

ANÁLISIS DEL EQUILIBRIO TÉRMICO DE UN MÓDULO DE BATERÍAS

THERMAL BALANCE ANALYSIS OF A BATTERY MODULE

Andrés Calvillo Téllez

Instituto Politécnico Nacional, México
calvillo@citedi.mx

Luis Alberto Cantera Cantera

Instituto Politécnico Nacional, México
lcanterac@ipn.mx

Teodoro Álvarez Sánchez

Instituto Politécnico Nacional, México
talvarez@citedi.mx

Recepción: 31/octubre/2021

Aceptación: 20/diciembre/2021

Resumen

Se presenta el estudio donde se analiza al parámetro de temperatura de un módulo de baterías de un vehículo autónomo a escala a partir de una prueba de monitoreo del equilibrio térmico. La adquisición de datos de temperatura del módulo de baterías se realizó en un lapso en el que se observaron diferentes rangos de temperatura en operación, esto se presentó en cuatro casos. El primer caso corresponde a un módulo de baterías con su empaque normal, la segunda con un recubrimiento de color blanco, la tercera de color negro y la cuarta con recubrimiento de cinta de kapton. Los valores de temperatura registrados se mantuvieron dentro del margen de seguridad de 0 a 70 °C. La transferencia de calor fue a través de contacto directo entre celdas, de la más caliente a la más fría, alcanzado un equilibrio térmico entre ellas mediante distribución física de las baterías. Se logró mantener un equilibrio térmico confortable observando que las lecturas no rebasaran los márgenes de seguridad de los componentes, por lo que ninguna batería alcanzó esfuerzos térmicos no permisibles, permitiendo prolongar su vida útil. Se muestra el desarrollo de las métricas de análisis como las temperaturas promedio extremas y las desviaciones estándar a las que son sometidos.

Palabras Clave: Análisis matemático, diseño del prototipo, STEM.

Abstract

The study is presented where the temperature parameter of a battery module of an autonomous vehicle is analyzed at scale from a thermal balance monitoring test. The acquisition of temperature data from the battery module was carried out in a period in which different operating temperature ranges were observed, this occurred in four cases. The first case corresponds to a battery module with its normal packaging, the second with a white coating, the third with black, and the fourth with a Kapton tape coating. The temperature values recorded were kept within the safety margin of 0 to 70 °C. The heat transfer was through direct contact between cells, from the hottest to the coldest, reaching a thermal equilibrium between them through the physical distribution of the cells. It was possible to maintain a comfortable thermal balance by observing that the readings did not exceed the safety margins of the components, so that no battery made impermissible thermal stresses, allowing it to extend its useful life. The development of analysis metrics such as extreme average temperatures and standard deviations to which they are subjected is shown.

Keywords: *Design Thinking Math Analysis, STEM.*

1. Introducción

Para lograr una mayor comprensión de los fenómenos físicos es esencial atender las causas por las que estos fenómenos físicos inducen fallas en los sistemas electrónicos. Por ello es preciso observar la forma en que la temperatura afecta y condicionan el funcionamiento a las baterías. En este punto resulta fundamental realizar un análisis estadístico térmico de la batería [Shen, 2015], [Gao, 2020], [Carberry, 2018], [Allan, 2019], [Sjöström, 2018], [Del Cerro, 2018]. Esta condición electrónica está siendo contemplada por los desarrolladores de sistemas electrónicos, donde una de las principales interrogantes a atender es identificar el rango de desempeño térmico de las baterías para detectar cuando operan en temperaturas extremas y como resolver esta situación, observando su funcionamiento cuando son recubiertas con acabados tales como el color negro, blanco o con cubierta de kapton [Hu, 2015], [Olarte, 2011]. Para el análisis estadístico se requiere recoger y escudriñar cada muestra de datos de la

temperatura interna y externa de una serie de módulos individuales desde los cuales se puede extraer las muestras [Sjöström, 2018].

En los proyectos constituidos por equipos electrónicos [Méndez, 2016], especialmente los de potencia, es esencial la gestión térmica [Guenin, 2002], para mantener dentro del margen de temperaturas confortables de operación a los elementos electrónicos [Miyara, 2006], es una cuestión esencial para mantener en correcto funcionamiento los equipos [Freescale Semiconductor, 2008], [Ghaffarian, 2000] y [Howell, 2010].

Las temperaturas nominales de operación y funcionalidad de sistemas electrónicos comerciales van de los 0 °C hasta los 70 °C [Simons, 2004], [Wang, 2007]. Una temperatura fuera de este rango puede dañar los diversos componentes encontrados dentro de los equipos electrónicos [Rohan, 2014], [Ting, 2007].

Para disminuir el envejecimiento prematuro del módulo de baterías se debe monitorear la temperatura del módulo para observar el desempeño del flujo del calor mientras este alcanza el equilibrio térmico [Zhan, 2008].

El módulo de baterías de iones de litio es susceptible a temperaturas elevadas y lo que limitando su capacidad de almacenamiento generando pérdida de energía. Estos eventos térmicos están presentes cuando están activas y también durante la carga y descarga. Estos factores aceleran el envejecimiento prematuro lo que provoca el agotamiento y disminuya su tiempo de vida causando [Zhan, 1997].

2. Métodos

El método empleado compara de forma técnica y práctica el equilibrio térmico de las baterías y se realiza mediante una prueba que registra el tiempo y la temperatura, con el fin de obtener los valores térmicos (°C) en intervalos de tiempo determinados. Para llevar a cabo el experimento se instaló un dispositivo en la batería denominada plataforma STEM la cual está constituida por un sensor de temperatura y un datalogger basado en Arduino. Se empleó la batería a carga máxima, y se registró la temperatura tanto del ambiente como del cuerpo de la batería registrando las lecturas. Los datos obtenidos mediante métodos estadísticos permitirán la interpretación y análisis de los datos.

Se levantó el censo de lecturas térmicas tanto del ambiente como del módulo de baterías desde el instante en que se energice el vehículo autónomo a escala, se registrará la lectura cada dos minutos intervalo suficiente para que se presenten variaciones en las lecturas de los sensores. Se programaron cuatro distintos experimentos, el primero con recubrimiento de color blanco, el segundo con recubrimiento de color negro, el tercero sin recubrimiento y el cuarto con recubrimiento de kapton. Los datos obtenidos se vaciaron a una hoja de Excel donde se insertaron las funciones estadísticas para extraer los valores de las métricas estadísticas. La figura 1 muestra el sistema empleado para la adquisición de datos térmicos de la temperatura de la batería. Las ecuaciones de la 1 a la 8 obtienen los valores estadísticos de la media muestral de la temperatura ambiente denotada por la variable aleatoria X, y de la temperatura de la batería denotada por la variable aleatoria Y

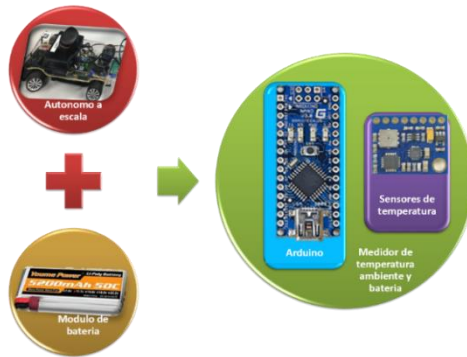


Figura 1 Módulo de baterías de autónomo a escala y el medidor de temperatura del ambiente y de la batería.

$$E[X] = m_{10} = \sum_i x_i P(x_i) \quad (1)$$

$$E[Y] = m_{01} = \sum_j y_j P(y_j) \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_X^2 = \mu_{20} = E[X^2] - 2\bar{X}\bar{X} + \bar{X}^2 = E[X^2] - 2\bar{X}^2 + \bar{X}^2 \\ \sigma_X^2 = E[X^2] - \bar{X}^2 = m_{20} - m_{10}^2 \\ \sigma_X = \sqrt{E[X^2] - \bar{X}^2} = \sqrt{m_{20} - m_{10}^2} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sigma_Y^2 = \mu_{02} = E[Y^2] - 2\bar{Y}\bar{Y} + \bar{Y}^2 = E[Y^2] - 2\bar{Y}^2 + \bar{Y}^2 \\ \sigma_Y^2 = E[Y^2] - \bar{Y}^2 = m_{20} - m_{10}^2 \\ \sigma_Y = \sqrt{E[Y^2] - \bar{Y}^2} = \sqrt{m_{20} - m_{10}^2} \end{cases} \quad (4)$$

$$R_{XY} = m_{11} = E[XY] \quad (5)$$

$$C_{XY} = E[XY] - E[X]E[Y] \quad (6)$$

$$\rho_{xy} = \frac{C_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\mu_{11}}{\sqrt{\mu_{20}\mu_{02}}} = \left[\frac{(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \right] = \left[\frac{(E[XY] - E[X]E[Y])}{\sqrt{E[X^2] - \bar{X}^2}} \right] \quad (7)$$

$$y = a + bx \quad (8)$$

Donde:

$E[\]$: Esperanza matemática de la variable aleatoria discreta X y de la Y

x_i : i-ésimo valor de la variable aleatoria discreta X

y_i : i-ésimo valor de la variable aleatoria discreta Y

$P(x_i)$: Magnitud probabilística del i-ésimo valor de la variable aleatoria discreta X

$P(y_i)$: Magnitud probabilística del i-ésimo valor de la variable aleatoria discreta Y

σ_x : Es la función de la desviación estándar de la variable aleatoria discreta x

σ_y : Es la función de la desviación estándar de la variable aleatoria discreta y

R_{XY} : Es la función de correlación de las variables aleatorias discretas x, y

C_{XY} : Es la función de covarianza de las variables aleatorias discretas x, y

ρ_{xy} : Es el coeficiente de Pearson de las variables aleatorias discretas x, y

a : Es la pendiente y vienen expresada de la siguiente manera:

$$a = \frac{n \sum_{i,j} (x_i y_j) - \sum_i (x_i) \sum_j (y_j)}{n \sum_i (x_i^2) - |\sum_i (x_i)|^2}$$

b : Es el punto de corte, y vienen expresada de la siguiente manera:

$$b = \frac{\sum_j (y_j) \sum_i (x_i^2) - \sum_i (x_i) \sum_{i,j} (x_i y_j)}{n \sum_i (x_i^2) - |\sum_i (x_i)|^2}$$

3. Resultados y Discusión

En el primer experimento se registró tanto la temperatura ambiente, así como la del módulo de baterías, con una periodicidad de dos minutos. En este caso el

módulo de batería presentó un recubrimiento en color blanco. En la figura 2 se presenta la evolución de las lecturas registradas del equilibrio térmico y en las tablas 1 y 2 se muestran las métricas estadísticas de estos datos.

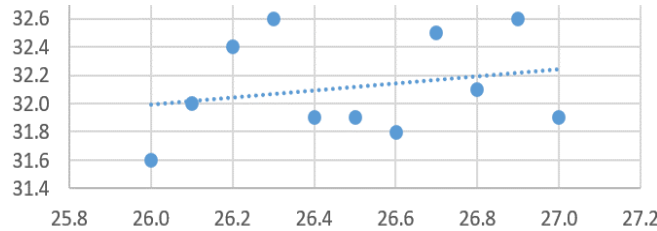


Figura 2 Dispersión de los datos del módulo de baterías con recubrimiento blanco.

Tabla 1 Datos experimentales del módulo de baterías con recubrimiento blanco.

x	y	x^2	y^2	xy
26.0	31.6	676	998.56	821.6
26.1	32.0	681.21	1024.00	835.2
26.2	32.4	686.44	1049.76	848.88
26.3	32.6	691.69	1062.76	857.38
26.4	31.9	696.96	1017.61	842.16
26.5	31.9	702.25	1017.61	845.35
26.6	31.8	707.56	1011.24	845.88
26.7	32.5	712.89	1056.25	867.75
26.8	32.1	718.24	1030.41	860.28
26.9	32.6	723.61	1062.76	876.94
27.0	31.9	729.00	1017.61	861.30

Tabla 2 Métricas estadísticas del comportamiento térmico del módulo de baterías con recubrimiento blanco.

$E[x] = 26.5$	$\sigma_x = 0.316227766$
$E[y] = 32.11818182$	$\sigma_y = 0.332533476$
$E[xy] = 851.1563636$	$a = 32.1174176$
$E[x^2] = 702.35$	$b = 2.88386E - 05$
$E[y^2] = 1031.688182$	$C_{xy} = 0.024545455$
$\sigma_{x^2} = 0.1$	$\rho = 0.701940557$
$\sigma_{y^2} = 0.110578512$	

En el primer experimento se registró tanto la temperatura ambiente, así como la del módulo de baterías, con una periodicidad de dos minutos. En este caso el módulo de batería presentó un recubrimiento en color negro. En la figura 3 se presenta la

evolución de las lecturas registradas del equilibrio térmico y en las tablas 3 y 4 se muestran las métricas estadísticas de estos datos.

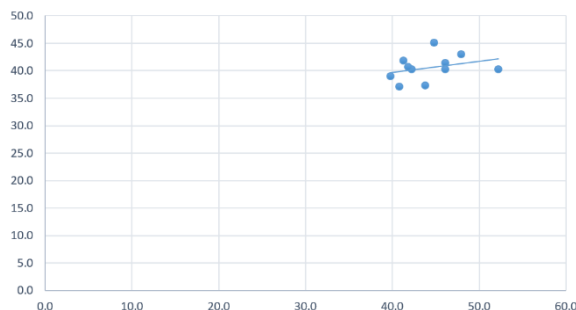


Figura 3 Dispersión de los datos experimentales de módulo de baterías con recubrimiento negro.

Tabla 3 Datos experimentales del módulo de baterías con recubrimiento negro.

x	y	x^2	y^2	xy
41.30	41.8	1705.69	1747.24	1726.34
44.8	45.1	2007.04	2034.01	2020.48
47.9	43.0	2294.41	1849	2059.7
46.1	41.4	2125.21	1713.96	1908.54
42.2	40.3	1780.84	1624.09	1700.66
41.8	40.7	1747.24	1656.49	1701.26
46.1	40.3	2125.21	1624.09	1857.83
39.8	39.0	1584.04	1521	1552.2
40.8	37.1	1664.64	1376.41	1513.68
52.2	40.3	2724.84	1624.09	2103.66
43.8	37.3	1918.44	1391.29	1633.74

Tabla 4 Métricas de estadísticos del módulo de baterías con recubrimiento negro.

$E[x] = 44.25454545$	$\sigma x = 3.496586293$
$E[y] = 40.57272727$	$\sigma y = 2.21691469$
$E[xy] = 1798.008182$	$a = 40.51158821$
$E[x^2] = 1970.690909$	$b = 0.001381532$
$E[y^2] = 1651.060909$	$Cxy = 2.480578512$
$\sigma x^2 = 12.2261157$	$\rho = 0.144347998$
$\sigma y^2 = 4.914710744$	

El tercer experimento se compone de lecturas tomadas cada 2 minutos de un módulo de baterías sin recubrimiento e iniciando a temperatura ambiente de 29.4 °C. La figura 4 presenta la evolución del equilibrio térmico del módulo de baterías sin recubrimiento y las tablas 5 y 6 las métricas estadísticas.

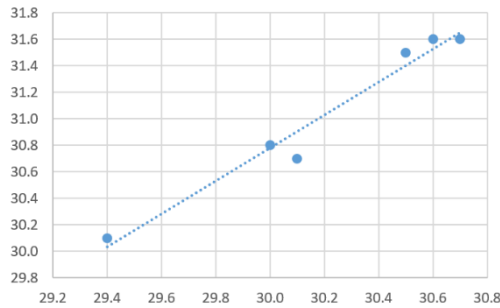


Figura 4 Dispersión de los datos experimentales del módulo de baterías sin recubrimiento.

Tabla 5 Datos experimentales del módulo de baterías sin recubrimiento.

x	y	x^2	y^2	xy
29.4	30.1	864.36	906.01	884.94
30	30.8	900	948.64	924
30.1	30.7	906.01	942.49	924.07
30.5	31.5	930.25	992.25	960.75
30.6	31.6	936.36	998.56	966.96
30.7	31.6	942.49	998.56	970.12

Tabla 6 Métricas de estadísticos del módulo de baterías sin recubrimiento.

$E[x] = 30.21666667$	$\sigma x = 0.445034331$
$E[y] = 31.05$	$\sigma y = 0.56199051$
$E[xy] = 938.4733333$	$a = 31.04208266$
$E[x^2] = 913.245$	$b = 0.000262019$
$E[y^2] = 964.4183333$	$Cxy = 0.245833333$
$\sigma x^2 = 0.198055556$	$\rho = 1.748997914$
$\sigma y^2 = 0.315833333$	

El cuarto experimento muestra el levantamiento de lecturas cada 2 minutos de un módulo de baterías con recubrimiento de cinta de kapton e iniciando a temperatura ambiente de 28.9 °C. La figura 5 presenta la evolución del equilibrio térmico del módulo de baterías con recubrimiento de cinta de kapton y las tablas 7 y 8 las métricas estadísticas.

4. Conclusiones

Los rangos de temperatura de operación en cada una de las pruebas se manejaron dentro de la temperatura de operación segura por encima de los 0 °C y por debajo de los 70 °C, es decir, las baterías operaron en condiciones normales de funcionamiento.

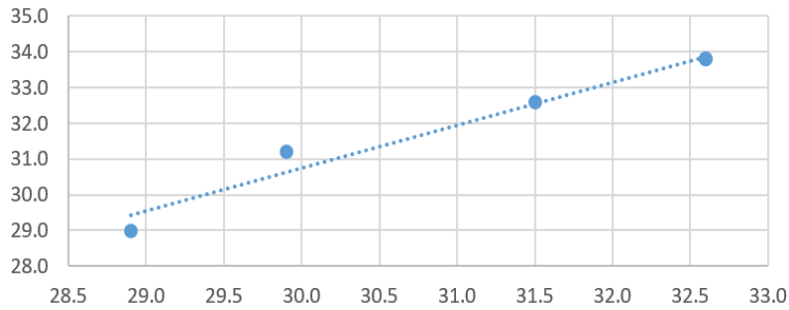


Figura 5 Dispersión de los datos experimentales del módulo de baterías con recubrimiento de kapton.

Tabla 7 Datos experimentales del módulo de baterías con recubrimiento de kapton.

X	y	x^2	y^2	xy
28.9	29.0	835.21	841	838.1
29.9	31.2	894.01	973.44	932.88
31.5	32.6	992.25	1062.76	1026.9
32.6	33.8	1062.76	1142.44	1101.88
32.6	33.8	1062.76	1142.44	1101.88
32.6	33.8	1062.76	1142.44	1101.88

Tabla 8 Métricas de estadísticos del módulo de baterías con recubrimiento de kapton.

$E[x] = 31.35$	$\sigma_x = 1.461449053$
$E[y] = 32.36666667$	$\sigma_y = 1.775449865$
$E[xy] = 1017.253333$	$a = 32.28762444$
$E[x^2] = 984.9583333$	$b = 0.002521283$
$E[y^2] = 1050.753333$	$C_{xy} = 2.558333333$
$\sigma_{x^2} = 2.135833333$	$\rho = 0.555337017$
$\sigma_{y^2} = 3.152222222$	

La contribución reside en que se deben presentar métricas que permitan inferir y llevar un histórico de temperaturas que garantice la operatividad del diseño y focalizar el elemento propicio a presentar deterioro prematuro, desgaste, fatiga o estrés que le conducirán a una condición de falla.

Los valores de las hojas de datos muestran al máximo absoluto, donde una vez que se alcanza no hay retorno y lo siguiente es una falla generalizada. El fabricante no garantizará la operación fuera de esos límites y cualquier cosa puede suceder si opera el dispositivo fuera de ellos. Probablemente el mayor problema con las bajas temperaturas es el hecho de que casi todas las químicas de la batería se caen por

completo en el frío. Algunas condiciones pueden ser más agresivas que otras, si se está a la sombra, la temperatura de la batería probablemente no importe demasiado, ya que está dentro de los límites de los componentes. La eficiencia térmica se obtiene de la relación del calor presente en la batería y de su capacidad de disipar el calor que genera.

Finalmente es necesario revisar la literatura sobre los fenómenos físicos que limitan las velocidades de carga de la batería y la temperatura que esta genera, es aquí donde hay que enfocar los esfuerzos de los futuros experimentos, ya que se requiere evidencia de que es en el proceso de carga donde se altera la química de la batería y provoca el aumento de temperatura por encima de los rangos nominales, factores que le inducirían fatiga y desgaste.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Allan, C. N., Campbell, C., & Crough, J. (Eds.), (2019). *Blended learning designs in STEM higher education: putting learning first*. Singapore: Springer.
- [2] Carberry, A. R., & Baker, D. R., (2018). The impact of culture on engineering and engineering education. In *Cognition, metacognition, and culture in STEM education* (pp. 217-239). Springer, Cham.
- [3] Del Cerro Velázquez, F., & Rivas, F. L., (2018). Estudio de un caso de enseñanza de materias STEM a través del ecourbanismo apoyado por herramientas avanzadas de diseño, en el horizonte 2030 de objetivos de desarrollo sostenible (ODS). *Revista de Educación a Distancia (RED)*, (58).
- [4] Freescale Semiconductor (2008). *White Paper. Thermal Analysis of Semiconductor Systems*.
- [5] Gao, X., Li, P., Shen, J., & Sun, H., (2020). Reviewing assessment of student learning in interdisciplinary STEM education. *International Journal of STEM Education*, 7, 1-14.
- [6] Gerardo I. Palafox A., (2017). *Diseño y manufactura de un disipador de calor para transistores de potencia igbt* Tesis Cd. de Huajuapán de León, Oax.
- [7] Ghaffarian, R., (2000). Accelerated thermal cycling and failure mechanisms for BGA and CSP assemblies. *J. Electron. Packag.*, 122(4), 335-340.

- [8] Guenin, Bruce, (2002). Thermal Calculations for Multi-chip Modules. Calculation Corner, Design, Number 4, Semiconductor, Test & Measurement, Volume 8.
- [9] Howell, J. R., Menguc, M. P., & Siegel, R., (2010). Thermal radiation heat transfer. CRC press.
- [10] Hu, B., Song, G., & Ma, X., (2015). An Efficient Method to Estimate the Maximum Junction Temperature of IGBT Modules. PCIM Asia, 108-113.
- [11] Méndez, Alfonso, (2016). Disipadores térmicos para dispositivos electrónicos. Laboratorio de Instrumentación Bioingeniería. Técnico de Laboratorio v 1.0.
- [12] Miyara, Federico, (2006). Disipación. de Potencia. Segunda Edición - Año 2006. B26.00. Universidad Nacional de Rosario. Facultad de Ciencias Exactas. <https://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/disipa.pdf>.
- [13] Olarte, W, Botero, M., & Zabaleta, B. C., (2011). Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo. *Scientia et technica*, 2(48), 253-256.
- [14] Rohan Chaudhary, Swati Sharma, Manish Kumar, (2014). Thermal analysis of semiconductor systems, *IJIRT | Volume 1 Issue 7 | ISSN: 2349-6002 IJIRT 101234 International journal of innovative research in technology* 312.
- [15] Ting Yuan Wang and Margaret Schmitt, (2007). Accurate Thermal Analysis of Chip/Package Systems, Apache Design Solutions. https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1276063.
- [16] Shen, J., Jiang, S., & Liu, O. L., (2015). Reconceptualizing a college science learning experience in the new digital era: a review of literature. *Emerging Technologies for STEAM Education*, 61-79.
- [17] Simons, Robert E., (2004). Simple Formulas for Estimating Thermal Spreading Resistance Calculation Corner, Design, Number 2, Test & Measurement, Volume 10.
- [18] Tomaszewska, A., (2019). Lithium-ion battery fast charging: A review. *ETransportation*, 1, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100011>.
- [19] Wang, T. Y., & Schmitt, M., (2007). Accurate Thermal Analysis of Chip/Package System. *EDA DesignLine magazine*.

- [20] Sjöström, J., & Eilks, I., (2018). Reconsidering different visions of scientific literacy and science education based on the concept of Bildung. In *Cognition, metacognition, and culture in STEM education* (pp. 65-88).
- [21] Zhan, Y., Kumar, S., & Sapatnekar, S., (2008). Thermally aware design. *Foundations and Trends® in Electronic Design Automation*, 2(3), 255-370.
- [22] Zhang, M. T., Jovanovic, M. M., & Lee, F. C., (1997). Design and analysis of thermal management for high-power-density converters in sealed enclosures. In *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1997. APEC'97 Conference Proceedings 1997. Twelfth Annual* (Vol. 1, pp. 405-412). IEEE.