

# Altitude Effect in the Design of a Lithium-Ion Battery Packing System

Marcelo Cortés-Carmona    Abdiel Mallco-Mallco    Rodrigo Palma-Behnke    Williams Calderón-Muñoz    Jorge Reyes-Marambio  
*Depto. Ingeniería Eléctrica*    *Depto. Ingeniería Eléctrica*    *Depto. Ingeniería Eléctrica*    *Depto. Ingeniería Mecánica*    *Centro de Energía*  
*Universidd de Antofagasta*    *Universidd de Antofagasta*    *Universidd de Chile*    *Universidd de Chile*    *Universidad de Chile*  
Antofagasta, Chile    Antofagasta, Chile    Santiago, Chile    Santiago, Chile    Santiago, Chile  
marcelo.cortes@uantof.cl    abdiel.mallco@uantof.cl    rodpalma@cec.uchile.cl    wicalder@gmail.com    jreyes@centroenergia.cl

**Abstract**— One of the most noticeable effects on the loss of performance and capacity of thermal systems is caused by the effect of altitude, which causes the density of a compressible fluid and the atmospheric pressure to be considerably reduced, leading to a reduction of power to electrical and thermal systems. In view of this, lithium-ion battery packs that have forced cooling through a compressible fluid are directly affected by environmental conditions, resulting in the loss of cooling capacity of the system, which affects the performance of the package when it works at large altitude. The objective of this research is to quantify the impact of altitude on sea level in the design of a pack of lithium ion batteries with forced cooling.

**Keywords**— *Li-ion batteries; Thermal modeling; Thermal behavior; Simulation*

## I. INTRODUCCIÓN

Las baterías de iones de litio son dispositivos que se usan principalmente en el almacenamiento de energía para Vehículos eléctricos híbridos (HEV), Vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV) y Vehículos Eléctricos (EV), debido a su larga vida útil, velocidad de carga y densidad energética. Sin embargo, uno de los factores que hace que estos tipos de vehículos no tengan un precio competitivo en el mercado automotriz, es el costo de la batería, la que representa aproximadamente el 50 % del costo total del vehículo [1]. Ante esta eventualidad es necesario desarrollar tecnologías que puedan reducir los costos, mejorar la densidad energética y que tenga particularmente el control de los sistemas de gestión de baterías como también la gestión térmica del sistema [2].

Uno de los requerimientos importantes para lograr la gestión de la vida útil de la batería, se relaciona con el control de la temperatura de la batería y de esta forma limitar el rango de temperatura de funcionamiento. En la práctica, sólo la temperatura de la superficie de la celda puede ser medida, y se utiliza para el monitoreo de seguridad. Además, la degradación de las baterías de iones de litio se ve influenciada por la temperatura del núcleo, el cual está más cerca del electrodo [3], de esta forma, éste parámetro proporcionará una referencia más precisa para la estimación de la vida útil de la batería.

Las baterías de ion-litio pueden ser consideradas en la actualidad como uno de los dispositivos ideales para el

almacenamiento de energía en el rango de potencias medias, las que se utilizan principalmente en autos eléctricos y aplicaciones estacionarias para apoyo de la red eléctrica (Battery Energy Storage Systems, BESS). Esto se debe gracias a sus favorables ventajas, como su alta densidad de potencia, su larga vida útil y su moderada tasa de descarga [4]. Sin embargo, la temperatura de las baterías de ion-litio varía dependiendo del contexto en que se encuentren, ya sea aumentando o disminuyendo, afectando así las propiedades de la batería. Por ejemplo, la temperatura aumenta durante los procesos de carga y descarga de la batería.

Las futuras tecnologías vehiculares, tienen como objetivo introducir vehículos de alto rendimiento eléctrico, de esa manera se requiere de sistemas inteligentes para controlar y mantener la temperatura de su empaque de baterías dentro de rangos deseables de funcionamiento. Durante el funcionamiento con altas tasas de carga y descarga, las baterías de iones de litio pueden calentarse hasta 55°C o más, sobre todo cuando las celdas se apilan en módulos y paquetes. Por lo tanto, se requiere de un sistema que pueda modelar la generación térmica de la batería, de manera tal que la batería pueda mantener su temperatura dentro del rango deseable y garantizar un funcionamiento óptimo del vehículo en términos de seguridad, rendimiento y vida útil de la batería.

Uno de los efectos más notorios en la pérdida de rendimiento y capacidad de sistemas térmicos se produce por el efecto de la altitud, la que provoca que la densidad de un fluido compresible y la presión atmosférica se vea disminuida considerablemente acarreado una reducción de potencia para sistemas eléctricos y térmicos [5]. Ante esto, los empaques de baterías de ion litio que usan refrigeración forzada mediante un fluido compresible, se ven afectados directamente perdiendo capacidad de refrigeración, y disminución del rendimiento.

El objetivo de esta investigación es cuantificar el impacto que tiene la altura sobre el nivel del mar en un diseño de un pack de baterías de ion litio que cuenta con refrigeración forzada. La hipótesis que se plantea es que el efecto de la altitud es suficientemente significativo como para justificar que las baterías deberían diseñarse orientadas a mercados específicos en relación a la altitud de trabajo, lográndose con esto, diseños más económicos cuando se conoce que el uso de estas estará orientado principalmente a ciudades cercanas a las

This work was supported in part by the project INNOVA CORFO 12IDL2-16296, FIC-R 30136779-0 as well as CONICYT/FONDAP 15110019 Solar Energy Research Center” SERC-Chile.

costas. Este artículo se organizó de la siguiente forma: en la sección II se presentan la metodología utilizada en donde se incluye el modelo matemático del paquete de celdas. En la sección III se entregan los resultados obtenidos mediante simulaciones para diferentes casos, finalmente, en la sección IV se presentan las conclusiones de esta investigación.

## II. METODOLOGÍA

En esta sección se presenta un modelo eléctrico y térmico de una celda de ion litio que permite estimar el desempeño de esta. La dinámica eléctrica se representa por un modelo de un circuito eléctrico consistente en una fuente de voltaje, una resistencia y dos circuitos resistivos capacitivos en paralelo (OCV-R-RC-RC). Para el fenómeno térmico se utiliza un modelo de dos estados que captura la dinámica de la temperatura en el núcleo y en la superficie de la batería. La dependencia entre ambos modelos se establece mediante la generación de calor que se produce al circular corriente eléctrica por la celda, obteniéndose así un modelo electro-térmico de la batería.

### A. Modelo Eléctrico de la Celda

El estado de carga de una celda “state of charge”, (SOC) se define como la integración de la corriente que circula por la celda durante un periodo de tiempo, lo que queda definido por (1):

$$\frac{dSOC}{dt} = -\frac{1}{3600 \cdot C_n} I \quad (1)$$

La capacidad nominal de la celda,  $C_n$  [Ah] se puede obtener realizando ciclos de carga y descarga de acuerdo a las recomendaciones que entregue el fabricante.

El comportamiento eléctrico de una batería se puede representar por un circuito eléctrico equivalente como el que se muestra en la Fig. 1. Este tipo de estructura es una buena elección para representar el modelo de la batería. Los dos circuitos RC representan la constante de tiempo rápida y lenta para el establecimiento de la tensión en terminales de la celda [6].

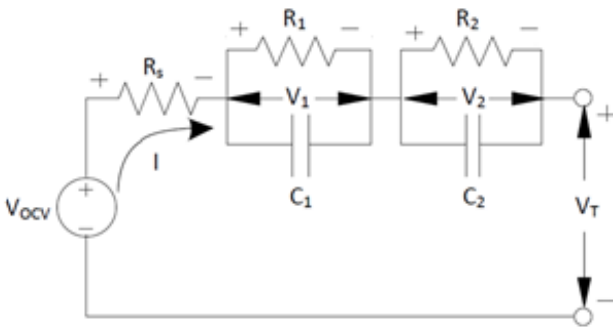


Fig. 1. Modelo del circuito equivalente eléctrico de la batería de ion-Litio.

Las ecuaciones (2) y (3) representan el modelo eléctrico de la batería.

$$\frac{dv_1}{dt} = -\frac{1}{R_1 C_1} v_1 + \frac{1}{C_1} I \quad (2)$$

$$\frac{dv_2}{dt} = -\frac{1}{R_2 C_2} v_2 + \frac{1}{C_2} I \quad (3)$$

Los estados  $v_1$  y  $v_2$  son los voltajes de los condensadores,  $R_s$  es la resistencia interna, los parámetros  $R_1$  [ $\Omega$ ],  $C_1$  [F] corresponden al primer circuito RC y representan la dinámica de difusión del litio en la fase sólida.  $R_2$  [ $\Omega$ ],  $C_2$  [F] en el segundo circuito RC representan la dinámica de difusión del litio en el electrolito. Las variables de estado del modelo eléctrico son SOC,  $v_1$  y  $v_2$ . La corriente  $I$  es la variable independiente, mientras que la variable de salida  $V_T$  es el voltaje en terminales el que se define por (4).

$$V_T = V_{OCV} - v_1 - v_2 - IR_s \quad (4)$$

$V_{OCV}$  representa el voltaje de circuito abierto, mientras que  $R_s$  representa la resistencia interna de la celda.  $V_{OCV}$  sólo depende del estado de carga de la batería, sin embargo, los parámetros del circuito equivalente dependerán del estado de carga, la temperatura, y la dirección de la corriente. En [6] se muestran parámetros en función del SOC, temperatura y la dirección de la corriente. Los valores de los coeficientes corresponden a la celda 26650 fabricada por la empresa A123 Systems.

La Temperatura de la celda de la batería es conducida por la generación de calor  $Q$  definido en (5).

$$Q = \frac{v_1^2(t)}{R_1} + \frac{v_2^2(t)}{R_2} + R_s I^2 \quad (5)$$

El calor generado en la celda está definido por el calentamiento por efecto Joule y la energía disipada en el electrodo de mayor potencial.

### B. Modelo térmico de la Celda

La distribución de temperatura radial dentro de una celda cilíndrica puede ser descrita por ecuaciones diferenciales ordinarias, las cuales consideran la generación de calor y la transferencia de esta. Un modelo térmico de dos estados térmicos simplificado es el que define en (6) y (7),

$$C_c \frac{dT_c}{dt} = Q + \frac{T_s - T_c}{R_c} \quad (6)$$

$$C_s \frac{dT_s}{dt} = \frac{T_f - T_s}{R_u} + \frac{T_s - T_c}{R_c} \quad (7)$$

$T_c$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] y  $T_s$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] representan los estados de la temperatura del centro y de superficie, respectivamente. Los parámetros que caracterizan este modelo son los siguientes;  $T_f$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] es la temperatura de entrada del aire y  $Q$  la generación de calor del modelo eléctrico.  $C_c$  [J/K] es la capacidad de calor en el núcleo,  $C_s$  [J/K] es la capacidad de calor en la superficie,  $R_c$  [K/W] es la resistencia de conducción entre el núcleo y la superficie,  $R_u$  [K/W] es resistencia de convección en torno a la

celda. La resistencia de convección  $R_u$  depende de las condiciones de flujo, y puede ser modelado para diferentes tipos de fluidos. La Fig. 2 muestra una representación gráfica del modelo de transferencia de calor.

Para efecto de interacción con las variables eléctricas de la celda, la temperatura utilizada por el modelo es la media de las temperaturas del núcleo y de la superficie, definido como  $T_m$  [°C] en (8).

$$T_m = \frac{T_s + T_c}{2}. \quad (8)$$

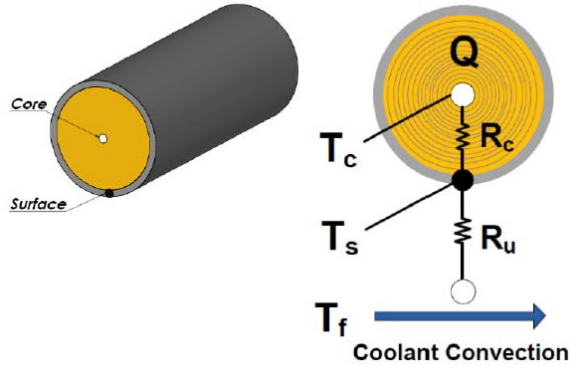


Fig. 2. Modelo Térmico de una Celda

### C. Representación de un arreglo de celdas

La transferencia de calor hacia o desde un banco de tubos en flujo cruzado es relevante para numerosas aplicaciones industriales, como la generación de vapor en una caldera o el enfriamiento en un serpentín de un acondicionador de aire. En la Fig. 3 se muestra un arreglo de celdas en forma lineal y escalonada. Normalmente un fluido se mueve sobre los tubos.

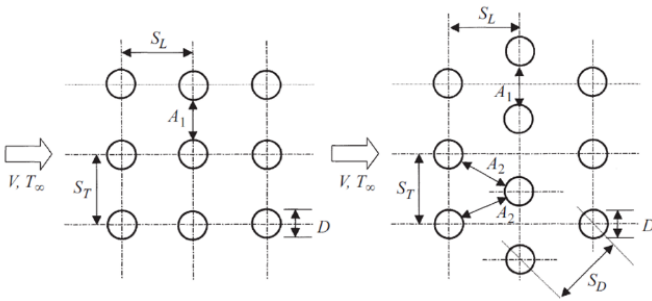


Fig. 3. Arreglo geométrico en forma lineal y escalonada

Las filas de los tubos de un banco están escalonadas o alineadas en la dirección de la velocidad del fluido. La configuración se caracteriza por el diámetro del tubo  $D$  y por la separación transversal  $S_T$  y la separación longitudinal  $S_L$  medidas entre los centros de los tubos. Las condiciones del flujo dentro del banco están dominadas por los efectos de separación de la capa límite y por las interacciones de estelas, que a su vez influyen en la transferencia de calor por convección.

A diferencia del modelo de una celda individual, en este se requiere modelar la transferencia de calor por convección

entre celdas vecinas. De (6) y (7) se aprecia que la temperatura interna no se vincula con la temperatura superficial de las otras celdas, por lo tanto, se puede deducir que la transferencia de calor entre celdas depende de las temperaturas superficiales entre celdas y el coeficiente de convección entre estas. De esta manera se tiene que para las celdas  $i, j$  la transferencia de calor entre celdas vecinas queda establecida por (9);

$$\sum_{j \in \Omega_1, i \neq j}^n \frac{T_{Si} - T_{Sj}}{R_{Ci,j}}, i = 1 \dots n, \quad (9)$$

donde  $R_{ci,j}$  es la resistencia de convección entre celdas  $i$  y  $j$ ,  $\Omega_i$  es en conjunto de celdas vecinas a la celda  $i$ .

### D. Resistencia convectiva entre celdas

Cuando se tiene un arreglo de celdas un tema que debe ser resuelto es la determinación de la resistencia de convección entre celdas. Una estimación aproximada de este valor se puede obtener usando el procedimiento establecido por Zhukauskas [7]. Esta metodología fue diseñada para intercambiadores de calor, pero debido a que la configuración geométrica utilizada en intercambiadores de calor es similar a la que se usa en arreglo de celdas circulares, también se puede aplicar en baterías.

Zhukauskas proporcionó una amplia teoría sobre el ordenamiento de tubos alineados y escalonados como la transferencia de calor y caída de presión. La transferencia de calor desde una celda depende de su ubicación dentro del empaquetamiento y dentro de rangos bajos del número de Reynolds. Los tubos en la primera fila tienen un comportamiento similar a las de las filas inmediatamente superiores. Para números de Reynolds mayores, la turbulencia del flujo conduce a una mayor transferencia de calor desde los tubos interiores que de los de la primera fila. La transferencia de calor se hace invariante con la ubicación del tubo después de la tercera o cuarta fila en el régimen de flujo mixto, esto se produce por encima del número de Reynolds  $Re_{Dmax}$ .

### E. Efecto de la altitud en el diseño de baterías

Uno de los efectos más notorios en la pérdida de rendimiento y capacidad de sistemas térmicos se produce por el efecto de la altura, la que provoca que la densidad de un fluido compresible y la presión atmosférica se vea disminuida considerablemente acarreado una reducción de potencia para sistemas eléctricos y térmicos. Ante esto, los empaques de baterías de ion litio que usan refrigeración forzada mediante un fluido compresible, se ven afectados directamente perdiendo capacidad de refrigeración, y disminución del rendimiento.

Desde un punto de vista mecánico, la diferencia fundamental entre líquidos y gases consiste en que estos últimos, dada su naturaleza de fluido compresible, pueden ser comprimidos. Su volumen, por lo tanto, no es constante y consiguientemente tampoco su densidad. Teniendo en cuenta el papel fundamental de esta magnitud física en la estática de fluidos, se comprende que el equilibrio de los gases haya de considerarse separadamente de los líquidos.

Una forma simple de expresar el cambio de presión con la altura esta expresada por la ecuación general de la

hidrostática, que generalmente se aplica en fluidos no compresibles, pero que también es aplicable para fluidos compresibles, esta ecuación es la que se presenta en (10)

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g, \quad (10)$$

dónde  $dP$  es la diferencia de presión entre dos puntos,  $dz$  es la diferencia de alturas,  $\rho$  la densidad del fluido y  $g$  la aceleración de la gravedad.

En general en los fluidos compresibles la densidad varía de manera casi proporcional a la presión. Por ello si la integración de (10) supone grandes cambios de presión, la densidad debe ser considerada como variable. Para analizar este tema, se consideran dos situaciones específicas en los procesos de integración.

En la primera, se considera un gas estático a temperatura constante. En este caso, (10) se combina con la ecuación de estado del gas y se integra para obtener la presión y la densidad del gas en función de la altura sobre el nivel del mar. Un caso más interesante, pero menos habitual consiste en obtener la presión y densidad del gas considerando que la presión varía linealmente con la altura. En esta situación, la presión y densidad quedarán expresadas en función de la altura y de la temperatura ambiente [8]. En (11) y (12) se muestran las ecuaciones de presión y densidad del gas en función de estas dos variables.

$$P_h = P_o \left[ \frac{T_o + \beta \cdot H}{T_o} \right]^{\frac{g}{\beta \cdot R}}, \quad (11)$$

$$\rho_h = \rho_o \left[ \frac{T_o + \beta \cdot H}{T_o} \right]^{\frac{g}{\beta \cdot R} - 1}, \quad (12)$$

donde,  $P_h$  es la presión a una altura  $H$  y temperatura  $T_o$  en [Pa],  $P_o$  es la presión a nivel del mar, 101325 [Pa],  $\rho_o$  es la densidad del aire a nivel del mar, 1.2 [kg/m<sup>3</sup>].  $g$  es la aceleración de gravedad, 9.8 [m/s<sup>2</sup>],  $\beta$  el gradiente térmico 0.00650 [°K/m],  $R$  es la constante de gases, que para el caso del aire es 287[J/kg-K],  $T_o$  es la temperatura a nivel del mar [°K] y  $H$  es la altura sobre el nivel del mar en [m]. La Fig. 4 muestra la densidad en función de la altitud y la temperatura del entorno. En la Fig. 4 se aprecia que la densidad disminuye cuando la altitud crece. Asimismo, la densidad disminuye cuando la temperatura aumenta.

### III. RESULTADOS OBTENIDOS

En esta sección se realizan diferentes análisis en los cuales se explora el comportamiento de parámetros y variables relevantes en el diseño de baterías cuando cambia la temperatura del entorno y la altitud. La Fig. 5 muestra el coeficiente de convección  $h$  en función de la separación vertical  $S_T$  [m] parametrizado con distintas velocidades de refrigeración a nivel del mar. De la misma manera, en la Fig. 6 se muestran los resultados para una altura de 3000 m.s.n.m. En estas simulaciones no se ha considerado la temperatura

ambiente  $T_o$ . De estos resultados se puede determinar que el coeficiente de convección  $h$  es en promedio 19 % mayor a nivel del mar que a 3.000 m.s.n.m.

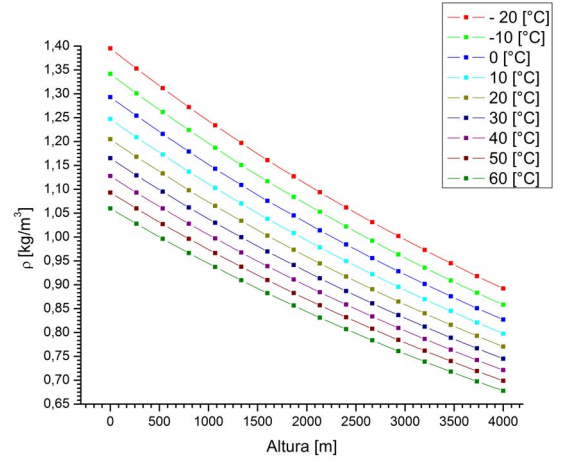


Fig. 4. Coeficiente de convección a nivel del mar

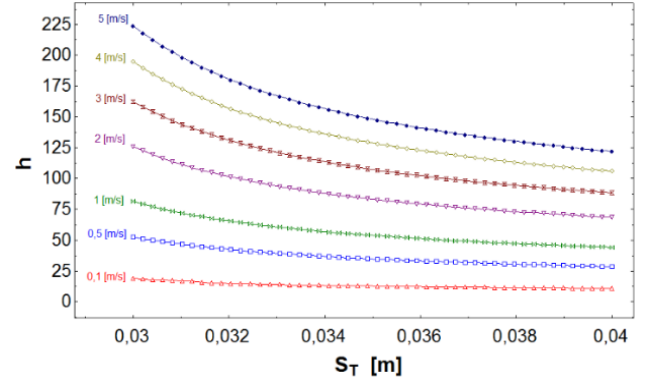


Fig. 5. Coeficiente de convección a nivel del mar

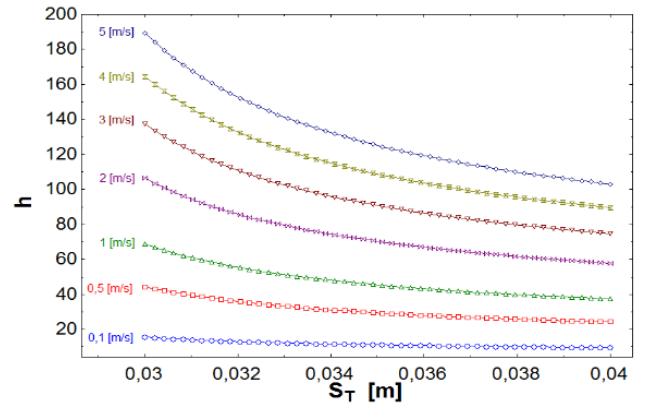


Fig. 6. Coeficiente de convección a 3000 m.s.n.m. sin considerar la temperatura

Por otra parte, la Fig. 7 muestra los resultados obtenidos cuando se considera el efecto de la temperatura ambiente. En este caso, la temperatura promedio a nivel del mar es 20 °C, mientras que a 3.000 m.s.n.m es 12 °C. Este análisis es equivalente a comparar las condiciones de las ciudades de

Antofagasta y Calama. Cuando la temperatura es considerada por el modelo, el coeficiente de convección  $h$  es en promedio 21% mayor a nivel del mar con respecto a 3.000 m.s.n.m. Esto implica que considerar la temperatura en el modelo produce una diferencia de sólo 2 % con respecto a modelos que no la consideran.

Este efecto es aún más cuantificable cuando se compara la diferencia de presión entre la entrada al módulo de celdas y la salida. La diferencia de presión tiene un mayor impacto en el diseño del arreglo de celdas dado que define la capacidad del ventilador afectando el rendimiento energético de la batería.

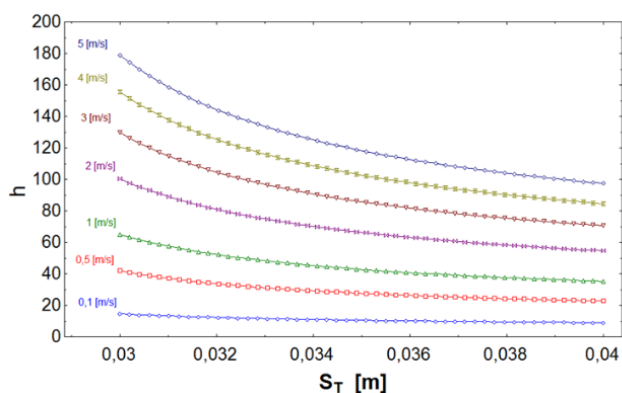


Fig. 7. Coeficiente de convección a 3000 m.s.n.m. considerando la temperatura

La Fig. 8 presenta la caída de presión  $\Delta P$  a nivel de mar en función de la separación vertical  $S_T$ , parametrizada a distintas velocidades de refrigeración. Asimismo, la Fig. 9 muestra la caída de presión a 4000 m.s.n.m. La caída de presión disminuye conforme aumenta la altitud, de esta manera se tiene, que a 4000 m.s.n.m esta disminuye en un 27% cuando la velocidad de refrigeración es 5 m/s.

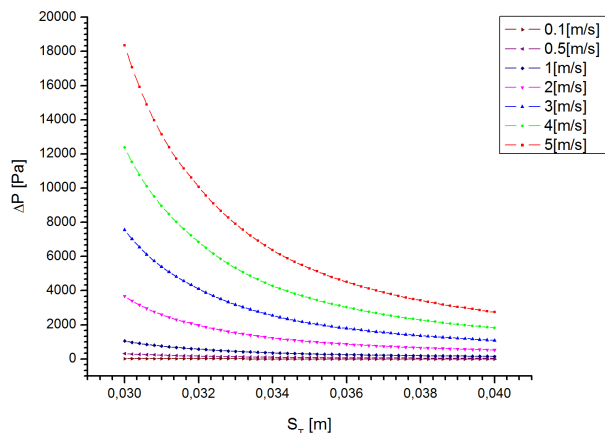


Fig. 8. Caída de presión a nivel del mar en función de la separación vertical  $S_T$ .

Otra variable que se puede analizar en el diseño de un pack de batería es la temperatura. Para cuantificar esta variable, se realizaron diferentes simulaciones con distintas configuraciones. La Fig. 10 muestra los resultados obtenidos a nivel del mar para una configuración escalonada consistente

de 40 celdas conectadas eléctricamente en serie y organizadas en 10 columnas y 4 filas. Se utilizó una celda cilíndrica  $\text{LiFePO}_4$ , tipo ANR 26650 fabricada por A123 System. Las características de la celda y parámetros de simulación son:  $V_{oc} = 3.35$  (V), 2.5 Ah,  $D = 2.6$  cm,  $S_L = 3.3$  cm,  $S_T = 3.4$  cm,  $T_{\infty} = 24$  °C,  $V = 0.1$  m/s. Como corriente de carga se aplica un pulso de 3C en descarga durante 15 min, y 0.5C en carga durante 15 min. El tiempo de simulación es 60 min. Asimismo, la Fig. 11 muestra los resultados de la simulación para una altitud de 4000 m.s.n.m.

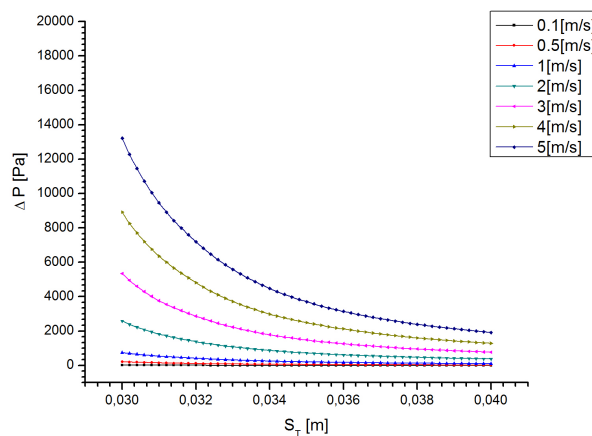


Fig. 9. Caída de presión a 4000 m.s.n.m. función de la separación vertical  $S_T$ .

En las Fig. 10 y 11 se aprecia que el efecto de la altitud produce un incremento de temperatura cercano a 1 °C. De esta manera se puede concluir que la altura produce un efecto no significativo en la temperatura.

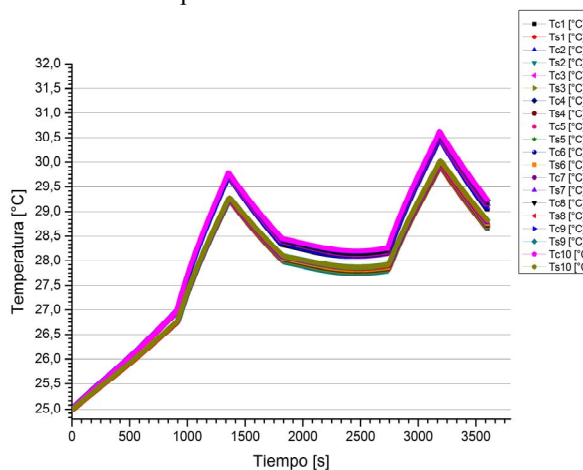


Fig. 10. Temperatura de pack de 40 celdas a nivel del mar

Como una forma de verificar la calidad de los resultados del modelo propuesto se realizaron simulaciones computacionales con el software ANSYS. La malla simulada cuenta con 18.297 nodos y 16.507 elementos distribuidos en la superficie de análisis 2D, la simulación fue realizada en estado estacionario debido a que las variaciones con el tiempo de las cantidades físicas son periódicas y se repiten de manera casi



idéntica. La temperatura de entrada al sistema es de 25 °C y la salida se definió de acuerdo a la presión atmosférica del ambiente. La Fig. 12 presenta los gráficos de temperatura máxima para diferentes velocidades de refrigeración.

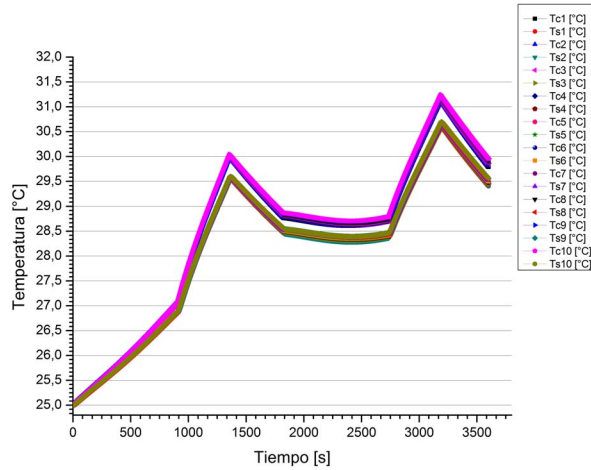


Fig. 11. Temperatura de pack de 40 celdas a 4000 m.s.n.m

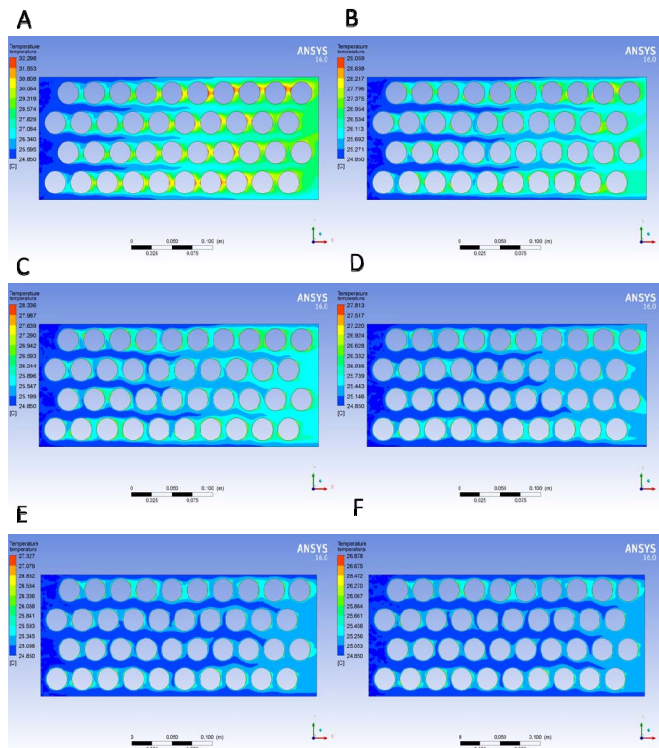


Fig. 12. Gráficos de temperatura de la superficie de las celdas realizados en el paquete Ansys a diferentes velocidades. A. 0,1 m/s, B. 0,5 m/s, C. 1 m/s, D. 2 m/s, E. 3 m/s y F. 4 m/s

En el mismo sentido, la Tabla I presenta los resultados en donde se comparan las variables; temperatura de la superficie  $T_s$ , velocidad máxima  $V_{max}$ , variación de presión  $\Delta P$ , número de Nusselt y coeficiente convectivo  $h$ . Se aprecia que los errores en las estimaciones están en el rango de 2,85% a 29,45%. Las variables que tienen errores menores al 7% son la temperatura superficial y el coeficiente de convección. Sin

embargo,  $V_{max}$ ,  $\Delta P$ , y Nusselt tienen errores que superan el 11%. Esto significa que el uso de la teoría de Zhukauskas tiene altos errores cuando se estima  $V_{max}$ ,  $\Delta P$ , y Nusselt, y tiene errores aceptables cuando se estima la temperatura y  $h$ .

TABLE I  
COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE MODELO PROPUESTO Y ANSYS

Altitud	0 [m]		Error %	4000 [m]		Error %
	Ansys	Modelo		Ansys	Modelo	
T. Núcleo [°C]	---	26,69	---	---	27,14	---
T.Superf. [°C]	28,33	27,55	2,75	29,95	27,96	6,64
vmáx [m/s]	4,79	4,25	11,27	4,81	4,25	11,64
$\Delta P$ [Pa]	27,78	35,55	27,9	18,51	24,79	25,33
Nusselt	34,07	44,75	23,86	23,78	33,77	29,45
$h$ [W/m <sup>2</sup> K]	47,10	44,08	6,4	33,26	31,72	4,64

Para efectos de diseño de baterías de ion litio, las variables que impactan son la temperatura y la caída de presión. La primera se usa para verificar el riesgo del diseño, para lo cual se requiere que la temperatura se mantenga en rangos acotados. En este sentido diremos que el modelo propuesto es confiable para predecir esta variable. En lo que se refiere a la variación de presión, esta se utiliza para dimensionar el ventilador del arreglo de celdas. Es este caso diremos la estimación de la potencia del ventilador estará sujeta a un error sobre el 26%.

Finalmente, se realizaron cálculos comparativos a diferentes altitudes del tamaño de la potencia del ventilador. Para tener una idea clara de cómo afecta la altura al desempeño del sistema de refrigeración de aire en el módulo basta con conocer la potencia que necesita el ventilador para mover una cantidad de aire de un punto a otro. Esto quiere decir que, en base a la potencia a nivel del mar, se puede inferir la potencia a cualquier altitud mediante la relación de sus densidades, para tal efecto se toma como velocidad de ingreso al módulo 1 [m/s] entre 0 y 4000 m.s.n.m. para posteriormente encontrar un caudal de 31,82 [m<sup>3</sup>/h] al ingreso de aire con una caída de presión específica para cada altitud. La potencia mecánica debido al caudal y la caída de presión se presenta en la Tabla II.

TABLE II  
VALORES DE LA POTENCIA DEL VENTILADOR A DIFERENTES ALTURAS

Altitud [msnm]	Caudal [m <sup>3</sup> /h]	$\Delta P$ [Pa]	Potencia del aire [W]	Rate	$\Delta Pe$ [Pa]	Potencia ventilador [W]
0	31,82	27,78	0,246	0,997	27,688	0,245
1000	31,82	24,63	0,218	1,119	27,571	0,244
2000	31,82	22,15	0,196	1,263	27,979	0,247
3000	31,82	20,13	0,178	1,412	28,419	0,251
4000	31,82	18,51	0,164	1,600	29,616	0,262

Un ventilador se caracteriza por el movimiento de caudal volumétrico [m<sup>3</sup>/s] para refrigeración mediante un fluido que en este caso es aire. En la Tabla II se observa un decrecimiento de la potencia que necesita el aire para la refrigeración a medida que aumenta la altura, esto significa que existe una menor transferencia de energía entre el fluido y las celdas a mayor altura a consecuencia de un menor flujo

másico del fluido. Este fenómeno está relacionado básicamente con la cantidad de moléculas de aire que mueve un ventilador tanto a nivel del mar como en la altura debido al déficit que se encontraría en este último. Por lo tanto, el ventilador a mayor altura mueve una menor cantidad de moléculas de aire por lo que la potencia para este efecto es menor que a nivel del mar.

Por otra parte, el costo energético que representaría mantener la temperatura máxima de simulación a nivel del mar respecto a la temperatura máxima a 4000 m.s.n.m. se consigue incrementando la velocidad de fluido refrigerante de 1 [m/s] a 1,3 [m/s], lo que resulta en un cambio en la presión estática de 27,78 [Pa] a 34,69 [Pa], lo que en términos de potencia a una altura de 4000 [m] se obtiene 0,307 [W] a diferencia de los 0,164 [W] obtenidos anteriormente sin considerar el aumento de velocidad del fluido refrigerante. Por lo tanto, se requiere aumentar la potencia del ventilador en 1.8 veces.

#### IV. CONCLUSIONES

En esta investigación se ha analizado el efecto que tiene la altitud y temperatura ambiente en el diseño de un banco de baterías de ion litio. Los resultados obtenidos permiten concluir que la altitud tiene un mayor efecto que la temperatura ambiente en el diseño. En lo que se refiere al coeficiente de convección  $h$ , este es en promedio 21% mayor a nivel del mar que con respecto a 3.000 m.s.n.m. Por otro lado, la temperatura ambiente sólo tiene un efecto de un 2% en la variación de la densidad. En lo que se relaciona con la temperatura en el núcleo de la celda, está experimenta un aumento del orden de 1 °C entre nivel del mar y 4000 m.s.n.m. Por otra parte, la energía requerida para mantener la misma temperatura de la celda que se produce a nivel del mar requiere un consumo en ventilación 80% mayor. Este efecto, permite justificar la hipótesis de que es conveniente realizar diseños personalizados en base de altitud, como una forma de lograr diseños más económicos.

Usualmente, los modelos utilizados para transferencia de calor utilizan configuraciones alineadas y escalonada, lo que limita la representación de otras configuraciones existentes. Para nuestro caso se utilizó el modelo alineado, la que fue comparada con simulaciones realizadas con Ansys, obteniéndose resultandos con diferencias entre un 6% a 25%. Esto plantea un campo de investigación orientado a mejorar las clásicas representaciones que se hacen usando la teoría de Zhukauskas.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo entregado por los proyectos CONICYT/ FONDAP/15110019 “Solar Energy Research Center” SERC-Chile, FIC-R 30136779-0, e INNOVA CORFO 12IDL2-16296.

#### REFERENCIAS

- [1] S. Al Hallaj, H. Maleki, J. S. Hong, and J. R. Selman, “Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 83, pp. 1-8, October 1999.
- [2] S. Al-Hallaj, J. R. Selman, “Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications,” *Journal of Power Sources*, vol. 110, pp. 341-3488, August 2002.
- [3] P. Antonucci, and V. Antonucci, “Electrochemical energy storage” in *Electrochemical energy storage in the emerging era of smart grids*, Rosario Carbone, Eds. 2011, pp. 2.
- [4] N. Baba, H. Yoshida, M. Nagaoka, C. Okuda, S. Kawauchi, “Numerical simulation of thermal behavior of lithium-ion secondary batteries using the enhanced single particle model,” *Journal of Power Sources*, vol. 252, pp. 214-228, April 2014.
- [5] M. Lapuerta, O. Armas, J. R. Agudelo, y C. A. Sánchez, “Study of the Altitude Effect on Internal Combustion Engine Operation. Part 1: Performance”, *Información Tecnológica*, vol. 17 N° 5, pp. 21-30, 2006.
- [6] H.Perez and J. Sieguel, "Parameterization and validation of an integrated electro-thermal cylindrical LPF battery model," *ASME 2012 5<sup>th</sup> Annual Dynamic Systems and Control Conference*, 2012.
- [7] F. Incropera, and D. De Witt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley and Sons Inc., New York, NY, 1985.
- [8] A. Mallco-Carpio, “Modelamiento electro-térmico de baterías de litio en diferentes condiciones de altitud y temperatura,” M.S. thesis, Dept. Elect. Eng., Univ. de Antofagasta, Antofagasta, Chile, 2016.