

[VOLVER AL ÍNDICE](#)

## SIMULACIÓN DE LAS TEMPERATURAS ALCANZADAS POR LA RADIACIÓN SOLAR EN EL PAVIMENTO

Ángel Queizán ([aqueizan@frlp.utn.edu.ar](mailto:aqueizan@frlp.utn.edu.ar)); Virginia Borges ([virborges1@gmail.com](mailto:virborges1@gmail.com));  
Gerardo Botasso ([gerardobot@hotmail.com.ar](mailto:gerardobot@hotmail.com.ar)); Ana Castro Luna ([castrolu@gmail.com](mailto:castrolu@gmail.com))

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata (UTN-FRLP) - Arg.

**Palabras clave:** Energía solar térmica, Colector de asfalto, Simulación

*El aumento demográfico, y la abundancia de edificios de vivienda multifamiliar en los centros urbanos ha originado un incremento del área pavimentada, ya que se utilizan mezclas asfálticas en las calles y en estacionamientos vecinos a estas viviendas y en sus centros comerciales. Con el avance de la urbanización, se registran temperaturas más elevadas en las ciudades que en las áreas rurales aledañas. Como consecuencia, hay un aumento en el uso de acondicionadores de aire, lo que implica una mayor demanda y consumo de electricidad. Al mismo tiempo, el exceso de calor contenido en las áreas pavimentadas provoca su deformación, se generan huellas permanentes, que eliminan la característica del pavimento y provocan un deterioro prematuro del pavimento.*

*Un modo de reducir los efectos negativos de la alta temperatura en el pavimento se logra extrayendo el calor que acumuló por exposición solar, mediante la circulación de un fluido de capacidad calorífica adecuada que circula debajo del pavimento.*

*La variación de temperatura hacia el interior del pavimento es una información importante y necesaria para determinar el equipo a utilizar posteriormente en un colector del calor solar de pavimento asfáltico*

### 1. INTRODUCCIÓN

El rápido desarrollo económico mundial ha provocado un aumento acelerado en la demanda de energía. Como consecuencia del uso descontrolado e ineficiente de combustibles fósiles, y el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero, GEI, la temperatura en nuestro planeta ha aumentado excesivamente en las últimas décadas, con un impacto ambiental preocupante. Se han propuesto diferentes opciones tecnológicas para estabilizar la concentración atmosférica de los GEI, entre las cuales se menciona el uso de las fuentes de energías renovables, aunque el porcentaje de la participación de éstas en la provisión de energía es aún bajo como se muestra en la Figura 1 [1].

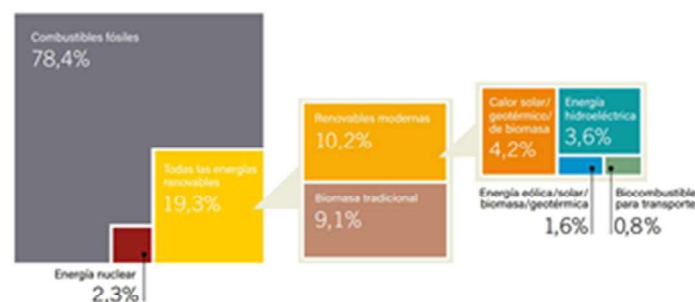


Figura 1 - Diagrama sobre contribución a la demanda de diferentes fuentes de energía en 2016

La energía solar es considerada entre todas las energías renovables, como una energía limpia, respetuosa del medio ambiente y en términos de la vida humana, inagotable.

La radiación térmica puede definirse como la radiación electromagnética irradiada por un cuerpo debido a su temperatura. El calor emitido por un radiador ideal o cuerpo negro está expresado por la

ley de Stefan-Boltzmann, que vincula la energía total irradiada,  $E$ , para todas las longitudes de onda  $\lambda$ , con la temperatura como  $E = \sigma \cdot T^4$  siendo  $\sigma$  la constante de Boltzman,  $\sigma = 5,67032 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

El sol es considerado un *cuerpo negro*, esto es un cuerpo que absorbe y emite toda la radiación que posee. La radiación solar que llega a la tierra posee una energía que se extiende entre 0.1 y 100  $\mu\text{m}$  en el espectro electromagnético, incluye casi un 42% de la radiación visible un 52% infrarroja (IR) y el porcentaje restante de radiación ultravioleta (UV).

La radiación irradiada a la atmosfera, por la tierra, que es considerada un *cuerpo gris* con una temperatura media de 300<sup>0</sup>K, se encuentra mayoritariamente en la región de ondas largas del espectro electromagnético [2].

Un pavimento de mezcla asfáltica es una masa densa compuesta de áridos de diferente tamaño regulado, arena, polvo fino de caliza y betún o asfalto procedente de la destilación de petróleo. Tomando en cuenta que debido a la irradiación solar que recibe el pavimento, éste puede alcanzar temperaturas próximas a 343 <sup>0</sup>K en días estivales, es posible desarrollar un sistema innovador capaz de coleccionar parte de la energía solar térmica.

En el pavimento, ese calor podría ser empleado inmediatamente o almacenado para usar según requerimiento. La cantidad de radiación solar que llega a una determinada localización depende de muchos factores, entre otros la ubicación geográfica del pavimento, el día específico del año, la presencia o ausencia de nubes.etc. [3]. Los pavimentos son afectados por el clima y la época del año que se considere, en invierno si las temperaturas son muy bajas, se vuelven duros y quebradizos y en el verano, con las altas temperaturas se ablandan y al ser expuestos al tránsito vehicular aparecen deformaciones que dejan un pavimento con ondulaciones. Otros materiales como el hormigón o los cerámicos se pueden usar también como material de almacenamiento.

Es de destacar, que en la ciudad los pavimentos contribuyen, además al llamado efecto isla de calor urbano (ICU) ocasionando que la temperatura en la ciudad sea más elevada que la registrada a campo abierto, Figura 2. La temperatura media en la ciudad puede ser entre 1 y 3 <sup>0</sup>C más elevada que en los alrededores durante el día, siendo esa diferencia de hasta 12 <sup>0</sup>C, en una noche calmada. La consecuencia de este aumento de temperatura es una mayor demanda de electricidad en la zona urbana para la refrigeración del ambiente lo que provoca un aumento en la concentración de los gases contaminantes. Muchos materiales artificiales, como el pavimento, pueden almacenar más calor que los materiales naturales, como el suelo seco y la arena. Como resultado, las áreas construidas típicamente capturan más energía del sol, a veces conservando el doble de su entorno rural durante el día. [4].

La mayor capacidad calorífica de los materiales urbanos convencionales contribuye a calentar el ambiente urbano durante la noche, cuando los materiales en esas zonas residenciales liberan el calor almacenado. Si se toma en cuenta la gran cantidad de pavimento asfáltico utilizado en las áreas urbanas, se puede tener una idea de la potencialidad de este elemento como fuente de energía calórica. Para aprovechar esa energía debe ser posible coleccionarla. La secuencia en el procedimiento de aprovechamiento de esta energía es en primer lugar, captura, luego almacenamiento y finalmente uso.

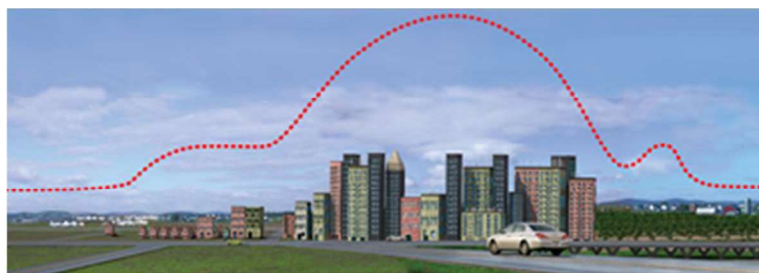


Figura 2 - Esquema de la variación de temperatura por efecto isla de calor urbano ICU.

Como consecuencia de la exposición a la radiación solar, la posibilidad de vientos superficiales y la naturaleza del pavimento existe un intercambio de energía radiante entre éste y la atmósfera, al que se suma un intercambio de calor por convección entre la superficie del pavimento y el aire circundante y una transferencia de calor por conducción debido al gradiente de temperatura entre la superficie y el interior del pavimento. La ubicación a una cierta profundidad del pavimento de un

dispositivo a través del cual circule un fluido aceptor de calor, permitirá el aprovechamiento de esa energía

Actualmente se conocen varias propuestas para coleccionar calor desde mezclas asfálticas, los más avanzados y modernos usan un tramo del camino asfaltado como un gran colector solar para absorber el calor, transfiriéndolo a un líquido que fluye por una tubería incrustada en el pavimento, a pocos centímetros de la superficie. El líquido caliente puede usarse a continuación o almacenarse a mayor profundidad del suelo donde la temperatura se mantiene prácticamente constante, y reutilizarse en invierno para impedir, por ejemplo, el congelamiento del asfalto. Sin embargo, un colector de mezclas asfálticas con tubos incrustados es problemático ya que siempre que se usen tubos metálicos, hay posibilidad de corrosión y si se reemplazan por tubos de polímero, hay peor conductividad térmica. Además, la estructura del pavimento se debilita debido a la introducción de un elemento flexible dentro un material mucho más rígido [5].

Hay otro prototipo de colector solar, denominado colector asfáltico multicapa, el cual está formado por tres capas de mezcla asfáltica, una capa inferior muy compacta fabricada casi sin poros, que hace de base y evita la infiltración del fluido colector del calor que circula por una capa intermedia muy porosa fabricada con una mezcla especialmente diseñada y una capa superior de asfalto, suficientemente impermeable como para evitar la entrada de agua desde la superficie del pavimento y que es la responsable de captar la energía solar, y transmitirla por conducción al fluido. El uso de la energía térmica proveniente del calentamiento solar de los asfaltos resulta de gran interés en muchas aplicaciones de ingeniería porque permite satisfacer los requerimientos ya sea en industrias como calor de proceso o en domicilios

En este trabajo habiendo elegido como modelo de colector de calor el denominado tricapa, o multicapa, se propone estudiar el comportamiento del pavimento expuesto a la radiación solar, en relación a la propagación del calor al interior del mismo. Para tal fin se realiza una simulación para determinar cómo varía la temperatura hacia el interior de la mezcla asfáltica irradiada, y que cantidad del calor puede ser almacenado en un pavimento poroso inundado con agua que es la capa que recibe el calor y contiene el fluido. Se utilizará la aproximación de diferencias finitas, a partir de parámetros físicos y climáticos obtenidos del año meteorológico típico (TMY) para la ciudad de La Plata Argentina [6].

## **2. CONSIDERACIONES SOBRE EL MODELO**

### **2.1. Balance de calor en el pavimento expuesto a la radiación solar**

Las propiedades de los materiales usados en los pavimentos, en particular su reflectancia solar, emisividad térmica, y capacidad calorífica, también influyen en el desarrollo del ICU, ya que determinan cómo la energía del sol es reflejada, emitida y absorbida.

La reflectancia solar, o albedo, es el porcentaje de energía solar reflejada por una superficie. El pavimento convencional y el hormigón tienen una reflectancia solar que dependiendo de la composición varía entre el 5 y 40 %, esto significa que los materiales absorben entre el 95 al 60 % de la radiación solar que reciben, en lugar de reflejarla a la atmósfera. Aunque la reflectancia solar es la principal determinante de la temperatura superficial de un material, la emisión térmica, también influye. La emisión térmica o emisividad de un material, da cuenta de la cantidad de calor que él irradia por unidad de área a una temperatura determinada, es decir la facilidad con que una superficie pierde calor o emite radiación de onda larga (infrarroja). Cualquier superficie expuesta a la energía radiante se calentará hasta que alcance el equilibrio térmico (es decir, hasta que emita tanto calor como el que recibe). Cuando se expone a la luz solar, una superficie con alta emisión alcanzará el equilibrio térmico a una temperatura más baja que una superficie con baja emisión

Los pavimentos convencionales con alta reflectancia solar reducen las temperaturas de la superficie y del subsuelo, ya que hay menos calor disponible en la superficie para ser absorbida por el pavimento.

El balance de energía existente en la superficie del pavimento está asociado a tres formas de transmisión de calor: i) radiación, ii) convección y iii) conducción.

Se propone un modelo que prediga la variación de temperatura con la profundidad de la capa de la mezcla asfáltica para lo cual se necesita del balance de energía que tiene lugar en el pavimento, y que incluye los flujos de radiación, la pérdida de energía por convección con el viento y la conducción de calor hacia el interior del pavimento .

En la Figura 3 muestran las diferentes contribuciones al balance de calor en un pavimento de asfalto de espesor  $\Delta x$ .

$Q_{SOL}$  es el calor que llega a la superficie del pavimento por la radiación solar incidente (directa y difusa) que se toma desde los valores de radiación medidos en el TMY [6]. Una porción de esta radiación,  $Q_{SOLREF}$ , se refleja dependiendo del albedo superficial. El albedo es la reflectividad de una superficie de modo que la porción de calor del sol absorbida por la superficie del pavimento es (1-albedo)  $Q_{SOL}$

La radiación emitida por el pavimento *quasi negro*, es  $Q_{PAV}$  mientras que  $Q_{PAVREF}$  representa la fracción de la radiación que emitida desde el pavimento, es luego absorbida por la atmósfera y parcialmente devuelta al pavimento. Por otra parte, la diferencia de temperatura existente en la interface pavimento/ aire provoca un flujo de calor convectivo el cual afectado por la velocidad del viento representa la pérdida de calor de la superficie del pavimento por convección  $Q_{CONV}$ .

Finalmente,  $Q_{COND}$  representa el calor absorbido por el pavimento que se transfiere por conducción a capas asfálticas más profundas.

La velocidad para transferir calor a través de una sección transversal de espesor  $\Delta x$ , entre la temperatura en la superficie del pavimento y la temperatura a una profundidad dada, se expresa por la ley de Fourier,  $Q_{COND} = -k \Delta T/\Delta x$  donde  $k$  representa la conductividad térmica. Este calor es el que necesitamos para expresar en una ecuación diferencial que muestre la variación de la temperatura con la profundidad para un flujo de calor dado

El calor transmitido es proporcional a la conductividad del material y a la diferencia de temperatura, y es inversamente proporcional al espesor:

Un pavimento con baja conductividad térmica puede calentarse en la superficie pero no transferirá ese calor a través de las otras capas del pavimento tan rápido como el pavimento con mayor conductividad. El grosor de un pavimento también influye en la cantidad de calor que almacenará, con pavimentos más gruesos que almacenan más calor

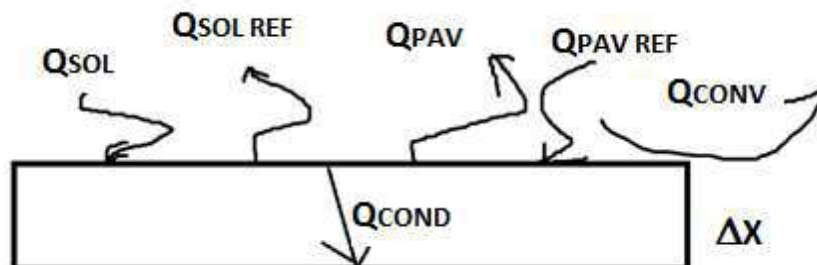


Figura 3 - Esquema del balance de calor a considerar en la capa de pavimento-

## 2.2. Recopilación de los parámetros involucrados

Para determinar cómo será el prototipo a realizar con mezcla asfáltica es necesario realizar un estudio previo de modelado y simulación acerca de cómo ocurre la transferencia de calor y la distribución de temperaturas hacia el interior del pavimento sujeto a irradiación solar. Se han desarrollado distintos modelos para predecir las temperaturas del asfalto [7]. En casi

todos los modelos de predicción de la temperatura del asfalto, se requieren como condiciones iniciales, datos de las propiedades fisicotérmicas del asfalto que se trata, tales como conductividad térmica, capacidad calorífica, irradiación solar, densidad del material, velocidad del viento, época del año, día, hora, etc.

Es un hecho conocido que la temperatura de la superficie disminuye cuando aumenta la conductividad térmica del material. Experimentalmente, agregados de cuarzo o de partículas metálicas pueden aumentar la conductividad térmica.

Para resolver las ecuaciones diferenciales que resultan del balance de energía y determinar la variación de temperatura con la profundidad de la capa de pavimento se usa el método de diferencia finita bajo la Plataforma Matlab © .

Por otra parte, todas las conclusiones que resultan del cálculo de los elementos en el balance serán validadas con medidas experimentales, con probetas con las mezclas asfálticas seleccionadas, en experiencias en el laboratorio y/o en estacionamientos al aire libre.

### 2.3. Formulación Matemática del Problema

En la transmisión de calor por conducción la energía se transmite entre dos puntos de un medio conductor que poseen distinta temperatura. La ecuación fundamental de la transmisión de calor por conducción calcula la distribución espacial y temporal de temperaturas en un medio. Así, la resolución de la ecuación permite determinar la temperatura de cualquier punto del medio para cualquier instante de tiempo. La transferencia de calor entre el pavimento y sus capas interiores puede tratarse como una transferencia de calor transitoria unidimensional. En adelante se considera el tratamiento para un conjunto de 3 capas de pavimento uno de ellos con una cierta permeabilidad y el suelo donde esta soportado

El problema a resolver es encontrar la distribución de temperatura dentro de un paquete de de asfalto definido por tres capas apoyado sobre el suelo.

Las capas de asfalto son:

- ✓ Capa 1 y 3 con la misma composición

Se trata de pavimentos compactos de 0.02 m espesor, con las siguientes propiedades físicas.

$$C_p^{(i)} = 1287.26 \left[ \frac{J}{Kgrs \cdot ^\circ K} \right] \quad \rho^{(i)} = 1287.26 \left[ \frac{Kgrs}{m^3} \right] \quad k^{(i)} = 1.4 \left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right]$$

$$i = 1,3$$

- ✓ Capa 2 : Está formada por un asfalto poroso de 0.04 m de espesor

$$C_p^{(2)} = 1840 \left[ \frac{J}{Kgrs \cdot ^\circ K} \right] \quad \rho^{(2)} = 1000 \left[ \frac{Kgrs}{m^3} \right] \quad k^{(2)} = 1.03 \left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right] \quad (2)$$

Se considera para el tratamiento que el suelo tiene una temperatura constante de 287<sup>o</sup>K , un espesor de 2.92 m y sus constantes físicas son

$$C_p^{(4)} = 837 \left[ \frac{J}{Kgrs \cdot ^\circ K} \right] \quad \rho^{(4)} = 1600 \left[ \frac{Kgrs}{m^3} \right] \quad k^{(4)} = 1.47 \left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right] \quad (3)$$

Sobre la superficie de la primer capa de asfalto incide un flujo térmico dado por la diferencia entre un flujo térmico por radiación (gana calor) y un flujo térmico convectivo (pierde calor)

✓ Flujo Térmico por radiación

$$Q^{rad} (T_{sup}) = (1 - alb) r + (e_a - e) \sigma (T_{sup})^4 \quad (4)$$

Siendo:

- $alb = \text{albedo} = 0.15$
- $e = 0.85$  Emisividad del pavimento
- $e_a = 0.7$  Emisividad de la atmosfera.
- $\sigma = 5,67032 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  constante de Boltzman
- $r$  Radiación en función del tiempo, dato obtenido del TMY.
- $T_{sup}$  Temperatura de la superficie de la primera capa, tiene una variación temporal

✓ Flujo térmico convectivo

$$Q^{conv} = h_c (T_{sup} - T_{aire}) \quad (5)$$

Siendo:

$$h_c = 698.24 \left( 0.00144 \left( \frac{T_{aire} + T_{sup}}{2} \right)^{0.3} V^{0.7} + 0.00097 |T_{sup} - T_{aire}|^{0.3} \right) \quad (6)$$

- $T_{sup}$  Temperatura de la superficie de la primera capa que varía con el tiempo
- $T_{aire}$  Temperatura del aire, que varía con el tiempo. Dato obtenido del TMY
- $V$  Velocidad del viento. Varía con el tiempo. Dato obtenido del TMY.

$$Q^{total} = Q^{rad} - Q^{conv} \quad (7)$$

El modelo matemático queda definido por la ecuación diferencial.

$$\begin{aligned} \rho^{(i)} C_p^{(i)} \frac{\partial T}{\partial t} &= k^{(i)} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ (\alpha^2)^{(i)} &= \frac{k^{(i)}}{\rho^{(i)} C_p^{(i)}} \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= (\alpha^2)^{(i)} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (8)$$

- $i = 1$  Primera capa de asfalto
- $i = 2$  Segunda capa de asfalto
- $i = 3$  Tercera capa de asfalto
- $i = 4$  Capa definida por el suelo

#### 2.4. Resolución de la ecuación diferencial

✓ Condición inicial.

Se considera una temperatura constante en las tres capas de asfalto y el suelo de  $303 \text{ }^\circ\text{K}$ . Esta condición es supuesta, tiene fuerte influencia al comienzo en el modelado, atenuándose su importancia en el transcurso del tiempo.

$$T_{ini} = 303 \text{ }^\circ\text{K} \quad (9)$$

✓ Condición de borde superior.

$$Q^{total} = Q^{rad} - Q^{conv} \quad (10)$$

Donde  $Q^{rad}$  y  $Q^{conv}$  están dadas por (4) y (5) respectivamente.

Condición de borde inferior.

Se fija una temperatura constante de 287 °K en el borde inferior.

$$T_{inf} = 287^{\circ}K \quad (11)$$

El problema definido por la ecuación diferencial (8), la condición inicial (9) y las condiciones de borde (10) y (11) es un problema no lineal en las temperaturas debido a la no linealidad de la condición de borde superior (10) en la temperatura  $T_{sup}$ .

### **Discretización de la ecuación diferencial.**

Para la resolución inicialmente se discretiza la ecuación diferencial (8) haciendo uso de las siguientes expresiones aproximadas de las derivadas primera y segunda

Derivada primera temporal

Expresando la derivada primera temporal en el punto  $x = x_i$  y  $t = t_j$  en forma progresiva y tomando un incremento temporal  $k$

$$\frac{\partial T}{\partial t}(x_i, t_j) \cong \frac{T(x_i, t_j + k) - T(x_i, t_j)}{k} - \frac{k}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}(x_i, \mu_j) \quad \mu_j \in (t_j, t_j + k) \quad (12)$$

Derivada segunda espacial

Expresando la derivada segunda espacial en el punto  $x = x_i$  y  $t = t_j$  en forma centrada con un incremento espacial  $h$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x_i, t_j) \cong \frac{T(x_i + h, t_j) - 2T(x_i, t_j) + T(x_i - h, t_j)}{h^2} - \frac{h^2}{12} \frac{\partial^4 T}{\partial x^4}(\xi_i, t_j) \quad \xi_i \in (x_i - h, x_i + h) \quad (13)$$

Definiendo

$$\begin{aligned} T(x_i, t_j + k) &= T_i^{j+1} & T(x_i, t_j) &= T_i^j \\ T(x_i + h, t_j) &= T_{i+1}^j & T(x_i - h, t_j) &= T_{i-1}^j \end{aligned} \quad (14)$$

En resumen la expresión de la ecuación diferencial discretizada en el punto  $x = x_i$  y  $t = t_j$  está definida por

$$\frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{k} - \alpha^2 \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{h^2} = 0 \quad (15)$$

Generándose un esquema en diferencias progresivas, la cual presenta un error de truncamiento local

$$\tau_{ij} = \frac{k}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}(x_i, \mu_j) - \frac{\alpha^2 h^2}{12} \frac{\partial^4 T}{\partial x^4}(\xi_i, t_j) \quad (16)$$

Desarrollando la expresión (16), resulta

$$T_i^{j+1} - T_i^j = \frac{k \alpha^2}{h^2} [T_{i+1}^j - 2 T_i^j + T_{i-1}^j] \rightarrow T_i^{j+1} = \frac{k \alpha^2}{h^2} [T_{i+1}^j - 2 T_i^j + T_{i-1}^j] + T_i^j \quad (17)$$

Definiendo el parámetro  $\lambda$  como:

$$\lambda = \frac{k \alpha^2}{h^2} \quad (18)$$

Resulta:

$$T_i^{j+1} = \lambda [T_{i+1}^j - 2 T_i^j + T_{i-1}^j] + T_i^j \rightarrow T_i^{j+1} = \lambda T_{i+1}^j + (1 - 2 \lambda) T_i^j + \lambda T_{i-1}^j \quad (19)$$

Se aprecia que a la derecha de (19) están descritas las temperaturas asociadas al instante  $t = t_j$ , mientras a la izquierda de la ecuación están descritas únicamente la temperatura asociada al instante  $t = t_{j+1}$ . Por lo que teniendo como datos las temperaturas  $T_{i+1}^j$ ,  $T_i^j$  y  $T_{i-1}^j$ , de (19) se obtiene directamente la temperatura por medio del esquema explícito.

Discretizando los dominios espacial en  $n$  partes y el temporal  $m$  se tienen las siguiente equidistancia entre los puntos.

$$h = L/n \quad k = T_{final} / m \quad (20)$$

Quedando el dominio continuo representado por el siguiente conjunto de puntos

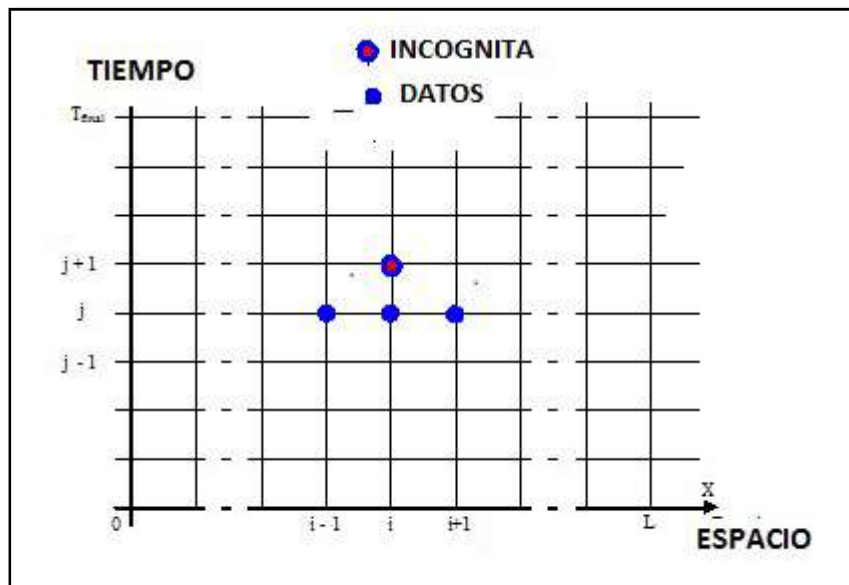


Figura 4-Diseño de malla para modelo en diferencias finitas

Aplicando la ecuación explícita (19) para el primer instante de tiempo  $t_2 = k$

$$T_i^2 = \lambda T_{i+1}^1 + (1 - 2 \lambda) T_i^1 + \lambda T_{i-1}^1 \quad i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (20)$$

Desarrollando para  $i$  resulta



$$\begin{aligned}
 i = 1 & \quad T_1^2 = \lambda T_2^1 + (1 - 2\lambda) T_1^1 + \lambda T_0^1 \\
 i = 2 & \quad T_2^2 = \lambda T_3^1 + (1 - 2\lambda) T_2^1 + \lambda T_1^1 \\
 i = 3 & \quad T_3^2 = \lambda T_4^1 + (1 - 2\lambda) T_3^1 + \lambda T_2^1 \\
 i = 4 & \quad T_4^2 = \lambda T_5^1 + (1 - 2\lambda) T_4^1 + \lambda T_3^1 \\
 & \quad \dots \\
 i = s & \quad T_s^2 = \lambda T_{s+1}^1 + (1 - 2\lambda) T_s^1 + \lambda T_{s-1}^1 \\
 & \quad \dots \\
 i = n-2 & \quad T_{n-2}^2 = \lambda T_{n-1}^1 + (1 - 2\lambda) T_{n-2}^1 + \lambda T_{n-3}^1 \\
 i = n-1 & \quad T_{n-1}^2 = \lambda T_n^1 + (1 - 2\lambda) T_{n-1}^1 + \lambda T_{n-2}^1
 \end{aligned} \tag{21}$$

Las expresiones anteriores son numéricamente estables si se cumple la siguiente desigualdad

$$\lambda = \frac{k \alpha^2}{h^2} \quad 0 \leq \frac{k \alpha^2}{h^2} \leq \frac{1}{2} \tag{22}$$

### 3.1.2 Esquema iterativo para definir la temperatura de la superficie de pavimento.

**Paso 1** -Se fija una temperatura para la superficie de la capa asfáltica  $T_{sup}$ , con este valor fijado se calcula

$$Q^{rad}(T_{sup}) = (1 - alb) r + (e_a - e) \sigma (T_{sup})^4 \tag{23}$$

$r$  Radiación en función del tiempo. Dato meteorológico obtenido del TMY.

$T_{sup}$  Temperatura de la superficie de la capa supuesta asociada a un instante de tiempo

$$Q^{conv} = h_c (T_{sup} - T_{aire}) \tag{24}$$

Donde:

$$h_c = 698.24 \left( 0.00144 \left( \frac{T_{aire} + T_{sup}}{2} \right)^{0.3} V^{0.7} + 0.00097 |T_{sup} - T_{aire}|^{0.3} \right) \tag{25}$$

$T_{aire}$  Temperatura del aire asociada a un instante de tiempo. Dato meteorológico obtenido del TMY.

$V$  Velocidad del viento asociada a un instante de tiempo. Dato meteorológico obtenido del TMY

$$Q^{total} = Q^{rad} - Q^{conv} \tag{26}$$

**Paso 2** Haciendo uso de la ecuación (20)

$$T_2^{j+1} = \lambda T_3^j + (1 - 2\lambda) T_2^j + \lambda T_1^j \quad j = 1, 2, \dots, m - 1 \tag{27}$$

Donde:

- $T_3^j$  Temperatura a una profundidad de  $2h$  en el instante  $j$ .

Dato conocido, calculado previamente o en el primer instante es igual a la condición inicial.

- $T_2^j$  Temperatura a una profundidad de  $h$  en el instante  $j$ .

Dato conocido, calculado previamente o en el primer instante es igual a la condición inicial.

- $T_1^j$  Temperatura sobre la superficie en el instante  $j k$ .

Dato conocido. Calculado previamente o en el primer instante es igual a la condición inicial.

- $T_2^{j+1}$  Temperatura a una profundidad de  $h$  en el instante  $(j + 1) k$ .

Si se conoce la temperatura  $T_2^{j+1}$  es posible calcular el siguiente flujo sobre la superficie

$$Q^{calc} = -k^{(1)} \frac{T_2^{j+1} - T_{sup}}{k} \quad (28)$$

**Paso 3-** Haciendo uso de la ecuaciones (28) y (26) se define la función:

$$f(T_{sup}) = [Q^{total}(T_{sup}) - Q^{calc}(T_{sup})]^2 \quad (29)$$

Numéricamente se busca el mínimo de la función (29) variando la temperatura de la superficie  $T_{sup}$ , mediante la metodología del Section Golden, para lo cual se vuelve al Paso1 y se repite el proceso iterativo hasta encontrar su mínimo bajo una tolerancia dada. En este punto se puede concluir que  $Q^{total}(T_{sup})$  y  $Q^{calc}(T_{sup})$  son *casi-iguales* y la temperatura que hace mínima a la función  $f(T_{sup})$  es la temperatura de la superficie asociada al instante  $(j + 1) k$ .

**Paso 4-** Teniendo la temperatura de la superficie mediante la ecuación

$$T_i^{j+1} = \lambda T_{i+1}^j + (1 - 2 \lambda) T_i^j + \lambda T_{i-1}^j \quad i = 2, \dots, n - 1 \quad (30)$$

Se calculan las temperaturas dentro de las tres capas de asfalto y en el suelo.

**Paso 5** -Se repite el proceso para el instante posterior de tiempo.

#### 4. RESULTADOS OBTENIDOS.

Tomando los siguientes parámetros de cálculo:

incremento temporal = 10 s, incremento espacial = 0.005m, tolerancia en la búsqueda del mínimo= 0.00001, número máximo de iteraciones en la búsqueda del mínimo = 2000, es posible graficar la variación de la temperatura con la profundidad o espesor de pavimento durante treinta días del TMY. A partir del modelo propuesto es posible medir la temperatura a diferentes niveles de profundidad

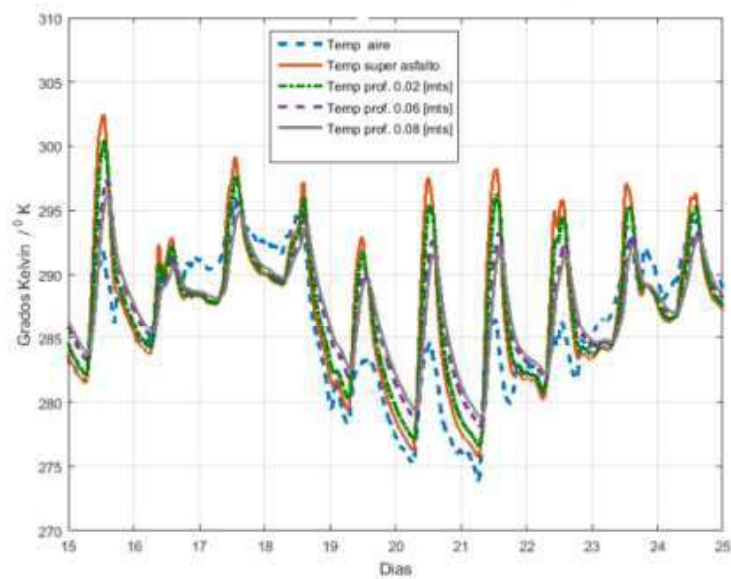


Figura 5 Variación de la temperatura calculada a diferentes profundidades en un periodo de 10 días del mes que se estudia correspondiente al TMY

En la Figura 5 se ha representado la variación de temperatura calculada a diferentes profundidades en el periodo comprendido entre el día 15 y el 25 del mes considerado. Se observa que la temperatura de la superficie de la capa 1 de pavimento alcanza los mayores valores en cada día analizado y presenta máximos y mínimos que se asocian a la presencia o ausencia de la luz solar. La variación de temperatura de la capa 1 sigue de modo muy aproximado y solidario la variación de la temperatura en la superficie. Las variaciones de temperatura con la profundidad y para cada día del mes de enero se muestran en la Figura 6.

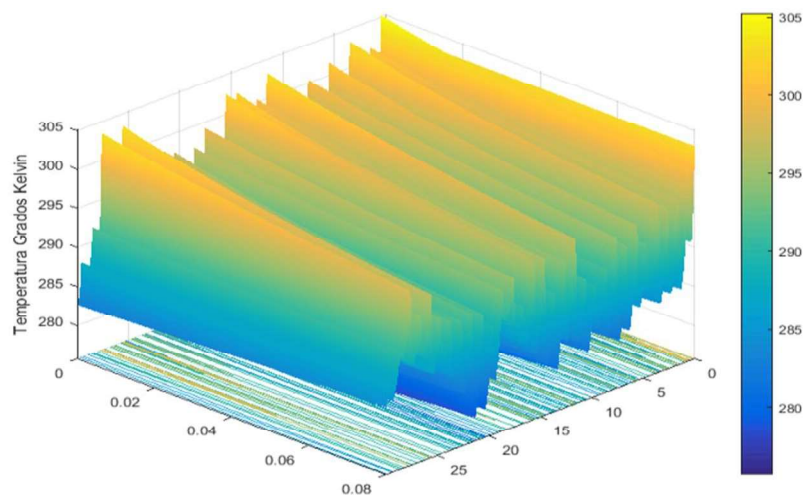


Figura 6- Variación de la temperatura con la profundidad, del conjunto de 3 capas de asfalto soportadas por el suelo durante 30 días del mes seleccionado del TMY.

## 5. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en la simulación muestran que es posible calcular como varía la temperatura del colector de calor solar, haciendo uso de una serie de parámetros fisicotérmicos y datos del año meteorológico tipo.

Se observa que la variación horaria de la temperatura del aire para el mes de enero y la temperatura del pavimento aumentan ambas hasta alcanzar un máximo diario y luego estas temperaturas disminuyen debido a la menor radiación solar

## 6. REFERENCIAS.

- [1] *Avanzando en la transición mundial hacia la energía renovable*, Tech. Rep, REN21 (2017).
- [2] Pascual-Muñoz P, Castro-Fresno D, P. Serrano-Bravo P. Alonso-Estébanez. (2013) *A thermal and hydraulic analysis of multilayered asphalt pavements as active solar collectors*. *Applied Energy* 111, 324–332.
- [3] M. Solaimanian, T W. Kennedy (1975) *Predicting Maximum Pavement Surface Temperature Using Maximum Air Temperature and Hourly Solar Radiation* *Transportation Research Record* 1417
- [4] Gago, E. J., J. Roldan, R. Pacheco-Torres, and J. Ordonez. (2013) *The City and Urban Heat Islands: Review of Strategies to Mitigate Adverse Effects*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 25, , pp. 749–758
- [5] Pan P, Wu S, Xiao W, Liu G (2015) *A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow melting*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 48, 624–634
- [6] F. Bre, M.G. García Santa Cruz, V D. Fachinotti (2017) *Generación del Año Meteorológico Típico para la Ciudad de La Plata, Argentina XIV Encontro Nacional do Conforto no ambiente Construido Balneario Comboriu Brasil*
- [7] Hermansson, E. (2004). "Mathematical model for paved surface summer and winter temperature: comparison of calculated and measured temperatures." *Cold Regions Science and Technology* 40(1-2): 1-17

## 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el aporte financiero necesario para la realización del trabajo, a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, CICPBA y a la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata, UTN FRLP. VB agradece la beca para alumnos UTN.