



Algunas variables para la evaluación de tecnologías aislantes óptimas en la implementación en cajas refrigerantes portátiles. Corporación Universitaria Lasallista¹

Ana Cristina Zúñiga², Gilmar Sáenz Tejada³, Luis Felipe Gómez Gómez⁴, Steven Ángel Cañas⁵

Some variables for the evaluation of optimal isolating technologies in the implementation of portable refrigerant boxes. Corporación Universitaria Lasallista

Algunas variáveis associadas ao desenho de uma caixa refrigerável portátil para transporte de biológicos, caso de estudo desenho de tecnologias de cadeia de frio. Corporación Universitaria Lasallista

RESUMEN

Introducción. El transporte de productos perecederos es un tema que amerita investigación, con el fin de brindar elementos a las pequeñas y medianas empresas para mejorar su cadena logística en el transporte nacional e internacional. **Objetivo.** El objetivo del presente artículo es presentar los resultados derivados del análisis de variables usadas en el diseño de una caja refrigerante para transporte de biológicos. **Materiales y métodos.** Este trabajo se presenta como un artículo original derivado de la investigación generada en la Corporación Universitaria Lasallista, en el marco del proyecto “Fortalecimiento de las capacidades de transferencia, comercialización y valoración de tecnologías”, financiado por Innpulsa Colombia en el año 2015. **Resultados.** El trabajo contiene un análisis de tecnologías sustitutas, además de una síntesis de algunas de

1 Artículo original derivado del proyecto de investigación “Fortalecimiento de las capacidades de transferencia, comercialización y valoración de tecnologías” desarrollando en la Corporación Universitaria Lasallista y financiado por Innpulsa Colombia.

2 Magíster en Gestión de Ciencia, Tecnología e Innovación, docente investigadora del grupo de Investigación G-3IN de la Corporación Universitaria Lasallista, E-mail: anzuniga@lasallistadocentes.edu.co ORCID: 0000-0001-6503-412X

3 Ingeniero químico, Hatch Indisa, E-mail: gilmar.saenz@hatchindisa.com ORCID: 0000-0002-8958-7850

4 Ingeniero mecánico, Hatch Indisa, E-mail: felipegomezg5@gmail.com ORCID: 0000-0001-9840-035X

5 Magíster en Ingeniería Hatch Indisa, E-mail: Steven.angel.c@gmail.com ORCID: 0000-0001-5390-2209

las características de la tecnología desarrollada para satisfacer las necesidades del mercado. **Conclusión.** El resultado de la investigación brinda información acerca de las variables adecuadas para el diseño y optimización de la tecnología con miras a obtener

el equilibrio adecuado entre la conservación, la trazabilidad y la autonomía.

Palabras clave: tecnologías de cadena de frío, conservación, trazabilidad, autonomía.

ABSTRACT

Introduction. Transportation of perishable products is a topic deserving to be investigated with the purpose of providing elements to small and medium-sized companies for improving their logistic chain in national and international transportation. **Objective.** Show results derived from the analysis of variables used in the design of a refrigerant box for transporting biologicals. **Materials and methods.** This work is submitted as an original article resulting from the research generated in La Corporación Universitaria Lasallista, in the frame of the project “Strengthening

of transfer, trading, and technologies valuation capacities,” financed by Innpulsa Colombia in the year 2015. **Results.** The work provides an analysis of alternative technologies, as well as a synthesis of some characteristics of the technology developed, in order to satisfy the needs of the market. **Conclusion.** The result of the research provides information about adequate variables for the design and optimization of the technology in order to obtain the appropriate balance among conservation, traceability and autonomy.

Keywords: cold chain technologies, conservation, traceability, autonomy.

RESUMO

Introdução. O transporte de produtos perecíveis é um assunto que merece investigação, com o fim de brindar elementos às pequenas e médias empresas para melhorar sua cadeia logística no transporte nacional e internacional. **Objetivo.** O objetivo do presente artigo é apresentar os resultados derivados da análise de variáveis usadas no desenho de uma caixa refrigerável para transporte de biológicos. **Materiais e métodos.** Este trabalho se apresenta como um artigo original derivado da investigação gerada na Corporación Universitaria Lasallista, no marco do projeto “Fortalecimiento das capacidades

de transferência, comercialização e valorização de tecnologias”, financiado por Innpulsa Colômbia no ano de 2015. **Resultados.** O trabalho contém uma análise de tecnologias substitutas, ademais de uma síntese de algumas das características da tecnologia desenvolvida para satisfazer as necessidades do mercado. **Conclusão.** O resultado da investigação brinda informação sobre as variáveis adequadas para o desenho e otimização da tecnologia com visão para obter o equilíbrio adequado entre a conservação, a rastreabilidade e a autonomia.

Palavras chave: tecnologias da cadeia de frio, conservação, rastreabilidade, autonomia.

INTRODUCCIÓN

Entre los desafíos actuales que enfrenta el sector del transporte refrigerado se destacan la necesidad de un soporte logístico eficiente y el mantenimiento integral de la temperatura durante toda la cadena logística. Para enfrentar estos desafíos, una de las

estrategias empleadas se centra en el control eficiente de las condiciones de refrigeración que da soporte a los procesos de trazabilidad, aspecto logístico esencial que garantiza, además, la conservación de los bienes almacenados. La demanda actual de bienes para el consumo crece en relación con el aumento de la población mundial. Alimentos y productos

farmacéuticos debidamente conservados son necesarios en proporciones cada vez mayores. Por ello, el grupo de investigación G-3IN de la Corporación Universitaria Lasallista, en conjunto con LUMES S.A. S. e INDISA S.A., ha desarrollado un sistema para la conservación y el transporte de muestras e insumos biológicos y alimentos perecederos que mantiene las condiciones adecuadas de almacenamiento, conservación y transporte durante tiempos de hasta ocho horas, bajo condiciones de refrigeración constantes. La solución tecnológica se fundamenta en tres características esenciales: 1. Conservación, 2. Trazabilidad y 3. Autonomía, las cuales responden a los retos planteados en el sector del transporte de bienes perecederos: (a). Mantener la frescura del producto durante el transporte / almacenamiento y (b). Manejo de temperaturas de almacenamiento adecuadas.

Este sistema para la conservación y el transporte de bienes perecederos garantiza el mantenimiento de la temperatura de refrigeración constante durante el tiempo de transporte, 8 horas máximo, así como el control asociado a la misma. La tecnología, cuenta con dos solicitudes de patente en Colombia, y una solicitud PCT. La tecnología se estructura de la siguiente forma: (i). Dispositivo de aislamiento y transferencia térmica para cajas isotérmicas de alta eficiencia energética y (ii). Caja para conservación y transporte. El sistema se encuentra en un nivel de alistamiento tecnológico (TRL) 4, puesto que ya ha sido validado a escala laboratorio y ha cumplido con las condiciones previstas para esta etapa, lo que garantiza el funcionamiento de la solución.

El trabajo de investigación desarrollado en la Corporación universitaria Lasallista desde 2014, en torno a tecnologías de cadena de frío, se ha venido consolidando desde el análisis de la oportunidad de mercado, las características de las tecnologías sustitutas y el análisis específico para el mercado colombiano, y se han desarrollado pruebas de concepto con diversas empresas del sector salud humana, animal y de alimentos, con el fin de optimizar las características funcionales de la tecnología.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplearon datos de referencias bibliográficas y especificaciones de los materiales aislantes objeto de estudio, se realizaron cálculos y modelos con simulaciones en ANSYS® para determinar las

características térmicas y de transferencia de calor en las cajas refrigerantes con cada uno de los aislantes seleccionados a diferentes espesores, y con los resultados se cuantificaron las temperaturas y flujos de calor para cada aislante, resultados que sirven para optimizar el aislamiento de la caja en cuanto a dimensiones, peso y costo. Se determinaron las propiedades más relevantes para el desempeño global de los materiales aislantes, y se construyó una matriz de calificación para cada aislante asignando relevancias a cada propiedad.

El método consistió en modelar analíticamente y por medio de elementos finitos el desempeño de las cajas refrigerantes con dos materiales aislantes, poliuretano y paneles de vacío, y probando diferentes espesores de aislante.

Por otro lado, el presente trabajo se desarrolló siguiendo una estrategia de investigación cualitativa, según Galeano:

La investigación social cualitativa apunta a la construcción de la realidad como resultado de un proceso histórico de construcción a partir de las lógicas de sus protagonistas con una óptica interna y rescatando su diversidad y particularidad. Hace especial énfasis en la valoración de lo subjetivo, lo vivencial y la interacción en tres los sujetos de la investigación (2004).

La unidad de análisis se centra en los factores básicos para la interpretación de las condiciones y requerimientos de mercado. El criterio para interpretar los resultados se basa en referentes teóricos que no están documentados de manera secuencial en la literatura.

El proceso a seguir para el trabajo de investigación partió de una guía dada por los asesores propuestos por Innpulsa Colombia quienes dieron una hoja de ruta para elaborar un plan de comercialización. Esto permitió tener un punto de partida para el análisis. Se eligieron posteriormente los empresarios e investigadores que serían entrevistados.

A continuación, se realizó la documentación del caso que fue consignada en el libro resultado de investigación *Fortalecimiento de las capacidades institucionales de transferencia, comercialización y valoración de tecnologías: estudio de caso*.

El proceso ha servido, además, como guía a la Corporación Universitaria Lasallista en lo relativo

tanto a sus técnicos e investigadores, como a sus gestores, para establecer una política de transferencia de conocimiento / tecnología, coherente con los objetivos de la institución y situándola en el camino de las universidades emprendedoras.

RESULTADOS

Las propiedades térmicas de los materiales aislantes son bien conocidas o algunas se pueden medir con precisión. Se puede calcular la cantidad de calor transferido a través de cualquier combinación de materiales. Para esto es necesario considerar:

- Conductividad térmica del material
- Permeabilidad de agua
- Resistencia al vapor de agua
- Resistencia a la intemperie
- Límites de temperatura
- Alcalinidad
- Resistencia mecánica
- Capilaridad
- Densidad
- Resistencia a rayos UV

Como requisito para llevar a cabo el análisis de la caja refrigerante para conservar la cadena de frío es necesario considerar la transferencia de calor en estado estable de los elementos que se involucran en el fenómeno, empleando balances de energía. Para modelar la transferencia de calor y el balance de energía que gobiernan el fenómeno es necesario considerar las siguientes variables:

- Dimensiones de la caja (ancho W, alto H, largo L)
- Espesor de aislamiento (e)
- Conductividad de aislamiento (k)
- Temperatura ambiente (T_{amb})
- Coeficientes de transferencia de calor (hamb, hint)
- Temperatura de elementos almacenados (T_v)
- Temperatura de pared interna de la caja refrigerante (T_{wint})
- Temperatura de pared externa de la caja refrigerante (T_{wext})
- Flux de calores y calores transferidos (Q/A)

Adicionalmente, para determinar la idoneidad de un material aislante se necesita determinar lo siguiente:

- Permeabilidad de agua
- Resistencia al vapor de agua

Para llegar a la optimización de las variables que garanticen autonomía, trazabilidad y estabilidad de temperatura, fue necesario, en primer lugar, evaluar las características de algunas de las tecnologías sustitutas existentes en el mercado, las cuales se describen en la tabla 1, resultado de análisis de información de fuentes primarias.

En la tabla 2, puede observarse que una de las variables a controlar en el desarrollo de esta clase de tecnologías es el tipo de refrigeración lo que aporta el valor diferencial en el momento de elegir un desarrollo, ya que esta variable incide directamente en la temperatura alcanzada y en la duración de la batería.

Otra de las variables importantes para la optimización de características de la tecnología es el análisis de los aislantes térmicos. En la investigación se realizó una comparación de algunos aislantes como opciones para ser empleados en la caja de refrigeración y congelación. En la tabla 3 se presenta la comparación realizada.

Los aislantes evaluados fueron: espuma de poliuretano inyectado, espuma de poliuretano flexible, poliisocianurato, poliestireno expandido, poliestireno extruido, paneles de vacío (VIP), fibra de vidrio, polietileno expandido, *FoamRubber* y criogel.

Las características evaluadas fueron: funcionalidad, procesabilidad, confiabilidad, resistencia térmica, temperatura máxima, temperatura mínima, resistencia a los rayos UV, absorción de agua, costo y disponibilidad comercial. A cada uno de los parámetros mencionados se les asignó una importancia relativa por un grupo focal de expertos de la compañía INDISA S. A., la cual se presenta en la tabla 3. El peso relativo de cada variable fue asignado de forma cualitativa. Las variables se seleccionaron de acuerdo con el criterio de los ingenieros de INDISA S. A., siguiendo guías internacionales para aislamiento industrial y diseño de producto; dichas variables se muestran a continuación:

- Funcionalidad: capacidad para realizar una función.
- Procesabilidad: facilidad para ser transformado y manipulado.
- Confiabilidad: probabilidad de correcto funcionamiento en el tiempo.
- Resistencia térmica: capacidad de un material a oponerse al flujo de calor.
- Límites de temperatura: temperatura máxima y mínima en la que el material inicia degradación.
- Resistencia a los rayos UV: resistencia a la

- exposición solar.
- Absorción de agua: define la permeabilidad y absorción del material. El agua degrada los materiales aislantes.
- Costo: valor del aislante en el mercado local.
- Disponibilidad comercial: facilidad de adquirir el material en el mercado local.

Tabla I. Comparación de algunas cajas de refrigeración comerciales

Fabricante	Stirling Ultracold	Vericor	Koolatron	Yeti	Dison	Vericor	Dengke
Referencia	ULT-25N	Cool Cube 420	PC-75	ROADIE 20	BC-1500A	Cool Cube 50 (VT-50)	LCB-6L
Refrigeración	Compresión - Refrigerante R508B - Libre de CFC/ HCFC	Paneles congelados	Termoeléctricos - Dual: Calentamiento Refrigeración	Sin Refrigeración	Termoeléctricos	Paneles congelados	6 paquetes de hielo de 0,40 L
Temperatura inferior, °C	-86,0	2,00	10 °C por debajo de la temperatura ambiente	De acuerdo al método empleado	2,00	2,00	N/A
Temperatura superior, °C	-20,0	8,00	38 °C por encima de la temperatura ambiente	De acuerdo al método empleado	8,00	8,00	N/A
Duración, h	120V o 240V, AC; 60Hz o 50Hz; o 12V DC en batería	106	Sujeto a batería: 12V-4,5A	De acuerdo al método empleado	Batería de 6 h. O sujeto a conexión a AC 110-240V, DC 12V o batería de 7,4V	65	48,0
Volumen interior, L	25,0	28,3	32,4	18,2	1,44	3,54	1,60
Volumen exterior, L	111	174	88,1	55,9	9,28	19,0	21,9
Peso, kg	21,0	26,3	6,81		3,50	5,45	2,40
Aislamiento	Paneles de vacío de alto desempeño y espuma de poliuretano	Panel aislado al vacío		Poliuretano de alta densidad		Panel aislado al vacío	Poliuretano
Espesor de aislamiento o recubrimiento total, cm (aproximado)	6,23	12,7		5,86	4,75	5,84	3,80
Transporte	Manijas	Ruedas en base, manija para movimiento	Manijas	Manijas	Cargadera	Cargadera	Cargadera
Otros		Resistente al agua, a golpes		Resistente al agua, a golpes	Indicador digital de temperatura		Indicador de temperatura LED

Fuente: elaboración de los autores

Tabla 2. Matriz de selección de aislantes para caja refrigerante portátil

	Espuma PU Iny.	Espuma PU Flex.	Poliisocianurato	Poliestireno Exp.	Poliestireno Extruido	Cellular Glass	Paneles de vacío	Fibra de vidrio	PE Expandido	Foam rubber	Cryogel	Importancia %
Funcionalidad	1,00	0,85	0,90	0,70	0,85	0,80	1,00	0,60	0,50	0,80	1,00	15,0 %
Procesabilidad	0,80	1,00	0,80	1,00	0,70	0,70	0,50	0,60	1,00	0,70	0,80	7,00 %
Confiabilidad	1,00	0,80	0,80	0,50	0,80	0,70	0,70	0,50	0,90	0,70	0,90	7,00 %
Resistencia térmica	0,20	0,20	0,19	0,15	0,15	0,13	1,00	0,13	0,10	0,15	0,32	20,0 %
Temperatura máxima	0,25	0,25	0,62	0,15	0,15	1,00	0,25	0,94	0,19	0,23	0,41	3,00 %
Temperatura mínima	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	1,00	1,00	4,00 %
Resistencia a los rayos UV	0,50	0,50	1,00	0,75	0,75	1,00	0,75	0,50	0,75	0,50	1,00	2,00 %
Absorción de agua	1,00	1,00	1,00	0,70	0,70	1,00	0,50	0,50	1,00	0,70	0,50	7,00 %
Costo	0,90	0,90	0,80	1,00	0,90	0,80	0,20	0,90	0,60	0,70	0,15	15,0 %
Disponibilidad comercial	0,90	1,00	0,90	1,00	0,80	0,70	0,50	1,00	0,90	0,60	0,60	20,0 %
Calificación	0,76	0,76	0,73	0,70	0,67	0,66	0,66	0,62	0,61	0,58	0,58	100 %
Jerarquía	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	10	

Fuente: elaboración de los autores a partir de simulaciones de ingeniería para el proyecto

El aporte de esta tabla radica en el análisis de los aislantes, de acuerdo con las necesidades de la tecnología que se desee diseñar y la parametrización de las variables. Es decir, el aislante es componente fundamental para el desempeño óptimo de la tecnología.

Todos estos análisis fueron pensados para realizar el transporte de muestras biológicas donde se espera transportar máximo 96 viales en una caja portátil, con un volumen interno aproximado de 14 litros. Los análisis posteriores se elaboran con base en este diseño.

Otras variables de estudio son la potencia y la transferencia de calor requeridas para la

conservación de la temperatura. Se efectúa un análisis donde se plantean los diferentes casos de refrigeración y congelación de la caja y su contenido desde una temperatura de 30 °C, correspondiente a la temperatura máxima promedio en una región colombiana con altas temperaturas, hasta temperaturas entre -4 °C y 4 °C.

En la tabla 3, se observa la potencia requerida para el caso más conservador de trabajo, que sería llevar la caja y su contenido a la temperatura seleccionada desde la temperatura ambiental considerada; se presentan las potencias requeridas y otros valores de relevancia.

Tabla 3. Energías y potencias requeridas para enfriamiento

Temperatura inicial	°C	30,2	30,2	30,2
Temperatura final	°C	-4,00	-2,00	4,00
Resumen de masas				
Masa de contenido de viales	G	960	960	960
Masa de viales	G	780	780	780
Masa de los rack	G	1771	1.771	1771
Masa del aire	G	13,4	13,4	13,3
<i>Masa total</i>	G	3524	3524	3524
Energías requeridas				
Energía para enfriar contenido de viales	J	137.280	129.252	105.168
Energía para enfriar viales	J	22.338	21.032	17.113
Energía para enfriar polipropileno	J	116.266	109.467	89.069
Energía para enfriar aire	J	462	433	349
<i>Energía total</i>	J	276.346	260.184	211.699
Tiempo de calentamiento	H	1,00	1,00	1,00
Potencia requerida				
Potencia para enfriar contenido de viales	W	38,1	35,9	29,2
Potencia para enfriar viales	W	6,21	5,84	4,75
Potencia para enfriar polipropileno	W	32,3	30,4	24,7
Potencia para enfriar aire	W	0,13	0,12	0,10
<i>Potencia total</i>	W	76,8	72,3	58,8

Fuente: elaboración de los autores con base en simulaciones de ingeniería para el proyecto

Considerando un tiempo de enfriamiento de 1h, la potencia total de enfriamiento desde 30 °C hasta -4 °C se estima en 76,8 W, y hasta 4 °C se estima en

58,8 W. Este análisis se presenta como referencia; es probable que las muestras una vez sean introducidas a la caja ya se encuentren a temperaturas entre el rango explicado, y por lo tanto, el requerimiento energético sería inferior.

Para tomar una decisión adecuada en cuanto a la elección del aislante también fue necesario analizar la pérdida de potencia respecto a las características del aislante; por esto, en la figura 1 se presenta la pérdida de potencia en función del espesor del aislante poliuretano para las temperaturas analizadas.

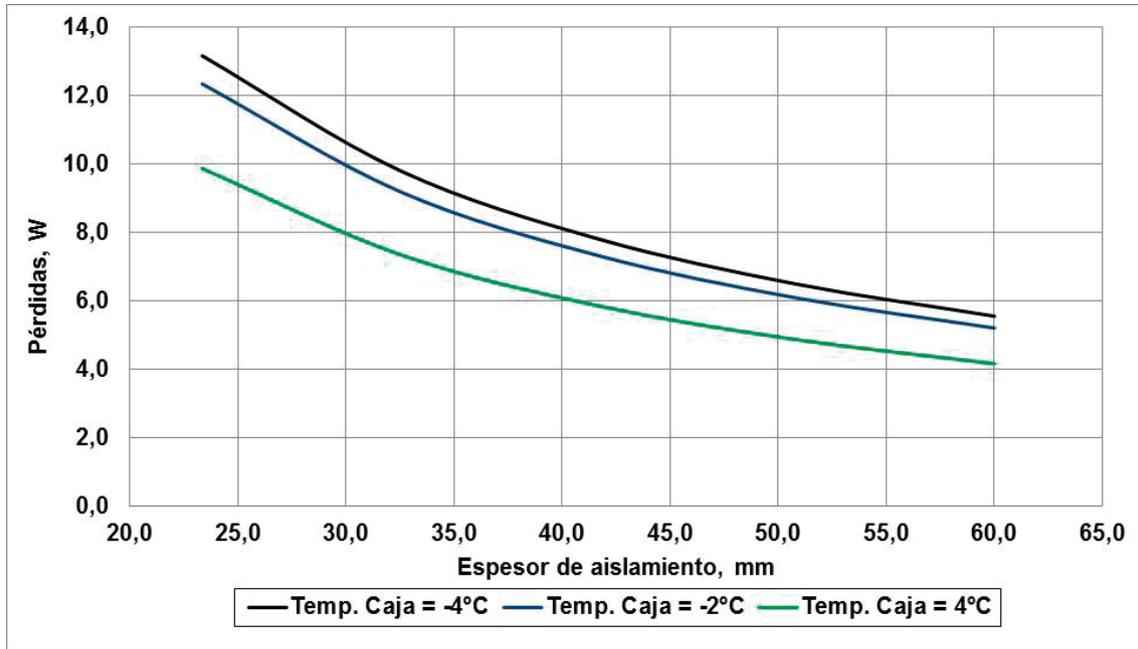
La pérdida de potencia se debe al diferencial entre la temperatura ambiente y la temperatura en la superficie exterior de la caja, al área superficial de la caja y al coeficiente de convección y radiación desde la caja. Para una temperatura requerida de -4 °C y un espesor de aislamiento de 4 cm, se estima una pérdida de potencia de 8 W, mientras que para una temperatura interna de 4 °C se estima una pérdida de potencia de 6 W. En la figura 2 se presentan las pérdidas de potencia empleando otro aislante (paneles de vacío).

La pérdida de potencia, empleando paneles de vacío como aislamiento para una temperatura interna de -4 °C y para un espesor de aislamiento de 4 cm, se estima en 2,20 W, 72,5 %, inferior a la pérdida de potencia asociada a emplear poliuretano bajo las mismas condiciones.

Para comparar los aislantes considerados, se presenta en la siguiente figura la relación del costo de aislamiento con cada material y las pérdidas de potencia asociadas en función al espesor de aislamiento. La figura 3 se presenta para una temperatura interna de -4 °C como caso de referencia.

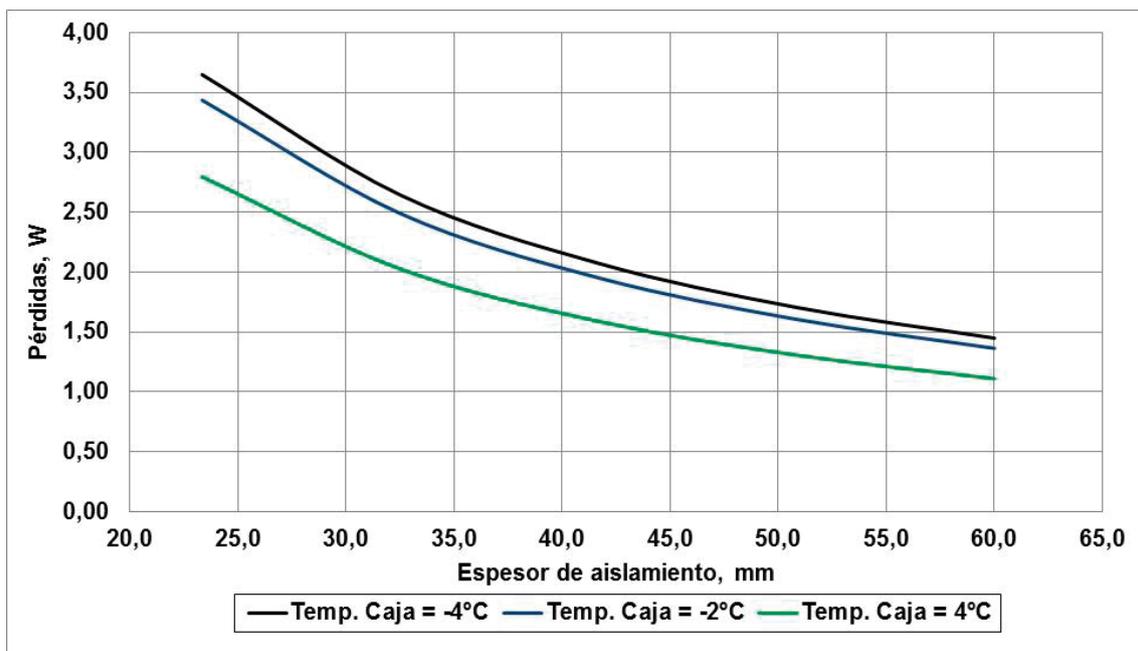
En la figura 3 las líneas continuas representan los costos de aislamiento, y las discontinuas, las pérdidas de potencia. El punto de cruce entre las líneas de costo y las pérdidas para cada material de aislamiento representa, de acuerdo con el eje de las abscisas, el espesor de aislamiento adecuado según el costo-beneficio que presenta el material para la aplicación. A un espesor de aislamiento de aproximadamente 12 mm se alcanza el punto de cruce para el VIP y a un espesor de 40 mm se alcanza el punto de cruce para el poliuretano. Ambos espesores representan similares costos de aislamiento y similares pérdidas de potencia. Por lo tanto, la opción de utilizar paneles de aislamiento al vacío bajo un espesor de aproximadamente 12 mm presenta ventajas con

Figura 1. Pérdida de potencia en función de la temperatura requerida empleando poliuretano como aislante



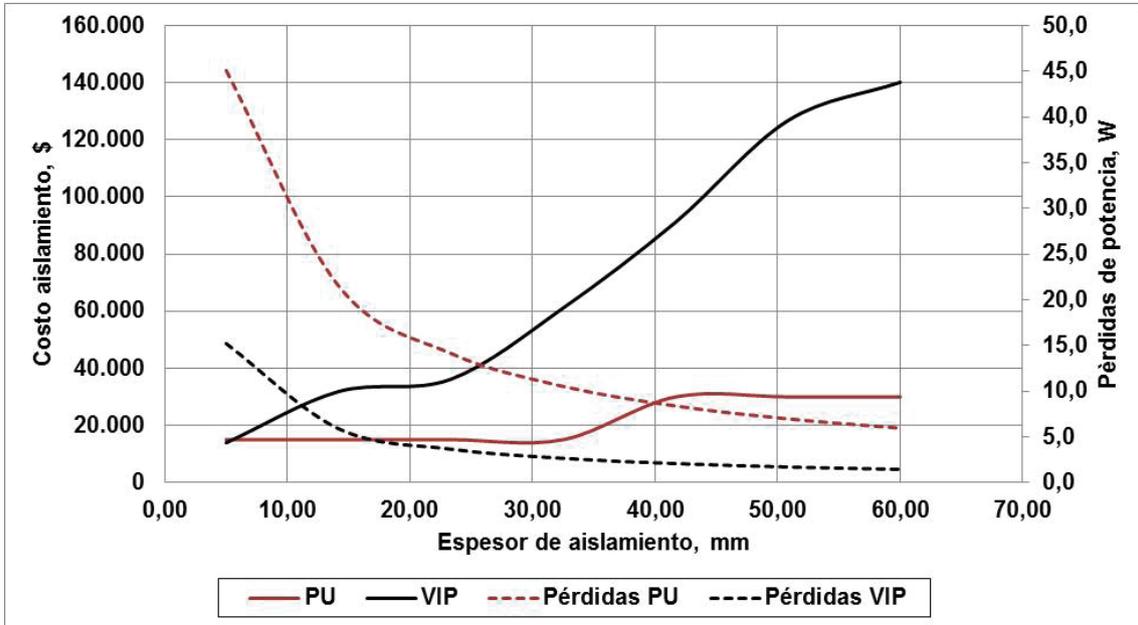
Fuente: elaboración de los autores a partir de simulación realizada en el proyecto

Figura 2. Pérdida de potencia en función de la temperatura requerida empleando paneles de vacío como aislante



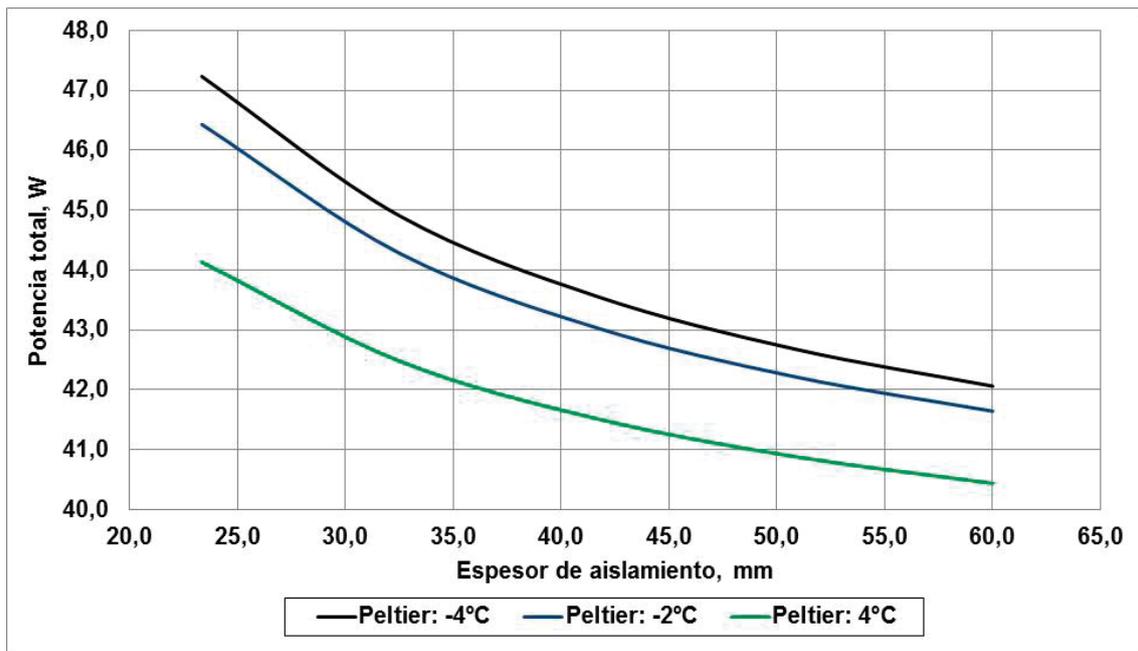
Fuente: elaboración de los autores a partir de simulación realizada en el proyecto

Figura 3. Comparación costos de aislamiento y pérdidas de potencia



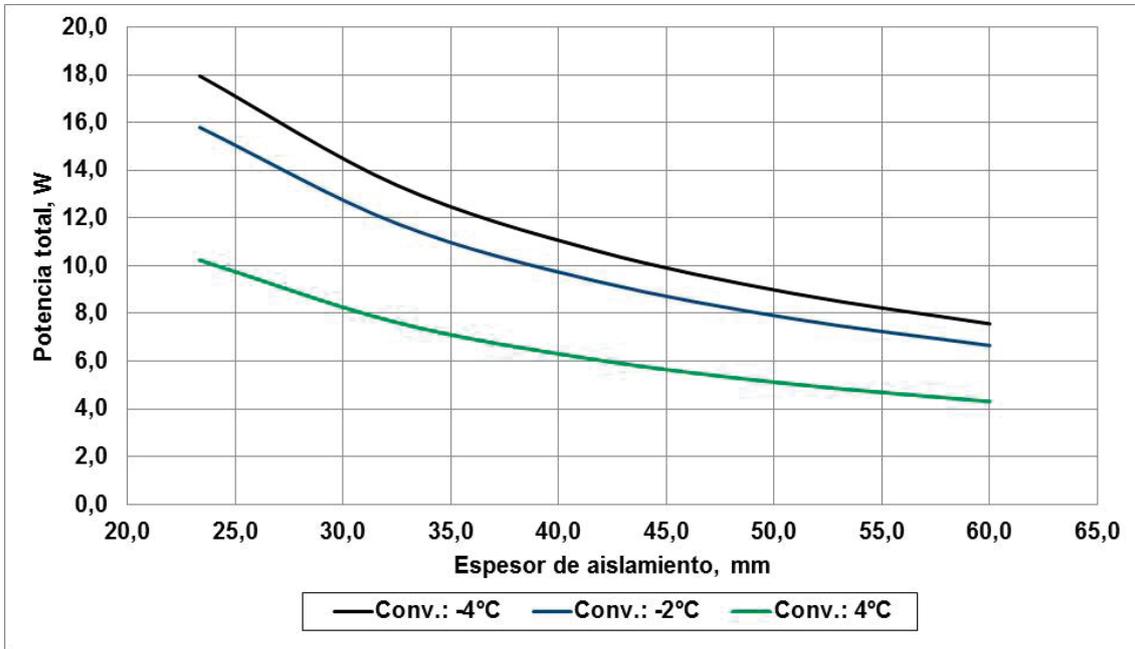
Fuente: elaboración de los autores a partir de simulación realizada en el proyecto

Figura 4. Potencia total requerida empleando sistema Peltier y poliuretano como aislamiento



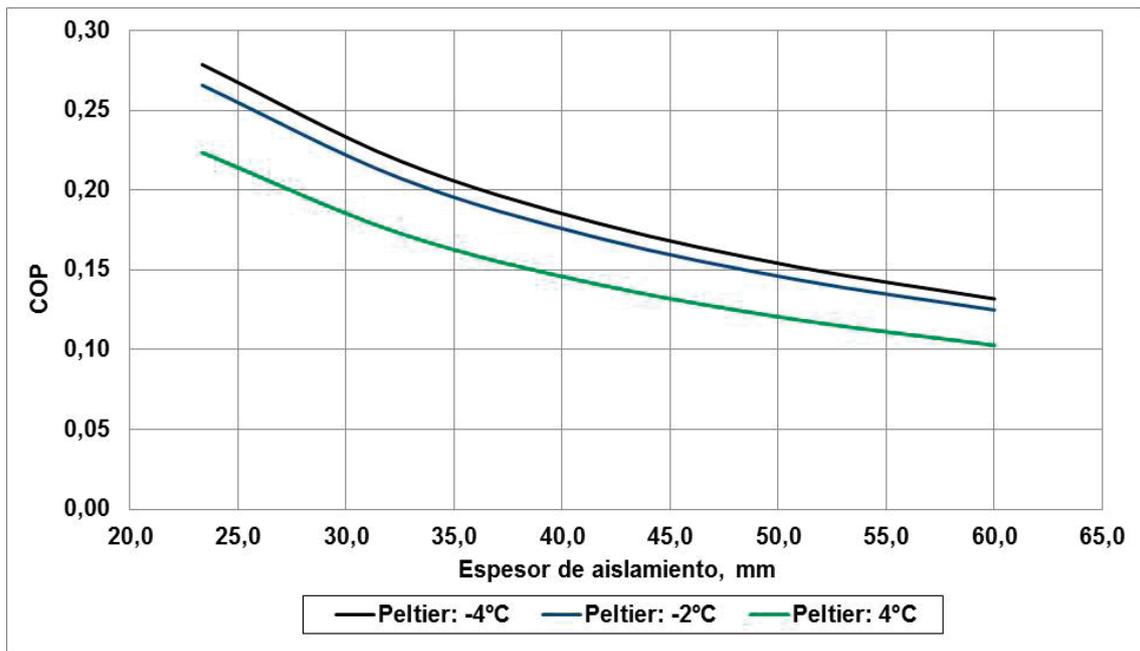
Fuente: simulación propia realizada en el proyecto

Figura 5. Potencia total requerida empleando ciclo de compresión de vapor y poliuretano como aislamiento



Fuente: simulación propia realizada en el proyecto

Figura 6. COP de sistema Peltier en función del esesor de aislamiento (poliuretano)



Fuente: simulación propia realizada en el proyecto

respecto al poliuretano. Sin embargo, se deben analizar otros parámetros para la selección de este aislante, como la disponibilidad regional, el tiempo de vida, el hermetismo y las demás variables exploradas en la tabla 3.

La energía requerida para cumplir con los requerimientos de refrigeración y / o congelación puede ser suministrada al sistema empleando diferentes ciclos de refrigeración; en este caso se comparan dos sistemas: *Peltier* y compresión de vapor. En la figura 4, se presenta la potencia total requerida para la refrigeración / congelación en la caja empleando un sistema *Peltier* y poliuretano como aislante.

Cuando se emplea un espesor de aislamiento de 4 cm y un sistema *Peltier* para cubrir los requerimientos energéticos, se requiere, para una temperatura interna en la caja de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, una potencia total de aproximadamente 43,8 W, mientras que para una temperatura interna de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ se requeriría una potencia total de aproximadamente 41,7 W. En la siguiente figura (figura 5) se presenta la potencia total requerida empleando un sistema de refrigeración de compresión de vapor.

Empleando un ciclo de refrigeración convencional, con un espesor de aislamiento de 4 cm, se requiere una potencia total de aproximadamente 11 W para una temperatura interna de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$; esta potencia es aproximadamente 75 % menor a la potencia total requerida con un sistema *Peltier*. La diferencia en la potencia total requerida con cada sistema se debe a la eficiencia asociada a cada uno de ellos o COP (*Coefficient of Performance*), el cual es la relación entre la potencia de refrigeración y la potencia total alimentada. Los sistemas *peltier* tienen coeficientes de operatividad o rendimiento (COP)^{6*} bajos, debido a la baja área de transferencia, a la conducción térmica interna y al efecto Joule, que genera un incremento de temperatura en el sistema por el paso de corriente eléctrica. En la figura 6 se presenta la relación entre el COP del sistema *Peltier* y el espesor de aislamiento empleando poliuretano como aislante.

Para una temperatura interna de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un espesor de aislamiento de 4 cm, se estima un COP de 0,18, mientras que para una temperatura de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ se estima un COP de 0,15.

Análisis complementario

Como complemento del análisis se realizaron unas simulaciones en cfx para comparar el desempeño de las alternativas de aislamiento de poliuretano y paneles de vacío. Considerando el aislamiento como uno de los factores fundamentales para lograr un menor consumo energético en cajas refrigeradas con celdas *Peltier* y, adicionalmente, con el ánimo de caracterizar las recirculaciones internas de aire frío para identificar localizaciones con mayor temperatura en los viales que se encuentran en el interior de la caja, se decidió simular, en ANSYS, casos variados que se presentan en la tabla 4.

Para entender mejor las implicaciones del uso de los aislantes a 20 mm de espesor y a 60 mm de espesor, se propone suponer un caso de transferencia de calor convectivo simplificado, donde se asume igual convección en ambos casos. Como consecuencia de estas simplificaciones, la relación entre el flux de calor del poliuretano y el flux de calor del panel de vacío sería directamente proporcional a la relación entre el delta de temperaturas de la pared y del ambiente. En este orden de ideas, se proponen las siguientes ecuaciones (Incropera & De Witt, 2000):

$$1. \text{ Relación de flux de calor} = \frac{\Delta T_{VIP}}{\Delta T_{PU}} \text{ (Ecuación 1)}$$

Por lo que para el caso de 20 mm se tiene lo siguiente:

$$2. \text{ Relación de flux de calor} = \frac{30.2-29.25}{30.2-27.4} = 0.34^{**} \text{ (Ecuación 2)}$$

Esto quiere decir que el uso de panel de vacío como material aislante representaría una transferencia de calor del 34 % respecto al poliuretano, lo que significa un ahorro importante en consumo energético.

Manteniendo la misma metodología, pero comparando el caso de poliuretano de 60 mm y elVIP de 20 mm, se tiene la siguiente ecuación:

$$3. \text{ Relación de flux de calor} = \frac{30.2-29.25}{30.2-29.2} = 0.95 \text{ (Ecuación 3)}$$

Esto quiere decir que se tiene una transferencia de calor similar para el caso de PU 60 mm 20 CFM y el VIP 20 mm 20 CFM. El resumen de resultados de las simulaciones se presenta a continuación:

6 * Véase Cengel & (1996).

Tabla 4. Resumen de resultados para los 12 casos simulados

CASOS	TEMPERATURA DE FUENTE DE FRÍO [°C]	T PROMEDIO EN VIALES (VIALES, TUBOS DE ENSAYO Y EPPENDORFS [°C])	T MAX EN VIALES [°C]	ÁREA EXTERNA [m ²]	FLUX DE CALOR EN PARED EXTERNA [W/m ²]	CALOR QUE SE TRANSFIERE EN PAREDES [W]
PU 60 mm 20 CFM VIALES	-2,0	-1,76	-0,97	0,73	6,68	4,87
PU 40 mm 20 CFM VIALES	-2,0	-1,70	-0,91	0,57	10,88	6,19
PU 20 mm 20 CFM VIALES	-2,0	-1,53	-0,31	0,43	22,26	9,54
PU 60 mm 30 CFM VIALES	-2,0	-1,84	-1,34	0,73	6,86	4,99
PU 40 mm 30 CFM VIALES	-2,0	-1,80	-1,15	0,57	11,25	6,40
PU 20 mm 30 CFM VIALES	-2,0	-1,67	-0,67	0,43	23,45	10,05
VIP 60 mm 20 CFM VIALES	-2,0	-1,93	-1,75	0,73	1,98	1,44
VIP 40 mm 20 CFM VIALES	-2,0	-1,91	-1,66	0,57	3,34	1,90
VIP 20 mm 20 CFM VIALES	-2,0	-1,84	-1,42	0,43	7,47	3,20
VIP 60 mm 30 CFM VIALES	-2,0	-1,96	-1,83	0,73	1,99	1,45
VIP 40 mm 30 CFM VIALES	-2,0	-1,94	-1,74	0,57	3,37	1,92
VIP 20 mm 30 CFM VIALES	-2,0	-1,56	-1,89	0,43	7,60	3,26

Fuente: elaboración de los autores con base en simulación de variables

En términos generales, la transferencia de calor hacia los exteriores permanece casi invariable en relación con el flujo de 20 CFM y 30 CFM de ventilador; de cualquier modo, el flujo impuesto sobre el ventilador sí influye sobre la temperatura máxima que alcanzan los elementos almacenados en el interior de la caja. Se observa que en el caso del poliuretano para 30 CFM las temperaturas máximas en los viales estuvieron 0.3 °C por debajo de las temperaturas obtenidas a 20 CFM, y para el uso de panel de vacío las temperaturas máximas de los viales con ventilador a 30 CFM estuvieron a 0.08 °C por debajo de las temperaturas logradas a 20 CFM. Esto implica que la sensibilidad en la distribución de frío a los cambios de potencia del ventilador resulta ser baja en el uso de paneles de vacío.

Con base en los anteriores análisis se decidió usar paneles de vacío y celdas *Peltier* para el desarrollo

de la caja portátil para transporte de biológicos y realizar con estas las primeras pruebas, ya que se tiene potencial para desarrollos compactos de cajas refrigeradoras, debido a que el desempeño de un panel de vacío de 20 mm de espesor es similar al desempeño de un panel de poliuretano de 60 mm de espesor. También se logra un alto grado de aislamiento y mínimas ganancias de calor desde el ambiente reduciendo focos de entrada de calor, y aumentando autonomía de baterías y la uniformidad en las temperaturas en el interior de la caja.

Los anteriores análisis evidencian que para el desarrollo de este tipo de tecnologías es necesario combinar una serie de variables de acuerdo con la aplicación específica en cada caso; las variables son interdependientes entre sí.

DISCUSIÓN

Uno de los aportes importantes de este artículo radica en que, una vez identificada la necesidad latente de desarrollos en esta temática por parte de la industria, se hace necesario realizar la optimización de la tecnología en cuanto a sus características técnicas. El incremento y la sofisticación actual de la logística requerida para el manejo de materiales perecederos que precisan de conservación de cadena de frío hacen necesaria la evaluación de diversas tecnologías que sean principalmente funcionales, que posean alta confiabilidad para la conservación de frío estable, que tengan disponibilidad comercial en el mercado local y que sean económicas para permitir su masificación.

Las tecnologías actuales más comunes para la conservación de perecederos se basan en el uso de elementos pasivos de enfriamiento (en este ámbito destaca el hielo); sin embargo, la homogeneidad de la temperatura al ser enfriamiento pasivo y no controlar la transferencia de calor en las cajas refrigerantes se ve comprometida, así mismo la autonomía derivada del tiempo que la tecnología es capaz de conservar la temperatura sin carga adicional.

El equipo portable de Stirling que ha sido objeto de estudio en este artículo cuenta con tecnología de enfriamiento por compresión de vapor y ofrece todas las características necesarias para un control preciso de la cadena de frío; sin embargo, la portabilidad del equipo está limitada por sus dimensiones y, adicionalmente, su precio es aproximadamente 264 USD / litro. Por su parte, la caja Vericor Cool Cube 420 está pensada para transporte sobre el suelo, limitando su acceso a zonas de topografía difícil, y su costo es aproximadamente 46USD / litro; además, usa tecnología de enfriamiento pasivo presentando los inconvenientes de homogeneidad de temperatura y autonomía condicionada.

Esta investigación será de gran utilidad para tomar decisiones para la fabricación de una caja refrigeradora que cumpla con las especificaciones de funcionalidad y confiabilidad que requiere la conservación de cadena de frío en vacunas y perecederos, empleando combinaciones de tecnologías de aislamiento y refrigeración económicas con un valor comercial inferior a 10USD / litro de material refrigerado y técnicamente idóneas para la logística de los materiales perecederos y biológicos.

Adicionalmente al análisis planteado a lo largo del artículo, es importante dejar como línea de trabajo para futuros artículos o proyectos de investigación en

el tema, el trabajar sobre la combinación de variables asociadas a la refrigeración y su relación con el gasto energético, que finalmente se convierte en la variable relevante a lo largo de cualquier estudio relacionado con la conservación y la cadena de frío. Si bien la elección del aislante es fundamental, los parámetros asociados al gasto de energía para la transferencia de calor se convierten, entonces, en el punto crítico para el diseño de tecnologías tendientes a la conservación y refrigeración de productos perecederos y biológicos.

CONCLUSIONES

La caja de refrigeración portátil es una tecnología que se emplea para conservación, almacenamiento y transporte, cuyo propósito se centra en mantener las condiciones adecuadas durante tiempos prolongados bajo condiciones de refrigeración para muestras e insumos biológicos o alimentos perecederos, alternando conexión eléctrica con autonomía por medio de baterías, lo que la hace apta, también, en aplicaciones en zonas de alta intermitencia energética o con un alto índice de cortes de energía.

Las cajas de refrigeración comerciales emplean básicamente tres métodos de refrigeración: ciclos de compresión, termoelectrónicos y hielo. El aislante más empleado es el poliuretano con recubrimiento de polietileno de alta densidad (HDPE). La caja de refrigeración se especifica con un volumen interno de 14,7 L, con una capacidad para 96 viales; esto representa 960 dosis de vacuna por caja, considerando cada dosis de 1 ml.

Considerando un tiempo de enfriamiento de 1 h, la potencia total de enfriamiento desde 30,2 °C hasta -4 °C de la caja con los viales se estima en 76,8 W, y hasta 4 °C, se estima en 58,8 W.

Se analizaron y simularon dos materiales de aislamiento: poliuretano (PU) y VIP (paneles de aislamiento al vacío). Se encontraron pérdidas de potencia similares y costo de aislamiento similar cuando se utiliza un espesor de aislamiento de PU de aproximadamente 40 mm y un espesor de aislamiento de VIP de aproximadamente 12 mm; la opción de utilizar paneles de aislamiento al vacío trae ventajas con respecto al poliuretano. Sin embargo, se deben analizar otros parámetros para la selección de este aislante, como la disponibilidad regional, el tiempo de vida, el hermetismo, la resistencia a la intemperie, la resistencia a los rayos UV, la confiabilidad y la funcionalidad.

Se simularon, en ANSYS, varias condiciones de flujo desde el ventilador del sistema *Peltier* de acuerdo con la temperatura requerida en la caja, considerando los casos de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. De las simulaciones se concluye que el uso de panel de vacío como material aislante representaría una transferencia de calor del 34 % respecto al poliuretano cuando se emplea un espesor de PU de 60 mm, en comparación con VIP con el mismo espesor de aislamiento, y para una temperatura objetivo de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que significa un ahorro importante en consumo energético de similar proporción, es decir, 34 %.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Association of Architectural Aluminium Manufacturers of South Africa. (2005). *Thermal Insulation Handbook*. Pretoria: The Association.
- Budynas, R. et al. (2008). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. New York: McGraw-Hill.
- Cengel, Y. & Boles, M. (1996). *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.
- Denco. (S. F.). *6 Liter cooler Bag*. Obtenido de <http://hisupplier.com/>: <http://dengke.en.hisupplier.com/product-730114-6-Liter-cooler-Bag.html> . Consultado Mayo de 2017.
- Eppendorf. (2016). *Flex tubes*. Obtenido de <https://online-shop.eppendorf.us/>: https://online-shop.eppendorf.us/US-en/Laboratory-Consumables-44512/Tubes-44515/Flex-Tubes-PF-9186.html?_ga=1.175482786.1228303268.1469125514.
- Galeano, M. (2004). *Diseño de proyectos en la investigación cualitativa*. Medellín: Fondo Editorial Universidad Eafit.
- Incroper, F. & De Witt, D. (2000). *Fundamentos de transferencia de calor*. 4. Ed. México: Pearson Educación.
- Koolatron, A. (2010). *P-95 Travel Server*. Obtenido de [koolatrononline.stores: http://koolatrononline.stores.yahoo.net/p-95-travel-saver.html](http://koolatrononline.stores.yahoo.net/p-95-travel-saver.html). C
- Koolatron B. (2010). *Koolatron P-75 Kool Kaddy - 12 Volt Cooler*. Obtenido de koolatrononline.stores: <http://koolatrononline.stores.yahoo.net/kool-kaddy.html>. Consultado Mayo de 2017.
- LabRepCo. (S.F.). *"Shuttle" Benchtop -86 °C Ultra Low Temp Freezer*. Obtenido de <https://www.labrepco.com/>: https://www.labrepco.com/store/categories/view-product/id/1871/product-title/Shuttle_Benchtop_86_C_Ultra_Low_Temp_Freezer/category-id/4243/category-title/Stirling_Ultracold_Shuttle. Consultado Mayo de 2017.
- Medline. (2016). *VACUETTE Serum Collection Tubes by Greiner*. Obtenido de <http://www.medline.com/>: <http://www.medline.com/jump/product/x/Z05-PF29924> . Consultado Mayo de 2017.
- Thermal Insulation Association of Canada. (2010); *Best Practices Guide for industrial insulation*. Toronto: TIAC.
- Technavio. (2016). *Technavio*. Obtenido de <http://www.technavio.com/> Consultado Mayo de 2017.
- Tecnova. (S.F.). Dispositivo de aislación y transferencia térmica para cajas isotérmicas de alta eficiencia energética. Medellín: Tecnova.
- Vericor A. (2016). *Vaccine Transport Cooler at Refrigerator Temperatures for Fresh Vaccine (VT-420)*. Obtenido de <http://www.vericormed.com/> Cool Cube 420: <http://www.vericormed.com/product/cooler-cool-cube-420-vaccine-transport-cooler-at-refrigerator-temperatures-fresh-vaccine-vt-420/> Consultado Mayo de 2017.
- Vericor B. (2016). *Transport coolers*. Obtenido de <http://www.vericormed.com/>: <http://www.vericormed.com/cool-cube-transport-coolers/> Consultado Mayo de 2017.
- World Health Organization. (2009). *PQS catalogue*. Obtenido de World Health Organization : http://apps.who.int/immunization_standards/vaccine_quality/pqs_catalogue/PdfCatalogue.aspx?cat_type=device. Consultado Mayo de 2017.
- Yeti. (2016). *Tundra Roadie* . Obtenido de <http://yeti.com/>: <http://yeti.com/roadie-cooler/> Consultado Mayo de 2017.

- Zambrano, C. (2014). Propuesta de modelo de medición de proyectos de investigación e innovación en el área de ciencias sociales y humanas en la Universidad de Medellín <https://repository.upb.edu.co>. Obtenido de <https://repository.upb.edu.co/handle/123456789/1517> Consultado Mayo de 2017.
- Zúñiga, A; Sánchez, A; Cuesta, C. y Granados, J. (2014). *Fortalecimiento de las capacidades institucionales de transferencia, comercializaion y valoración de tecnologías: estudio de caso*. Medellín: Lasallista.
- Zúñiga, A. et al. (2015). Cartilla virtual Convocatoria IFR 002 para fortalecimiento de las capacidades institucionales de transferencia, comercialización y valoración de tecnologías desarrolladas por los grupos de investigación G-3IN, GRIAL y GAMA. Recuperado de <http://observatoriolasallista.edu.co/tecnologias/libro/> Consultado Mayo de 2017.