



Análisis experimental del efecto térmico en el desbalance energético de baterías NiMH

Experimental analysis of the thermal effect on the energy imbalance of NiMH batteries

Andrés Edisson Águila-León
ua.andresal02@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de las Andes, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0005-4689-3275>

Edwin Javier Morejón-Sánchez
ua.edwinms68@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de las Andes, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0006-7409-155X>

Mario Fernando Vargas-Brito
ua.mariovb40@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de las Andes, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0000-0690-1406>

Raúl Fernando Galarza-Chacón
ua.raulgc93@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de las Andes, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0008-3608-4652>

RESUMEN

El estudio analizó el efecto térmico en el desbalance energético de baterías de níquel-metal hidruro (NiMH) en sistemas híbridos; en ese marco, se presentó como objetivo desarrollar un análisis experimental del efecto térmico en el desbalance energético de baterías NiMH. Bajo un enfoque experimental, se evaluó un módulo de baterías de un vehículo híbrido mediante mediciones de voltaje, temperatura y pruebas de balanceo individual. Los resultados evidenciaron que las celdas centrales alcanzan mayores temperaturas, generando mayor degradación y desbalance energético. Asimismo, el balanceo y la redistribución de celdas permitieron uniformar voltajes y mejorar el estado de salud del módulo. Se concluyó que el control térmico es determinante para optimizar el rendimiento y prolongar la vida útil de las baterías.

Descriptor: consumo de energía; economía de la energía; abastecimiento de energía. (Fuente: Tesoro UNESCO).

ABSTRACT

The study analysed the thermal effect on the energy imbalance of nickel-metal hydride (NiMH) batteries in hybrid systems; within this framework, the objective was to develop an experimental analysis of the thermal effect on the energy imbalance of NiMH batteries. Using an experimental approach, a battery module from a hybrid vehicle was evaluated through voltage and temperature measurements, as well as individual balancing tests. The results showed that the central cells reach higher temperatures, leading to greater degradation and energy imbalance. Furthermore, balancing and cell redistribution helped to standardise voltages and improve the health of the module. It was concluded that thermal management is crucial for optimising performance and extending the service life of the batteries.

Descriptors: energy consumption; energy efficiency; energy supply. (Source: UNESCO Thesaurus).

Recibido: 06/01/2026. Revisado: 12/01/2026. Aprobado: 18/01/2026. Publicado: 31/01/2026.

Tecnología



INTRODUCCIÓN

El rendimiento de las baterías de plomo-ácido sigue mejorando a pesar de más de 160 años de avances tecnológicos (Heller, 1998); su coste inicial de adquisición resulta considerablemente menor que el de las baterías NiMH y de iones de litio, en virtud de la madurez alcanzada por esta tecnología. Por su naturaleza electroquímica, las baterías de plomo-ácido son más adecuadas para vehículos eléctricos de baja velocidad y bajo coste, aunque con el tiempo serán desplazadas por tecnologías de mayor rendimiento. En ese marco de evolución tecnológica, el consumo de baterías de níquel-hidruro metálico (NiMH) ha crecido de manera sostenida en los últimos años, dado que han reemplazado a los acumuladores de níquel-cadmio gracias a sus ventajas técnicas y medioambientales; comercializadas en Japón desde 1990, se distinguen por su alta capacidad electroquímica, versatilidad, bajo mantenimiento, seguridad, compatibilidad ambiental y reducidas tasas de autodescarga, según señalan Innocenzi y Vegliò (2017). En esa misma línea, la batería NiMH constituye una alternativa de peso frente a la tecnología Ni-Cd, en razón de su alta densidad energética, elevada capacidad de descarga, larga vida útil y ausencia de materiales tóxicos; su demanda ha aumentado recientemente para aplicaciones que abarcan desde aparatos eléctricos portátiles hasta vehículos eléctricos e híbridos, tal como documentan Pan y Chen (2002). A lo anterior se suma que la tecnología NiMH ha sido ampliamente adoptada en vehículos híbridos por su fiabilidad, densidad de potencia y longevidad, manteniéndose como opción estable en aplicaciones prácticas pese al auge de las baterías de litio, de acuerdo con Zhang et al. (2025).

En cuanto a los factores que condicionan la durabilidad de estos sistemas, se ha documentado que los gradientes térmicos dentro del paquete de baterías pueden acelerar la degradación no uniforme de las celdas, afectando negativamente su rendimiento y vida útil (Itagi & Kumar, 2024); en estudios focalizados en baterías de automoción, se observó que diferencias de temperatura de apenas 5 °C entre celdas pueden ocasionar pérdidas de capacidad superiores al 10 %, efecto particularmente relevante en arquitecturas compactas donde la disipación térmica es limitada, conforme reportan Wu et al. (2023). En el contexto específico de sistemas híbridos Toyota como el Prius C (Aqua), la arquitectura en serie de módulos y la estructura compacta inducen gradientes térmicos localizados, especialmente en las celdas centrales, que resultan susceptibles a mayor envejecimiento, según establecen Martínez-Sánchez et al. (2024). Al respecto, el sistema del Toyota Prius contiene una serie de componentes técnicamente avanzados que hacen que el diagnóstico resulte complejo; la unidad de control de la batería mide temperatura, voltaje y corriente, y cuando alguno de estos parámetros supera los niveles predeterminados se registra un código de diagnóstico de avería (DTC), siendo los más frecuentes los de «fuga detectada» y «mal funcionamiento del bloque de la batería», de acuerdo con Plett (2011). En relación con la gestión energética del sistema, la calidad de la batería determina la eficiencia del vehículo, y su administración basada en la estimación del estado de carga (SOC) resulta indispensable para aceptar la potencia procedente del frenado regenerativo, suministrarla al accionamiento eléctrico y prevenir la sobrecarga o descarga profunda, tal como señalan Ota et al. (2008).

Por tanto, se tiene por objetivo desarrollar un análisis experimental del efecto térmico en el desbalance energético de baterías NiMH.

MÉTODO

El estudio se desarrolló mediante un enfoque experimental aplicado a un módulo de baterías de níquel-metal hidruro (NiMH) perteneciente a un sistema híbrido Toyota Prius C (Aqua). El procedimiento se estructuró en varias etapas que permitieron caracterizar la condición inicial del módulo y evaluar el efecto del balanceo individual.

Diagnóstico inicial del sistema híbrido

Se realizó un escaneo con Toyota Techstream, obteniendo los códigos de falla C1310, C1259 y P0A80, que indicaron fallas en el sistema híbrido y degradación del paquete de baterías con un SOH del 52 %.



Desmontaje del módulo de baterías

Un módulo de batería está compuesto por celdas conectadas en serie y en paralelo; su modelado puede abordarse considerando estas configuraciones junto con las resistencias entre celdas y terminales. Se procedió al desmontaje del paquete de baterías de alta tensión siguiendo protocolos de seguridad para sistemas híbridos, que incluyeron: desconexión del servicio híbrido mediante extracción del fusible principal (service plug); uso de guantes dieléctricos y herramientas aisladas; y verificación de ausencia de tensión antes de manipular el módulo.

Medición inicial de voltajes

Se retiró el módulo afectado y se realizaron mediciones de voltaje en circuito abierto para cada una de las 20 celdas que lo componen, utilizando un multímetro digital calibrado y registrando los valores individuales.

Evaluación térmica del módulo

Durante operación simulada, los tres termistores instalados en el módulo registraron temperaturas de 33,5 °C en la celda 1 (periferia), 43,2 °C en la celda 11 (zona central) y 35,0 °C en la celda 20 (periferia). Este gradiente térmico de aproximadamente 10 °C confirma que las celdas centrales operan en condiciones más severas, favoreciendo su degradación acelerada; los resultados son consistentes con el análisis térmico realizado y justifican la reubicación de las celdas centrales hacia posiciones periféricas para reducir el estrés térmico acumulado.

Parámetros de interés

– Número de celdas por módulo: 6 – Voltaje nominal: 7,2 V – Capacidad: 6,5 Ah – Resistencia interna aproximada por módulo (R_i): 0,02 Ω (dato típico Panasonic) – Masa: 1,04 kg – Dimensiones: 275 × 106 × 19,6 mm – Densidad aproximada (NiMH): $\rho \approx 8.000 \text{ kg/m}^3$ – Calor específico del NiMH: $C_e \approx 500 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ – Área superficial estimada (A): considerando el módulo como paralelepípedo $\rightarrow A \approx 0,07 \text{ m}^2$

La ecuación 1 describe el modelo de generación de calor por efecto Joule durante carga/descarga: $Q_{h^n e_n} = I^2 \cdot R_i \cdot t$ (1) Si el vehículo descarga el módulo a $I = 50 \text{ A}$, con $R_i \approx 0,02 \Omega$ y para un ciclo de descarga de $t = 300 \text{ s}$ (5 min): $Q = (50)^2 (0,02)(300) = 15.000 \text{ J}$.

La ecuación 2 describe el incremento de temperatura en un modelo sin disipación: $\Delta T = Q_{h^n e_n} / (m \cdot C_p)$ (2) Con $m = 1,04 \text{ kg}$ y $C_p \approx 500 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$: $\Delta T = 15.000 / (1,04 \times 500) = 28,8 \text{ }^\circ\text{C}$; esto significa que, en condiciones sin enfriamiento, el módulo podría calentarse casi 30 °C por encima de su temperatura inicial en solo 5 minutos de alta demanda.

La ecuación 3 describe el modelo de pérdidas por convección: $Q^{\text{conv}} = h \cdot A \cdot \Delta T \cdot t$ (3) Con coeficiente convectivo forzado $h = 30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $A = 0,07 \text{ m}^2$ y $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$: $Q^{\text{conv}} = 30 (0,07)(10)(300) \approx 6.300 \text{ J}$; el calor neto acumulado se reduce entonces a $Q^{\text{net}} = 15.000 - 6.300 \approx 8.700 \text{ J}$, con un incremento real de $\Delta T^{\text{Real}} = 8.700 / (1,04 \times 500) = 16,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Proceso de carga y balanceo individual

Cada celda se cargó de forma individual con corriente constante de 0,2 A durante 72 horas, monitoreando la temperatura superficial para evitar sobrecalentamiento; al finalizar, todas las celdas alcanzaron uniformemente 8,0 V.

Reordenamiento de las celdas

Se implementó una redistribución estratégica, desplazando las celdas más degradadas (previamente en el centro) hacia posiciones periféricas, con el objetivo de reducir el estrés térmico en operaciones futuras.



Verificación final

Se detectó una notable corrosión en los bus bars de la batería, que fue tratada con una solución de ácido sulfúrico; dicha corrosión en los bus bars de baterías NiMH se produce por la exposición al electrolito alcalino (KOH), la humedad y la condensación dentro del paquete. Estos factores, combinados con las diferencias de potencial eléctrico, generan corrosión electrolítica y galvánica que deteriora el recubrimiento protector; los ciclos térmicos repetidos favorecen la formación de óxidos e incrementan la resistencia de contacto, contribuyendo al desbalance energético y a la pérdida de eficiencia del módulo híbrido. Se registró la posición de cada celda dentro del módulo y se clasificaron los resultados según su ubicación (central o periférica), lo que permitió relacionar la distribución térmica con los niveles de degradación observados. El módulo se reensambló con bus bars limpios y tratados contra corrosión; se midieron nuevamente los voltajes de todas las celdas, verificando que todas alcanzaran el valor uniforme de 8,0 V.

RESULTADOS

Voltajes iniciales desbalanceados

En sistemas híbridos Toyota existe generación de DTC cuando el delta es superior a 0,03 V entre celdas; se observa, a su vez, un patrón de menor voltaje en las celdas centrales. Se registraron voltajes entre 7,29 V y 7,35 V, siendo las celdas centrales (7–14) las que presentaron menores valores, lo que indica mayor degradación energética acumulada. Ver tabla 1.

Tabla 1. Voltajes individuales de cada celda (Águila, 2025).

BLOQUE	CELDA	VOLTAJE (V)	DELTA (ΔV)
1	1	7,34	0,00
	2	7,34	0,00
2	3	7,34	0,00
	4	7,33	0,01
3	5	7,31	0,03
	6	7,31	0,03
4	7	7,30	0,04
	8	7,29	0,05
5	9	7,29	0,05
	10	7,29	0,05
6	11	7,29	0,05
	12	7,29	0,05
7	13	7,30	0,04
	14	7,30	0,04
8	15	7,31	0,03
	16	7,31	0,03
9	17	7,33	0,01
	18	7,34	0,00
10	19	7,34	0,00
	20	7,34	0,00

Diferencias térmicas significativas

En condiciones operativas simuladas, los tres termistores mostraron temperaturas de 33,5 °C en el extremo inicial (celda 1), 43,2 °C en la zona central (celda 11) y 35,0 °C en el extremo final (celda 20). Sin refrigeración, la temperatura supera los 50 °C en menos de 10 minutos; con ventilación forzada, el aumento se estabiliza alrededor de 40 °C, aunque persiste el riesgo para las celdas centrales, que reciben menor flujo de aire, con el límite crítico de 40 °C a partir del cual se acelera la degradación química. Este gradiente de aproximadamente 10 °C confirmó que las celdas centrales operan bajo mayor estrés térmico.



Análisis térmico matemático

El modelo de generación de calor por efecto Joule predijo un incremento potencial de 28,8 °C en ausencia de refrigeración, alcanzando temperaturas cercanas a 54 °C; con ventilación forzada, el incremento se redujo a 16,7 °C, aunque persiste un gradiente térmico interno que afecta con mayor intensidad a las celdas centrales. Las celdas centrales (aproximadamente 7–15) alcanzan temperaturas superiores a 40 °C, acercándose al rango crítico, mientras que las celdas periféricas (1–4 y 17–20) se mantienen entre 33 °C y 35 °C con menor degradación térmica; este comportamiento evidencia por qué el reordenamiento de las celdas representa una estrategia efectiva para reducir el estrés térmico acumulado.

Balanceo individual exitoso

Tras el proceso de carga controlada a 0,2 A durante 72 horas por celda, todos los módulos alcanzaron un voltaje uniforme de 8,0 V \pm 0,02 V; no se registraron sobrecalentamientos ni fugas de electrolito durante la operación.

Redistribución de celdas

Se realizó el reordenamiento físico de las celdas, ubicando las previamente degradadas hacia posiciones periféricas, con el objetivo de reducir su exposición a temperaturas elevadas en operaciones futuras.

Condición final del módulo

Tras la reconfiguración, el módulo presentó voltajes balanceados y conexiones sin signos de corrosión, gracias a la limpieza de los bus bars; se logró una mejora en la vida útil operativa del paquete de baterías con un SOH del 60 %, resultado de la combinación del balanceo energético y la redistribución térmica.

DISCUSIÓN

Las mediciones de voltaje inicial demostraron que las celdas ubicadas en el centro del paquete presentaban valores más bajos (\approx 7,29 V) que las periféricas (\approx 7,34–7,35 V); este patrón coincide con investigaciones anteriores que indican que el calor acumulado en la zona central acelera las reacciones de degradación en baterías NiMH, reduciendo gradualmente su capacidad útil, conforme señalan Itagi y Kumar (2024) y Wu et al. (2023). El comportamiento térmico medido con los termistores confirmó esta hipótesis, dado que el sensor ubicado en la celda 11 registró 43,2 °C, aproximadamente 10 °C más que las celdas extremas; estos datos se encuentran dentro de los rangos reportados en investigaciones que analizan módulos híbridos sin refrigeración líquida, donde los gradientes internos pueden alcanzar diferencias similares, de acuerdo con Martínez-Sánchez et al. (2024).

El análisis térmico matemático aportó una visión complementaria de este fenómeno; bajo condiciones de descarga intensa, el modelo sin refrigeración predijo un incremento de temperatura cercano a 28,8 °C, alcanzando valores críticos superiores a 50 °C. Incluso considerando la ventilación forzada del sistema, la simulación mostró que el gradiente térmico persiste, lo que refuerza la necesidad de estrategias de mitigación; este resultado concuerda con modelos térmicos reportados en la literatura, en los que la convección forzada solo atenúa, sin eliminar, los puntos calientes en el interior del módulo. Ante este escenario, se implementó una estrategia de balanceo individual y redistribución de celdas; el balanceo permitió uniformar los voltajes a 8,0 V, recuperando parte de la capacidad perdida y asegurando homogeneidad energética. La reubicación de las celdas centrales degradadas hacia zonas periféricas se fundamentó en la evidencia térmica obtenida, pues al exponer estas celdas a un entorno con mejor disipación de calor se reduce el estrés térmico futuro y se prolonga su vida útil; si bien esta práctica no es estándar en el mantenimiento industrial, representa una solución innovadora que podría evaluarse como estrategia de extensión de vida en baterías de vehículos híbridos en condiciones de campo.



CONCLUSION

En relación con el objetivo de desarrollar un análisis experimental del efecto térmico en el desbalance energético de baterías NiMH, se concluye que los gradientes térmicos internos constituyen el principal factor que provoca la degradación no uniforme de las celdas; las ubicadas en la zona central operan a temperaturas significativamente mayores, lo que acelera la pérdida de capacidad y genera desbalances de voltaje. Del mismo modo, se demostró que estrategias como el balanceo individual y la redistribución física de las celdas permiten reducir dicho desbalance, mejorar la uniformidad energética y elevar el estado de salud del módulo; de ello se desprende que el control térmico y la gestión adecuada de la distribución interna son determinantes para optimizar el rendimiento y prolongar la vida útil de las baterías en sistemas híbridos.

FINANCIAMIENTO

No monetario

CONFLICTO DE INTERÉS

No existe conflicto de interés con personas o instituciones ligadas a la investigación.

AGRADECIMIENTOS

A UNIANDES.

REFERENCIAS

- Emadi, A. (2011). Batteries need electronics. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 5(1), 27–35. <https://doi.org/10.1109/MIE.2011.940251>
- Heller, B. (1998, January 16). Advances in plate making and expanders for lead acid batteries. En *Proceedings of the 13th Annual Battery Conference on Applications and Advances* (pp. 147–151).
- Innocenzi, V., & Vegliò, F. (2017). A review of the processes and lab-scale techniques for the treatment of spent rechargeable NiMH batteries. *Journal of Power Sources*, 362, 202–218. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.07.034>
- Itagi, A. R., & Kumar, R. K. (2024). Cell balancing for the transportation sector: Techniques, challenges, and future research direction. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.13890>
- Kelly, K. J., Mihalic, M., & Zolot, M. (2002). Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight during chassis dynamometer testing. En *Proceedings of the 17th Annual Battery Conference on Applications and Advances*. <https://doi.org/10.1109/BCAA.2002.986408>
- Martínez-Sánchez, R., et al. (2024). Evaluating a nickel–metal hydride (NiMH) battery regeneration patent based on a non-intrusive and unsupervised prototype. *Batteries*, 10(11), 402. <https://doi.org/10.3390/batteries10110402>
- Ota, Y., Sakai, M., & Sasaki, T. (2008). Modeling of voltage hysteresis and relaxation of HEV NiMH battery. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 4654–4658. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00783>
- Pan, Y. H., & Chen, V. S. (2002). An experimental and modeling study of isothermal charge/discharge behavior of commercial Ni–MH cells. *Journal of Power Sources*, 112(1), 298–306. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00450-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00450-0)
- Plett, G. L. (2011). Recursive approximate weighted total least squares estimation of battery cell total capacity. *Journal of Power Sources*, 196(4), 2319–2331. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.048>



Scott, P., & White, L. (2013). Failure analysis of some Toyota Prius battery packs and potential for recovery. *SAE Technical Paper*. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2561>

Turcheniuk, K., Bondarev, D., & Yushin, G. (2021). Battery materials for low-cost electric transportation. *Materials Today*, 42, 57–72. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.09.027>

Wu, Y., Zhang, Z., & Huang, H. (2023). Optimal battery thermal management for electric vehicles with battery degradation minimization. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.03056>

Zhang, Q., Shang, Y., Li, Y., & Zhu, R. (2025). A concise review of power batteries and battery management systems for electric and hybrid vehicles. *Energies*, 18(14), 3750. <https://doi.org/10.3390/en18143750>

Derechos de autor: 2026 Por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>