

DIMENSIONADO DE SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN PASIVA DE EDIFICACIONES POR CONDUCTOS ENTERRADOS

Ernesto Lorenzo Romero.

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela, e-mail: *ernestolorenzor@gmail.com*

RESUMEN

El sistema de conductos enterrados para climatización pasiva de edificaciones utiliza la tierra para el enfriamiento y/o calentamiento de una corriente de aire que circula forzosamente a través de tubos que luego se inyecta a la edificación contribuyendo a mejorar las condiciones térmicas, con un bajo consumo energético. Distintas investigaciones realizadas en el IDEC han demostrado el potencial de aplicación de éste sistema en Venezuela (Lorenzo, 2007), sin embargo, a partir del estudio del estado del arte se concluye que existe muy poca documentación científica respecto a metodologías que permitan predecir su comportamiento en un clima determinado. En dicho sentido, se asumió el uso de un protocolo de cálculo simplificado basada en fórmulas empíricas que han demostrado suficiente aproximación en la estimación del comportamiento del aire dentro de una tubería enterrada (Amitrano, 2006), a la vez que se elaboró una herramienta computarizada que agiliza el cálculo y facilita la labor del arquitecto ante una eventual aplicación del sistema. Finalmente, se realiza un análisis comparativo entre datos obtenidos de registros experimentales previos y los arrojados por la herramienta desarrollada, obteniendo así el rango de confiabilidad de ésta.

Palabras clave: Conductos enterrados, climatización pasiva, Metodología de cálculo, Eficiencia energética, Edificaciones.

INTRODUCCIÓN

A partir del estudio de parte del estado del arte de la tecnología de conductos enterrados en Venezuela y el mundo, no se encontró información relevante respecto a procedimientos y/o metodologías para el cálculo y dimensionado de estos sistemas en el trópico. Igualmente, en gran parte de las aplicaciones documentadas, tanto el diseño como la construcción fueron intuitivas y con poca rigurosidad científica. En virtud de dichos hallazgos se evidenció la necesidad de contar con una metodología de cálculo que permitiese evaluar el comportamiento teórico del sistema de conductos enterrados en cualquier contexto climático, a la vez que brindara las variables necesarias para su eventual dimensionado, de una manera menos intuitiva y más objetiva.

Esta exploración comenzó a finales del año 2007 en el IDEC (Lorenzo 2007), (Lorenzo, et al, 2008), (Lorenzo, et al, 2010), (Lorenzo, et al, 2011). Sin embargo, en definitiva se decidió trabajar con la adaptación de un procedimiento simplificado de fórmulas empíricas desarrollado en la Université Joseph Fourier, de Grenoble, Francia, (Amitrano, 2006). Mientras, en paralelo, se desarrolló una herramienta de cálculo con miras en facilitar el cálculo y dimensionado de estos sistemas por parte de profesionales y técnicos, la cual

permite incluso, la simulación del comportamiento del aire dentro del sistema de conductos enterrados, en respuesta a secuencias climáticas introducidas según la necesidad del usuario.

Ahora bien, debido a que el enfoque de la metodología de cálculo que sustenta la herramienta desarrollada parte de procedimientos simplificados, se entiende que en todos los casos las condiciones climáticas serán estacionarias (no dinámicas), lo que conlleva a que se realicen simplificaciones con el fin de predecir ciertas condiciones térmicas dentro del tubo, así como su comportamiento aproximado. Por lo tanto, y con miras en comprobar su confiabilidad, el motivo del presente trabajo es cubrir la necesidad de realizar una validación de la metodología utilizada, con el fin de estimar su margen de error y confianza.

En este sentido, se utilizaron tres prototipos experimentales del sistema de conductos enterados debidamente caracterizados, los cuales fueron construidos en la planta experimental del IDEC, en el Laurel, Caracas - Venezuela. El fin es el de simular su comportamiento con la ayuda de la herramienta de cálculo desarrolla, tomando en cuenta todas las variables que intervienen como, el clima, los materiales, la longitud del tubo, la velocidad del aire dentro del tubo, el caudal, etc. Y comparar éstos resultados con los resultados reales para estimar así el margen de error arrojado por la metodología.

Finalmente, y debido a la gran cantidad de mediciones realizadas durante la experimentación, se decidió acotar el campo de estudio seleccionando una muestra de 300 registros consecutivos para cada uno de los prototipos experimentales, obteniendo un universo total de 900 registros a estudiar. Finalmente, se promedia el porcentaje de error obtenido en cada muestra y se estima la confiabilidad de la metodología.

1. SOPORTE TEÓRICO PARA LA EVALUACIÓN Y DIMENSIONADO DE SISTEMAS DE CONDUCTOS ENTERRADOS.

En función de la necesidad de dar respuesta a los vacíos existentes identificados luego del estudio del estado del arte de la tecnología de conductos enterrados a nivel nacional e internacional (Lorenzo 2007), se planteó el desarrollo de una metodología de cálculo por medio de la adaptación de un procedimiento simplificado de fórmulas empíricas desarrollado en la Université Joseph Fourier, de Grenoble, Francia, titulado “Eléments de dimensionnement d’un échangeur air/sol” (Amitrano, 2006), con el cual, y en conjunto con el profesor Luis Rosales, se logró la adaptación de una secuencia de fórmulas que garantizaban la suficiente aproximación para resolver el problema.

1.1. Metodología de cálculo

Dado que el interés principal es conocer la cantidad de energía transferida por el movimiento del aire dentro del tubo o conducto, todos los cálculos se basan en la hipótesis de que la temperatura en la superficie interior del tubo es constante. Se considera igualmente que el intercambio de calor se hace en régimen estacionario, es decir, que las temperaturas siguen siendo constantes en la tierra y en la superficie interior del conducto. En este sentido se plantea un procedimiento de cálculo que consta de seis (6) pasos o etapas fundamentales para la determinación de los resultados:

1.- El intercambio térmico dentro de un tubo donde un fluido circula, se conoce como convección forzada, donde el flujo de calor por el área φ , a través de la pared del tubo es proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie interna, T_{sol} y la superficie externa del tubo, T_{air} y contrariamente a la resistencia térmica de la pared, R .

$$\varphi = \frac{(T_{sol} - T_{air})}{R} \quad (1)$$

2.- La resistencia de la pared se compone, por una parte de la resistencia a la conducción, y por la otra de la resistencia a la convección.

$$R = R_{cond} + R_{conv} \quad (2)$$

3.- Considerando una pared de poco espesor, en relación con el diámetro del tubo, se puede hacer la aproximación de que es una pared plana. La resistencia a la conducción sería entonces:

$$R_{cond} = \frac{e}{\lambda} \quad (3)$$

e*: espesor (m)** ***λ :
conductividad (W/m.K)

Es decir, que si se tiene un tubo con espesor $e = 5$ mm y conductividad $\lambda = 0,16$, la resistencia a la conducción sería, $R = 0,031$ m².K/W.

4.- La resistencia térmica en la convección forzada es una función de la velocidad de circulación del aire.

$$R_{conv} = \frac{1}{5,55 \cdot V^{0,8}} \quad (4)$$

5.- La cantidad de calor intercambiado por la unidad de tiempo corresponde al flujo del calor multiplicado por la superficie.

$$dQ = \varphi \cdot S \cdot dt = \frac{(T_{sol} - T_{air})}{R} S \cdot dt \quad (5)$$

6.- Finalmente, este intercambio térmico implica la variación en la temperatura del aire.

$$dT_{air} = \frac{dQ}{c.p.V} \quad (6)$$

***C*: calor específico (para el aire $C = 1$ kJ/(kg.K))**

***ρ*: densidad (para el aire $\rho = 1,2$ kg/m³)**

***V*: volumen del aire considerado**

El cálculo de la variación de la temperatura del aire a lo largo del tubo es realizado numéricamente, para lo cual se corta el tubo en segmentos pequeños. Se considera que la temperatura del aire es constante en cada segmento, entendiéndose que en el primero, se

tomará siempre la temperatura del aire exterior, cuya resultante, a causa del intercambio de calor ocurrido en dicho tramo, será la temperatura del aire que se aplique en el siguiente segmento. Esto ocurrirá sucesivamente hasta completar la longitud total del tubo, obteniendo en definitiva, la estimación de la temperatura del aire una vez haya recorrido toda la tubería enterrada.

En este sentido, es fundamental aclarar que la cantidad de calor intercambiado en cada segmento, corresponde a un flujo de calor constante y al tiempo de permanencia del aire en cada segmento:

$$t_i = \frac{l_i}{v}$$

l_i : Segmento de tubo

v : Velocidad del aire

Este procedimiento de cálculo permite estimar la temperatura del aire a la salida de una tubería enterrada de determinada longitud y en condiciones estacionarias, por lo tanto, se asume que su acercamiento es aceptable solo cuando se realizan los cálculos con pequeños segmentos a lo largo de la longitud total del tubo. Por lo tanto, se recomienda como mínimo una división de 200 segmentos, con el fin de poder obtener resultados más acertados.

1.2. Herramienta de cálculo

Debido a la complejidad de realizar los cálculos en forma manual, se optó por la elaboración de una herramienta que facilite la utilización de la metodología desarrollada, suministrando información de una manera sencilla, rápida y acertada para la evaluación, cálculo y/o dimensionado de los sistemas de conductos enterrados. Asimismo, la herramienta permite simular gráfica y numéricamente, el comportamiento del aire a lo largo de su recorrido dentro del conducto estudiado, facilitando así la toma de decisiones fundamentales como, el diámetro óptimo del tubo a utilizar, la velocidad del aire dentro del mismo y la longitud requerida en función de la temperatura y caudal deseado. Finalmente, resalta la posibilidad de realizar simulaciones del comportamiento del aire dentro del tubo, utilizando una secuencia climática introducida por el usuario, de más de 15 días.

La interfaz se diseñó para que los datos climáticos, una vez cargados en el programa, se entrelazaran de manera automática y progresiva con el resto de la información requerida al inicio, permitiendo así predecir el comportamiento de la temperatura del aire dentro de los tubos según el tipo de clima introducido, versus la longitud total del tubo.

Asimismo, y en apoyo a la predicción numérica, se incorporaron dos gráficos de generación automática, que permiten observar el comportamiento del aire dentro del tubo en comparación con la temperatura exterior, en conjunto con distintas longitudes de tubos posibles, tanto en un día característico, (figura 1).

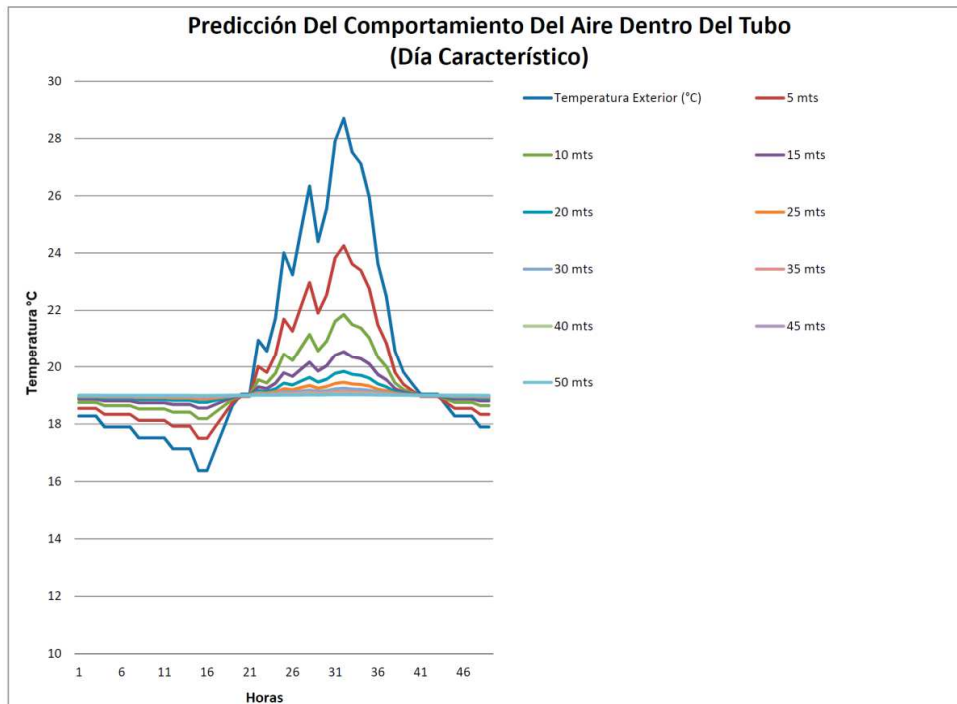


Figura 1: Gráfico generado por la herramienta de cálculo, indicando el comportamiento del aire dentro del tubo un día característico, versus longitud del tubo.

Como a lo largo de una secuencia climática completa, (figura 2).

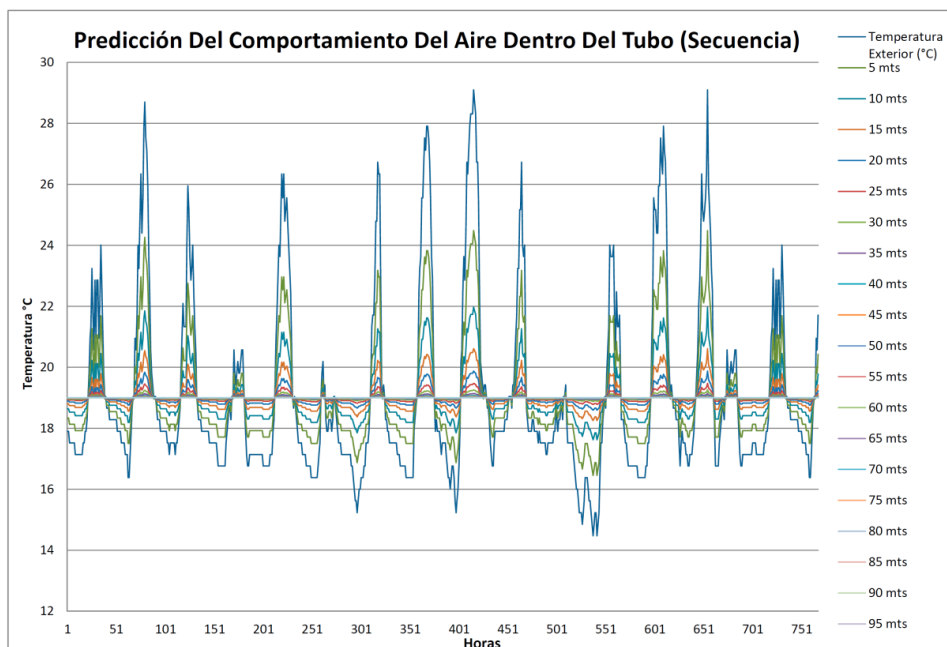


Figura 2: Gráfico generado por la herramienta de cálculo, indicando el comportamiento del aire dentro del tubo en una secuencia climática, versus la longitud del tubo.

2. CARACTERIZACIÓN DE PROTOTIPOS EXPERIMENTALES UTILIZADOS EN EL ESTUDIO.

El desarrollo de los prototipos se llevó a cabo durante el año 2007, dentro del contexto del trabajo de investigación titulado “Climatización Pasiva por Conductos Enterrados. Caso de aplicación: Almacenes L & G para bebidas alcohólicas y gaseosas” (Lorenzo 2007). Los mismos se desarrollaron en la Planta Experimental del IDEC ubicada en una zona montañosa denominada El Laurel, al sureste de la ciudad de Caracas, donde predomina durante la mayor parte del año un clima que se encuentra entre moderado y cálido húmedo.

Durante su desarrollo se plantearon dos fases fundamentales. La primera consistió en la recopilación y documentación de las características propias del lugar, lo que permitió realizar un diseño adecuado en función de los datos obtenidos. Y la segunda fase, comprendió la construcción total del sistema y su puesta en marcha.

De toda esta experiencia, lo fundamental es la caracterización de las variables técnicas que intervinieron en su funcionamiento, con el fin de poder simular las mismas condiciones en la herramienta de cálculo y luego poder realizar los respectivos análisis:

Material del tubo Utilizado: PVC

Espesor: 0,5 Cms

Conductividad: 0,16 W/mK

Temperatura de la tierra alrededor del tubo: 20,19 °C

Caudal: 58 m³/h

Diámetro del tubo: 4” y 6” según el caso.

Longitud del tubo: 15 m y 30 m según el caso.

Temperatura del aire exterior: Varía según la muestra seleccionada de datos.

Capacidad calorífica del aire: 1200 J/m³°C

Secuencia de mediciones: Realizadas cada 15 minutos y de manera consecutiva en todos los sensores.

Ahora bien, como la temperatura del aire exterior varía en cada registro realizado, y se registraron más de 2000 registros por cada prototipo experimental, es pertinente la selección de una muestra representativa para cada uno de ellos, ya que los registros objeto del análisis deben correrse uno a uno, en función de estimar en cada caso el error obtenido, así como el acercamiento de los resultados en comparación con los reales.

En este sentido, se crearon las bases para la elaboración de los análisis comparativos tomando un universo de 900 registros entre los tres prototipos realizados. Todo esto con el fin de validar la metodología y herramienta de cálculo.

3. ANÁLISIS COMPARATIVOS DE RESULTADOS.

Con el fin de estimar la validez de la metodología de cálculo propuesta anteriormente, se procedió a realizar un análisis comparativo entre, la temperatura del aire registrada a la salida de los tubos enterrados correspondientes a los prototipo experimentales, y éste mismo

resultado, pero obtenido por la herramienta computarizada luego de la simulación fidedigna de las condiciones en las que se desarrollaron dichos prototipos.

En este sentido, y debido a la gran cantidad de mediciones realizadas durante la experimentación, se decidió acotar el campo de estudio, seleccionando una muestra de 300 registros consecutivos de la temperatura del aire exterior y la temperatura del aire al final del ducto, para cada uno de los prototipos experimentales objeto de análisis. Esto nos conlleva al manejo de un universo de 900 registros estudiados.

El procedimiento llevado a cabo fue elemental, y comenzó con la necesidad de obtener la temperatura del aire al final de ducto en cada uno de los 300 registros seleccionados, pero ahora con la ayuda de la herramienta de cálculo desarrollada. Para esto se utilizaron los datos técnicos obtenidos de la experimentación, en conjunto con el registro de la temperatura exterior correspondiente al mismo momento de la muestra seleccionada.

Es importante resaltar que ambos requerimientos se obtuvieron gracias a la rigurosa documentación realizada durante el desarrollo de los prototipos experimentales (Lorenzo 2007).

Una vez introducidos todos los datos, el programa calcula de forma automática el comportamiento del aire dentro del tubo para cada uno de los 300 registros correspondientes a cada prototipo, permitiendo obtener la temperatura del aire al final del tubo, el cual es el dato fundamental para poder realizar el análisis comparativo deseado.

Asimismo, la herramienta de cálculo permite la generación gráfica de éstos resultados, a la vez que ofrece la posibilidad de incorporar, en paralelo, la secuencia correspondiente a las mediciones reales, con el fin de visualizar con mayor claridad, el comportamiento de ambas curvas.

En este sentido, se puede observar en la figura 3, un gráfico donde se resume el comportamiento del aire exterior y la temperatura del aire al final del tubo, tanto real, como simulada, para el caso experimental correspondiente al tubo de 15 metros de longitud y 4” de diámetro.

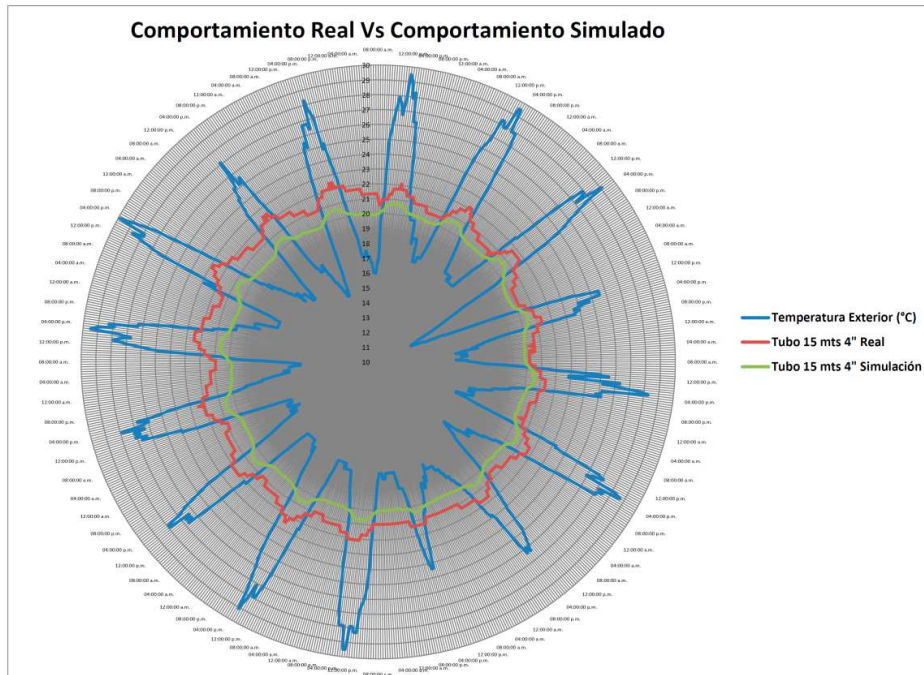


Figura 3: Temperatura del aire al final del tubo con datos reales vs simulados, para un tubo de 15 metros de longitud y 4” de diámetro. Fuente: Herramienta de cálculo V 1.3.

Igualmente se graficaron los resultados correspondientes al tubo de 30 metros de longitud y 4” de diámetro (Figura 4).

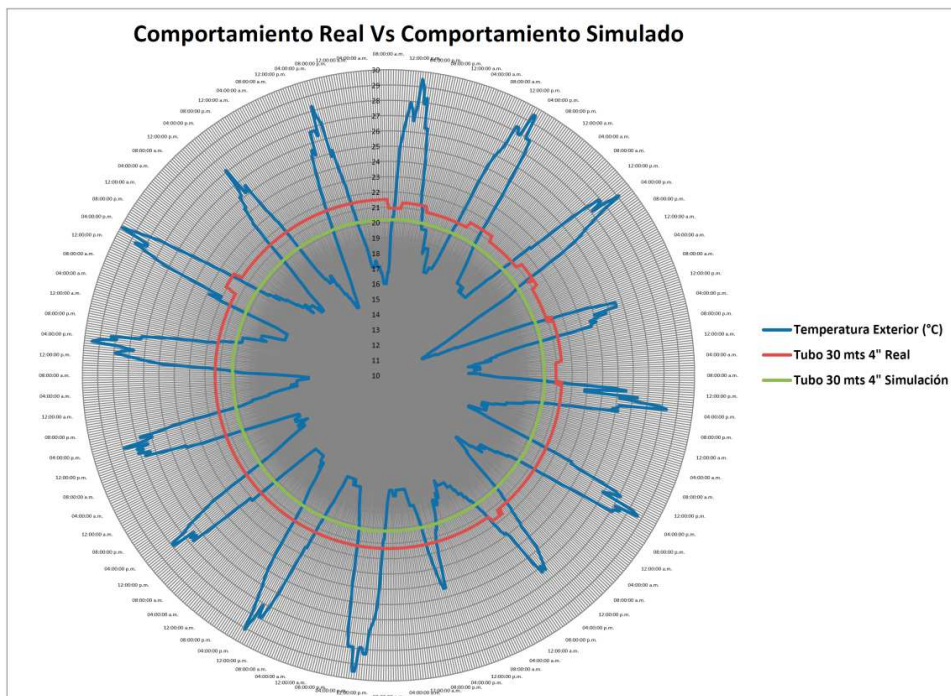


Figura 4: Temperatura del aire al final del tubo con datos reales vs simulados, para un tubo de 30 metros de longitud y 4” de diámetro. Fuente: Herramienta de cálculo V 1.3.

Y finalmente los del tubo de 15 metros de longitud y 6” de diámetro (figura 5).

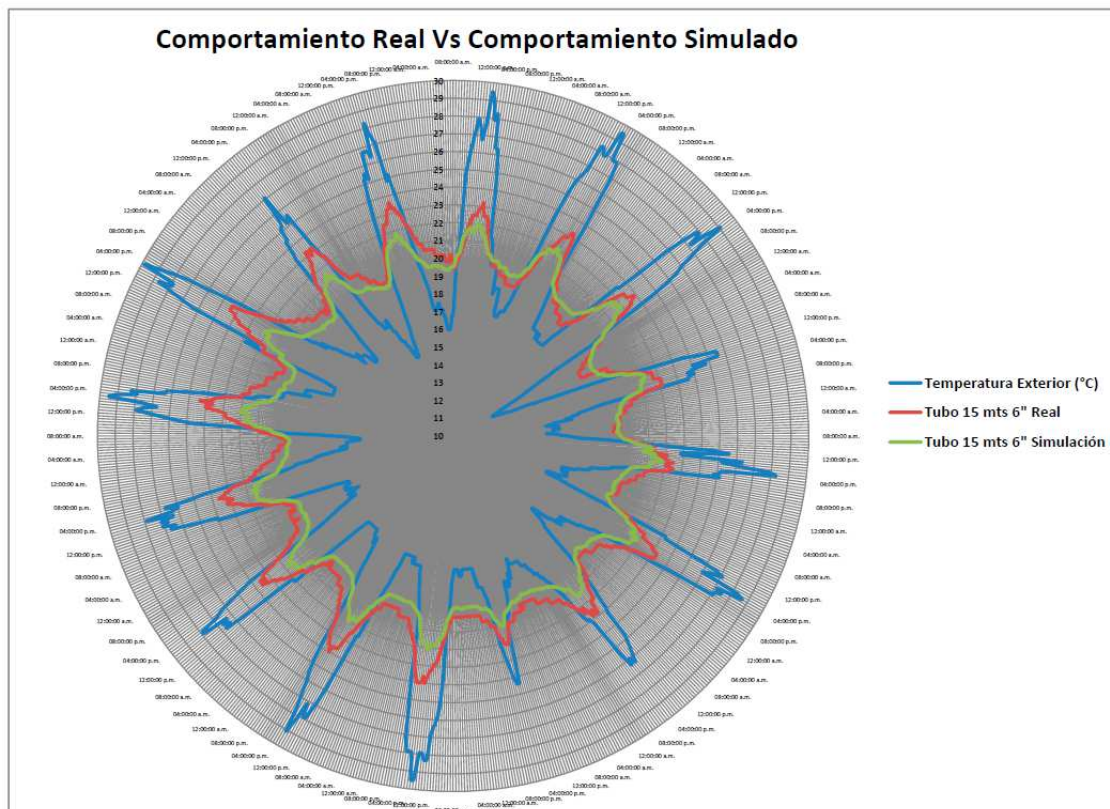


Figura 5: Temperatura del aire al final del tubo con datos reales vs simulados, para un tubo de 15 metros de longitud y 6” de diámetro. Fuente: Herramienta de cálculo V 1.3.

En este sentido y una vez obtenido todos resultados, se calculó la diferencia en °C existente entre los resultados numéricos vs los reales en cada uno de los 300 registros, con el fin de obtener el acercamiento o exactitud de los resultados teóricos, expresado en %. Finalmente, una vez promediados los resultados obtenidos en todo el universo de 900 muestras, se concluye que la metodología de cálculo posee un margen de error de 4,58 % y un acercamiento del 95,42 %. Asimismo, en promedio los resultados simulados indicaron una desviación con respecto a los reales, de 0,99 °C (figura 6).

| | DIFERENCIA °C | ACERCAMIENTO % |
|--|---------------|----------------|
| PROMEDIO GENERAL DE RESULTADOS PROTOTIPOS VS SIMULACIONES (900 MUESTRAS) | 0,99 | 95,42 |
| TASA DE CONFIANZA - METODOLOGÍA DE CÁLCULO | | 95,42% |
| MARGEN DE ERROR - METODOLOGÍA DE CÁLCULO | | 4,58% |

Figura 6: Síntesis de resultados obtenidos del análisis comparativo realizado entre resultados reales de prototipos experimentales y los arrojados por la herramienta de cálculo.

CONCLUSIONES GENERALES

El presente estudio constituye una contribución en el desarrollo de la tecnología de conductos enterrados para climatización pasiva de edificaciones en nuestro país, principalmente por la adaptación y verificación, de un procedimiento simplificado de fórmulas empíricas desarrollado en la Université Joseph Fourier, de Grenoble, Francia. Y una herramienta computarizada, que entre otras cosas permite, de una manera rápida y sencilla, la evaluación, cálculo y/o dimensionado del éste sistema, por parte de profesionales y técnicos, quienes en definitiva, junto a los actores sociales involucrados, tanto del sector público, como del privado, son los que pueden estimular su implementación progresiva en el contexto venezolano.

Con respecto a la metodología de cálculo simplificada, a pesar que se basó en la hipótesis de que la temperatura en la superficie interior del tubo era constante y se consideró igualmente que el intercambio de calor se hacía en régimen estacionario, es decir, que las temperaturas siguen siendo constantes en la tierra y en la superficie interior del conducto, se logró por medio de un análisis comparativo de 900 muestras de temperatura reales frente a las mismas 900 muestras de temperaturas simuladas, obtener un margen de error de 4,58%, donde además se pudo observar que en todos los casos simulados, se registraron temperaturas menores en comparación con las mediciones reales, pero con una diferencia entre ambos que en promedio se ubicó en 0.99 °C.

Estos resultados en definitiva nos permiten avalar o validar la viabilidad del método, con la salvedad de que la misma sigue siendo una metodología de cálculo simplificado, basada en regímenes estacionarios, la cual está pensada para que sea utilizada como un instrumento simplificado, rápido y sencillo para el cálculo y dimensionado de sistemas de conductos enterrados por parte de profesionales, técnicos y especialistas, dedicados principalmente al área de la arquitectura y construcción, con miras en propiciar la futura masificación de estos sistemas en el país. En dicho sentido, los resultados obtenidos deben ser considerados como un aporte en el área de especialidad, sin dejar de lado la necesidad de seguir profundizando en su desarrollo y perfeccionamiento mediante la incorporación de un equipo multidisciplinario.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- **Amitrano, D.** (2006). “Eléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit « puits canadien »” Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique (LGIT). Université Joseph Fourier. Grenoble, Francia.
- **Lorenzo, E.** (2007) “Climatización pasiva por conductos enterrados. Caso de aplicación: Almacenes L & G para bebidas alcohólicas y gaseosas”. Trabajo especial de grado. IDEC-FAU-UCV. Caracas, Venezuela.
- **Lorenzo, E. Hobaica, M. Conti, A.** (2008). “Desarrollo experimental de un prototipo del sistema de tubos enterrados”. Revista Tecnología y Construcción, 24 -I. pp. 43-50.

- **Lorenzo, E. y Hobaica, M** (2010). “Racionalidad energética en edificaciones industriales. Aplicación de sistemas pasivos de climatización.”. Revista Tecnología y Construcción, Vol. 26. N° II. pp. 9-18. Caracas, Venezuela

- **Lorenzo, E.** (2011). “Climatización Pasiva por Conductos Enterrados Dentro del Contexto Climático Venezolano”. Ediciones Facultad de Arquitectura – UCV. Caracas – Venezuela.