



HEATT©. NUEVO SOFTWARE GRATUITO PARA SIMULACIÓN TÉRMICA DE FLUJOS DENTRO DE TUBERÍAS

MANUEL SECO-NICOLÁS¹, MARIANO ALARCÓN GARCÍA¹, ALFONSO P.
RAMALLO GONZÁLEZ², JUAN PEDRO LUNA-ABAD³

¹Ingeniería Energética e Innovación Docente en Tecnología, Dpto. de Electromagnetismo y Electrónica
Campus de Excelencia Internacional en el contexto europeo (CEIR) Campus Mare Nostrum
Universidad de Murcia, España

²Sistemas Inteligentes y Telemática, Dpto. de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones
Campus de Excelencia Internacional en el contexto Europeo (CEIR) Campus Mare Nostrum
Universidad de Murcia, España

³Modelado de Sistemas Térmicos y Energéticos, Dpto. de Ingeniería Térmica y de Fluidos
Campus de Excelencia Internacional en el contexto Europeo (CEIR) Campus Mare Nostrum
Universidad Politécnica de Cartagena, España

(Recibido 19 de marzo de 2023, para publicación 28 de marzo de 2023)

Resumen – Se presenta la nueva plataforma web de simulación numérica de flujo térmico en régimen laminar que discurre por en el interior de tuberías [HEATT©](#) (Herramienta de Evaluación y Análisis Térmico en Tuberías) en su versión inicial 1.0. Se trata de un software libre y de uso gratuito disponible a nivel internacional basada en el Método de Simulación por Redes (MESIR), financiado por la convocatoria 2021 de Pruebas de Concepto de la Fundación Séneca-Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia (España). Cubre el espacio existente entre los grandes y costosos programas informáticos de simulación térmica en fluidos, y el diseño por parte de pequeños profesionales, PYMEs e investigadores con pocos recursos para poder realizar cálculos complejos de comportamiento térmico.

Palabras clave – [HEATT©](#), transmisión del calor en tuberías, flujo térmico, simulación numérica, MESIR.

1. INTRODUCCIÓN

En el actual contexto internacional, la energía y, en concreto, la optimización de instalaciones industriales y domésticas con fluidos térmicos para reducir los consumos energéticos está teniendo un papel muy relevante a nivel internacional, como reflejan algunas Directivas del Parlamento Europeo y el Consejo [1, 2]. Por citar algún ejemplo de la repercusión en España, el Componente 7 del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) [3] destina un presupuesto de 100M€ sólo a implantación de proyectos de energía solar térmica, y 150 M€ a proyectos de producción de frío y otros procesos; así como otros instrumentos como el REPowerEU para reducir la dependencia energética con Rusia, el PNIEC para descarbonizar el 30% de emisiones industriales, ayudas FEDER, etc.

En este contexto de necesidad internacional de optimización del uso de la energía, se presenta, por primera vez, la versión 1.0 de la nueva plataforma de diseño de tuberías [HEATT©](#) (Herramienta de Evaluación y Análisis Térmico en Tuberías), de alcance internacional. Configurada en formato de software libre, alojado en la web, y accesible a cualquier diseñador o investigador que desee realizar proyectos en los que sea necesario para tener en cuenta el intercambio de calor entre un fluido que circula por una tubería y el ambiente externo, a través de una plataforma web gratuita, versátil y amigable.

Esta aplicación ha sido financiada como Prueba de Concepto por la Fundación Séneca-Agencia para la Ciencia y la Tecnología de la Región de Murcia, máximo exponente de la financiación pública regional en la Región de Murcia.

Esta herramienta está basada en extensos estudios previos [4-7], consigue obtener resultados precisos en problemas de flujo complejos como el caso de condición de contorno asimétrica de temperatura publicado recientemente por Seco *et al.* en 2021 [8]; en un futuro próximo se espera incorporar condiciones de contorno y comportamiento más amplias como calor constante o asimétrico, temperatura uniforme o no, transitorio, etc. En el mercado existe una gran cantidad de software para el cálculo y diseño de tuberías. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el software está relacionado con el cálculo de aislamiento, pérdidas de calor, pérdidas de carga, mecánicas, etc. En estos casos, generalmente se refieren a fluidos operando en estado estacionario y condiciones que podemos calificar como “estándar”, como AISLAM[®] [9], de libre disposición; TechCalc 2.0[®] [10], de cálculo de elementos simples; FRIO[®] [11], para instalaciones frigoríficas o CYPE[®] [12]. Sin embargo, no permiten a los ingenieros ni arquitectos diseñar sus propias soluciones cuando las condiciones de funcionamiento se desvían de las clásicas, como es el caso de las instalaciones solares térmicas u otras.

La innovación fundamental que se presenta es la aplicación web [HEATT[®]](#) (Fig. 1), actualmente en su versión 1.0 de Prueba de Concepto. Con esta aplicación web se pretende reducir la brecha entre el software privado, muy caro e inasequible en la inmensa mayoría de los casos, y las PYMEs o autónomos en general que suelen necesitar trabajar de forma rápida y económica. Este es un software abierto y modular destinado a desarrollarse continuamente sobre la base de los comentarios recibidos de los profesionales y usuarios en general.

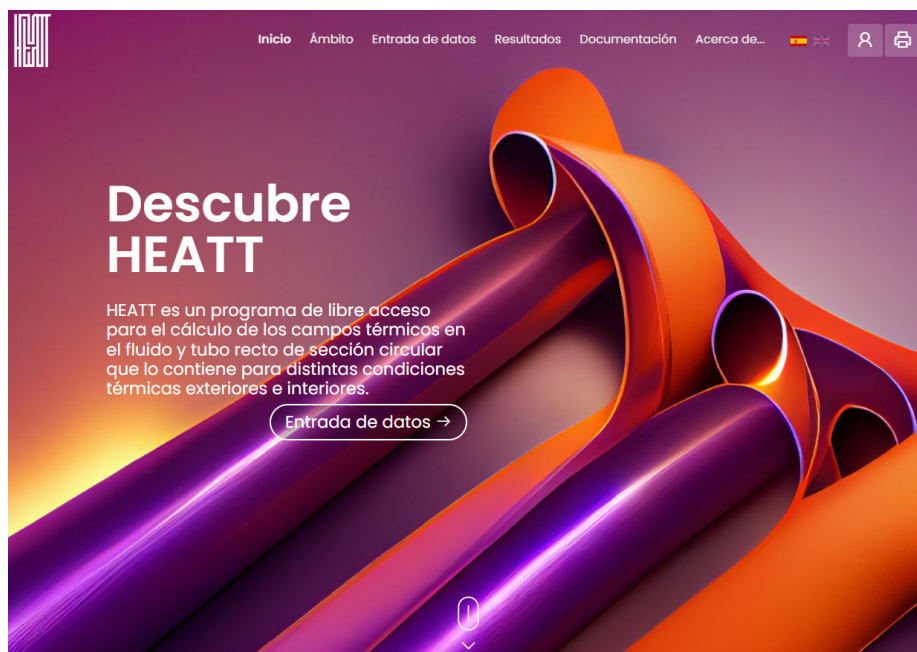


Fig. 1. Portada aplicación web: [HEATT[®]](#). Fuente: elaboración propia, [45].

2. FUNDAMENTOS DE DISEÑO

Para desarrollar esta Prueba de Concepto se ha contrastado ampliamente a nivel numérico y experimental la metodología de cálculo utilizada conocida como Método de Simulación por Redes (MESIR) [13], que permite estimaciones rápidas, eficaces y precisas del transporte de calor en soluciones tubulares como las utilizadas en captadores solares térmicos, geotermia, suelo radiante y otros equipos sometidos a condiciones de operación cuyo análisis implica gran dificultad, sin necesidad de que el usuario esté familiarizado con el uso de dicha metodología MESIR.

El modelo fisicomatemático del colector, ya validado, se ha implementado en un software gratuito que simula el comportamiento térmico de un fluido que circula a través de una tubería de sección circular. En

este fluido, un usuario sin conocimientos en MESIR, y con conocimientos muy simples de mecánica de fluidos e ingeniería térmica, puede determinar tanto las propiedades térmicas del fluido como del tubo circundante.

2.1. Método de las Diferencias Finitas

No se pretende en este epígrafe detallar en exceso el método de las diferencias finitas, tan solo enunciar el mecanismo en que se basa este método numérico para el lector poco familiarizado con estas técnicas, en las referencias [14-18], entre otras muchas, podrá el lector encontrar los fundamentos detallados de este método y en [19] se puede ver el alcance y amplia aplicación de éste a los problemas relacionados con la transferencia de calor.

En el Método de las Diferencias Finitas se supone inicialmente una función $f=f(\xi,\eta)$ con ξ, η dos variables cualesquiera, ec (1). Suponiendo un incremento inicial para ξ , de h_1 , el desarrollo por series de Taylor es:

$$f(\xi + h_1, \eta) = f(\xi, \eta) + h_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \xi}\right)_{\xi,\eta} + \frac{h_1^2}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial \xi^2}\right)_{\xi,\eta} + \frac{h_1^3}{6} \left(\frac{\partial^3 f}{\partial \xi^3}\right)_{\xi,\eta} + H(h_1^4) \quad (1)$$

Considerando un incremento h_1 suficientemente pequeño, ξ, η continuas, una serie convergente y despreciables los términos de orden 2 o más, entonces se pueden calcular las diferencias finitas hacia adelante y hacia atrás para cada una de las variables de la función, ecs. (2a a 2d):

$$\left[\left(\frac{\partial f}{\partial \xi}\right)_{\eta=\text{cte}}\right]_{adelante} \cong \frac{1}{h_1} [f(\xi + h_1, \eta) - f(\xi, \eta)] \quad (2a)$$

$$\left[\left(\frac{\partial f}{\partial \eta}\right)_{\xi=\text{cte}}\right]_{adelante} \cong \frac{1}{h_2} [f(\xi, \eta + h_2) - f(\xi, \eta)] \quad (2b)$$

$$\left[\left(\frac{\partial f}{\partial \xi}\right)_{\eta=\text{cte}}\right]_{atras} \cong \frac{1}{h_1} [f(\xi, \eta) - f(\xi - h_1, \eta)] \quad (2c)$$

$$\left[\left(\frac{\partial f}{\partial \eta}\right)_{\xi=\text{cte}}\right]_{atras} \cong \frac{1}{h_2} [f(\xi, \eta) - f(\xi, \eta - h_2)] \quad (2d)$$

Así se puede obtener una *aproximación central* de diferencias finitas, ecs. (3, 4 y 5):

$$f(\xi + h_1, \eta) + f(\xi - h_1, \eta) = 2f(\xi, \eta) + 2\frac{h_1^2}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial \xi^2}\right)_{\xi,\eta} + H(h_1^4) \quad (3)$$

y despejando queda:

$$\left[\left(\frac{\partial^2 f}{\partial \xi^2}\right)_{\xi,\eta}\right]_{central} \cong \frac{1}{h_1^2} [f(\xi + h_1, \eta) - 2f(\xi, \eta) + f(\xi - h_1, \eta)] \quad (4)$$

$$\left[\left(\frac{\partial^2 f}{\partial \eta^2}\right)_{\xi,\eta}\right]_{central} \cong \frac{1}{h_2^2} [f(\xi, \eta + h_2) - 2f(\xi, \eta) + f(\xi, \eta - h_2)] \quad (5)$$

Es un método más operativo ya que basta con sustituir la función f por la temperatura T , para obtener la temperatura en cada punto; y basta sustituir ξ por x ; η por y ; y h_1 por Δx y h_2 por Δy este resultado es mucho más sencillo de aplicar a problemas en dos o tres dimensiones, y suficientemente aproximadas como para poder aplicarlas a cualquier problema real de transmisión del calor.

2.2. Analogía termoelectrónica

Tal como queda descrito con detalle en [13], el método de simulación por redes, MESIR, o *Network Simulation Method*, NSM, es un procedimiento para el estudio de distintos procesos, consistente en elaborar un modelo en red eléctrica equivalente al proceso en cuestión, y en simular tal proceso mediante la aplicación al modelo en red de un programa adecuado de resolución de circuitos eléctricos.

Un modelo en red se considera equivalente a un determinado proceso cuando, en la descripción del proceso, sus ecuaciones diferenciales y las ecuaciones de la red elemental correspondiente a las mismas variables, coinciden. Tal equivalencia, por un lado, determina el campo de aplicación del método de simulación por redes, que abarcará cualquier proceso que admita una red equivalente. Por otro lado, establece la validez del modelo en red en base a la que tenga el modelo matemático del que parte.

Para desarrollar el modelo en red se parte de las ecuaciones matemáticas que definen el proceso objeto de estudio. Estas ecuaciones se discretizan usando el método de las diferencias finitas, MDF, en el entorno de un volumen finito elemental, una celdilla elemental. Una vez discretizadas las ecuaciones y convertidos cada uno de sus términos en elementos discretos, se hace una relación formal de correspondencia entre cada uno de estos términos y los correspondientes componentes eléctricos. Esto se hace para cada una de las celdillas en las que se ha dividido el espacio o volumen en el que tienen aplicación las ecuaciones objeto de estudio.

La asociación de tales celdillas elementales viene a describir el proceso en cuestión en un medio finito, descripción tanto más exacta cuanto mayor sea el número de celdillas elementales que se conecten.

En el caso de los procesos de transporte, la posibilidad de elaborar modelos en red representativos de los mismos, es decir, el que admitan redes equivalentes, supone no sólo la equivalencia matemática, sino, también, la equivalencia física, dada las asociaciones que pueden establecerse, en cuanto al tipo de descripción física, entre las variables características de unos y otros procesos. Además, la equivalencia física permite, en casos muy concretos, determinar cualitativa y cuantitativamente, ciertas magnitudes asociadas a la red, que pueden jugar un papel, en la descripción del fenómeno de transporte, similar al de su equivalente en el transporte de carga eléctrica, como es el caso de la impedancia, por ejemplo. Cuando esto es así, el modelo en red, claramente, va más allá que como etapa previa a la simulación, pues contiene elementos que son inherentes al propio proceso.

Pero no sólo se pueden modelar procesos de transporte. El método se puede aplicar a otro tipo de fenómenos siempre y cuando se satisfagan los requerimientos básicos que más adelante se explicitarán. Dada, pues, la variedad de fenómenos que pueden admitir modelos en red se hace preciso un planteamiento formal, planteamiento que se concreta en la teoría de redes de Peusner [20], teoría en la que se apoya para elaborar su termodinámica de redes, y que, a su vez, se sustenta en la teoría de circuitos. Sobra decir que en cada una de las celdillas elementales sobre las que se sustenta el modelo cumplen las leyes de Kirchoff para el voltaje y la corriente.

El MESIR ha sido aplicado en las últimas cuatro décadas en varios campos de la Física, Química, Biología, Geología e Ingeniería en los que están involucrados los fenómenos de transporte, reacciones químicas, cálculo de estructuras, mecánica de fluidos, mecánica o problemas de frontera móvil, [21-27] entre los trabajos relacionados con la transferencia de calor en superficies adicionales cabe mencionar las referencias [28-35] en las que se desarrollan innovadores parámetros para la mejor caracterización y optimización de aletas y de superficies extendidas en general.

A modo de ejemplo sencillo y como introducción al problema que se pretende exponer en este trabajo se toma la ecuación de la transferencia de calor en coordenadas cartesianas. La expresión general de esta ecuación es bien conocida, ec. (5);

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_g = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

Considerando el problema estacionario y en 1D únicamente en la dirección del eje OX, la ecuación se transforma en, ec. (6);

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q}_g = 0 \quad (6)$$

En este caso se ha tenido en cuenta la posibilidad de generación interna de calor. Es sencillo aplicar la formulación de las diferencias finitas para discretizar esta ecuación en un volumen unitario o celdilla elemental, el resultado de la discretización es, ecs. (7a y 7b):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \sim \frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{(\Delta x)^2} \quad (7a)$$

$$\frac{\dot{q}_l}{k_i} \quad (7b)$$

De manera que la ecuación discretizada queda, ec. (8);

$$\frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{\dot{q}_l}{k_i} = 0 \quad (8)$$

y aplicada al dominio reticulado de la figura y tras ciertas manipulaciones elementales, se puede poner como, ec.(9);

$$\frac{T_{i-\Delta x/2} - T_i}{\Delta x/2} - \frac{T_i + T_{i+\Delta x/2}}{\Delta x/2} + \left(\frac{\dot{q}_l}{k_i}\right) \Delta x = 0 \quad (9)$$

Cada uno de los términos de la ecuación anterior puede identificarse como un flujo de corriente entrante o saliente a un nodo central en función del signo que le acompañe, de este modo se ha de cumplir la ley de Kirchoff para la corriente y para las tensiones. Repitiendo este proceso para el resto de las celdillas en el que esta reticulado el dominio se obtiene un sistema de ecuaciones que corresponden al circuito global, en este caso es muy conveniente usar un software de resolución de circuitos eléctricos tal como PSpice, GNSpice, etc., los resultados arrojados por el programa serán los valores de temperatura y calor en cada punto.

Así se evidencia la relación formal existente entre los fenómenos de transmisión del calor y los fenómenos eléctricos, en ella se basa MESIR para elaborar modelos fisicomatemáticos destinados a simular comportamientos térmicos, en este caso, el del flujo que discurre a lo largo de una tubería circular sometida a cambios térmicos externos.

3. EL PROBLEMA DE GRAETZ. APROXIMACIONES A LA REALIDAD MEDIANTE MODELOS 1D, 2D Y 3D

En el epígrafe anterior se ha descrito como se aplica el MESIR a un caso sencillo en coordenadas cartesianas bajo modelos 1D y con generación interna de calor. Pocos casos reales son tan sencillos y de tan inmediata aplicación. El caso que se desarrolla en este epígrafe fue desarrollado en 1882 por el físico alemán Leo Graetz [36] y describió lo que posteriormente se conoció como el “problema de Graetz”, tal problema consiste en un flujo desarrollado hidrodinámicamente y con perfil uniforme de temperatura, en un punto determinado hay un salto brusco de temperatura en la superficie del fluido que hace que se modifique el perfil de temperatura. El problema se puede estudiar bajo diferentes geometrías, conducciones cilíndricas o placas planas paralelas, bajo condiciones de flujo laminar o turbulento, etc. En el problema desarrollado por Graetz se considera que el fluido circula por el interior de una tubería circular en régimen laminar completamente desarrollado y con temperatura uniforme. Este cilindro se veía súbitamente calentado, pasando la superficie del fluido a estar calentado a una temperatura diferente, esto ocasiona un nuevo perfil de temperaturas, ec. (10), en esta primera aproximación no se considera la pared del tubo, solo el fluido. En 1980, Papoutsakis *et al.* [37] incluyeron la conducción axial en la formulación del problema, ya que era necesario para la consideración de números de Péclet bajos. A este problema se le llamó “problema conjugado de Graetz” ec. (11). Entre 1992 y 1995, los investigadores Bilir, Zhang, Ebadian entre otros [38-40] incorporaron además el efecto de la pared del tubo en el comportamiento térmico del flujo. A esto se llamó “problema conjugado-extendido de Graetz” ecs. (12a, 12b), y lo llegaron a resolver numéricamente para casos estacionarios bidimensionales.

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(k_f r \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) \right] = (\rho u_z c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial z} + (\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (10)$$

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(k_f r \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = (\rho u_z c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial z} + (\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(k_f r \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = (\rho u_z c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial z} + (\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} \\ \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(k_s r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) = (\rho c_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} \end{array} \right. \quad (12a \text{ y } 12b)$$

En 2018, Seco-Nicolás *et al.* [5], utilizando el análisis dimensional discriminado aplicado al “problema conjugado-extendido de Graetz” mediante MESIR, confeccionaron un conjunto de ábacos con las soluciones universales del comportamiento térmico de fluidos que circulaban por el interior del emparrillado de tubos de captadores solares térmicos de baja temperatura trabajando en condiciones operativas normales. Sin embargo, pronto se determinó que había un número muy limitado de aplicaciones de este método en la industria convencional, ya que la simetría que define el modelo bidimensional no tenía en cuenta la realidad fenomenológica de la mayoría de las situaciones reales observadas. Era necesario lograr un modelo tridimensional que resolviera el problema de Graetz.

Tras varios años de colaboración en 2021, un grupo de investigadores de la Universidad de Murcia, (UM) y de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) ambas situadas en España consiguieron desarrollar un modelo bajo condiciones 3D que simulaba un flujo laminar en condiciones de convección forzada sujeto a condiciones de contorno asimétricas como las que se dan en el emparrillado de tubos de un captador solar térmico de baja temperatura, en el que la mitad superior de cada tubo recibe la energía proveniente del sol, mientras que la mitad inferior del tubo permanece embutida en una capa de aislamiento ecs. (13a, b y c).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(k_f r \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = (\rho u_z c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial z} + (\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} \\ \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(k_s r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) = (\rho c_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(k_a \frac{\partial T_a}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_a \frac{\partial T_a}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_a \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) = (\rho c)_a \frac{\partial T_a}{\partial t} \end{array} \right. \quad (13a, b \text{ y } c)$$

El modelo descansa en un conjunto de hipótesis que deben ser cumplidas para la validez de los cálculos. Así, se desprecian los efectos de flotabilidad, que lo son cuando el fluido circula en régimen laminar de convección forzada [41], lo que sucede, de acuerdo a Metais y Eckert (1964), citado por Suryanarayana [41], cuando el número de Reynolds, Re , tiene valores medio-bajos ($1E+02 < Re < 1E+03$ para tubos horizontales y $5E+02 < Re < 2E+03$ para tubos verticales) y el número de Rayleigh, Ra , se mantiene bajo ($< 1 \cdot E+03$); además debe cumplirse $0,01 < Pr \cdot D/L < 1$, donde Pr es el número de Prandtl, D es el diámetro del tubo y L su longitud. Esta situación se da en colectores solares y otros dispositivos.

Los resultados obtenidos bajo estos modelos pudieron ser comparados con la bibliografía previa y validados con resultados experimentales obtenidos del Laboratorio Solar de la Universidad de Murcia en condiciones de operación reales, se observaron grandes diferencias entre los resultados utilizando modelos 2D frente a los modelos 3D tal como queda reflejado en la Fig. 2.

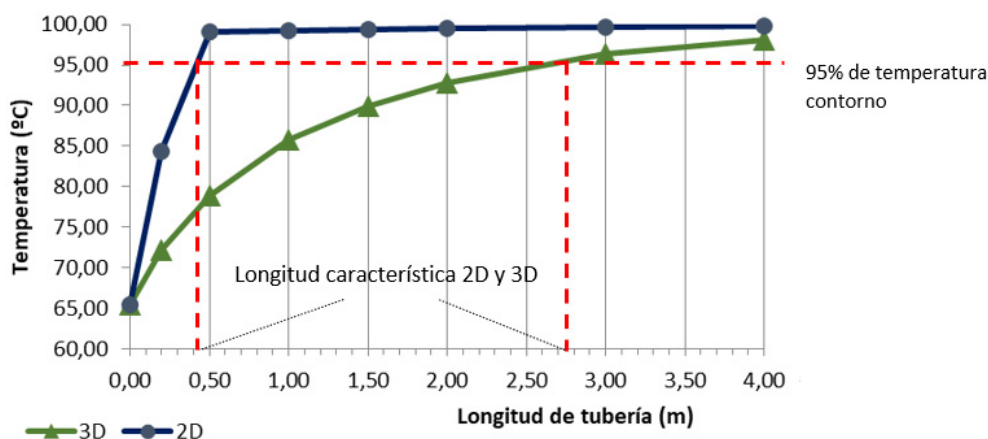


Fig. 2. Temperatura media ponderada a lo largo de un tubo en modelos 2D y 3D. Fuente: Seco-Nicolás *et al.*, [2].

Ante esta situación se hacía necesaria la elaboración de modelos más complejos y precisos que condujeran a resultados comparables con los de la literatura especializada y con los experimentales, esto condujo a la elaboración de modelos en 3D. El modelo necesario para lograr la suficiente definición requería elaborar un mallado tridimensional con cerca de 17.000 celdas, en las que se circunscribe un circuito eléctrico con aproximadamente 140.000 elementos entre resistencias, fuentes de tensión e intensidad, condensadores y otros elementos, lo que se programa con unas 144.000 líneas de código.

4. VALIDACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL

La única forma posible de hacer que este modelo de simulación numérica sea útil para la comunidad científica, profesional y educativa es validarlo experimentalmente.

Lo primero es comparar los resultados numéricos con los trabajos previos publicados anteriormente. Con las mismas condiciones de contorno simétricas 2D que utilizaron Zueco *et al.* [42], el presente modelo arrojó una discrepancia relativa máxima de alrededor del 2% [6]. Sin embargo, el modelo pretende ser útil para la resolución de casos reales, por lo que fue necesario realizar experimentos en condiciones reales para asegurar la veracidad de sus resultados.

El montaje e instrumentación experimental se describió en 2020 [8,43] y consiste en un conjunto de dos captadores solares de placa plana de diferente topología equipados cada uno con más de 40 termopares y otras sondas instaladas en grupos, formando cuatro Secciones (Fig. 3, arriba). Cada sonda se ha ajustado según la sección transversal que se muestra en la Fig. 3 (abajo).

El banco de trabajo sometido a la intemperie realiza mediciones de cada sonda cada minuto durante varios días. Una vez seleccionado un día soleado regular, entendido como un día de distribución estándar de irradiancias, se han utilizado los datos obtenidos cada hora desde las 11:00 hasta las 15:00 horas, medidos en las Secciones 1 a 3 de los colectores (Fig. 3, arriba dcha.). Nótese que la temperatura medida de cada Sección consiste en una temperatura promedio ponderada de 6 o 7 termopares superiores, calculada según

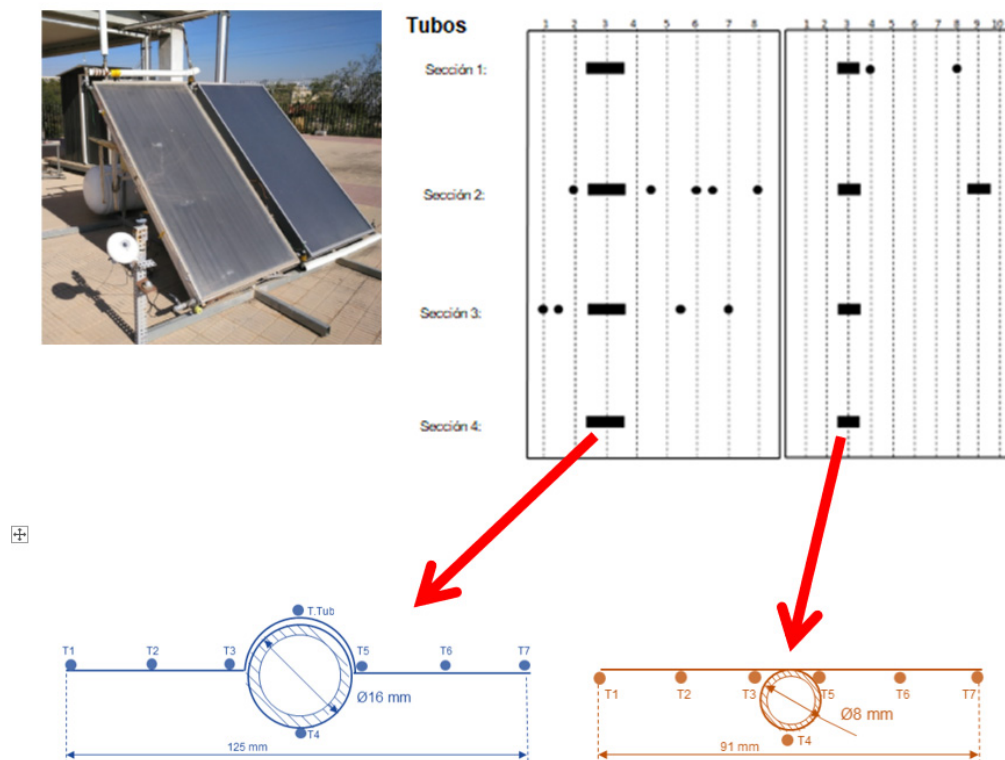


Fig. 3. Banco de trabajo experimental. Dos captadores solares planos de baja temperatura de diferentes topologías instrumentados. (Arriba, dcha.) Distribución de termopares. (Abajo) Sección transversal de un tubo y placa plana de cada captador, y sus correspondientes termopares, [2, 45].

el método descrito en trabajos anteriores [8,43]. Esta temperatura media ponderada medida es la temperatura introducida en el modelo matemático como condición límite de la temperatura exterior superior, para simular la temperatura global del fluido. El resultado de esa simulación es la distribución de temperaturas del fluido dentro de la tubería, en el cual la temperatura media general se puede obtener fácilmente. Luego, asumiendo que el termopar T4 (Fig. 3, abajo) es representativo de la temperatura global del fluido real considerando, ya que no es posible medir dentro del tubo, se puede realizar la comparación entre la temperatura global simulada del fluido y la temperatura global medida.

Debido a que el número de experimentos fue inferior a 30, se realizó un estudio T-Student, concluyendo que ambas distribuciones tienen la misma media. El análisis residual llegó a la conclusión de que los datos no se distribuyen normalmente. El análisis de las diferencias entre los valores observados y simulados muestra una raíz cuadrada del error medio absoluto de 0,518, lo que da una idea de que existe una buena concordancia entre los resultados simulados y observados. El análisis de Regresión alcanza un $R^2 = 0,99$, por lo que hay una buena precisión.

En resumen, el análisis estadístico realizado para validar la correlación entre los resultados esperados de temperatura simulada y la temperatura efectivamente medida en un dispositivo real (Fig. 4), concluye que existe una muy buena concordancia, y el modelo matemático se puede utilizar para simular el campo de temperaturas en un fluido dentro de una tubería sometido a las condiciones descritas.

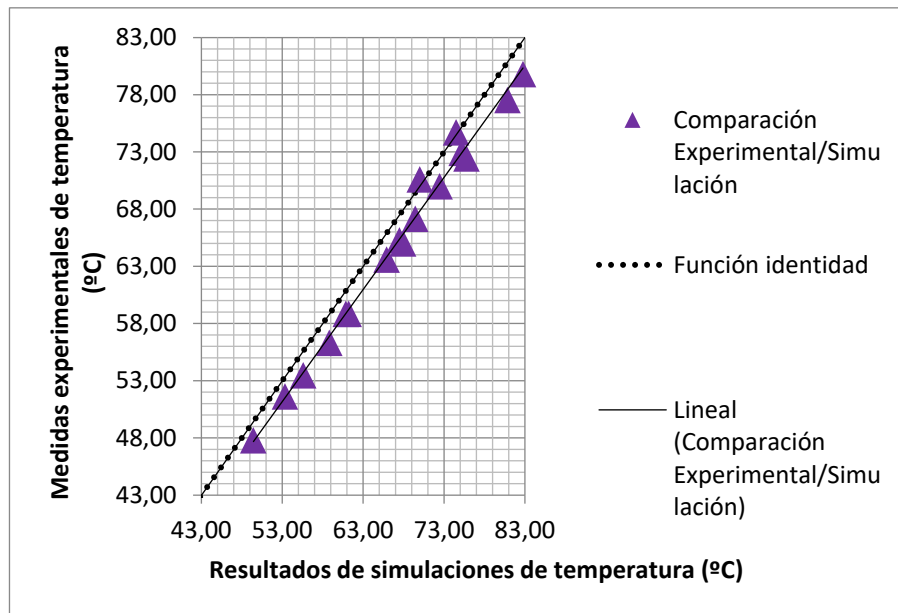


Fig. 4. Comparación entre resultados experimentales y simulados.

5. [HEATT©](#)

Logrado un modelo numérico que se ajustara a los resultados experimentales con suficiente precisión, se procede a buscar financiación por varias vías para tratar de dar visibilidad a los resultados obtenidos. El grupo de investigación manda propuestas de proyectos de investigación a varias entidades públicas hasta que finalmente es la Fundación Séneca – Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia (España) la que a través de una de sus convocatorias públicas elige este proyecto y se dota de fondos al equipo del Grupo de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad de Murcia para trasladar a software libre y gratuito toda la arquitectura informática de la solución del problema, y alojarla en los servidores de la Universidad de Murcia. La idea es dar servicio gratuito a cualquier profesional o investigador de cualquier parte del mundo, sin necesidad de adquirir los costosos programas informáticos mencionados al principio, ni de instalar ninguna aplicación que con seguridad quedará obsoleta con la evolución de los diversos Sistemas Operativos.

El resultado de todo esto es una aplicación denominada **HEATT[®]**, a la que puede accederse a través de una página web, el acrónimo de **HEATT[®]** es Herramienta de Evaluación y Análisis Térmico en Tuberías. Esta plataforma, sencilla y amigable, ha sido lanzada ya, en su versión 1.0 como Prueba de Concepto, para ser sometida a uso general y para que investigadores y profesionales de todo el mundo envíen sus opiniones y propuestas de mejora para ir poco a poco haciéndola crecer.

5.1. ¿Cómo funciona **HEATT[®]**?

5.1.1. Definición de la topología

Tanto el mallado, tipo de malla, número de celdillas elementales y en general los aspectos topológicos del modelo no son accesibles al usuario, el hecho de no poder manipular estos aspectos facilita, en nuestra opinión, el acceso al uso del programa ya que el potencial usuario no precisa tener conocimiento en temas relacionados con la topología usada en la elaboración del mallado usado en métodos numéricos en general, no obstante el número de celdillas es suficiente para garantizar la suficiente precisión en los resultados obtenidos.

Una vez se accede a la aplicación a través de la página web, en una primera pantalla se introducen los datos geométricos del problema a resolver, con ayuda de cuadros de dialogo y de diagramas que hacen más sencilla la visualización del problema que se está diseñando, Fig. 5. Finalmente, se envían las condiciones del problema a simular a la plataforma web, que va resolviendo el problema de computación en orden de llegada, y avisando al usuario, en cuestión de minutos, de los resultados de simulación. Estos resultados

Inicio Ámbito **Entrada de datos** Resultados Documentación Acerca de...

Entrada de datos

Propiedades térmicas del fluido

Densidad media del fluido	ρ_f	<input type="text" value="997,78"/>	kg/m ³
Calor específico medio del fluido	C_p	<input type="text" value="4178,22"/>	J/kgK
Velocidad media del flujo	u_m	<input type="text" value="0,026"/>	m/s
Conductividad térmica del sólido (pared del tubo)	k_s	<input type="text" value="380"/>	W/mK
Conductividad térmica media del fluido	k_f	<input type="text" value="0,63"/>	W/mK

Geometría

Longitud del tubo	L	<input type="text" value="4"/>	m
Radio interior del tubo	R	<input type="text" value="0,0035"/>	m
Espesor de pared del tubo	L_0	<input type="text" value="0,0005"/>	m

Condiciones de contorno

Temperatura exterior del tubo	T_{ext}	<input type="text" value="100"/>	°C
Temperatura de fluido a la entrada del tubo	T_{ent}	<input type="text" value="65,45"/>	°C

El proceso tardará aproximadamente 30 minutos en obtener resultados. Si todos los parámetros son correctos, pulse **Confirmar**.

Región de Murcia **f SéNeCa⁽⁺⁾**
 Agencia de Ciencia y Tecnología
 Región de Murcia
 Privacidad e información legal Cookies

Fig. 5. Pantalla 1: definición de topología, materiales y condiciones de contorno. Fuente: elaboración propia.

consisten en una distribución de temperaturas medias longitudinales, Fig. 6, y 10 mapas de temperaturas de las secciones transversales de la tubería separadas entre sí un 10% de la longitud total impuesta por el usuario, Fig. 7.

Otro resultado que se obtiene del programa es la llamada *longitud característica* del problema, una variable “oculta” del mismo que indica cuando el proceso térmico originado por el cambio brusco de temperatura en el origen de la tubería está completamente desarrollado [6]. Esta longitud se evalúa como aquella en la que la temperatura media del fluido alcanza el 90% de la temperatura exterior (Fig. 2).

Planos de corte horizontal longitudinal

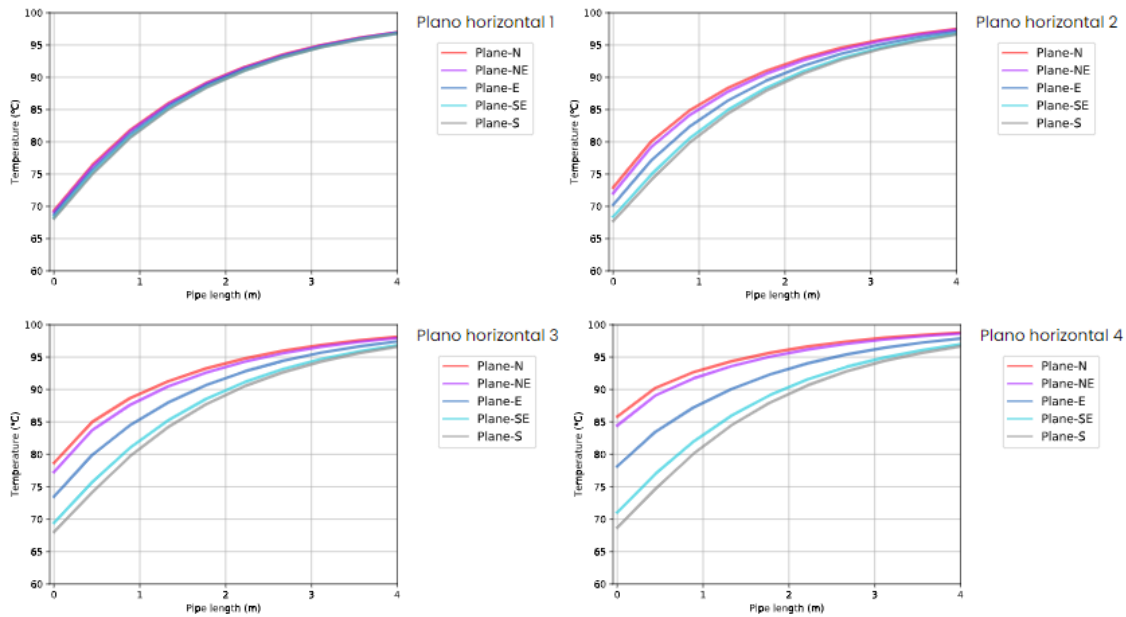


Fig. 6. Pantalla 4: visualización de resultados. Distribución longitudinal de temperaturas. Fuente: elaboración propia.

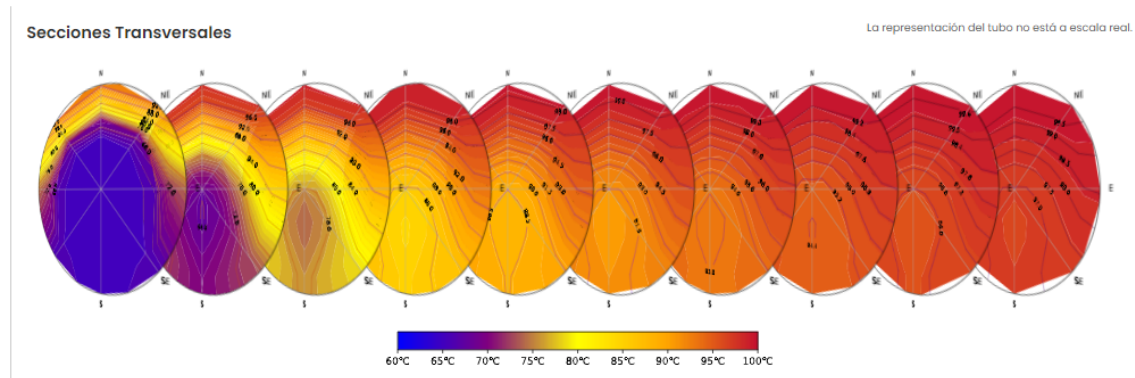


Fig. 7. Pantalla 5: visualización de resultados. Secciones transversales. Fuente: elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

El equipo formado por el grupo de Ingeniería Energética de la Universidad de Murcia (UMU, España) junto con profesores de la UPCT, han realizado una plataforma informática amigable y versátil para mejorar y universalizar el cálculo flujo y diseño de tuberías sometidas a condiciones térmicas peculiares, por

ejemplo, aquellas en las que se dan condiciones de frontera como temperaturas asimétricas, frecuentes en instalaciones solares, por ejemplo.

Bajo el nombre de [HEATT](#)[©] (Herramienta de Evaluación y Análisis Térmico de Tuberías) nace un sistema de libre acceso y de servicio básico gratuito dentro de los servidores de la Universidad de Murcia desde donde da servicio a profesionales e investigadores de todo el mundo.

[HEATT](#)[©] se basa en un programa realizado mediante el Método de Simulación por Redes (MESIR), ampliamente contrastado en investigación a nivel teórico y experimental para problemas de ámbito energético y otros, pero que no ha sido desarrollado hasta ahora como herramienta autónoma accesible al público. En todo caso, la utilización de HEATT no requiere en modo alguno del conocimiento del MESIR ni de ningún otro método numérico, no es necesaria la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales acoplados ni de fundamentos de programación, aunque sí de un conocimiento básico del flujo en tuberías. Por esta razón, el grupo de profesionales potenciales de la herramienta es muy amplio, entre ese grupo pueden encontrarse profesionales dedicados a la docencia e investigación en este campo.

Además, una de las características más relevantes de esta nueva plataforma es su realización en código abierto, con la capacidad para que pueda ser modulable por los usuarios de la comunidad para mejorar sus prestaciones, lo que la mantendrá viva y actualizada. El equipo investigador autor de este proyecto trabaja ya en la ampliación del alcance del mismo y en un futuro próximo se espera completar la herramienta con más casos, como el de la condición de contorno de calor, distribución de temperaturas variable, transitorios, etc. que aumentarán la flexibilidad y alcance de la herramienta.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto ha sido financiado por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM), a través del Programa Regional para apoyar la Transferencia y Valorización del Conocimiento y el Emprendimiento Científico 2021 de la Fundación Séneca-Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia (España), por Resolución de 27 de diciembre de 2021 correspondiente a la convocatoria de "Ayuda a la investigación grupos para la comercialización y explotación industrial de resultados bajo el modelo de Prueba de Concepto".

REFERENCIAS

- [1] E.P.a.t. Council, Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (2018)
- [2] E. Parliament, Directive 2010/31/EU of the European Parliament, Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (Recast), Strasbourg (2010)
- [3] S. Government, Plan de Recuperación, Resiliencia y Transformación y (PRTR), Spanish Government, Madrid, Spain (2022)
- [4] S. Bilir, "Numerical-solution of Graetz Problem with axial conduction", *Numerical Heat Transfer Part a-Applications*, 21, 493-500 (1992)
- [5] S. Bilir, A. Ates, "Transient conjugated heat transfer in thick walled pipes with convective boundary conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 2701-2709 (2003)
- [6] M. Seco-Nicolas, M. Alarcon, F. Alhama, "Thermal behavior of fluid within pipes based on discriminated dimensional analysis. An improved approach to universal curves", *Applied Thermal Engineering*, 131, 54-69 (2018)
- [7] F. Alhama, C.N. Madrid, *Análisis dimensional discriminado en mecánica de fluidos y transmisión del calor*, Editorial Reverté, Barcelona (2012)
- [8] M. Seco-Nicolás, M. Alarcón García, J.P. Luna-Abad, "3D numerical simulation of laminar forced-convection flow subjected to asymmetric thermal conditions. An application to solar thermal collectors", *Solar Energy*, 220, 230-245 (2021)
- [9] S.M.f.t.E. Transition, AISLAM (2018)

- [10] I. Saint-Gobain, e.v. software, TechCalc, Guadalajara (1990), pp. Thermal Calculation Software for Technical Insulation.
- [11] ATECYR, FRIO, ATECYR, pp. Dimensionamiento de instalaciones frigoríficas.
- [12] C.I. S.A., CYPE, 2022.
- [13] J. Horno, *Network Simulation Method*, Research Singpost, Trivandrum, India (2002)
- [14] W.F. Ames, *Numerical Method for Partial Differential Equations*, Section 1.6. Academic Press, New York (1977)
- [15] F.B. Hildebrand, *Finite-Difference Equations and Simulations*, Section 2.2. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1968)
- [16] G. Boole, *A Treatise on the Calculus of Finite Differences*, 2^a Ed., Macmillan and Company (1872) [También: Edición Dover, 1960]
- [17] J.W. Thomas, *Numerical Partial Differential Equations: Finite Difference Methods*. Texts in Applied Mathematics. Springer New York, NY. (1995) doi <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7278-1>
- [18] G.D. Smith., *Numerical Solution of Partial Differential Equations. Finite Difference Methods*, Third Edition. Clarendon Press. Oxford Applied Mathematics and Computing Science Series (1985)
- [19] M.N. Özisik, H.R.B. Orlande, M.J. Colaço, R.M. Cotta, *Finite Difference Methods in Heat Transfer*, 2nd Edition (2017) CRC Press. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315121475>
- [20] L. Peusner, *Studies in Network Thermodynamics*, Elsevier (1986)
- [21] I. Alhama-Manteca, G. Garcia-Ros, F. Alhama-Lopez, “Universal solution for the characteristic time and the degree of settlement in nonlinear soil consolidation scenarios. A deduction based on nondimensionalization”. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 57, 186–201 (2018)
- [22] F. Marin, F. Alhama, J.A. Moreno, “Modelling of stick-slip behaviour with different hypotheses on friction forces”, *Int. J. Eng. Sci.*, 60, 13–24 (2012)
- [23] J.L. Morales, J.A. Moreno, F. Alhama, “Numerical Solutions of 2-D Linear Elastostatic Problems by Network Method”, *Cmes-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 76, 1–18 (2011)
- [24] J.F. Sanchez-Perez, F. Alhama, J.A. Moreno, M. Canovas, “Study of main parameters affecting pitting corrosion in a basic medium using the network method”, *Results Phys.*, 12, 1015–1025 (2019)
- [25] A. Soto, F. Alhama, C.F. Gonzalez-Fernandez, “An efficient model for solving density driven groundwater flow problems based on the network simulation method”, *J. Hydrol.*, 339, 39–53 (2007)
- [26] J. Zueco, F. Alhama, “Simultaneous inverse determination of temperaturedependent thermophysical properties in fluids using the network simulation method”. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 50, 3234–3243 (2007)
- [27] J. Zueco, F. Alhama, C., Fernandez, “Analysis of laminar forced convection with Network Simulation in thermal entrance region of ducts”, *Int. J. Therm. Sci.* 43, 443–451 (2004)
- [28] J.P. Luna-Abad, F. Alhama, “Design and Optimization of Composite Rectangular Fins Using the Relative Inverse Thermal Admittance”, *Journal of Heat Transfer (ASME)*, 135(8), 084504-1 to 084504-4 (2013)
- [29] J.P. Luna-Abad, F. Alhama, A. Campo, “Optimization of Longitudinal Rectangular Fins Through the Concept of Relative Inverse Admittance”, *Heat Transfer Engineering*, 31(5), 395 – 401 (1980) doi: 10.1080/01457630903375228
- [30] J.P. Luna Abad, F. Alhama, “Effectiveness of composite fins under maximum heat dissipation”, *Heat Transfer Engineering*, 38(9), 867-880 (2017)
- [31] J.P. Luna Abad, F. Alhama, A. Campo, “The Use of Relative Inverse Thermal Admittance for the Characterization and Optimimization of Fin-Wall Assemblies”, *Thermal Science International Scientific Journal*, 21(1), 151-160 (2017)
- [32] M. Alarcón García *et al.*, “Transient multibooiling in a pin fin with temperature dependent thermal conductivity”, *Heat and Mass Transfer*, 41(1), 67-74 (2004) doi: 10.1007/s00231-004-0542-4
- [33] M. Alarcón García *et al.*, “A Revision of the Classical Performance Extended Surfaces Assessment: Proposed New Coefficients”, *Journal of Heat Transfer*, 125(6), 1187-1190 (2003) doi: 10.1115/1.1603777
- [34] M. Alarcón García *et al.*, “Optimisation of a longitudinal rectangular fin-wall assembly”, 12 *Int. Heat Transfer Conf. At: Grenoble - France*. doi: 10.1615/IHTC12.1090

- [35] M. Alarcón García *et al.*, “Time-dependent heat transfer in a fin-wall assembly. New performance coefficient: Thermal reverse admittance”, *International Journal of Thermal Sciences*, **41**(4), 386-395 (2002) doi: 10.1016/S1290-0729(02)01329-7
- [36] L. Graetz, “Ueber die Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten”, *Annalen der Physik*, 254, 79-94 (1882)
- [37] E. Papoutsakis, D. Ramkrishna, H.C. Lim, “The extended Graetz problem with Dirichlet wall boundary-conditions”, *Applied Scientific Research*, 36, 13-34 (1980)
- [38] S. Bilir, “Laminar-flow Heat-transfer in pipes including 2-dimensional wall and fluid axial conduction”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38, 1619-1625 (1995)
- [39] M.A. Ebdian, H.Y. Zhang, “An exact solution of extended Graetz problem with axial heat-conduction”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32, 1709-1717 (1989)
- [40] M.A. Ebdian, H.Y. Zhang, “Effects of heat-generation and axial heat-conduction in laminar-flow inside a circular pipe with a step change in wall temperature”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 17, 621-635 (1990)
- [41] N.V. Suryanarayana, *Forced Convection*, in: F. Kreith (Ed.) Thermal Engineering
- [42] J. Zueco, F. Alhama, C. Fernandez, “Analysis of laminar forced convection with Network Simulation in thermal entrance region of ducts”, *International Journal of Thermal Sciences*, 43, 443-451 (2004)
- [43] M. Seco-Nicolás, M. Alarcon Garcia, J.P. Luna-Abad, “Experimental calculation of the mean temperature of flat plate thermal solar collectors”, *Results in Engineering*, 5 (2020)
- [44] M. Seco-Nicolás, *Estudios del flujo laminar en conductos sometidos a cambio térmico. Experimentación en captadores de energía solar térmica*, Faculty of Chemistry, University of Murcia, Murcia, Spain (2017)
- [45] M. Seco-Nicolás, M. Alarcón García, A.P. Ramallo González, J.P. Luna-Abad, “HEATT©. A free software for thermal design of liquid flows inside pipes”, *Results in Engineering*, 17, 100983 (2023)

HEATT© (HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN Y ANÁLISIS TÉRMICO EN TUBERÍAS). THE FREE SOFTWARE FOR THERMAL SIMULATION OF FLUIDS WITHIN THICKED-WALLED PIPES

Abstract – This work is aimed at presenting a new online platform devoted to the numerical simulation of the field of temperatures in a fluid flow in laminar regime within thicked-walled pipes. The platform is called HEATT© (Herramienta de Evaluación y Análisis Térmico en Tuberías). It is a non-profit free use software available at the world wide web based on the Network Simulation Method (NSM), that fills the gap between the more expensive thermal simulation software, addressed to technicians, designers, SMEs and technical professionals, as well as researchers and teachers of every level of education, with little resources, who need a powerful tool for reaching complex calculations of thermal behavior. It has been funded by the Seneca Foundation-Science and Technology Agency of the Region of Murcia (Spain), by means of its call “Proof of Concept 2021”.

Keywords – HEATT©, Heat Transmission in Pipes, Thermal Flow, Numerical Simulation, NSM.