

RELITEC'S

REVISTA

REVISTA LATINOAMERICANA DE INNOVACIÓN
TECNOLÓGICA, CIENCIA Y SOCIEDAD

2^{da} EDICIÓN.

N° 2 Vol. 2.



Revista Latinoamericana de Innovación Tecnológica, Ciencia y Sociedad (RELITEC´S), Año 2, No 2, septiembre 2015 - septiembre 2016, es una publicación anual editada por el Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, a través de las divisiones de Ingeniería en Administración, Ingeniería Industrial, Ingeniería en Gestión Empresarial y Arquitectura, Domicilio Conocido S/N El Saucillo Huichapan, Hidalgo, CP 42411, tel. 7617248080, www.iteshu.edu.mx, iteshu@iteshu.edu.mx, editor responsable: Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, reserva de derechos al uso exclusivo No 04- 2015-070113081900-203, ISSN 2395-972X, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, Responsable de la última actualización de este número, Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Domicilio Conocido S/N El Saucillo Huichapan, Hidalgo, CP 42411, Municipio de Huichapan estado de Hidalgo, Fecha ultima de modificación, 30 de septiembre de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Tecnológico Superior de Huichapan.

Consejo Editorial

Nombre	Cargo
MGPA. María Angélica Bravo Cadena	Presidenta del consejo editorial
MGPA. Justo Juan Manuel Martínez Licona	Secretario académico
Ing. Jackelin Bautista Chávez	Secretaria técnica
MTI. María del Rocío López Bravo	Secretaria Operativa
CP. Roberto Gonzales Vargas	Vocal
M. en C. Miguel Ángel Espíndola Lugo	Vocal

Comité Editorial

Nombre	Cargo
Dr. Juan Serrano Arellano	Jefe Editorial
Dr. Francisco Jaime Arroyo Rodríguez	Coordinador de asistente editorial
M.S.M. Daniel Napoleón Gómez Balbuena	Asistente editorial
Mtro. Jorge Carlos Tuyub Moreno	Asistente editorial
Mtro. Jorge Alberto Mendoza Domínguez	Asistente editorial
M. en A. Angélica Guzmán Espinosa	Asistente editorial
Ing. Juan Carlos Rodríguez Uribe	Asistente editorial
Mtra. Cindy Esmeralda Alvarado Chi	Diseñador y diagramador de textos
Ing. Erick Hernández Nájera	Encargado de soporte técnico
LI. Saulo Gregorio Cristales Bonilla	Encargado de soporte técnico

Contenido

Determinación de la difusividad y conductividad térmica de materiales.....	1
Estudio térmico de los compartimentos de un refrigerador doméstico: influencia del ensuciamiento del condensador.....	11
Measurements of solar reflectance and thermal emittance of roof coatings available in Mexico.....	15
Optimización del sistema de reparto en empresa panificadora por medio del modelo de transporte y programación lineal.....	20

Determinación de la difusividad y conductividad térmica de materiales

E.V. Macias-Melo*, K.M. Aguilar-Castro, I. Y. Pérez-Olán, K. A. López Moral, I. A. Hernández-Pérez

División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad s/n, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Vhsa, Centro, Tabasco, C.P. 86040, México.

**Correo de autor de contacto: edgarvmaciasmelo@gmail.com*

Resumen—La conductividad térmica (λ) y la difusividad térmica (α) de los diferentes materiales de construcción juegan un papel importante para la optimización de la energía dentro de las construcciones, por lo cual, se deben seleccionar adecuadamente para optimización del uso de la energía. En la selección de materiales existen muchos parámetros que definen su desempeño, pero todos pueden ser obtenidos a partir de λ y α . En este trabajo se desarrolló una metodología para determinar λ y α en un problema de difusión de calor bidimensional en estado transitorio, mediante métodos inversos aplicados a la ecuación de difusión de calor. Para ello, se estableció un caso de estudio con sus respectivas condiciones de frontera, y el rango de difusividad sobre el cual se encuentran los materiales utilizados en una construcción. El problema de estudio se resolvió utilizando el método de diferencias finitas. Como resultado se obtuvo la evolución del campo de temperaturas en el modelo de estudio, a partir de lo cual, se obtuvo la difusividad y la conductividad térmica. En el estudio se obtuvieron parámetros óptimos para la solución de la ecuación de calor transitorio, se encontró una relación biyectiva entre el tiempo y el valor de la difusividad. Los valores de los errores estándares de estimación máximos obtenidos fueron de 2.08×10^{-12} .

Palabras clave —conductividad térmica, difusividad térmica, materiales de construcción.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el sector de la construcción es uno de los grandes consumidores de energía, se estima que su consumo mundial de energía es de aproximadamente 40% (Department of energy, DOE, 2007; Hong Kong Energy Statistics, 2008; Tzikopoulos *et al.* 2005; Gupta, 2000). Debido al rápido aumento en el nivel de vida, los cambios climáticos y el desarrollo económico, se contemplan tendencias crecientes en el consumo de energía. Por lo cual, promover la eficiencia energética en este rubro ha llegado a convertirse en un punto estratégico para el desarrollo sustentable de varios países (Zhu Na *et al.*, 2009). Para lograr esto, se debe realizar una selección adecuada de los materiales considerando sus propiedades, buscando una adecuada transferencia de calor dependiendo de la aplicación.

La sustentabilidad del suministro de energéticos primarios y la sustentabilidad ambiental han impulsado un considerable crecimiento de la demanda de materiales con propiedades termofísicas conocidas, lo cual ha conducido a regulaciones en el mercado de estos productos tendientes al establecimiento de un mercado cada vez más estable y con certidumbre. Esto ha dado lugar a desarrollar y establecer normatividades principalmente en Europa, Estados Unidos, Canadá y otros países, incluyendo México, las cuales generalmente se basan en las normas emitidas por ISO (International Organization for Standardization) y ASTM (American Society for Testing Materials).

Actualmente, en México solamente se evalúa la conductividad térmica y el calor específico como un requisito para la venta de materiales con la denominación de aislantes según la NOM-018-ENER establecida por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) y el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). A pesar de los esfuerzos de la CONUEE y el ONNCCE para establecer metodologías para la determinación de la transferencia de calor con menor incertidumbre, las metodologías propuestas son todas en estado permanente, lo cual solo es válido para materiales de baja densidad y bajo calor específico. Sin embargo, cuando se tienen materiales con características distintas, el cálculo de la transferencia de calor con estas metodologías genera discrepancias significativas entre los valores de valor flujo de calor calculado y el real. Además, cabe comentar que las diferentes metodologías descritas en las normas para la determinación de la conductividad térmica en México (NMX-C-181 y NMX-C-189) y en el mundo (ASTM C-177 y ASTM E1225) requieren que el sistema experimental alcance el estado permanente, lo cual, implica periodos de prueba del orden de horas o días.

Por lo cual, una alternativa para reducir los tiempos en la determinación de la conductividad térmica y además, obtener la difusividad térmica son los métodos inversos de transferencia de calor. Estos métodos se aplican conociendo la evolución de las temperaturas en un conjunto de puntos en el material, bajo análisis con condiciones de frontera conocidas.

Para este propósito, en este proyecto se desarrollará una metodología para determinar la conductividad térmica y la difusividad térmica mediante métodos inversos de transferencia de calor aplicados a la ecuación de difusión de calor, en estado transitorio.

II. MODELO DE ESTUDIO

Cuando un material es puesto bajo condiciones de frontera conocidas, la velocidad de transferencia de calor, así como la cantidad de energía transmitida y almacenada dependerán de la difusividad térmica del material. Esto se verá reflejado en la evolución del comportamiento de las temperaturas de un tiempo a otro para un punto determinado.

Para estudiar este fenómeno, se aborda un problema de difusión de calor bidimensional en estado transitorio. El modelo físico y las condiciones de frontera del caso de estudio se presentan de forma esquemática en la Figura 1.

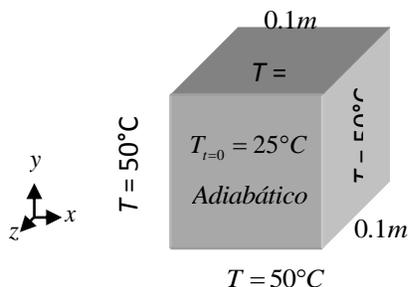


Fig. 1. Modelo físico.

En el modelo físico representado en la Figura 1, se muestra una sección del material que será puesta bajo prueba con el fin de determinar la difusividad térmica. Dentro de las consideraciones realizadas para el caso de estudio se establece que: el material se almacena antes de realizar la prueba en un lugar a una temperatura fija de 25°C, con el fin de que transcurrido un tiempo, se pueda considerar una distribución inicial de temperatura de 25°C. Las caras del material en dirección “z” se consideran adiabáticas ya que están aisladas con el fin de poder sujetar la muestra sin afectar la temperatura del material. En las caras restantes, se considera una temperatura de 50°C, sobre estas caras se medirá la temperatura en tres puntos del material, sobre un

plano central en el eje z. En el modelo físico no se considera ningún tipo de generación de energía al interior del material, por lo que, es cero.

III. MODELO MATEMÁTICO

Para este estudio se resolverá primero la ecuación bidimensional de difusión de calor transitoria mediante diferencias finitas y posteriormente, se seleccionarán un conjunto de puntos para obtener la difusividad térmica empleando los métodos inversos de transferencia de calor.

A. Ecuación de difusión de calor

El esquema del caso de estudio para la obtención del modelo matemático de difusión de calor tridimensional transitorio se muestra en la Figura 2.

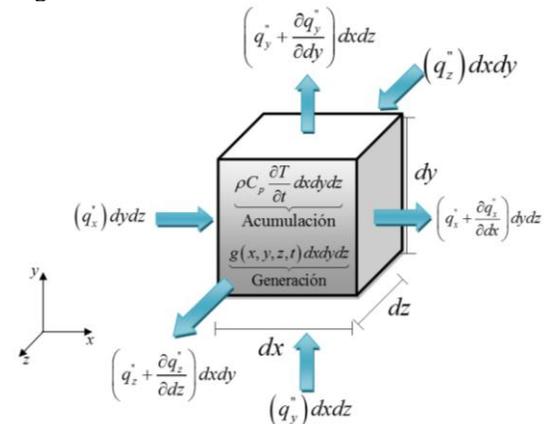


Fig. 2. Balance de energía al interior de un volumen de control.

El modelo se obtiene a partir de un balance de energía sobre un volumen diferencial, en donde la energía acumulada es igual a la energía que entra menos la energía que sale más la energía que se genera, lo cual, puede expresarse mediante,

$$\text{Acumulación} = \text{Entra} - \text{Sale} + \text{Genera} \quad (1)$$

La Figura 2 muestra de forma gráfica la acumulación, generación, las entradas y salidas de energía en forma de calor del volumen diferencial considerando la Ecuación (1). Considerando el diagrama de la Figura 2, se sustituyen los términos de la Ecuación (1) obteniendo el cambio de energía al interior del volumen de control como se muestra en la Ecuación (2).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz = \underbrace{\left(q_x'' \right) dy dz + \left(q_y'' \right) dx dz + \left(q_z'' \right) dx dy}_{\text{Entrada}} \dots$$

$$- \left[\left(q_x'' + \frac{\partial q_x''}{\partial x} dx \right) d_y d_z + \left(q_y'' + \frac{\partial q_y''}{\partial y} dy \right) d_x d_z + \left(q_z'' + \frac{\partial q_z''}{\partial z} dz \right) d_x d_y \right] \dots$$

$$+ \underbrace{g(x, y, z, t) dx dy dz}_{\text{Generación}} \quad (2)$$

El flux de calor a través de las caras se determina de acuerdo a la Ley de Fourier como se muestra en la Ecuación (3).

$$q_n'' = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3)$$

Sustituyendo la Ecuación (3) en la Ecuación (2) y simplificando se obtiene,

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\lambda \frac{dT}{dy} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda \frac{dT}{dz} \right) \right] + g(x, y, z, t) \quad (4)$$

La Ecuación (4) define la difusión de energía en un medio de conductividad térmica no homogénea. Si el medio se considera homogéneo con conductividad térmica independiente del espacio, la ecuación se puede escribir como,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + g(x, y, z, t) \quad (5)$$

La difusividad térmica se determina como,

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (6)$$

La Ecuación (5) es una ecuación diferencial parcial de tipo parabólica, la cual requiere para su solución dos condiciones de frontera por cada dirección, una condición inicial, es decir, la distribución de temperaturas en el interior del material y la función de distribución de la generación de calor.

La condición inicial puede ser o no una función dependiente del espacio, físicamente representa la distribución de temperaturas al inicio del

experimento y puede representarse como, $T = f(x, y, z)$ para $t = 0$.

La distribución inicial puede ser independiente de las direcciones, es decir, un valor constante en todo el material como el caso de modelo físico de la Figura 1. Para el caso de las condiciones de frontera, estas pueden ser de tres clases. En la condición de frontera de *primera clase* (condición de Dirichlet) se conoce la distribución de temperaturas en la frontera, esta distribución puede depender del espacio y del tiempo. Esta puede expresarse mediante las Ecuaciones (7)-(9).

$$T = f(y, z, t) \text{ para } x = 0 \text{ ó } x = l_x \quad (7)$$

$$T = f(x, z, t) \text{ para } y = 0 \text{ ó } y = l_y \quad (8)$$

$$T = f(x, y, t) \text{ para } z = 0 \text{ ó } z = l_z \quad (9)$$

Este tipo de condiciones de frontera se presentan en la dirección x y y del modelo físico, con un valor constante.

En la condición de frontera de *segunda clase* (condición de Newmann) se conoce el flux de calor, y puede depender del espacio y del tiempo, se puede expresarse como,

$$q_x'' = f(y, z, t) \text{ ó } -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = f(y, z, t) \text{ para } x = 0 \quad (10)$$

$$q_x'' = f(y, z, t) \text{ ó } -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = f(y, z, t) \text{ para } x = l_x \quad (11)$$

$$q_y'' = f(x, z, t) \text{ ó } -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = f(x, z, t) \text{ para } y = 0 \quad (12)$$

$$q_y'' = f(x, z, t) \text{ ó } -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = f(x, z, t) \text{ para } y = l_y \quad (13)$$

$$q_z'' = f(x, y, t) \text{ ó } -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = f(x, y, t) \text{ para } z = 0 \quad (14)$$

$$q_z'' = f(x, y, t) \text{ ó } -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = f(x, y, t) \text{ para } z = l_z \quad (15)$$

Este tipo de condiciones de frontera en su forma homogénea representa una condición de frontera conocida como adiabática. Este tipo de condiciones de frontera se presenta en una dirección del modelo físico.

Para el caso de las condiciones de frontera de tercera clase (condición de frontera de Robin), se realiza un balance en la frontera entre el flux de calor conductivo y el flux convectivo. El coeficiente convectivo y la temperatura en el

fluido pueden depender del espacio y tiempo, se puede expresar como,

$$q_x'' = h(T - T_\infty) \text{ ó } -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h(y, z, t)[T - T_\infty(y, z, t)]$$

para $x = 0$ (16)

$$q_x'' = h(T - T_\infty) \text{ ó } \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h(y, z, t)[T - T_\infty(y, z, t)]$$

para $x = l_x$ (17)

$$q_y'' = h(T - T_\infty) \text{ ó } -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = h(x, z, t)[T - T_\infty(x, z, t)]$$

para $y = 0$ (18)

$$q_y'' = h(T - T_\infty) \text{ ó } \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = h(x, z, t)[T - T_\infty(x, z, t)]$$

para $y = l_y$ (19)

$$q_z'' = h(T - T_\infty) \text{ ó } -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h(x, y, t)[T - T_\infty(x, y, t)]$$

para $z = 0$ (20)

$$q_z'' = h(T - T_\infty) \text{ ó } \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h(x, y, t)[T - T_\infty(x, y, t)]$$

para $z = l_z$ (21)

Con las **Ecuaciones (7)-(21)** se muestran los tipos de condiciones de frontera con las que se pueden representar todos los diversos casos físicos en las fronteras.

El modelo matemático para el sistema físico representado en la **Figura 1** es reducido a bidimensional, esto debido a la consideración de fronteras adiabáticas en $z = 0$ y $z = 0.1 \text{ m}$ y que el resto de las fronteras y la condición inicial no dependen de la dirección z . La generación de calor se considera igual a cero, por lo que, este se desprecia de la ecuación.

La ecuación gobernante para el modelo físico en $0 < x < 0.1 \text{ m}$, $0 < y < 0.1 \text{ m}$, $t > 0$, es

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (22)$$

Con condición inicial $T = 25^\circ\text{C}$ para $t = 0$, en $0 \leq x \leq 0.1 \text{ m}$, $0 \leq y \leq 0.1 \text{ m}$, y con condiciones de frontera de primera clase, $T = 50^\circ\text{C}$ en $x = 0$, $x = 0.1 \text{ m}$, $y = 0$, $y = 0.1 \text{ m}$ para $t > 0$.

B. Método de Diferencias Finitas

Para obtener la solución de las Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP) se utiliza el método de diferencias finitas que consiste en cuatro pasos:

Paso 1.- Discretización espacial del elemento a evaluar.

Se define la cantidad de número de nodos en que se quiere dividir cada dirección. En el caso de estudio se selecciona un número impar de nodos de forma que se puedan tener nueve nodos, incluyendo uno en el centro, para la comparación entre corridas con mayor cantidad de nodos. Los puntos seleccionados en material son los siguientes:

- El punto P_1 se encuentra en el centro y su posición es $x = 0.05 \text{ m}$, $y = 0.05 \text{ m}$.
- El punto P_2 para el sistema físico se repite en valor sobre las cuatro posiciones ($x = 0.025 \text{ m}$, $y = 0.025 \text{ m}$), ($x = 0.025 \text{ m}$, $y = 0.075 \text{ m}$), ($x = 0.075 \text{ m}$, $y = 0.025 \text{ m}$) y ($x = 0.075 \text{ m}$, $y = 0.075 \text{ m}$).
- El punto P_3 para el sistema físico se repite en valor sobre las cuatro posiciones ($x = 0.05 \text{ m}$, $y = 0.025 \text{ m}$), ($x = 0.05 \text{ m}$, $y = 0.075 \text{ m}$), ($x = 0.075 \text{ m}$, $y = 0.05 \text{ m}$) y ($x = 0.075 \text{ m}$, $y = 0.05 \text{ m}$).

En la **Figura 3** se muestra la distribución de los nodos.

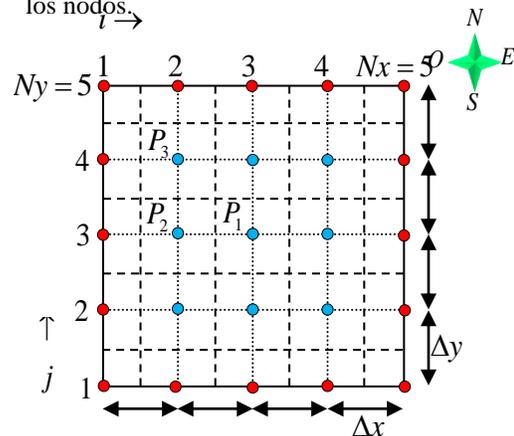


Figura 3. Discretización del modelo físico.

Todos los nodos en rojo corresponden a la frontera mientras que los nodos en azul corresponden al interior. El incremento para una distribución uniforme de nodos en material está dado por la razón entre la longitud entre el número de nodos menos. Para tener los mismos puntos de comparación se requiere que se incremente el número de nodos de la siguiente forma,

$N_x=N_y=5+(n \times 4)$, donde n es un número entero positivo.

Paso 2.- Conversión de las derivadas a una aproximación a través de las series de Taylor con discretización adelantada para la primera derivada y centrada para la segunda derivada.

Paso 3.- Reducción de las ecuaciones a una matriz de ecuaciones algebraicas.

Paso 4.- Solución del sistema de ecuaciones algebraicas.

IV. METODOLOGÍA

En la **Figura 4** se presenta un diagrama esquemático del algoritmo de solución del caso de estudio, el cual fue programado utilizando el Software Matlab ®.

El primer paso en la metodología propuesta es definir el intervalo de difusividad térmicas entre el que se espera se encuentre el valor de la difusividad térmica del material bajo prueba. Para este caso, el intervalo de difusividad térmica se tomó considerando los valores de materiales para construcción reportados en la NOM-008-ENER.

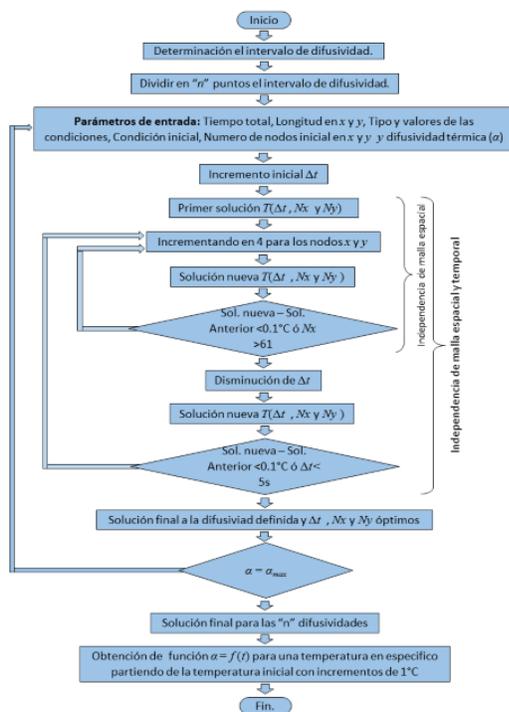


Fig. 4. Diagrama de proceso de solución del caso de estudio.

En la **Tabla 1** se muestran algunos valores de los materiales de construcción. Tomando en consideración la información de la difusividad el límite inferior del intervalo fue de $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ mientras que el límite superior es de $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

TABLA 1.
DIFUSIVIDAD TÉRMICA DE DIFERENTES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

MATERIAL	DIFUSIVIDAD (m^2/s)
Ladrillo de cromita	4.3760×10^{-8}
Concreto	6.9169×10^{-7}
Arcilla refractaria cocida	5.8000×10^{-7}
Arcilla	1.0118×10^{-8}
Piedra	
Granito	1.3840×10^{-8}
Caliza	1.2170×10^{-8}
Arenisca	1.9460×10^{-8}
Mármol	1.3490×10^{-8}
Cuarcita	1.8400×10^{-8}
Madera	
Roble	1.0500×10^{-7}
Ciprés	1.2254×10^{-7}

Una vez seleccionado el tamaño del intervalo se divide en "n", para este caso $n=4$. Los valores de difusividad térmica que se probaron fueron 1×10^{-7} , 5×10^{-7} , 1×10^{-6} y $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

El modelo empleado para simular el sistema físico propuesto fue el de difusión de calor bidimensional de estado transitorio sin generación, **Ecuación (22)**. Para ello, se utiliza la forma discretizada implícita de la ecuación de difusión de calor.

Por otro lado, la discretización de las condiciones de frontera para este caso de fronteras de primera clase es,

$$T_{i,j}^{k+1} = 50 \quad (23)$$

Como puede verse para la solución del problema es necesario tener algunos valores definidos como lo muestra el tercer paso. Los valores son:

- 1) el tiempo total que se piensa simular (el cual, no superará la hora ya que se piensa en esta alternativa como una forma rápida de encontrar la difusividad),
- 2) la longitud en "x" y "y",
- 3) la clase y valor de las condiciones de frontera,
- 4) la distribución de temperaturas al tiempo cero (Condición inicial),
- 5) la difusividad térmica (α) y

- 6) el número de nodos inicial en “x” y “y” que nos dará el valor de los incrementos Δx y Δy respectivamente.

Lo siguiente es seleccionar un incremento en el cual se deberá dividir el tiempo total en incrementos uniformes. El primer incremento seleccionado deberá ser el mayor que se piensa probar. Posteriormente, se obtiene una solución para el mayor incremento de tiempo y el menor número de nodos a probar. Manteniendo el incremento de tiempo, se incrementa en un múltiplo de cuatro la cantidad de nodos en “x” y “y”, para obtener la nueva solución.

Con la nueva solución y la anterior, se realiza una comparación de nueve puntos donde la diferencia máxima no debe superar 0.1°C , si esto no se cumple se vuelve a incrementar en un múltiplo de cuatro el número de nodos en “x” y “y”. Una vez que se incrementa el número de nodos para obtener una nueva solución se compara con la solución anterior. El proceso se repetirá hasta que la diferencia sea menor que 0.1°C o que el número de nodos llegue a un número máximo de nodos. Si se cumple cualquiera de los dos criterios se disminuye el incremento de tiempo para obtener una nueva solución. Con la nueva solución se vuelve a realizar una comparación entre la nueva y la anterior solución en los nueve puntos donde la diferencia máxima no debe superar 0.1°C , si se cumple se habrán encontrado los incrementos en “x”, “y” y “t” óptimos. Este proceso se conoce como independencia de malla, una vez que se ha llevado a cabo todo el proceso se puede decir que se tiene la solución.

La independencia de malla se realiza sobre todos los valores de difusividad térmica.

A partir de las soluciones obtenidas para las diferentes difusividades térmicas se obtiene una relación de la difusividad térmica en función del tiempo para una temperatura definida, es decir, a partir del tiempo que tome en llegar a una temperatura establecida en un punto conocido le corresponde un único valor de difusividad térmica.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las **Tablas 2** se muestra un estudio de independencia de malla espacial y temporal para la solución del modelo matemático bidimensional transitorio para $\alpha=1\times 10^{-7}$ m²/s. La independencia espacial para cada una de las dos direcciones se

realizó incrementando el número de nodos. Al incrementar el número de nodos, N_x (columna 2) y N_y (columna 3), el tamaño de los espacios entre estos disminuye, por lo que el error debido a la aproximación se reduce mejorando así solución. Por otro lado, en la discretización temporal el valor del incremento de tiempo, Δt (columna 1), se hace cada vez más pequeño. Los resultados obtenidos se van comparando entre ellos, de menor N_x y N_y y mayor Δt contra mayor N_x y N_y y menor Δt . Los parámetros de comparación fueron la temperatura promedio después de 3600 s (columna 4), la diferencia máxima con la corrida anterior (columna 5) y el tiempo computacional (columna 6) para cada una de las corridas. En la obtención de la diferencia máxima se compararon nueve puntos uniformemente distribuidos en el sistema.

La consideración para definir la independencia de malla fue que la diferencia máxima fuera menor que 0.1°C , ya que este sería el valor de la incertidumbre del sensor que se emplearía en el sistema experimental que se trata de reproducir mediante simulación. El análisis de independencia de malla se sustenta en la reducción del tiempo computacional tomando como base la diferencia entre corridas hasta un número de cifras significativas con sentido físico.

Para el caso con la menor difusividad térmica simulada, 1×10^{-7} m²/s, la independencia se determinó en $N_x=53$, $N_y=53$ $\Delta t=15$ s y $N_x=33$, $N_y=33$ $\Delta t=5$ s. Sin embargo, a pesar de los dos casos cumplen con el criterio se seleccionara la que consuma menos tiempo computacional. El estudio de independencia de malla se realizó para cuatro diferentes difusividades, 1×10^{-7} m²/s; 5×10^{-7} m²/s; 1×10^{-6} m²/s y 1.5×10^{-6} m²/s.

Para las otras tres difusividades, la independencia de malla se encontró en $N_x=33$, $N_y=33$ $\Delta t=5$ s. El tiempo computacional con los parámetros de independencia de malla llevan alrededor de tres minutos. Se pudo observar que el tiempo de cómputo creció exponencialmente respecto al incremento del número de nodos en el espacio, esto debido al método de solución del sistema de ecuaciones simultáneas. Por otro lado, la relación entre el tiempo computacional y la reducción del incremento de tiempo es de forma lineal. Por lo cual, estos valores se tomaran como los óptimos para la simulación del modelo matemático.

TABLA 2.
INDEPENDENCIA DE MALLA PARA $\alpha=1 \times 10^{-7}$ M2/S.

Δt (s)	N_x	N_y	\bar{T} (°C)	ΔT_{max} (°C)	t_{comp} (s)
60	5	5	32.37	3.32	1.8
	13	13	31.08	0.92	2.1
	21	21	30.96	0.60	3.2
	33	33	30.92	0.49	18.0
	41	41	30.91	0.46	49.5
	53	53	30.90	0.44	206.0
30	5	5	32.28	3.18	1.7
	13	13	30.99	0.72	2.1
	21	21	30.87	0.39	4.7
	33	33	30.83	0.26	33.5
	41	41	30.82	0.23	105.0
	53	53	30.81	0.21	436.8
15	5	5	32.23	3.10	1.6
	13	13	30.94	0.62	2.2
	21	21	30.83	0.28	7.4
	33	33	30.79	0.14	62.9
	41	41	30.78	0.11	192.0
	53	53	30.77	0.09	1537.6
5	5	5	32.20	3.05	1.7
	13	13	30.92	0.55	3.0
	21	21	30.80	0.20	19.5
	33	33	30.76	0.06	182.5
	41	41	30.75	0.03	577.2
	53	53	30.74	0.01	2381.9
	61	61	30.74	0.00	5952.7

C. Evolución de temperaturas

Para los puntos donde se realizó la comparación para la independencia de malla se obtienen las curvas de evolución de la temperatura. En la **Figura 5** se muestra la evolución de la temperatura del nodo localizado en el centro del sistema físico (P_1) para los cuatro diferentes valores de difusividad térmica. En el comportamiento se puede ver que transcurre un tiempo sin que la temperatura cambie, es decir, antes de que la onda de calor llegue hasta el punto central. El tiempo total máximo que se simuló fue de 3600 s para la menor difusividad térmica y se fue reduciendo conforme incrementaba la difusividad. De forma concreta el tiempo que se simula para cada difusividad térmica será aquel en el cual se alcance la temperatura máxima para la difusividad más baja.

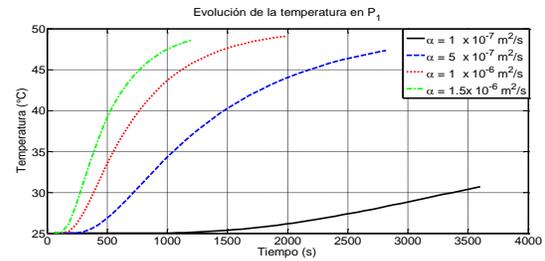


Fig. 5. Evolución del punto P_1 para diferentes valores de difusividad térmica.

En la **Figura 6 y 7** se muestra la evolución de la temperatura para los puntos P_2 y P_3 del medio físico para los diferentes valores de difusividad térmica.

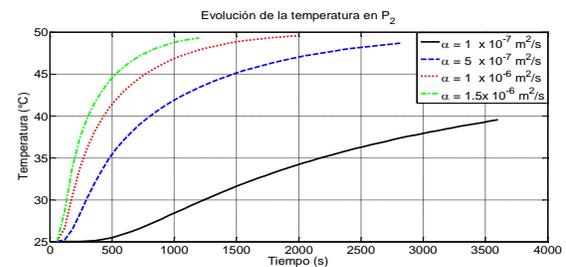


Fig. 6. Evolución del punto P_2 diferentes valores de difusividad térmica.

Para los tres diferentes puntos analizados (P_1 , P_2 y P_3) las curvas de evolución de la temperatura muestran que cuando aumenta la difusividad térmica el tiempo de respuesta disminuye. Por otro lado se ve que existe una relación biyectiva entre el tiempo que tarda en alcanzar un valor específico de temperatura y el valor de difusividad térmica.

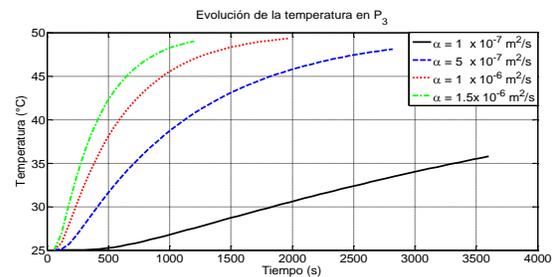


Figura 7. Evolución del punto P_3 diferentes valores de difusividad térmica.

D. Determinación de la difusividad térmica por Método Inverso

Para obtener la difusividad térmica por el método inverso, se relaciona el tiempo con la difusividad térmica requerido para alcanzar una temperatura específica. En la **Figura 8** se muestra una ampliación de la **Figura 5** donde se aprecia el

tiempo para alcanzar una temperatura $T=26^{\circ}\text{C}$ para los diferentes valores de difusividad térmica.

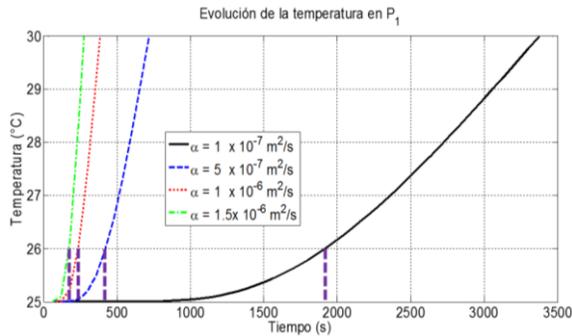


Fig. 8. Tiempo para alcanzar 26°C para diferentes valores de difusividades térmicas.

El tiempo estimado para que el sistema alcance la temperatura de 26°C para las diferentes difusividades térmicas se muestra en la **Tabla 3**.

TABLA 3.
DIFUSIVIDAD CONTRA TIEMPO PARA LA TEMPERATURA DE 26°C EN EL PUNTO P1.

$T=26^{\circ}\text{C}$	
Difusividad (m^2/s)	Tiempo (s)
1.5×10^{-6}	172.3
1×10^{-6}	236.5
5×10^{-7}	423.6
1×10^{-7}	1917.0

Los datos de la **Tabla 3** se presentan de forma gráfica en la **Figura 9**. Por otro lado, se muestra además con línea continua el ajuste realizado a los datos.

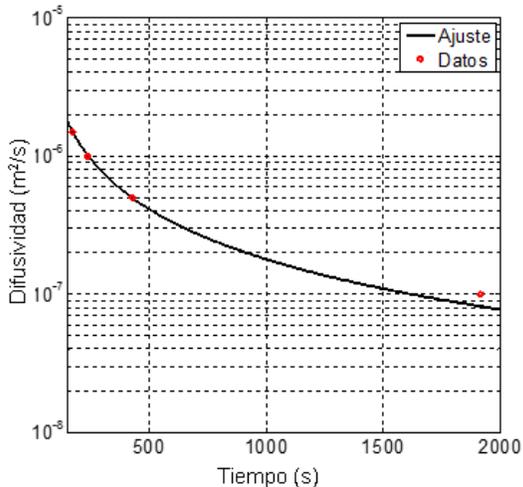


Fig. 9. Tiempo contra difusividad térmica para la temperatura de 26°C .

La función propuesta para el ajuste tiene la forma

$$\alpha = at^b \quad (24)$$

donde α es el valor de la difusividad térmica y t es el tiempo requerido para que se alcance una temperatura específica. Las constantes a y b son las constantes de ajuste. En el caso del punto central para la temperatura específica de 26°C los valores de las constantes son: $a = 0.0007389$ y $b = -1.205$, por lo que, la función queda como se muestra en la **Ecuación (25)**.

$$\alpha = 7.389 \times 10^{-4} t^{-1.205} \quad (25)$$

En la **Tabla 4** se muestran los tiempos y las difusividades térmicas para que se alcance las temperaturas específicas de 27 hasta 30°C con incrementos de un grado para el caso del punto central (P_1). El límite superior del intervalo de temperaturas, 30°C , se debe a que es la temperatura máxima que alcanzó el punto P_1 para la difusividad térmica de 1×10^{-7} en un tiempo de 3600 s.

En las **Tablas 5** y **Tabla 6** se muestran los tiempos y las difusividades térmicas para que se alcancen las temperaturas específicas de 26 hasta 35°C y 26 hasta 39°C para el caso de los puntos P_2 y P_3 respectivamente. Los intervalos de temperatura están definidos por la temperatura máxima alcanzada en cada punto para la difusividad térmica de $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ en un tiempo de 3600 segundos.

TABLA 4.
DIFUSIVIDAD TÉRMICA CONTRA TIEMPO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS EN EL PUNTO P1.

$\alpha(\text{m}^2/\text{s})$	Tiempo (s)			
	$T=27^{\circ}\text{C}$	$T=28^{\circ}\text{C}$	$T=29^{\circ}\text{C}$	$T=30^{\circ}\text{C}$
1.5×10^{-6}	203.3	230.1	253.8	275.7
1×10^{-6}	281.1	319.5	354.0	386.7
5×10^{-7}	512.8	587.0	654.5	719.0
1×10^{-7}	2335.7	2723.5	3056.5	3376.2

TABLA 5.
DIFUSIVIDAD TÉRMICA CONTRA TIEMPO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS EN EL PUNTO P2.

$\alpha(\text{m}^2/\text{s})$	Tiempo (s)				
	$T=26^{\circ}\text{C}$	$T=27^{\circ}\text{C}$	$T=28^{\circ}\text{C}$	$T=29^{\circ}\text{C}$	$T=30^{\circ}\text{C}$
1.5×10^{-6}	91.1	121.3	139.0	156.8	174.5
1×10^{-6}	125.1	153.2	181.3	207.6	234.0
5×10^{-7}	197.0	254.9	307.6	359.5	412.3
1×10^{-7}	780.0	1058.5	1318.1	1576.3	1839.1

$\alpha(\text{m}^2/\text{s})$	Tiempo (s)				
	$T=31^{\circ}\text{C}$	$T=32^{\circ}\text{C}$	$T=33^{\circ}\text{C}$	$T=34^{\circ}\text{C}$	$T=35^{\circ}\text{C}$
1.5×10^{-6}	193.4	212.7	232.0	253.2	275.8
1×10^{-6}	261.7	289.9	319.9	350.9	384.4

5×10^{-7}	466.8	523.4	582.6	644.9	710.9
1×10^{-7}	2110.1	2391.8	2686.9	2997.8	3327.5

Tabla 6.

DIFUSIVIDAD TÉRMICA CONTRA TIEMPO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS EN EL PUNTO P3.

$\alpha(m^2/s)$	Tiempo (s)				
	T=26° C	T=27° C	T=28°C	T=29° C	T=30° C
1.5×10^{-6}	76.5	93.3	110.0	124.7	136.4
1×10^{-6}	97.7	126.5	142.5	158.5	174.4
5×10^{-7}	159.8	199.2	231.4	262.5	293.3
1×10^{-7}	613.1	787.6	940.9	1090.2	1242.3
$\alpha(m^2/s)$	Tiempo (s)				
	T=31° C	T=32° C	T=33°C	T=34° C	T=35° C
1.5×10^{-6}	148.1	159.7	171.4	184.5	201.5
1×10^{-6}	191.8	209.9	228.0	248.0	271.6
5×10^{-7}	326.1	359.5	397.5	437.9	481.91
1×10^{-7}	1401.5	1571.1	1754.9	1956.3	2179.1
$\alpha(m^2/s)$	Tiempo (s)				
	T=36° C	T=37° C	T=38°C	T=39° C	
1.5×10^{-6}	218.4	235.4	257.7	282.1	
1×10^{-6}	295.3	324.6	355.3	392.7	
5×10^{-7}	532.2	588.6	652.1	724.6	
1×10^{-7}	2428.3	2708.9	3027.3	3390.6	

En las **Tabla 7, 8 y 9** se presentan las constantes de ajuste de la **Ecuación (24)** para los diferentes valores específicos de temperatura. Estos resultados se utilizan para la determinación de la difusividad térmica.

Tabla 7. Ajustes para el punto P1.

T (°C)	Coeficientes de ajuste		Error estándar de estimación (EEE) $\times 10^{-16}$	Factor de correlación (R ²)
	a	b		
26	0.000753	-1.209	7.385	0.9993
27	0.000798	-1.182	6.270	0.9994
28	0.000855	-1.168	6.286	0.9994
29	0.000894	-1.155	5.592	0.9995
30	0.000913	-1.142	4.734	0.9996

Tabla 8. Ajustes para el punto P2.

T (°C)	Coeficientes de ajuste		Error estándar de estimación (EEE)	Factor de correlación (R ²)
	a	b		
26	1.092e-010	1.737	2.08×10^{-12}	-0.8784
27	0.001861	-1.488	4.206×10^{-15}	0.9962
28	0.001291	-1.372	6.286×10^{-16}	0.9994
29	0.001134	-1.313	1.74×10^{-15}	0.9984
30	0.001044	-1.27	1.408×10^{-15}	0.9987
31	0.001014	-1.239	1.172×10^{-15}	0.9989
32	0.001007	-1.216	1.055×10^{-15}	0.999

33	0.001177	-1.298	1.638×10^{-15}	0.9985
34	0.0009746	-1.171	6.971×10^{-16}	0.9994
35	0.0002534	-0.9165	1.33×10^{-13}	0.8799

Tabla 9. Ajustes para el punto P3.

T (°C)	Coeficientes de ajuste		Error estándar de estimación (EEE)	Factor de correlación (R ²)
	a	b		
26	0.00093	-1.487	2.424×10^{-15}	0.9978
27	0.00068	-1.35	1.724×10^{-15}	0.9984
28	0.00126	-1.436	1.938×10^{-15}	0.9983
29	0.00180	-1.472	3.552×10^{-15}	0.9968
30	0.00172	-1.436	3.427×10^{-15}	0.9969
31	0.00152	-1.388	2.734×10^{-15}	0.9975
32	0.00133	-1.341	2.037×10^{-15}	0.9982
33	0.00117	-1.298	1.638×10^{-15}	0.9985
34	0.00108	-1.264	1.338×10^{-15}	0.9988
35	0.00113	-1.252	1.302×10^{-15}	0.9988
36	0.00114	-1.234	1.385×10^{-15}	0.9987
37	0.00098	-1.19	7.192×10^{-16}	0.9994
38	0.00105	-1.182	8.491×10^{-16}	0.9992
39	0.00103	-1.16	6.16×10^{-16}	0.9994

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se planteó una metodología inversa para determinar la difusividad térmica y la conductividad térmica a partir del conocimiento de la densidad y el calor específico. Dentro de los resultados más relevantes se obtuvo para los diferentes valores de difusividad térmica, una relación biyectiva entre el tiempo y el valor de la difusividad, con el fin de que en un punto específico se alcance el valor de difusividad.

La relación encontrada entre el tiempo y el valor de difusividad fue de tipo exponencial de la forma $\alpha = at^b$, donde a y b fueron las constantes a determinar para el ajuste. El error estándar de estimación máximo obtenido para las funciones fue de 2.08×10^{-12} , el cual, se debe considerar para la determinación de la incertidumbre de un sistema experimental. Estos resultados sugieren que este ajuste es apropiado ya que no aportará significativamente en el valor de la incertidumbre.

E. Agradecimientos

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por el apoyo y las facilidades para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1]. American Society for Testing and Materials. C 177 - 04 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.
- [2]. American Society for Testing and Materials. E 1225 – 99 Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded- Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique.
- [3]. DOE, 2007, Buildings energy data book. Office of energy efficiency and renewable energy, US Department of Energy.
- [4]. Gupta C.L., 2000, Energy efficient building, Renewable Energy Technologies: Applications to industries and agriculture. Proceedings of the millennium international conference on renewable energy technologies (MILCONRES). Feb, IIT, Chennai.
- [5]. Hong Kong Energy Statistics, 2008, Census and Statistics Department, Hong Kong Government, Hong Kong, <<http://www.censtatd.gov.hk/>>.
- [6]. NMX-C-181-1984 industria de la construcción – materiales termoaislantes - transmisión térmica en estado estacionario (medidor del flujo del calor) - método de prueba.
- [7]. NMX-C-189-1984 Industria de la construcción – materiales termoaislantes - transmisión térmica (aparato de placa caliente aislada) - método de prueba
- [8]. NOM-018-ENER-1997 Aislantes térmicos para edificaciones, características, límites y métodos de prueba.
- [9]. Tzikopoulos A.F., M.C. Karatza, J.A. Paravantis., 2005, Modelling Energy Efficiency of bioclimatic building, Energy and Building, 37: 529-544.
- [10]. Zhu Na, Ma Zhenjun, Wang Shengwei., 2009, Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review, Energy Conversion and Management, 50: 3169–3181.

Estudio térmico de los compartimentos de un refrigerador doméstico: influencia del ensuciamiento del condensador

J. M. Belman-Flores

Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8 Comunidad de Palo Blanco, C.P. 36885, Salamanca, Gto. México. Tel.: +52 (464) 6479940 Ext. 2419; fax: +52 (464) 6479940 Ext. 2311 E-mail: jfbelman@ugto.mx

Resumen—En este trabajo se presenta un caso práctico sobre la influencia de presentar un condensador obstruido (sucio) sobre el comportamiento térmico de los compartimentos de un refrigerador doméstico. Se realizan ensayos experimentales para evaluar térmicamente el fresh food y freezer para el refrigerador de referencia (fábrica) versus refrigerador con ensuciamiento en el condensador. Se concluye que efectivamente existe una diferencia térmica debido a la alteración en la transferencia de calor y en el flujo de aire del condensador, lo cual repercute en el consumo energético del electrodoméstico. Para fines prácticos, es de suma relevancia el hacer notar a los fabricantes sobre la importancia de dar a conocer a los usuarios de refrigeradores sobre una limpieza periódica en los condensadores de tipo tubo-alambre.

Palabras clave: refrigerador doméstico, condensador, ensuciamiento, comportamiento térmico.

I.- INTRODUCCIÓN

El fenómeno de preservar cierto espacio a una temperatura más baja que la de su entorno desde las primeras civilizaciones hasta nuestros tiempos, ya sea en relación al manejo y conservación de alimentos, ha sido y seguirá siendo parte fundamental de nuestras vidas. En México, el 82% de las viviendas cuentan con al menos un refrigerador doméstico, esto supone más de 23 millones de refrigeradores funcionando [1]. Hoy en día, el método más empleado en la generación de frío está basado en la compresión de vapor, representando un alto porcentaje de consumo energético, y más aún cuando se presentan fallas en el sistema. Conociendo que la función básica de un refrigerador doméstico es preservar la calidad de productos perecederos, es bien identificado que esta calidad depende de un buen desempeño del refrigerador, el cual está ligado fuertemente a la distribución de temperatura y al flujo de aire dentro

de los compartimentos: fresh food y freezer. En este contexto, se han realizado diversas investigaciones en el campo de la refrigeración doméstica, particularmente en la distribución de temperatura y flujo de aire en los compartimentos [2]. En esta directriz se pueden encontrar aplicaciones de la técnica de velocimetría de imágenes de partículas, PIV, en el análisis del flujo de aire en los compartimentos del refrigerador [3]. Otros trabajos se basan en el desarrollo numérico para analizar el flujo de aire y el desempeño térmico del fresh food [4-6]. Afonso y Matos [7] evaluaron el efecto del calor rechazado del condensador y del compresor sobre el comportamiento térmico de los compartimentos del refrigerador. Björk et al. [8] aplicaron termografía para estudiar la distribución térmica dentro del refrigerador. Belman-Flores et al. [9] analizaron la estratificación térmica en los compartimentos de un refrigerador tipo bottom mount de convección forzada mediante dinámica computacional de fluidos, CFD, y cuyos resultados se validaron experimentalmente.

Basado en lo anterior, en este trabajo se propone un caso práctico sobre el análisis térmico de los compartimentos de un refrigerador doméstico, esto en relación al efecto del ensuciamiento simulado del condensador (tubo-alambre en espiral). Con este estudio se comparan los perfiles térmicos de ambos compartimentos para el refrigerador de referencia (tal y como sale de fábrica) y el refrigerador con el ensuciamiento simulado del condensador.

A. REFRIGERADOR EXPERIMENTAL

En la Figura 1 se muestra el refrigerador doméstico usado para llevar a cabo las pruebas experimentales. Este tipo de refrigerador opera mediante convección forzada, tanto para el evaporador como para el condensador. La

capacidad volumétrica del refrigerador es de 0.28 m³ y sus dimensiones externas son 169 cm x 61.8 cm x 65.5 cm (alto x ancho x profundidad). Como se puede observar en la figura, el refrigerador cuenta con 2 compartimentos: freezer (localizado arriba) y fresh food (localizado abajo).



Fig 1. Refrigerador experimental.

II.-INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIONES

Con el fin de medir la temperatura en el refrigerador bajo estudio se montaron recipientes de 0.245 l que contienen 50% volumen de agua y 50% de glicol en el fresh food (ver Figura 1), mientras que en el freezer se usaron bloques de madera para evitar cambios de densidad y volumen. En total se montaron 16 termopares tipo J (± 0.3 K), estos termopares son localizados en los contenedores y bloques de madera. Varios estudios fueron llevados a cabo para evaluar el comportamiento térmico interno del refrigerador, el cual opera dentro de un cuarto a temperatura de $294 \text{ K} \pm 2 \text{ K}$. Las señales generadas por los dispositivos de medición fueron almacenadas en un sistema de adquisición basado en PC con el software LabView SignalExpress. La tasa de muestro se programó cada 0.5 min. Cabe resaltar que el refrigerador se evaluó en la posición 5 del damper (referencia de fábrica). Además, las pruebas fueron terminadas en el momento que se consigue la estabilidad térmica de los compartimentos, alrededor de 7 horas y media de funcionamiento.

B. ENSUCIAMIENTO DEL CONDENSADOR

El condensador es uno de los componentes principales de un sistema de compresión de calor,

es el lugar donde se rechaza el calor ganado en el sistema frigorífico. El inadecuado funcionamiento de este equipo puede repercutir en el mal funcionamiento del refrigerador, logrando con esto un incremento en el consumo energético y un decremento en el desempeño energético [10]. El condensador del refrigerador es del tipo tubo-alambre en espiral el cual está colocado en la parte inferior del refrigerador, a un costado del compresor (ver Figura 2a). Este condensador tiene montado un ventilador en la parte posterior, lo cual hace que el rechazo de calor sea a través de convección forzada. También cabe resaltar que este tipo de intercambiadores son poco usados, y esto es debido al incremento del consumo energético que representa el ventilador. Por otro lado, en la Figura 2b se muestra el ensuciamiento simulado del condensador a través de cartón de espesor delgado cubriendo parte de las paredes del condensador, lo cual representa una obstrucción al flujo de aire y por ende a la transferencia de calor. Este ensuciamiento simulado es el que se produce típicamente por causas comunes como el polvo, pelusa, telarañas, insectos, etc. que se incrustan sobre los tubos y alambre del condensador.



a) referencia b) ensuciamiento simulado
Fig 2. Condensador del refrigerador.

III.-RESULTADOS

En la Figura 3 se muestra el comportamiento térmico del fresh food y freezer para el refrigerador de referencia (condensador sin ensuciamiento). Se puede observar inicialmente la temperatura de arranque del refrigerador alrededor de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, conforme pasa el tiempo se empiezan a distinguir dos grupos de tendencias, una corresponde a los termopares ubicados en el fresh food y la otra a aquellos colocados en el freezer. Se aprecia que el comportamiento térmico del fresh food tarda más tiempo en estabilizarse, debiéndose esto a la menor cantidad de flujo de aire en este espacio, además, se tiene mayor volumen para enfriar. Las tendencias más calientes son aquellos termopares ubicados en la parte inferior de la puerta.

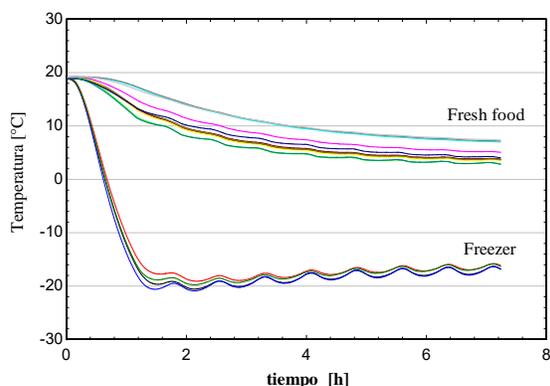


Fig 3. Comportamiento térmico de los espacios del refrigerador.

En cuanto al comportamiento térmico del freezer se puede notar que experimenta un cambio más brusco durante la primera hora y media de funcionamiento, representando un salto térmico de alrededor de 40°C. Debido al tamaño del volumen y a la mayor cantidad de flujo de aire, este espacio muestra una menor dispersión térmica, logrando más rápido la estabilidad térmica. Estos comportamientos representan típicamente el funcionamiento de un refrigerador doméstico, esto sin ninguna carga térmica.

Acorde al objetivo perseguido en este trabajo, las siguientes pruebas se realizaron para el refrigerador con el ensuciamiento simulado del condensador (ver Figura 2b) y para las mismas condiciones de arranque. En la Tabla 1 se muestran los resultados de la comparativa entre ambas condiciones del refrigerador. Estos resultados representan el promedio de los termopares localizados en cada compartimento durante la última hora de estabilidad térmica. Por lo que en la tabla se muestra la comparativa entre los compartimentos del refrigerador, observando que en términos generales existe mayor enfriamiento cuando el condensador está obstruido.

Tabla 1. Resultados térmicos en los compartimentos del refrigerador.

	Condensador de referencia	Condensador obstruido	Diferencia
Fresh food [°C]	4.7462	4.3317	8.8%
Freezer [°C]	-16.8151	-18.6546	11.0 %

Con base a los resultados se puede concluir que con el ensuciamiento del condensador se degrada la transferencia de calor, provocando esto un mayor

trabajo del compresor, por lo que al estar más tiempo encendido induce una mayor cantidad en el suministro del flujo de aire frío. Y esto también está influenciado por el tipo de calibración que tenga el refrigerador desde fábrica. Este ensuciamiento también provoca que el desempeño energético, COP, del refrigerador sea menor. La diferencia máxima comparativa entre los comportamientos térmicos es del 11%. Esta diferencia térmica quizá no sea tan perceptible al usuario, pero en términos energéticos se podrá ver un incremento en la facturación eléctrica.

Finalmente, en base a estos estudios simples se proponen ideas para que los fabricantes hagan conocer a los usuarios sobre la importancia en la limpieza periódica de los condensadores de este tipo (tubo-alambre), logrando con esto condiciones térmicas más óptimas en los compartimentos.

IV.- CONCLUSIONES

En este trabajo se propuso una evaluación experimental simple para ver el efecto de la obstrucción del flujo de aire en el condensador, simulando con esto el ensuciamiento de dicho componente en un refrigerador doméstico. Se instrumentó el refrigerador de prueba para medir las condiciones térmicas de los compartimentos (fresh food y freezer) con la finalidad de comparar las condiciones del refrigerador de referencia (fábrica) contra el refrigerador con el condensador sucio. Se obtuvieron promedios de temperatura en ambos compartimentos resultando en una diferencia máxima del 11%, implicando esto una condición térmica ligeramente más fría cuando el condensador es obstruido. Esto debido al incremento en el trabajo del compresor, repercutiendo así en la degradación del desempeño energético. Finalmente, con esto se pretende plasmar más ideas sobre el manejo y limpieza adecuada del refrigerador doméstico.

REFERENCIAS

- [1]. Centro Nacional de Población y Vivienda 2010 INEGI.
- [2]. J.M. Belman-Flores, J.M. Barroso-Maldonado, A.P. Rodríguez-Muñoz, G. Camacho Vázquez. Enhancements in domestic refrigeration, approaching a sustainable refrigerator – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016; 51:955-968.
- [3]. Xiangzhao Meng, Bingfeng Yu. Experimental research on air flow performance at supply air openings in frost-free refrigerator by DPIV. *Applied Thermal Engineering* 2009; 29:3334-3339.
- [4]. Guo-Liang Ding, Hong-Tao Qiao, Zhi-Li Lu. Ways to improve thermal uniformity inside refrigerator. *Applied Thermal Engineering* 2004;24:1827-1840.

-
- [5]. Laguerre O, Ben Amara S, Moureh J, Flick D. Numerical simulation of air flow and heat transfer in domestic refrigerators. *Journal of Food Engineering* 2007;81:144-156.
- [6]. Torabi M, Saedodin S, Salami Naserian R, Salehi P. A combined experimental and three-dimensional numerical study of natural convection heat transfer in a domestic freezer for optimization and temperature prediction. *International Review of Mechanical Engineering* 4 (2010) n.6.
- [7]. Afonso V, Matos J. The effect of radiation shields around the air condenser and compressor of a refrigerator on the temperature distribution inside it. *International Journal of Refrigeration* 2006;29:1144-1151.
- [8]. Björk E, Palm B, Nordenberg J. Thermographic study of the on-off behavior of an all-refrigerator. *Applied Thermal Engineering* 2010;30:1974-1984.
- [9]. Belman-Flores JM, Gallegos-Muñoz A, Puente-Delgado A. Analysis of the temperature stratification of a no-frost domestic refrigerator with bottom mount configuration. *Applied Thermal Engineering* 2014;65:299-307.
- [10]. Bilal A. Qureshi, Syed M. Zubair. The impact of fouling on the condenser of a vapor compression refrigeration system: An experimental observation. *International Journal of Refrigeration* 2014;38:260-266.

Measurements of solar reflectance and thermal emittance of roof coatings available in Mexico

M.L. Chávez-Manzo¹, G. Álvarez¹, I. Hernández-Pérez^{2*}, J. Xamán¹, Y. Chávez¹

¹Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET-TecNM-SEP), Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor., México.

²Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura (DAIA-UJAT), Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km. 1, Cunduacán, Tabasco, CP 86690, México.

Abstract—A reflective roof is an ordinary roof with a reflective coating on its outer surface, it is characterized for its high solar reflectance and thermal emittance. In spite of its benefits, this technology is not well known in Mexico and there exist little information about the solar reflectance and thermal emittance for the coatings available in the country. Neither have validated test methods for the verification of the surface properties of the products in the Mexican market. In this work it was measured the solar reflectance and the thermal emittance of twelve reflective coatings (white, blue and red), nine are available in the Mexican market, two are not available yet and one was made by the authors. The measurements were performed with a spectrophotometer with an integration sphere and an emisometer to measure solar reflectance and thermal emittance, respectively. The results showed that the coatings with hollow plastic microspheres have the highest solar reflectance (0.86) and the thermal emittance values were similar which ranged between 0.82 and 0.91.

Keywords— Reflective coatings, Solar reflectance, Thermal emittance

Resumen—Un techo reflectivo es básicamente un techo ordinario con un recubrimiento reflectivo en su superficie exterior, caracterizado por su alta reflectancia solar y emitanancia térmica. A pesar de sus beneficios, la tecnología de techos reflectivos es poco conocida en México, existe poca información sobre la reflectancia solar y emisividad térmica de los recubrimientos reflectivos disponibles en el país. Tampoco se cuenta con métodos de prueba validados. En este trabajo se reporta la metodología y la medición de la reflectancia espectral y la emitanancia total de doce recubrimientos reflectivos (blanco, azul y rojo), nueve están disponibles en el mercado mexicano, dos no disponibles y una ecológica. Las mediciones se realizaron utilizando un espectrofotómetro con esfera de integración y un emisómetro calibrados respectivamente. Los resultados indican que los recubrimientos con microesferas plásticas huecas tienen la mayor reflectancia solar total (0.86). La emitanancia oscila entre los valores de 0.82 y 0.91.

Palabras clave —: Recubrimientos reflectivos, Reflectancia, Emitanancia

I INTRODUCTION

Our planet is suffering an energetic and economic crisis due to global warming. The governments of the developed countries are committed with the Intergovernmental Panel

on Climate Change (IPCC) to understand and give solutions to this issue [1].

The energy consumption of residential, commercial and public sector depict about 19% of final energy consumption in Mexico. From this amount, more than 83% corresponds to either residential or domestic sector, furthermore the buildings consume more than 16% of the final energy in Mexico [1].

The buildings consume about 40% of the primary energy in the world and they are responsible of about a third part of the CO₂ emissions [2].

In warm weather, most of the energy is consumed by the air conditioning system (ACS). To decrease the energy consumption of buildings is necessary increase the efficiency of ACS and performance of the building envelope. The passive systems for buildings are those that use renewable sources as the Sun, vegetation and take into account all the architecture features to adequate the construction to the environment [1], such as the evaporative cooling, green roofs, thermal insulation and reflective roofs (also known as cool roofs).

The element most exposed to the solar radiation in a building is the roof, this component can represent up to 50% of heat gains in a building [3]. A reflective roof (RR) is a roof system that reflects solar radiation and emits heat preserving the roof's surfaces cool (under the Sun). This effect occurs because two thermal-optical properties: a high reflectance and infrared emittance [4]. These properties allow the roof to keep lower temperatures in the roof compared to the conventional roofs under the same conditions.

The solar reflectance is the percentage of the solar energy reflected by a surface. Recommendable values for roofs are higher than 70 and 30% for white coatings and the colored ones respectively. The increment of the solar reflectance decrease the surface's temperature because the solar radiation is reflected hence less energy is absorbed. The thermal emittance, in other words, the percentage that a material can radiate compared to a black body. Values above 80% are recommended for roofs. In air-conditioned buildings, in summer, the cooling loads can be reduced by using reflective roofs thanks to its high reflectance and emittance. Moreover, in a building without air-conditioner, the indoor thermal conditions can be improved by

diminishing the air temperature and delaying the heat transfer into the envelope of the building [5].

In the last years important studies on the field of reflective materials have been accomplished. Theoretical and experimental studies about the application of reflective coatings have demonstrated their effectiveness in different climatic contexts and different types of roofs [6-7].

The current Mexican regulations of energy efficiency for building envelopes (NOM-008-ENER-2001, NMX-C-460, NOM-020-ENER-2011) [8-10] do not take into account reflective coatings applied to building components. They just establish the minimum levels for the envelope's thermal resistance, orientation for each climatic zone. However solar reflectance and thermal emittance are very important properties because they are used in heat transfer calculations of buildings components. In this work we report the properties of roof coatings marketed in Mexico. The Total Solar Reflectance (TSR) and the emissivity of several roof coatings were obtained.

II MATERIALS Y METHODS

The Total Solar Reflectance (TSR) and the emittance of several of twelve roofs coating (seven are white and five are colored) were studied. Nine of those were selected for being the most commercial of the brand: Thermotek, Comex, Sherwin William, Fester, Impac, two were made by paint manufacturers PROINSA and the last one was made by the authors using nopal slime (white color). In the Table 1 and 2 the commercial and noncommercial coatings are presented, respectively.

TABLE 1.
COMMERCIAL REFLECTIVE COATINGS.

Brand	Model	Type	Color
Thermotek	DOUBLE ACTION	Elastomeric	White
Sherwin Williams	TECHOLASTIC ULTRA 5 años	Acrylic (wáter base)	White
Comex	TOP TOTAL 3 años	Acrylic	White Terracotta
Impac	Impac 3000	Normal	White Terracotta
	Impac Sokul	Expancel	White Terracotta
Fester	ACRITON 4 años	Elastomeric	White

TABLE 2.
NO COMMERCIAL REFLECTIVE COATINGS.

Brand	Type	Color
PROINSA	With expancel	Blue

IMPERPAL	Without Expancel Nopal	White
----------	---------------------------	-------

A. Preparation nopal's Paint

The nopal's reflective coating was made at Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET-TecNM) in Thermal Systems Laboratory.

The materials used for their elaboration were:

- Lime
- White cement
- Salt
- Penca of nopal.

The white nopal's paint is a natural coating made with nopal slime, this component makes possible a bigger cohesion between the ingredients. In addition, this material allows a greater duration of coating.

B. Measurement Methodology

The samples were prepared at CENIDET laboratory, the sample's size is determined based on equipment used (spectrophotometer with integration sphere and portable emisometer). For this study were considered of 2 cm of wide by 4 cm long for the reflectance measurements and 5 cm by 5 cm for emittance measurements.

The spectral reflectance was measured with a spectrometer Shimadzu with an integration sphere model UV-3101PC, this equipment is in Thermal Systems Laboratory CENIDET-TNM. After that a total reflectance (ρ_s) was obtained with weighted ordinates performing integration of spectral solar reflectance. The emittance was measured with an emisometer model AE1 of Devices & Services Company provided by the Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM).

C. Calibration

The calibration of the coatings' measurements is shown in this section. In the technical sheet of Thermotek reflective coating is shown the reflectance and emittance, thus this coating was used for calibration. Subsequently the white and colored roofs' outcomes are shown.

The Thermotek coating DOUBLE ACTION reported in its technical sheet a reflectance value of $\rho = 0.82$ and $\epsilon = 0.91$ emittance. These measurement were developed based in the standard ASTM C 1549 and ASTM C 1371 [11-12] respectively.

In the ASTM C 1549 a reflectometer is used, and this

device measure for only four wavelengths: 380, 500, 650 y 1220 nm, while the ASTM 903 used a spectrophotometer that measure in a range of 250 to 2500 nm, therefore the ASTM C 1549 doesn't replace the measure method of the ASTM 903, this article is based in the second one [11-14].

Thermotek's total reflectance reported is 0.82. The uncertainty of the TSR (Total Solar Reflectance) Thermotek coating was ± 0.0014 . The emittance reported in the technical sheet of Thermotek is 0.91 with an uncertainty of 0.01.

The reflectance measure with spectrophotometer is 0.80. This differs slightly from the reported in the technical sheet of Thermotek, but this difference could be by the measurement equipment used, due to a reflectometer only measure with the 4 wavelength whereas the spectrophotometer is more reliable by cause of this measured in the entire wavelength range.

In Table 3 the results of the weighted averages for radiation specular total, ultraviolet, visible and infrared are presented. The spectral reflectance curve for Thermotek coating is presented in Figure 1. It can be seen a high reflectance in the visible and near infrared and in part of it has high reflectance but this starts to decrease from 1500nm.

The emittance measure with emisometer is 0.9, with an uncertainty of ± 0.01 . In the technical sheet an emittance of 0.91 is shown, there is a variation of 0.01, which falls within the range of measurement uncertainty.

TABLE 3.
TSR PARA THERMOTEK.

TSR	
ρ_λ	0.80 ± 0.0014
ρ_{uv}	0.11 ± 0.0006
ρ_{vis}	0.85 ± 0.0016
ρ_{nir}	1.81 ± 0.0012

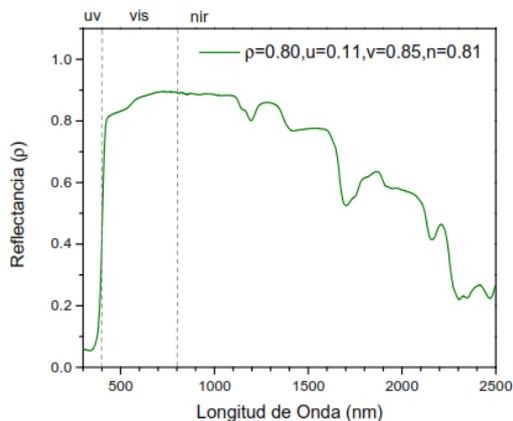


Figure 1. Spectral reflectance of Thermotek coating.

III RESULTS

In the following sections the reflectance spectral curves and the emittance of white and colored reflective are presented.

D. Reflectance: white reflective coatings

Figure 2 shows the spectral reflectance of the white reflective coatings. It can be seen, that the coating Impac Sokul (with hollow plastic microspheres) has the highest values in the near infrared spectrum (NIR), while COMEX coating has the highest values in the visible spectrum (vis). The Impac 3000 coating has the lower solar reflectance among the commercial coatings. Nevertheless among all white coatings, the white made by the authors (Nopal) has lower reflectance but is still it is considered as a reflective coating. The reflectance of this coating decreases enough in the visible spectrum compared with the others, due to the fact that the others containing TiO_2 that produce a highest whiteness in visible spectrum.

In Table 4 the values of the Total Solar reflectance (TSR) are presented, for the measurements of white reflective roofs Comex, Sherwin Williams, Impac Sokul (hollow plastic microspheres) and Impac 3000 (without microspheres).

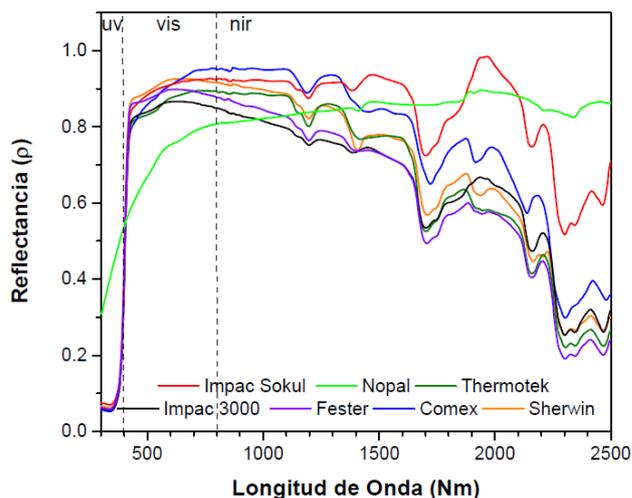


Figure 2. Spectral Reflectance of white reflective coating.

TABLE 4.
TSR OF WHITE REFLECTIVE COATINGS.

TSR	Impac Sokul	COMEX	Sherwin	Impac 3000	Fester	Nopal
ρ_λ	0.86	0.85	0.82	0.77	0.82	0.75
ρ_{uv}	0.01	0.11	0.13	0.005	0.79	0.46
ρ_{vis}	0.48	0.88	0.87	0.46	0.76	0.72
ρ_{nir}	0.37	0.88	0.84	0.31	0.77	0.83

Figure 3 shows the comparison of TSR to the white reflective coatings. The coating with the highest reflectance

is Sokul Impac with hollow plastic microspheres, followed by coating COMEX TOP Total 3 years with having a TSR of 0.86 and 0.85, respectively.

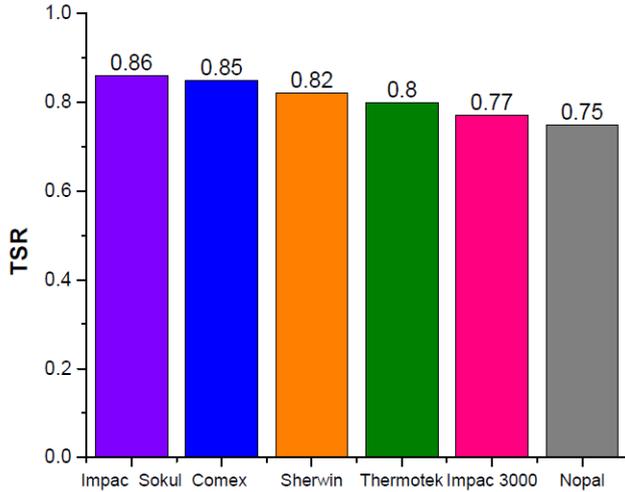


Figure 3. TSR of white reflective coatings.

E. Solar reflectance: colored coatings

The colored roofs for this study case are classified in blue and terracotta. Figure 4 shows the blue coatings manufactured by PROINSA with are without expancel. The blue coating with expancel (black curve), has higher values in the visible and infrared spectrum with respect to the blue coating without expancel. Nevertheless in ultraviolet spectrum the behavior is the same and both have very low reflectance in the visible.

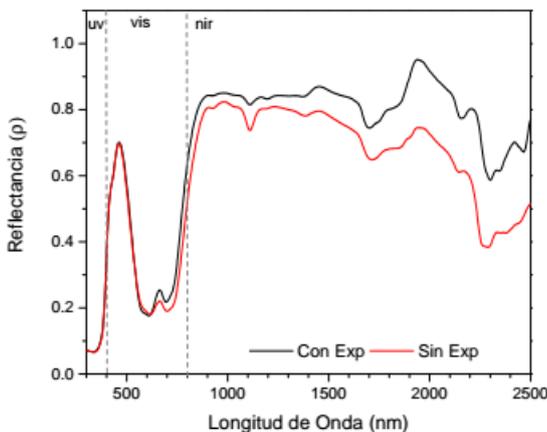


Figure 4. Spectral reflectance for blue coatings

Figure 5 shows the spectral reflectance of terracotta colored coatings. The Impac Sokul coating has a higher reflectance in the infrared and the coatings Impac 3000 and

Comex are of the same order.

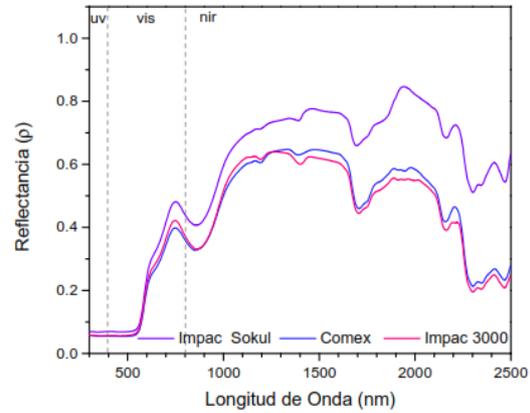


Figure 5. Spectral reflectance of terracotta coatings.

Table 5 presents TSR for colored reflective coatings (blue and terracotta). The blue coatings with expancel has the highest TSR (0.54) and the terracotta one, Impac Sokul has the highest TSR (0.37).

TABLE 5.
TOTAL SOLAR REFLECTANCE (TSR) OF COLORED ROOF.

TSR	Blue		Terracotta		
	With Expancel	Without Expancel	Impac Sokul	Impac 3000	Comex
ρ_{λ}	0.54	0.50	0.37	0.31	0.30
ρ_{uv}	0.01	0.01	0.003	0.002	0.06
ρ_{vis}	0.21	0.19	0.12	0.11	0.18
ρ_{nir}	0.33	0.30	0.25	0.20	0.49

F. Thermal emittance

The measurements of the thermal emittance are shown in Table 6. The highest emittances are 0.91 and 0.90 for colored coating Comex (terracotta) and the reflective coating Thermotek (white). The lowest emisivity are 0.81 and 0.83 from colored roof Impac Sokul Terracotta and Impac Sokul white with microspheres.

TABLE 6.
THERMAL EMITTANCE OF THE COATINGS.

Coating	Color	Emisivity
Comex	Terracotta	0.91
	White	0.89
Thermotek	White	0.90
Sherwin Williams	White	0.89
Fester	White	0.85
Impac Sokul	White	0.82
	Terracotta	0.81
Impac 3000	White	0.89
	Terracotta	0.88
Nopal	White	0.86
PROINSA	Blue (Expancel)	0.84
	Blue (Normal)	0.83

IV CONCLUSION

Based in the measurements of the different roof coatings it was observed that the ones with microspheres, Impac Sokul expancel either white or colored have higher TSR than conventional coatings.

Solar reflectance and thermal emittance are very important properties because they are used in heat transfer calculations of buildings components. Regarding the emissivity the Comex terracotta coating presented the highest emittance value. However all coatings have high thermal emittance values ranging between 0.82 and 0.91.

The ecological white paint made with nopal slime presented a significant value of reflectance (0.75) in comparison with the commercials and it is cheaper. Nevertheless, is necessary to evaluate its aging. This effect will be considered in a future work

Finally, it is important to consider aging of white and colored reflective roofs. We are currently working to determine the aging of the coatings reported in this article.

G. Acknowledgments

The authors be grateful with Tecnológico Nacional de México (TecNM) for funding the project No. 5053.13P: Thermal Study of Green Building Construction components. Furthermore we acknowledge Dr. Jorge Rojas (IER-UNAM), for his support by lending us the emisometer.

REFERENCES

- [1] Lacomba, R., Ambriz García, J., Aznar Echnique, T., Fuentes Freixanet, V., Galván Fernández, A., García Chávez, J., y otros. *Arquitectura Solar y Sustentabilidad*. México. Trillas. (2012).
- [2] OECD/IEA, key world energy statistics, Tech. report, International Energy Agency 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France. (2012).
- [3] N.M. Nahar, P. Sharma y M.M. Purohit. Performance of diferent passive techniques for cooling of buildings in arid region (pp. 109-116). *Building and Environment* 38. (2003).
- [4] Synnefa, A. & Santamouris, M. Advances on technical, policy and market aspects of cool roof technology in Europe: The Cool Roofs projects (pp. 35-41). *Energy and buildings* 55. (2012).
- [5] Lisa Gartland. *Heat Island*. London Sterling, Editorial Earthscan. (2008).
- [6] Hernández I., Álvarez G., Xamán J., Zavala-Guillén I., Arce J., Simá E. Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components- A review (pp. 81-105). *Energy and buildings* 80. (2014).
- [7] Rodríguez Viqueira, M., Figueroa Castrejón, A., Fuentes Freixanet, V., Castorena Espinosa, G., Huerta Velázquez, V., García Chávez, J. R., Guerrero Baca, L. F. *Introducción a la Arquitectura Bioclimática*. México: Limusa. (2012).
- [8] NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. (2001).
- [9] NMX-C-460, Taller para el aislamiento térmico en la vivienda. (2009).
- [10] NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones- Envolvente de edificios para uso habitacional. (2011).
- [11] ASTM C1549. Standard Test Method for Determination of Solar Reflectance Near Ambient Temperature Using a Portable Solar Reflectometer. (2005).
- [12] ASTM C1371. Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emisometers. (2004).
- [13] Sitio web de Thermotek. www.grupothermotek.com/?cat=8; consultado el 18 de octubre de 2014.
- [14] ASTM E 903. Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres1. (1996).

Optimización del sistema de reparto en empresa panificadora por medio del modelo de transporte y programación lineal

Rebeca Guadalupe Ortiz Mena

*Instituto Tecnológico Superior de Huichapan - ITESHU-TecNM-SEP.
Dom. Conocido S/N, El Saucillo, Huichapan, Hgo., C.P. 42411, México.
rgortiz@iteshu.edu.mx*

Resumen—El presente artículo, muestra el estudio de caso de una empresa panificadora, en donde tras explorar su cadena de suministro, se evaluó la posibilidad de transformar su sistema de reparto mediante la aplicación de un modelo matemático, para determinar el programa de transporte que minimice el costo total de traslado de su producto a sus diferentes centros de distribución, y que al mismo tiempo satisfaga los límites de su oferta y demanda.

En la actualidad la empresa no cuenta con un sistema o planeación de rutas para el suministro y reparto del pan diario, por lo tanto se desea implementar un método de optimización del sistema de reparto y así contribuir a la reducción de sus costos.

Este modelo de transporte se resolvió con programación lineal, su estructura especial permitió desarrollar un algoritmo de cómputo basado en el método SÍMPLEX, el cual arrojó la información pertinente para proponerle a la empresa una estrategia factible.

La modelación del problema mostró un ahorro del 34% en consumo de combustible.

Palabras clave — Modelo Transporte, Programación Lineal, reducción de costos.

Abstract— This article, shows the case study of a bakery company, where after exploring its supply chain, the possibility of transforming its distribution system by applying a mathematical model to determine the transportation program that minimizes assessed the total cost of transfer of the product to its various distribution centers, and at the same time meets the limits of supply and demand.

Currently the company does not have a system or route planning for the supply and distribution of daily bread, so you want to implement a method of optimization of the distribution system and thus contribute to reducing costs.

This transport model was solved with linear programming, its special structure allowed to develop a computer algorithm based on the simplex method, which threw relevant to the company to propose a feasible strategy.

The modeling of the problem showed a 34% savings in consumption of fuel

Palabras clave — Model Transportation, Linear Programming, cost reduction.

I INTRODUCCIÓN

La mayoría de las empresas, permanecen en constante desarrollo de estrategias para mantener la calidad de sus productos y servicios manejando los costos más bajos posibles.

De acuerdo con una investigación del Laboratorio de Transportes y Sistemas Territoriales (LTST) de la UNAM, nuevas tendencias en logística de distribución física se están aplicando en el área metropolitana de la Ciudad de México por empresas de los sectores de productos de consumo, confección y textil, farmacéutica, belleza, construcción. Los análisis son resultado de estudios de caso focalizados en los procesos logísticos clave: servicio al cliente, procesamiento de órdenes, gestión de inventarios y transporte de entrega a los puntos de venta [1].

Probablemente el segmento más cambiante en logística es el de la logística urbana, lo cual se revela en las recientes reuniones científicas, técnicas y profesionales especializadas en el tema. La logística urbana es aún un concepto en construcción, que abarca un conjunto de problemáticas, entre las que destaca la distribución física urbana-metropolitana de mercancías, que incluye todos los procesos en las cadenas de suministro, en particular transporte, gestión de inventarios, procesamiento de pedidos y servicio al cliente, así como el resurtido en puntos de venta físicos y los procesos de entrega [1].

Dentro de las nuevas tendencias que se están aplicando en logística de distribución física urbana-metropolitana de mercancías se encuentra la Introducción de innovaciones de tecnologías de la información en logística (como por ejemplo uso de software que permitan la simulación de un problema real, en el que se determinen y evalúen las alternativas de solución, antes de llevarlas a la realidad, y con un porcentaje de confianza aceptable) [1].

Derivado de estas tecnologías, las empresas han podido tomar decisiones en beneficio de sus procesos; se mencionan algunos casos en específico en la tabla 1

TABLA 1
DECISIONES DE GRANDES EMPRESAS, RESPALDADAS CON EL USO DE
TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN EN LOGÍSTICA [1].

No.	Caso	Acción
1	FEMSA Coca Cola	Reducción del número de centros de distribución para bajar el costo logístico y realizar distribución centralizada.
2	Unilever	Consolidó la operación logística de diferentes unidades de negocio, adquiridas en los últimos años por asociación y fusión, cerrando centros de distribución en la operación de distribución metropolitana.
3	Wal-Mart	La alianza de Aires del Campo, una prestigiosa comercializadora de productos certificados orgánicos, con Wal-Mart considera la segmentación del mix según localización de las tiendas
4	NISSAN	La gestión de inventarios en almacenes de refacciones de distribuidoras de Nissan está protegida con un inventario central en Toluca (y con un segundo respaldo en Los Ángeles, Estados Unidos para los vehículos importados) y envíos de paquetería industrial por Estafeta.
5	Procter & Gamble	Recepción de órdenes y producción sincrónica

La organización SAEVA, (PAFICADURA SAEVA S.A DE C.V, PANIFICADORA SAEVA) es una empresa dedicada a la elaboración de pan, tanto dulce como blanco, situada en el municipio de Pedro Escobedo en el estado de Querétaro.

Cuenta con una flotilla de 30 vehículos, los cuales cubren diariamente a 30 destinos diferentes.

Derivada de la exploración realizada en la empresa, se identificaron los siguientes aspectos:

TABLA 2
CONDICIONES INICIALES DE LA EMPRESA SAEVA

No.	Observación
1	No cuenta con un sistema o planeación de rutas para el suministro y reparto del pan diario.
2	Sus vehículos cargados salen de la panificadora sin ninguna planeación
3	Se dirigen directamente a su destino, sin seguir una ruta estudiada
4	Altos costos en consumo de gasolina

Por lo tanto SAEVA desea implementar un método que le ayude a optimizar su sistema de reparto y así contribuir a la reducción de costos.

Para este efecto, se inició con la recolección de datos correspondientes a recorridos, vehículos, consumos y costos, para analizarlos mediante un modelo de transporte.

A. Importancia de la reducción de costos

Cuando se manejan un margen de utilidades con unos ingresos constantes (ventas de difícil incremento o precios fijados por la competencia) la única alternativa viable es disminuir los costos, para mejorar la rentabilidad económica, hacia la búsqueda de un apalancamiento financiero positivo y un incremento en la rentabilidad financiera.

La reducción de costos también es una salida para las empresas industriales, que siempre tienen altos niveles de activos, es decir, deben controlar sus costos para contrarrestar la baja rotación de activos y obtener una rentabilidad económica más elevada [2].

Muchas empresas al desarrollar nuevos procesos y productos o la mejora continua de estos, involucran diversas características de interés, y éstas a la vez, están en función de un conjunto de factores de control. Para obtener el valor de respuesta de esas características se recurre a una estrategia experimental.

El tipo de diseño que se utiliza, involucra los factores de interés con el fin de encontrar la combinación que corresponda de la mejor manera a todas las características [3].

B. Modelo de Transporte:

El modelo de transporte es una clase especial de programación lineal que tiene que ver con transportar un artículo desde sus fuentes (es decir, fábricas) hasta sus destinos (es decir, bodegas o almacenes). Como sólo hay una mercancía, un destino puede recibir su demanda de una o más fuentes [4].

El objetivo de este modelo matemático es determinar el programa de transporte que minimice el costo total de transporte y que al mismo tiempo satisfaga los límites de la oferta y la demanda, es decir tener en cuenta la máxima producción que se puede obtener de en una fuente y contrastarla con la máxima demanda de mercadería (o servicios) que puede haber en un destino [5].

El modelo de transporte supone que el costo de transporte es proporcional a la cantidad de unidades transportadas en determinada ruta [6].

En general, se puede ampliar el modelo de transporte a otras áreas de operación, como el control de inventarios, programación de empleos y asignación de personal a diferentes actividades [7].

El modelo general presenta una red en la que hay "m" fuentes y "n" destinos diferentes, cada fuente y cada destino representados por un nodo [8].

Otro elemento de este modelo son los arcos, los cuales representan las rutas que enlazan las fuentes y los destinos. Cada arco que une una determinada fuente con

un determinado destino conduce dos clases de información: el costo de transporte por unidad y la cantidad transportada. La cantidad de oferta en una fuente específica y la cantidad de demanda en un destino específico también deben ser datos conocidos del problema [9].

El objetivo del problema es determinar las incógnitas “ x_{ij} ” que minimicen el costo total de transporte, y que al mismo tiempo satisfagan las restricciones de oferta y demanda en las fábricas y en los depósitos respectivamente [10]

El método de transporte es una simplificación del método Simplex, pero para poder aplicarlo es necesario que la oferta y la demanda se igualen; si ambas cantidades no son iguales, es necesario agregar un origen o un destino ficticio que absorba esta diferencia. [11]

Los modelos de transporte se pueden resolver con la ayuda del software LINGO: (Linear Generalize Optimizer) que es una herramienta simple para formular problemas lineales y no lineales, resolverlos y analizar su solución. El resultado que LINGO nos proporciona es la optimización que nos ayuda a encontrar el mejor resultado: la ganancia más alta, o el costo más bajo. A menudo estos problemas involucran el uso más eficiente de los recursos. Los problemas de optimización son clasificados a menudo como lineales o no lineales, dependiendo si las relaciones en el problema son lineales con respecto a las variables [12].

Uno de los rasgos más poderosos de LINGO es su aplicación en el lenguaje de modelo matemático. El cual permite expresar un problema de una manera muy similar a la anotación matemática normal pudiendo también, expresar una serie entera de restricciones en una declaración compacta. Esto lleva a modelos que son mucho más fáciles de mantener.

Otro aspecto es la sección de los datos, que le permite aislar los datos de la formulación del modelo. De hecho LINGO puede leer datos incluso de una hoja de cálculo separada, base de datos, o archivo de texto. Con datos independientes del modelo, es mucho más fácil de hacer cambios, y hay menos oportunidad de error cuando se realiza el modelo [13]

C. Hipótesis

La aplicación del método de transporte optimiza los sistemas de distribución, generando la disminución de costos involucrados en el proceso.

D. Objetivo general

Optimizar el sistema de reparto en la empresa panificadora SAEVA, por medio del modelo de

transporte y programación lineal, para la reducción de sus costos de entrega.

E. Particulares

Recolección de datos para la construcción y balance de la red de transporte.

Construcción y balance de la red de transporte por método gráfico, para la formulación de la función objetivo e identificación de restricciones.

Programación en LINGO conjuntos, para la solución de óptima de la función objetivo.

II METODOLOGÍA

El desarrollo de este trabajo de investigación comenzó con la recolección de datos mediante entrevista a los responsables de la organización.

Los datos recabados de esta entrevista y que se cotearon con bitácoras de la empresa fueron: características y número de vehículos empleados en el transporte de la mercancía, consumos, costos y recorridos, éstos, necesarios para la construcción y balance de la matriz de transporte mostrada en la Figura 1, que una vez construida permitió el diseño de la función objetivo, con sus respectivas restricciones, las cuales por medio de programación lineal en el software Lingo conjuntos fueron compiladas para encontrar la solución que minimizará los costos involucrados en el sistema de reparto de la empresa.

Finalmente se establecieron las conclusiones y recomendaciones para la empresa.

II RESULTADOS Y CONCLUSIONES

F. Recopilación de Datos

Tabla 3
CARACTERÍSTICAS Y NÚMERO DE VEHÍCULOS SAEVA

Vehículo	Modelo	No. de Unidades	Consumo Pavimento (Km/l)	Consumo Terracería/Ciudad (Km/l)	Consumo Mixto (Km/l)
Ford Triton	2007	8	10.3	6.9	8.43
Ford Triton	2008	12	10.45	7.3	8.7175
Nissan	2007	2	13.2	9.3	11.055
Nissan	2010	8	13.7	9.6	11.445

La tabla 3 muestra las características de las 30 unidades que SAEVA emplea en el reparto de su producto. Los datos fueron tomados por las bitácoras de los operarios.

TABLA 4
RECORRIDOS Y DESTINOS DE LOS VEHÍCULOS

Origen	Clave	Destino	Distancias recorridas		
			Por pavimento (km)	Por Terracería (Km)	Total (km)
Saeva	D01	Llano largo	103.4	2	105.4
Saeva	D02	San Lorenzo	112	1.8	113.8
Saeva	D03	Borbollón	137.4	17.8	155.2
Saeva	D04	La tortuga	60.4	1.4	61.8
Saeva	D05	Dañú	137.4	20.8	158.2
Saeva	D06	El fresno	98.8	2.6	101.4
Saeva	D07	El Carmen	90.8	1.5	92.3
Saeva	D08	Cazadero	81.8	3.2	85
Saeva	D09	Charco Largo	82.6	0.5	83.1
Saeva	D10	San Sebastián	75.4	0.8	76.2
Saeva	D11	Palmillas	60.4	0.6	61
Saeva	D12	San Francisco	68.8	1.3	70.1
Saeva	D13	Huimilpan	62.2	4	66.2
Saeva	D14	Los cues	65.6	2.5	68.1
Saeva	D15	Bernal	95.6	7	102.6
Saeva	D16	Cadereyta	146	5	151
Saeva	D17	Acuchitlancito	12.2	1.5	13.7
Saeva	D18	Ezequiel Montes	121	3.7	124.7
Saeva	D19	El Sauz	10.4	1.5	11.9
Saeva	D20	Tequisquiapan	90.2	7	97.2
Saeva	D21	La llave	46.2	2	48.2
Saeva	D22	Bernardo Quintana	55.4	3.5	58.9
Saeva	D23	Amealco de Bonfil	96.4	4.2	100.6
Saeva	D24	Paso de Mata	65.8	2	67.8
Saeva	D25	El Organal	33.2	2.3	35.5
Saeva	D26	Laguna de Vaquerías	65	1.4	66.4
Saeva	D27	El sitio	67.4	1.8	69.2
Saeva	D28	El pueblito	76.6	2.2	78.8
Saeva	D29	San Nicolas	84.6	1.5	86.1
Saeva	D30	Nopala	137.4	2.5	139.9

La tabla 2 registra los recorridos de las unidades a los diferentes destinos.

El costo invertido en combustible por entrega del producto asciende a \$ 4,455. Dos veces por semana.

G. Análisis de Datos

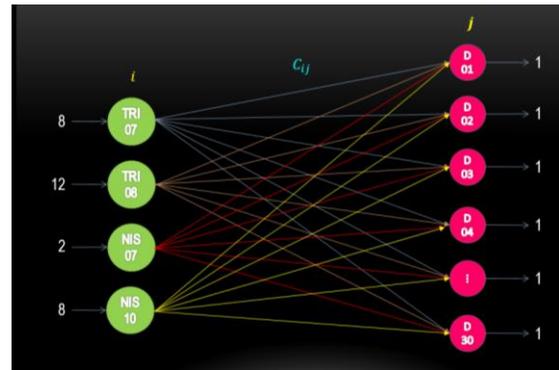


Fig. 1 Matriz del modelo de transporte

Se muestra en la figura 1, la matriz de transporte balanceada:

A la izquierda, con sus 30 orígenes (Vehículos) y, a la derecha, sus 30 destinos (Centros de distribución).

Las líneas que unen los orígenes con los destinos, representan los arcos, es decir las posibles 900 rutas a seguir, las cuales muestran los costos (C_{ij} (ver tabla 4)) del recorrido correspondiente.

Los costos fueron calculados con base en la ecuación 1.

$$C_{ij} = \left[\frac{\sum \text{Distancia Pavimento}}{\text{Rendimiento Pavimento}} + \frac{\text{Distancia Terracería}}{\text{Rendimiento Terracería}} \right] * \text{Costo gasolina} \quad \text{Ec (1)}$$

De las 900 rutas, el trabajo consiste en elegir las 30 que originen el costo más bajo. Trabajo que se agilizará con el apoyo de una tecnología informática en logística, la seleccionada para este tipo de problemas (problemas de transporte) fue LINGO.

H. Sintaxis para la modelación en LINGO conjuntos:

TABLA 5
SINTAXIS LINGO CONJUNTOS [14].

No.	Aspecto
1	El nombre de las variables deben tener 32 caracteres como máximo, comenzando con una letra seguido de letras, dígitos o _ .
2	El compilador de LINGO no distingue entre mayúsculas y minúsculas.
3	Todas las sentencias deben terminar en un punto y coma.
4	Para dar nombre a la función objetivo o a las restricciones, estos se deben colocar entre corchetes.
5	Para declarar la función objetivo se deben colocar las palabras reservadas MAX (maximizar) o MIN (minimizar), en automático son resaltadas en azul, seguidas del signo de igualdad (=).
6	Los comentarios deben comenzar con un signo de admiración (!), éstos en automático son resaltados en verde.
7	LINGO tiene la habilidad de nombrar las

CANTIDAD(TRI08, D10)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(TRI08, D12)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(TRI08, D13)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(TRI08, D14)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(TRI08, D20)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(TRI08, D24)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(TRI08, D27)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(TRI08, D28)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(TRI08, D29)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(NIS07, D3)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(NIS07, D5)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(NIS10, D1)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(NIS10, D2)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(NIS10, D6)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(NIS10, D15)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(NIS10, D16)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(NIS10, D18)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(NIS10, D23)	1.000000	0.000000
CANTIDAD(NIS10, D30)	1.000000	0.000000

J. Análisis e interpretación de resultados

La solución LINGO, indica que al efectuarse los 30 recorridos de la manera indicada; ejemplo: el vehículo Tritón 2007, se dirigirá a la Localidad de la Llave, Bernardo Quitana, etc., mientras que el vehículo Nissan 2010, se dirigirá a la Localidad de Nopala Hgo; de esta manera el costo de combustible de los 30 recorridos será equivalente a \$ 2, 931.96

La columna de holgura o sobrante (slack o surplus): Esta parte del informe de solución nos dice cuan cerca estamos de satisfacer una restricción como una igualdad. Si la restricción es de menor-igual nos referimos a variables de slack y si es de mayo-igual nos referimos a variables surplus.

Si la restricción está correctamente formulada se satisface como una igualdad, el valor de holgura o sobrante será positivo. De lo contrario la solución será no factible, la holgura o valor sobrante será negativo.

En este caso la solución es factible ya que representa valores positivos.

Dual price: El informe de solución también nos da el precio dual para cada restricción. Se puede interpretar el precio dual, como la cantidad en la que el objetivo mejoraría por el término constante de la restricción aumentado en una unidad. Retomando el ejemplo, en la solución del problema, el precio dual de cada recorrido es cero lo que se interpreta como la única opción que dará el mínimo costo. A veces se llaman a los precios duales precios sombra.

IV CONCLUSIONES

Sin la implementación de la metodología de PL, se tiene un costo de combustible por \$4,455, los resultados del modelo de transporte arrojan un costo de \$2, 932, lo que significa un ahorro del 34% en cada entrega del producto.

Por lo tanto a (\$ 2,932 por entrega)* (2 veces a la semana) * (52 semanas del año)= \$ 158,392 de ahorro al año. Las 30 rutas a seguir por los diferentes vehículos, se muestran en la solución de LINGO, al efectuarlas el costo en combustible será de \$ 2, 931.96

La aplicación del método de transporte optimizó el sistema de reparto, de la empresa SAEVA, generando un ahorro del 34% en los costos involucrados en el proceso.

El uso de tecnologías informáticas en logística, permite a las organizaciones tomar decisiones con un porcentaje de confianza aceptable. Los resultados obtenidos por tecnologías informáticas, permiten realizar simulaciones de los procesos sin afectar la realidad, ya que no se interviene detienen los procesos para realizar los estudios. Esto permite también jugar con los valores de las variables, para supuestos futuros.

REFERENCIAS

- [1]. Hernández, Juan Carlos, Antún, Juan Pablo y lozano, Angélica . Soluciones de Almacenaje. [En línea] 09 de 10 de 2007. [Citado el: 14 de Septiembre de 2016.] <http://www.logisticamx.enfasis.com>.
- [2]. Rentabilidad Financiera y Reducción de Costos. Morillo, Marisela. 4. Mérida, Venezuela : Universidad de los Andes, 2002, Vol. 4. 1316-8533.
- [3]. Optimización simultánea para la mejora continua y reducción de costos en procesos. Domínguez Domínguez, Jorge. 4. Medellín, Colombia : Universidad EAFIT, 2006, Vol. 2. 1794-9165.
- [4]. Taha, Hamdy A. Investigación de Operaciones. México : Pearson, 2004. /a edición.
- [5]. Bronson, Richard. Operation Research. s.l. : Mc Graw Hill, 1994. 2ª. Edicion .
- [6]. Kumar, P y Goel, P. Product Quality Optimization Using Fuzzy Set Concepts. s.l. : A Case Study. Qual, 2002.
- [7]. Davis y Mckeown. Métodos cuantitativos para administración. México : Mc Graw Hill., 1994.
- [8]. Hillier, Frederick y Lieberman, Gerald. Introducción a la Investigación de Operaciones. México D.F. : Mc Graw Hill, 2008. 8ª Edición.
- [9]. Godino, Pablo E. www.Scrib.com. Investigación Operativa Profesor: Ing. [En línea] [Citado el: 08 de 07 de 2016.] <https://es.scribd.com>.
- [10]. Wayne, Winston. Investigación de Operaciones. México : Iberoamericana. , 1994. 970-695-362-1.
- [11]. Reducción del costo de transportación en las Series Nacionales de Béisbol. Suárez, Rosete y Paredes Miranda, David. 3. Ciudad de La Habana, Cuba : Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 2013, Vol. 16. 1815-5944.
- [12]. Canizo, Erica . Investigación Operativa. Software Para Programación Lineal. LINGO/LINDO. 2002.
- [13]. Salazar López, Bryan. The Modeling Language and optimizer. Colombia : Commons Atribución, 2012.
- [14]. Canizo, Erica y Lucero, Paola. Investigación Operativa. [aut. libro] Software para programación Lineal. LINGO/LINDO. 2002.
- [15]. Ivorra, Carlos. Optimización con LINGO. [En línea] [Citado el: 14 de 09 de 2016.] <http://www.uv.es>.