando la transmisión finaliza, esto representa que la celda de combustible por si misma podría soportar una demanda de carga por largos periodos de tiempo. En el momento en que la carga se vuelve a normalizar la corriente se mantiene constante, hay que recordar que la simulación se hizo tanto para una estación de campo como para una estación repetidora y en ambos casos la celda cumple con la función de mantener operando la estación. En el caso de la simulación para una operación atípica, donde se caracterizó una demanda que se tiene en las estaciones sensoras de campo cuando éstas presentan una falla, no se presentan problemas para alimentar la carga, pues las variaciones que sufre el voltaje de salida entregado por la celda es prácticamente despreciable, y del mismo modo no se ve afectada la corriente de salida en la celda.

La celda de combustible presenta una corriente de salida constante que puede ser variada desde 8 A hasta los 6.75 A como mínimo, y el modelo utilizado de la celda de combustible puede generar hasta 96 W.

La variación del hidrógeno se mantuvo prácticamente constante a lo largo de la simulación, mientras que la variación en el oxígeno presenta más variaciones, porque el oxígeno es más sensible a las variaciones de la carga de lo que es el hidrógeno.

Se podría utilizar el sistema de la celda de combustible con la coordinación de un sistema secundario para mantener el voltaje necesario en la carga durante los cambios que ésta demande. La integración de un sistema de celdas de combustible con un sistema secundario de energía, que dependa de variantes como un sistema fotovoltaico o un aerogenerador pueden ser necesarios.

Durante los casos de estudio se observa la variación del voltaje de salida en la celda que se mantiene prácticamente constante. Este comportamiento estable de voltaje, puede ofrecer una mejora considerable en comparación con el sistema fotovoltaico con el que se cuenta actualmente. La integración de las celdas de combustible además, permitirá establecer parámetros de diseño, en los cuales se pueda contar con un registro historio de días y meses donde se requiere un suministro de energía adicional.

La simulación arroja que el sistema de la celda puede generar 96 W de potencia, para el caso que es el correspondiente a la estación repetidora de campo en estado atípico, la celda de combustible aporta la potencia necesaria para mantener operando a la estación sin ninguna restricción. Incluso ofrece la potencia necesaria para poder ampliar el equipo actual de instrumentación y de comunicación. La actual restricción en el consumo energético en la estación de campo, ha restringido la implementación de instrumentación que ayude a medir otros parámetros diferentes a las aceleraciones sísmicas, como niveles de insolación, velocidad del viento y optimizar la operación del sistema en la parte de comunicaciones mediante dispositivos tecnológicos disponibles, como el de telefonía celular o satelital. Por lo que resulta interesante poder contar con un sistema alternativo capaz de proveer la energía necesaria para alcanzar las metas deseadas por el centro. Con el análisis de la simulación se puede destacar que se podría alimentar un banco de baterías de respaldo con la corriente que genera la celda, y así contar con un sistema secundario que podría operar en caso de ocurrir una falla en la celda o en caso de que el combustible se haya agotado, entonces se ofrecería un tiempo de respaldo suficiente para acudir al sitio y realizar el mantenimiento correspondiente.

Referencias:

- [1] Bei Gou, Woon Ki Na, Bill Diong, “*Fuel Cells Modeling, Control and Applications*”. CRC Press; United States of America, 2010.
- [2] MathWorks, Simulink, Pagina visitada 14 de febrero de 2011.
<http://www.mathworks.com/products/simulink/>
- [3] J. Purkrushpan and H. Peng, “*Control of Fuel Cell Power Systems: Principle, Modeling, Analysis and Feedback Design*”, Germany: Springer, 2004.