Evaluación termoeléctrica de un supercapacitor integrado a un sistema de enfriamiento

Cardoso-Fernández, V.*, Ricalde-Cab, L., Bassam, A. y Cruz-Jiménez, B.

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Avenida industrias no contaminantes y periférico norte s/n. Mérida, Yucatán, México.

Fecha de recepción: 09 de octubre de 2019 - Fecha de aceptación: 10 de junio de 2020

Resumen

En esta investigación se aborda la simulación térmica y eléctrica de un supercapacitor; el modelo empleado para describirlo es un circuito de tres ramas que integra capacitancias y resistencias variables en función de la temperatura. En el análisis térmico, se simuló la integración de un sistema de enfriamiento a base de aletas para disminuir la temperatura de operación hasta el rango óptimo establecido por los parámetros eléctricos. Los resultados del trabajo muestran que, para un sistema de enfriamiento compuesto por siete aletas de aluminio de 0.01 m de radio con 0.01 m de separación entre éstas, cuando se logra disminuir la temperatura de operación del dispositivo a 40 °C, la capacitancia y resistencia son de 2,047.43 C y 0.80 R, respectivamente. La geometría de las aletas, el coeficiente de conductividad (k) y el régimen de disipación convectiva (h) son parámetros críticos para establecer las temperaturas de operación del supercapacitor, repercutiendo en la eficiencia del dispositivo.

Palabras clave: Almacenamiento de energía, Matlab Simulink, temperatura de operación, sistema de enfriamiento, condiciones locales.

Thermoelectric evaluation of a supercapacitor integrated to a cooling system

Abstract

This research addresses the thermal and electrical simulation of a supercapacitor; the model used to describe it is a three-branch circuit that integrates capacitance and variable resistance depending on the temperature. In the thermal analysis, the integration of a fin-based cooling system was simulated to reduce the operating temperature to the optimum range established by the electrical parameters. The results of the work show that, for a cooling system composed of seven aluminum fins of 1.0 cm radius with 1.0 cm separation between them, when the operating temperature of the device is reduced to 40 ° C, the capacitance and resistance they are 2,047.43 C and 0.80 R, respectively. The geometry of the fins, the coefficient of conductivity (k) and the regime of convective dissipation (h) are critical parameters to establish the operating temperatures of the supercapacitor, affecting the efficiency of the device.

Keywords: Energy storage, Matlab Simulink, operating temperature, cooling system, local conditions.

*victorcf.92@gmail.com

Nota: Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 24, No. 2, 2020, ISSN: 2448-8364

Introducción

La necesidad del ser humano por consumir energía en lugares donde está disponible, lo ha llevado a desarrollar distintos dispositivos para el almacenamiento de energía; estos pueden clasificarse de acuerdo con el principio de almacenamiento: mecánicos, químicos, electromagnéticos y térmicos. Uno de los dispositivos de almacenamiento que se ha desarrollado en los últimos años son los supercapacitores; éstos pueden almacenar mayor cantidad de energía comparándolos con capacitores comunes y a su vez entregar mayor potencia que las baterías (Sharma & Batti, 2010). Actualmente, la producción mundial de supercapacitores varía según la región; se conoce principalmente que el 55 % son manufacturados en Asia del Este, 28 % en América del Norte y un 7 % en Europa, dejando el 10 % restante a pequeñas empresas productoras alrededor del mundo (Business Wire, 2016).

A diferencia de los capacitores, que emplean un dieléctrico convencional, los supercapacitores se basan en la capacitancia de doble capa y en la pseudocapacitancia para almacenar energía (CapacitorGuide, 2016)**.** Además, sus ciclos de carga y descarga son más rápidos que cualquier otro dispositivo de almacenamiento. Las aplicaciones más comunes, consisten en memorias de respaldo, mejoramientos a la batería, actuadores electroquímicos, vehículos eléctricos, entre otros.

Sin embargo, debido a las mismas características de funcionamiento, este dispositivo de almacenamiento de energía puede experimentar distintas problemáticas al momento de operar. En los vehículos híbridos, los supercapacitores son empleados para recuperar energía durante el frenado, a través de altas corrientes de carga y descarga en cada ciclo. Aunque la eficiencia para estos ciclos es superior al 90 %, no puede despreciarse el calentamiento que experimentan ciertos componentes, lo que sugiere el uso de un sistema de enfriamiento adecuado (Michael, 2006).

Uno de los parámetros de importancia en la operación de estos sistemas de almacenamiento, es la temperatura, la cual determina la forma en que se llevará a cabo el proceso de degradación (Chaari et al., 2014). Si estos sistemas operan por encima de su temperatura máxima permitida presentarán problemas en su eficiencia (Frivalsky et al., 2014). En cuanto a la expectativa de vida, ésta es reducida debido al calentamiento generado por las pérdidas en la resistencia conductora, así como de la electrolítica (Gualous et. al., 2003). Además de los efectos ya mencionados, el aumento de temperatura en un supercapacitor puede incrementar la presión en su interior (Al Sakka et al., 2009). Por otro lado, existe un calentamiento significativo en el dispositivo debido a los ciclos repetitivos de carga y descarga, a pesar de que la resistencia equivalente en serie de un supercapacitor, se llegue a encontrar en el orden de los mΩ.

Es posible encontrar en la literatura distintos modelos que simulan el comportamiento de un supercapacitor. Allu et. al. desarrollaron un modelo computacional tridimensional que permite analizar el transporte de cargas a lo largo del sistema electrodo-electrolito (Allu et. al., 2014). Al Sakka et. al. estudiaron la distribución de la temperatura de operación en distintos supercapacitores, llegando a la conclusión que ésta depende de la geometría del mismo y que el valor máximo se encuentra en la mayoría de los casos en el centro (Al Sakka et. al., 2009).

Berrueta et. al. realizaron una simulación termoeléctrica, empleando un circuito eléctrico equivalente para simular el comportamiento eléctrico y otro para el térmico; estos sistemas tienen como variables de entrada la corriente eléctrica y temperatura ambiente, para arrojar como variables de salida el voltaje de operación del supercapacitor, así como su temperatura (Berrueta et. al., 2014). Por otra parte,

Andocilla-López modeló el comportamiento de un supercapacitor a través de un modelo en Matlab Simulink, teniendo a los parámetros eléctricos como variables independientes y la temperatura de operación como variable dependiente (Andocilla-López et. al., 2015). La diferencia entre estos dos trabajos radica en que Berrueta empleó un supercapacitor Maxwell SC BMOD0083 para obtener los parámetros del circuito equivalente; mientras que Andocilla-López empleó un modelo en Matlab Simulink para describir el comportamiento del supercapacitor, obteniendo los parámetros de operación a través de las ecuaciones diferenciales de transferencia de calor resueltas por el método de diferencias finitas.

Con el propósito de lograr una integración entre los parámetros eléctricos de un supercapacitor y su comportamiento térmixo, Xiong et. al. proponen una metodología basada en ingresar la temperatura de operación, corriente y voltaje al modelo eléctrico, para obtener como variable de salida el calentamiento generado por efecto Joule, recibido por el modelo que describe el comportamiento térmico del dispositivo (Xiong et. al., 2015). A través de un estudio experimental, Gualous et. al. describieron la variación de la resistencia en serie, así como la capacitancia para un supercapacitor Maxwell 2700 F en función de la temperatura de operación (Gualous et. al., 2003). La diferencia de este trabajo respecto a los anteriores radica en la obtención de expresiones analíticas, las cuales describen la dependencia de los parámetros eléctricos de resistencia y capacitancia respecto a la temperatura de operación, basadas en polinomios de grado tres.

En el presente trabajo se pretende abordar el problema de la disipación de calor en un supercapacitor, uniendo el modelo termoeléctrico que lo describe, con un sistema de enfriamiento a base de aletas circulares. El objetivo consiste en mantener la temperatura de operación dentro del rango óptimo establecido por el fabricante. A través de la integración de los modelos del supercapacitor y el sistema de enfriamiento, se determinará la relación de la capacitancia y resistencia con la temperatura de operación. Este modelo integrado se evaluará bajo condiciones ambientales correspondientes a la ciudad de Mérida, Yucatán, México.

En la sección de materiales y métodos se presenta el modelo termoeléctrico del supercapacitor, así como el sistema de enfriamiento y las ecuaciones que rigen ambos sistemas. En el análisis de resultados, se muestra la relación que guardan las variables eléctricas (capacitancia y resistencia) del supercapacitor con la temperatura de operación del mismo.

Materiales y métodos

Modelo termoeléctrico del supercapacitor

El modelo empleado en el presente trabajo consiste en un circuito eléctrico de dos ramas (Figura 1); en la primera se encuentran una resistencia (R1) y una capacitancia (C1), ambos dependientes de la temperatura de operación. Mientras que la segunda también está compuesta por los mismos elementos, pero independientes de la temperatura (R2 y C2). La resistencia en paralelo (Rp) representa el efecto fuga y la inductancia (L) es empleada en aplicaciones de pulso. Las mediciones experimentales comprueban que el valor de la inductancia es tan pequeño que puede ser despreciado para la mayoría de los casos; como Rp únicamente tiene validez al momento de estudiar el almacenamiento de energía durante largos periodos de tiempo, para fines del presente trabajo puede ser omitido (Gualous et al., 2003).

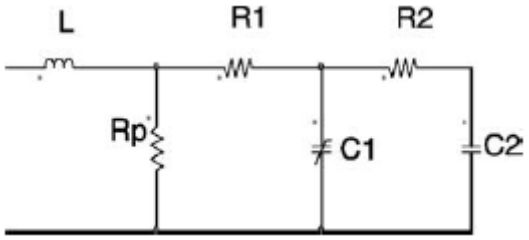

Figura 1. Modelo eléctrico de 2 ramas (Gualous et. al., 2003)

La resistencia y capacitancia en función de la temperatura, fueron modelados como polinomios de grado 3:

$$R_1 = aT^3 + bT^2 + cT + \quad (1)$$
$$C_1 = C_o + VC_v \quad (2)$$

Donde:

$$C_o = a_3T^3 + a_2T^2 + a_1T + a_0 \quad (3)$$
$$C_v = b_3T^3 + b_2T^2 + b_1T + b_0 \quad (4)$$

En las ecuaciones anteriores, C_o es un valor de capacitancia constante característico de cada supercapacitor y C_v es la parte de la capacitancia dependiente del voltaje. R_1 y C_1 son la resistencia y capacitancia del supercapacitor, respectivamente. Las constantes anteriores $(a, b, c, e, a_3, a_2, a_1, a_0, b_3, b_2, b_1\ y\ b_0)$, presentadas en las Tablas 1, 2 y 3, son identificadas al cargar el supercapacitor a diferentes temperaturas, variando la diferencia de potencial desde cero hasta un voltaje nominal y observando el voltaje terminal durante la redistribución interna de cargas. La corriente se mantiene controlada en todo momento. Se empleó un supercapacitor Maxwell 3000 F, el cual tiene voltaje máximo absoluto de 2.85 V, corriente máxima absoluta de 1500 A y temperatura de operación en el rango de -30 a 40 °C. La elección de este objeto de estudio fue debido a la descripción detallada del modelo termoeléctrico de tres ramas presentada por Gualous et. al. (2003). Este modelo facilita el análisis de la relación que guardan los parámetros eléctricos del supercapacitor con su temperatura de operación.

Tabla 1. Constantes determinadas para el polinomio R_1 (Gualous et. al., 2003)

Constante	Magnitud
a	$-1.10x10^{-5}m\Omega(°C)^{-3}$
b	$-7.10x10^{-4}m\Omega(°C)^{-2}$
c	$-205.10x10^{-4}m\Omega(°C)^{-1}$
e	$1.19m\Omega$

Tabla 2. Constantes determinadas para el polinomio C_o (Gualous et. al., 2003)

Constante	Magnitud
a_3	$0.0032\ F(°C)^{-3}$
a_2	$-0.1251\ F(°C)^{-2}$
a_1	$1.4572\ F(°C)^{-1}$
a_0	$1984.5\ F$

Tabla 3. Constantes determinadas para el polinomio C_v (Gualous et. al., 2003)

Constante	Magnitud
b_3	$-0.0022\ F(°C)^{-3}$
b_2	$0.0491\ F(°C)^{-2}$
b_1	$0.0247\ F(°C)^{-1}$
b_0	$543.7\ F$

Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento empleado tiene como objetivo disminuir la temperatura de operación del supercapacitor, cuando ésta se encuentre por encima del límite superior recomendado por el fabricante. Dicho sistema consiste en un arreglo de aletas circulares acopladas al supercapacitor, las cuales se adaptan a la geometría cilíndrica del dispositivo de almacenamiento de energía (Figura 2).

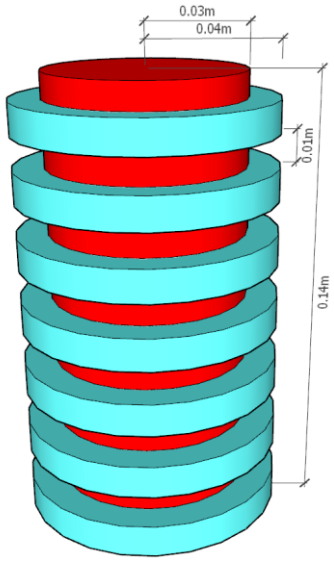

Figura 2. Representación esquemática del supercapacitor Maxwell 3000 F con un sistema de enfriamiento a base de aletas con r=0.01 m, distancia entre las aletas y espesor de 0.01 m.

Las aletas que forman el sistema de enfriamiento son de aluminio ($k = 205\ W/m \cdot K$). En la representación esquemática de la Figura 2, se observa un radio interno de 0.03 m que corresponde al radio del supercapacitor, un radio externo de 0.04 m el cual es medido desde el centro del supercapacitor hasta la punta de las aletas y un radio efectivo de las aletas de 0.01 m, obtenido a través de la resta de los radios exterior e interior. Además, existe una separación entre las aletas de 0.01 m.

Para llevar a cabo el análisis térmico del sistema de enfriamiento, se utilizó la metodología propuesta por Andocilla-López et. al. (2015). Éste elabora un código con los coeficientes de transferencia de calor por convección y conducción, así como el perímetro y área de la aleta como variables de entrada. Las variables de salida consisten en los perfiles de temperatura de las aletas.

Integración de modelos

Una vez descrita la simulación eléctrica obtenida a partir de Gualous et. al. (2003) así como la simulación del sistema de enfriamiento presentado por Andocilla-López et. al. (2015); éstas son unidas a través de un modelo desarrollado en Matlab. El propósito de realizar esta integración consiste en obtener una relación entre los parámetros eléctricos y el sistema de enfriamiento, empleando la temperatura de operación como nexo entre ellos.

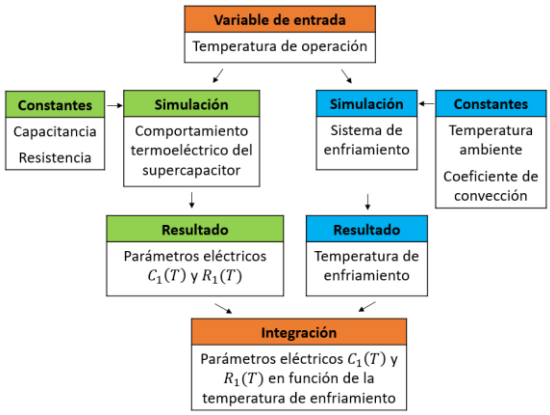

Figura 3. Modelo termoeléctrico para el supercapacitor Maxwell 3000 F. Las secciones resaltadas con color verde representan las ecuaciones que gobiernan los parámetros de interés del supercapacitor, mientras que aquellas de azul involucran al sistema de enfriamiento propuesto.

El diagrama mostrado en la Figura 3 inicia con la temperatura de operación como variable de entrada tanto para el modelo termoeléctrico del supercapacitor, así como para el sistema de enfriamiento. En la sección del dispositivo de almacenamiento de energía, se reciben también como variables de entrada la capacitancia y resistencia independientes de temperatura; cabe mencionar que ambos valores dependen del objeto estudiado, para el caso del supercapacitor Maxwell 3000 F, corresponden a $R_2 = 1\,\Omega$ y $C_2 = 150\,F$, mostrados en el circuito equivalente (Figura 1). Este bloque de la simulación presenta como resultado el valor de los parámetros eléctricos capacitancia y resistencia en función de la temperatura.

El sistema de enfriamiento trabaja con la temperatura ambiente y el coeficiente de convección. Estas variables de entrada dependen del sitio donde se empleará el objeto de estudio. Como resultado de esta simulación, se obtiene el valor de la temperatura de enfriamiento luego de que

ésta ha sido disminuida por el sistema de enfriamiento.
El último bloque del diagrama presenta como resultado la integración de ambos sistemas, el cual consiste en la obtención de los parámetros eléctricos en función de la temperatura obtenida a partir del sistema de enfriamiento.

Análisis de resultados

Los resultados que se observan en las Figuras 5 y 6 muestran la relación que guardan los parámetros eléctricos del supercapacitor con el valor térmico de interés, la temperatura de operación.

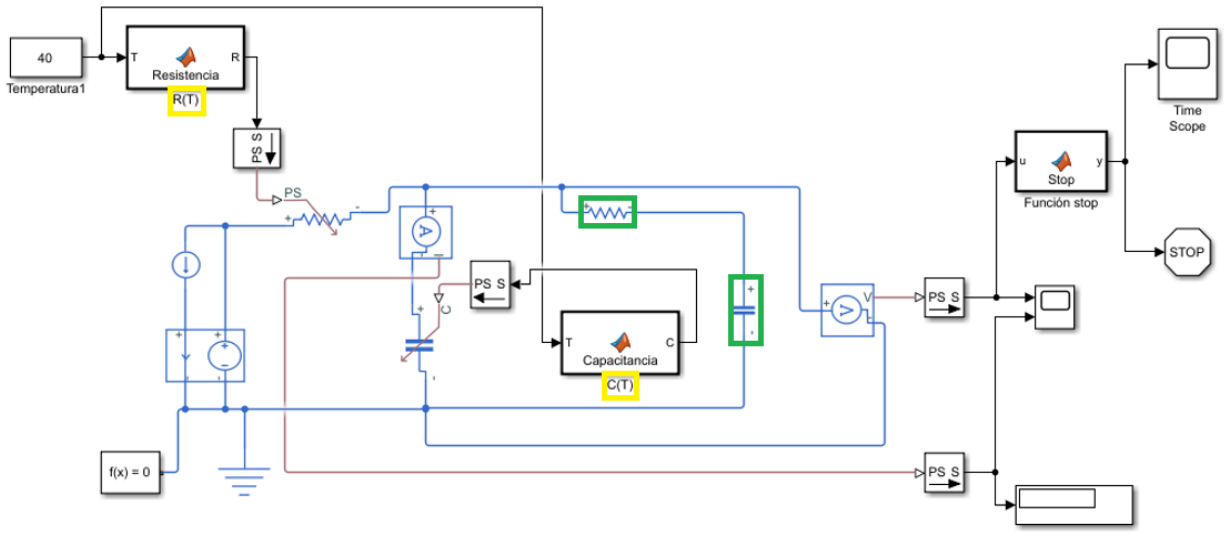

Figura 4. Modelo termoeléctrico realizado en Simulink. Los bloques de resistencia y capacitancia señalados de amarillo representan a R_1 y C_1, mientras que los elementos marcados de verde a R_2 y C_2.

La representación esquemática de la Figura 4 es empleada para elaborar el modelo del supercapacitor en Matlab Simulink; en la primera rama se observan señalados de amarillo los dos elementos dependientes de la temperatura (R_1 y C_1), mientras que en la segunda están presentes los mismos elementos, pero independientes de la temperatura y señalados de verde (R_2 y C_2). Los medidores de corriente y voltaje son colocados en la primera rama, con la intención de conocer el tiempo en el cual la capacitancia alcanza su valor máximo. El circuito es alimentado por una fuente de voltaje y se determina el tiempo en que C_1 alcanza su valor máximo. El modelo es sometido a una fuente de 140 A y 2.5 V, el supercapacitor empleado posee una capacitancia de 3000 F con electrodos de carbón activados y electrolito orgánico.

Estos valores numéricos fueron obtenidos empleando las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) descritas en la sección de materiales y métodos.

Efecto de la temperatura de operación sobre los parámetros eléctricos

En la Figura 5 se muestra la relación que guarda la resistencia respecto a la temperatura de operación del supercapacitor.

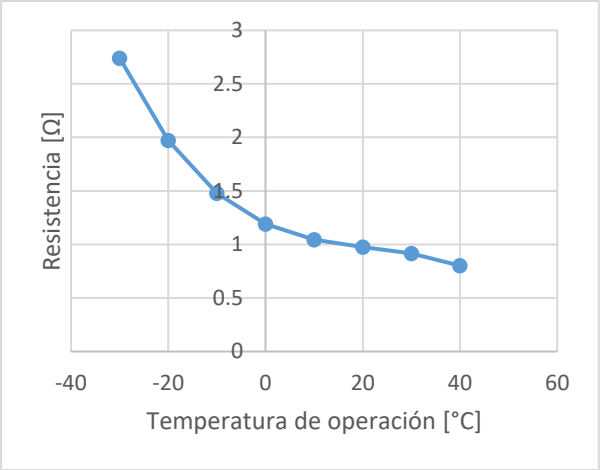

Figura 5. Relación entre la resistencia R_1 y la temperatura de operación

La Figura 6 muestra la relación que guarda la capacitancia respecto a la temperatura de operación del supercapacitor y el tiempo de carga.

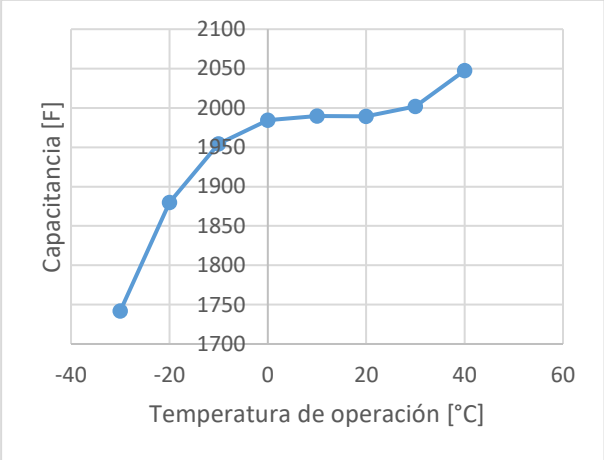

Figura 6. Relación entre la capacitancia C_1 y la temperatura de operación

Los resultados anteriores muestran que la resistencia del supercapacitor disminuye con la temperatura, mientras que la capacitancia del supercapacitor aumenta con la temperatura. Dichos comportamientos concuerdan con los presentados por Gualous et. al. (2003).

Después de haber presentado los resultados del modelo eléctrico y térmico, se simuló la implementación del sistema de enfriamiento bajo condiciones reales de viento y temperatura ambiente.

Los datos ambientales fueron proporcionados por la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. Las velocidades de viento fueron medidas a una altura de 10 m.

Las mediciones fueron tomadas durante un periodo de tiempo de 24 horas, obteniendo datos con una frecuencia de un minuto. Para fines del presente trabajo, se tomaron los valores promedio de cada 30 minutos, generando un total de 48 datos. Las mediciones fueron adquiridas el día 30 de marzo del 2009.

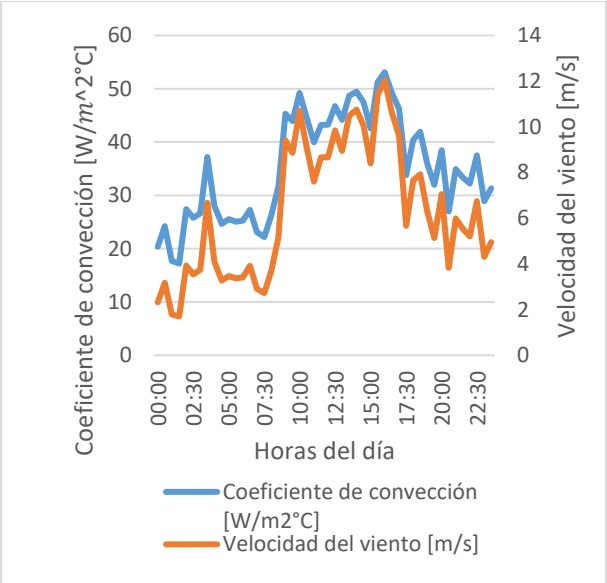

Figura 7. Coeficiente de convección y velocidad del viento a lo largo del día

Como se muestra en la Figura 7, existe una relación directamente proporcional entre la velocidad del viento y el coeficiente de convección. La línea de color naranja, que representa la velocidad del viento, presenta sus valores pico en un periodo de 9:00 a 11:00 horas y nuevamente en la tarde, de 15:00 a 17:00 horas. Esto se debe a que en dichos horarios está presente en la ciudad de Mérida la brisa marina, proveniente de las costas de Progreso. Es en estas mismas horas donde se presentan los valores más altos de *h*.

Es en las primeras horas de la mañana donde se presenta un coeficiente de convección natural, de acuerdo a la

condición $Gr/Re^2 \ll 1$, donde Gr y Re representan el número de Grashof y Reynolds, respectivamente . Durante el 14% del día, el coeficiente de convección es natural; de las 0:00 a 02:00 horas, 04:00 a 05:00 horas y 07:00 a 08:00 horas. Mientras que el 86% restante cae en el régimen forzado.

A continuación, se puede observar la relación que guardan la velocidad de viento con el coeficiente de convección *h* a lo largo del día (Figura 8).

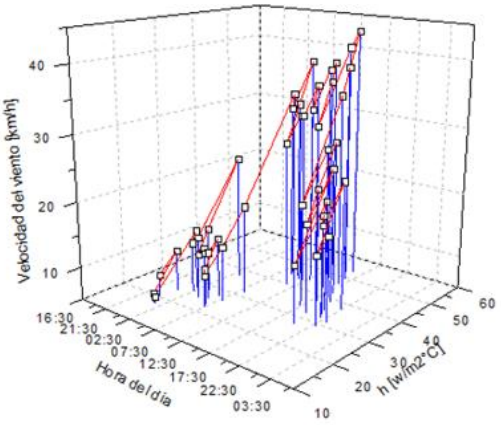

Figura 8. Representación tridimensional de la velocidad del viento vs hora del día vs coeficiente de convección.

El mayor coeficiente h (53.1 W/m^2°C) se presenta a las 16:00 horas, debido a que se presenta la mayor velocidad de viento (43.34 km/h). El menor coeficiente h (17.19 W/m^2°C) se presenta a las 01:30 horas, debido a que se presenta la menor velocidad de viento (6.12 km/h). Al igual que en el análisis anterior, es posible observar que el mayor coeficiente de convección se presenta a la misma hora en que la brisa marina actúa sobre la región.

A continuación, se relacionan la capacitancia y la resistencia con la temperatura de película a lo largo del día (Figura 9). Para fines del presente trabajo, se considera a la temperatura de película como aquella que describe el comportamiento térmico de la superficie del supercapacitor.

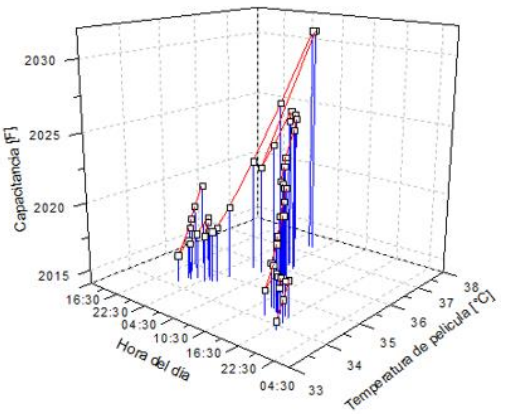

Figura 9. Representación tridimensional de la capacitancia vs hora del día vs temperatura de película.

La mayor capacitancia (2031.05 F) se presenta en la hora del día (09:00 horas) donde la temperatura del medio ambiente y la temperatura de película son mayores ($T_\infty = 24.67\ °C\ T_s = 37.33\ °C$). La menor capacitancia (2014.59 F) se presenta en la hora del día (23:30 horas) donde la temperatura del medio ambiente y la temperatura de película son menores ($T_\infty = 17.7\ °C\ T_s = 33.85\ °C$).

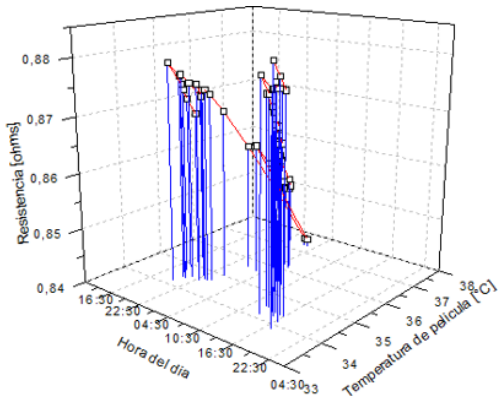

Figura 10. Representación tridimensional de la resistencia vs hora del día vs temperatura de película.

En la Figura 10 se observa que la mayor resistencia (0.8826 Ω) se presenta en la hora del día (23:30 horas) donde la temperatura del medio ambiente y la temperatura de película son menores ($T_\infty = 17.7\ °C\ T_s = 33.85\ °C$). La menor resistencia (0.8414 Ω) se presenta en la hora del día (09:00 horas) donde la temperatura del medio ambiente y la temperatura de película son mayores ($T_\infty = 24.67\ °C \quad T_s = 37.33\ °C$). Las

gráficas anteriores muestran que la capacitancia guarda una relación directamente proporcional con la temperatura, mientras que la relación que ésta guarda con la resistencia es inversamente proporcional.

Figura 11. Cantidad de calor disipada a lo largo del día.

En la Figura 11 se muestra la cantidad de calor que disipa el sistema de enfriamiento a distintas horas del día. En las horas donde se presentan coeficientes de convección forzados es donde la cantidad de calor disipada es mayor y la temperatura en la superficie disminuye.

Conclusiones

Se simuló el comportamiento eléctrico y térmico de un supercapacitor empleando el modelo de 3 ramas a través de Matlab Simulink. Con la ecuación de la aleta se obtuvieron los perfiles de temperatura, así como los parámetros geométricos del sistema de enfriamiento. Ambos modelos fueron integrados y empleados en la simulación de un supercapacitor Maxwell 3000 F bajo condiciones reales.

Del análisis del modelo eléctrico, se obtiene que cuando la temperatura de operación aumenta, también lo hace su capacitancia, mientras que el tiempo de carga y resistencia disminuye. Para la temperatura de operación de 40 °C, los resultados eléctricos obtenidos fueron $C_1 = 2{,}047.47\ F, R_1 = 0.8016\ \Omega\ y\ t = 26{,}652\ s$. Mientras que para el valor de -30 °C, se obtuvo $C_1 = 1{,}741.79\ F,\ R_1 = 2.7413\ \Omega\ y\ t = 106{,}295\ s$.

Del diseño del sistema de enfriamiento, si se desea aumentar la disipación de calor a través de aletas, los parámetros geométricos (perímetro y área) generan una mayor variación de la temperatura con respecto a la posición, comparándolos con cambios en las variables térmicas (coeficiente de conducción y convección). Las aletas permitieron disipar la cantidad de calor emitida por el supercapacitor, disminuyendo al mismo tiempo su temperatura de operación por debajo del límite máximo de operación, considerado en 40 °C.

En el caso analizado bajo condiciones reales de operación, para los periodos del día de 9:00 a 11:00 horas y de 15:00 a 17:00 horas, no es necesario la implementación de un sistema de enfriamiento en la ciudad de Mérida, debido a que se hace presente la brisa marina, aumentando el coeficiente de convección y reduciendo la temperatura de operación. Para este periodo de tiempo del día, el coeficiente de convección promedio fue de $h = 44.55\ \frac{W}{m^{2}°C}$ de 9:00 a 11:00 horas y $h = 48.47\ \frac{W}{m^{2}°C}$ de 15:00 a 17:00 horas.

En los horarios de 0:00 a 02:00 horas, 04:00 a 05:00 horas y 07:00 a 08:00 horas, que es donde se presenta un coeficiente de convección natural debido a las bajas velocidades del viento, son los momentos del día en donde se recomienda la implementación del sistema de enfriamiento. El coeficiente de convección promedio de 0:00 a 02:00 horas fue $h = 21.37\ \frac{W}{m^{2}°C}$, de 04:00 a 05:00 horas $h = 26.06\ \frac{W}{m^{2}°C}$ y de 07:00 a 08:00 horas $h = 23.86\ \frac{W}{m^{2}°C}$.

Se diseñó un sistema de enfriamiento a base de aletas de aluminio ($k = 180\ \frac{W}{m°C}$) radio interno $r_1 = 0.03\ m$, radio externo $r_2 = 0.04\ m$ y grosor $t = 0.01\ m$, esquematizado en la Figura 2. Se emplearon condiciones atmosféricas promedio, reduciendo la temperatura de operación del

supercapacitor por debajo de los 40 °C durante las 24 horas del día.

Se sugiere realizar un análisis en donde se considere al supercapacitor como un objeto cuya temperatura interna sea constante, de tal forma que pueda realizarse el cálculo considerándolo como un sistema concentrado. La temperatura de operación y de la superficie se consideraron iguales; se sugiere realizar un estudio en donde se trabaje con ambas temperaturas por separado, mencionando la relación que guardan entre ellas. Una descripción del perfil de temperaturas dentro del supercapacitor cilíndrico permitiría obtener una descripción más detallada de dicha relación. En caso que se desee realizar un trabajo continuando en esta línea, se sugiere implementar un proceso de optimización para obtener los parámetros geométricos (*p* y *A*) y térmicos (*h, k)* óptimos del sistema de enfriamiento.

Referencias

Allu S. Velamur B. Shelton W. Philip B. Pannala S. A generalized multi-dimensional mathematical model for charging and discharging processes in a supercapacitor, (Journal of Power Sources, 2014) 256, 369-382.

Al Sakka Monzer, Gualous Hamid, Van Mierlo Joeri, Culcu Hasan. Thermal modeling and heat management of supercapacitor modules for vehicle applications, (Journal of Power Sources, 2009) 194, pp 581-587.

Andocilla-López, J. Carrera-Andrade, A. (2015). Modelación matemática y simulación de la ecuación diferencial de transferencia de calor de una aleta rectangular de área constante y longitud "L" con Simulink. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito

Berrueta A. San Martín I. Hernández A. Ursúa A. Sanchis P. Electro-thermal modelling of a supercapacitor and experimental validation, (Journal of Power Sources, 2014); 259, 154-165.

Business Wire. (2016). Electrochemical Double Layer Capacitors: Supercapacitors 2015-2025 - This Market Will be Worth $6 Billion in Ten Years - Research and Markets. Abril 26, 2016, de Business Wire: http://www.businesswire.com/news/home/20160426006558/en

CapacitorGuide. (2016). Supercapacitor. Octubre 17 de 2016, de CapacitorGuide. Sitio web: http://www.capacitorguide.com/supercapacitor/

Chaari R. Briat O. Vinassa J. Capacitance recovery analysis and modeling of supercapacitors during cycling ageing tests, (Energy Conversion and Management, 2014) 82, 37-45.

Frivalsky M. Cuntala J. Spanik P. Simple and accurate thermal simulation model of supercapacitor suitable for development of module solutions. (International Journal of Thermal Sciences, 2014) 84, 34-37.

Gualous H., Bouquain D., Berthon A., Kauffmann J.M. Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature. (Journal of Power Sources, 2003) 123, 86-93.

Michael, H. Temperature and dynamics problems of ultracapacitors in stationary and mobile applications, (Journal of Power Sources, 2006) 154, pp 556-560.

Sharma P. Bhatti T.S. A review on electrochemical double-layer capacitors. (Energy Conversion and Management, 2010) 51, 2901-2912.

Xiong G., Kundu A., & Fisher T. (2015). Thermal Effects in Supercapacitors. United States of America: Springer.