

ANÁLISIS DE LA GEOMETRIA EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN RECINTOS TRAPEZOIDALES

Aramayo, A. M.¹; Esteban, E. S.¹; Farfán, N. M.¹; Ordoñez, A.²

¹ Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional - Universidad Nacional de Salta

² Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta
Avenida Bolivia 5150, Salta Capital.

Recibido 13/06/2024; Aceptado 15/07/2024

RESUMEN.- La convección natural en recintos trapezoidales es un proceso muy utilizado en distintas aplicaciones tales como acondicionamiento térmico, performance de colectores solares, desalinizadores, intercambiadores de calor y paneles de secado. El estudio numérico de este proceso permite proponer un diseño óptimo de los equipos. En este trabajo, se presentan resultados numéricos de la transferencia de calor en tres geometrías trapezoidales: tipo ático, ático invertido y simétrico. En estas geometrías, las paredes verticales se mantienen aisladas, mientras que las paredes superior e inferior están activas. La temperatura de la pared inferior es mayor que la de la superior, con saltos de temperatura (γ_{crit}) que varían entre 1°C y 30°C. Además, la inclinación de las paredes activas varía entre 0° y 30°. El proceso de convección natural, inducido por la diferencia de temperatura, puede ser multicelular o unicelular, dependiendo del ángulo de inclinación. Para cada salto de temperatura, se ha determinado un ángulo crítico (γ_{crit}) en el que cambia de tipo de flujo. Se analiza el efecto de la inclinación de las paredes activas y del salto de temperatura en los campos de velocidad y el flujo de calor promedio para las tres geometrías.

Palabras clave: Convección natural. Recinto trapezoidal. Flujo de calor.

EVALUATION OF THE POTENTIAL OF NATURAL VENTILATION OF SEVERAL ARGENTINEAN LOCATIONS

ABSTRACT.- Natural convection in trapezoidal enclosures is a process widely used in different applications such as thermal conditioning, performance of solar collectors, desalinators, heat exchangers and drying panels. The numerical study of this process allows us to propose an optimal design of the equipment. In this work, numerical results of heat transfer in three trapezoidal geometries are presented: attic type, inverted attic and symmetrical. In these geometries, the vertical walls remain isolated, while the upper and lower walls are active. The temperature of the lower wall is higher than that of the upper one, with temperature difference (γ_{crit}) that vary between 1°C and 30°C. Furthermore, the inclination of the active walls varies between 0° and 30°. The natural convection process, induced by the temperature difference, can be multicellular or unicellular, depending on the angle of inclination. For each temperature difference, a critical angle (γ_{crit}) has been determined at which the type of flow changes. The effect of the inclination of the active walls and the temperature jump on the velocity fields and the average heat flux for the three geometries is analyzed.

Keywords: Natural convection. Trapezoidal enclosure. Heat flux.

1. INTRODUCCIÓN

La convección es un proceso muy utilizado en distintas aplicaciones ingenieriles. Cuando la convección es inducida por sólo por una diferencia de temperatura, convección natural, permite generar un flujo de calor con un ahorro de energía, que es el principal objetivo en las aplicaciones térmicas. Existen numerosos trabajos tanto experimentales como numéricos, que estudian la convección natural en recintos, en distintos tipos de geometrías.

En el trabajo de Abdulkadhim et al. (2021) se realiza una revisión exhaustiva del estudio de la convección forzada como natural en recintos con geometrías trapezoidales, paralelogramicas, elípticas y onduladas, que utilizaron varios métodos numéricos durante diez

años previos. Este artículo, señala que la convección natural en geometrías trapezoidales ha sido menos estudiada que las geometrías sencillas, tales como la rectangular o triangular. Los resultados de los trabajos revisados se presentan en términos de líneas de corriente, isotermas, número de Nusselt local y promedio. En los casos de calentamiento inferior, para recintos trapezoidales, las paredes activas son horizontales, por lo que la geometría planteada es diferente a las propuestas en este trabajo.

En este trabajo, se analiza la transferencia de calor en el interior de un recinto trapezoidal mediante convección natural. Los recintos estudiados presentan las siguientes características:

- **Tipo ático:** Pared inferior horizontal y superior inclinada.

- **Tipo ático invertido:** Pared inferior inclinada y superior horizontal.
- **Trapezio simétrico:** Pared inferior y superior inclinadas en forma simétrica.

En la figura 1, se muestran un esquema de los dominios de cálculo, para las tres configuraciones estudiadas. En particular este tipo de geometrías corresponde a un prototipo de destilador multietapa cuyas etapas tienen la particularidad de establecer cavidades del tipo trapezoidal simétrico (figura 1, derecha). La complejidad de los fenómenos fluido-dinámicos y térmicos que se obtienen nos ha motivado a trabajar con geometrías más sencillas, como las del tipo ático y ático invertido (figura 1 izquierda y centro).

Nuestro grupo de investigación tiene amplia experiencia en este tema, en el trabajo Esteban et al. (2019) se presentan los resultados de los patrones de flujo y evolución temporal del flujo de calor, en un recinto tipo ático, tomando como referencia un recinto rectangular se inclina la pared superior. Para el recinto rectangular el régimen es multicelular (calentamiento inferior) y a medida que aumenta la inclinación de la pared superior, disminuye la cantidad de celdas, hasta que, a partir de un ángulo crítico, se vuelve unicelular (calentamiento lateral). En el trabajo Esteban et al. (2022) se estudia la convección natural en un recinto cuya pared superior se mantiene horizontal, en tanto que la pared inferior se inclina (ático invertido), al igual que en el caso anterior, se observa un cambio de tipo de régimen de multicelular a unicelular, al aumentar la inclinación de la pared inferior. A un dado salto de temperatura, el ángulo crítico en el que se produce el cambio de régimen, para el caso del ático es menor que para el ático invertido.

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos para un trapezio simétrico y se compara la transferencia de calor para las tres configuraciones, teniendo en cuenta el efecto de la inclinación de la(s) pared(es) activa(s) y el salto de temperatura. En todos los casos se ha considerado inclinaciones hasta 30° y saltos de temperatura de 1 °C a 30 °C.

2. MODELO MATEMÁTICO

La convección natural en recintos, bajo la aproximación de Boussinesq, para un flujo laminar incompresible, está modelada por las siguientes ecuaciones:

De continuidad:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

De energía:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T \quad (2)$$

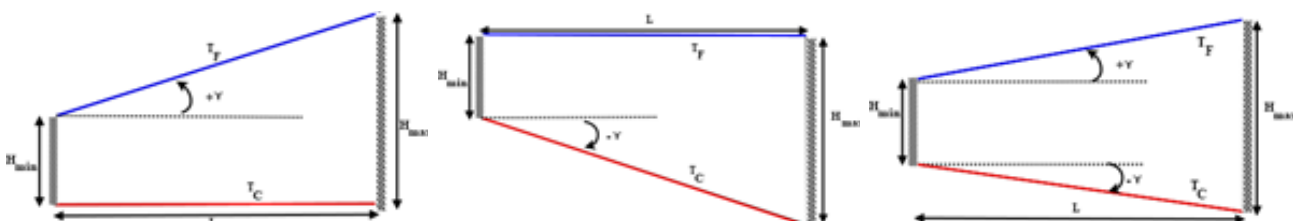


Fig. 1. Geometría de los dominios de cálculo: tipo ático (izquierda), tipo ático invertido (centro) y simétrico (derecha)

De momento:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} - \mathbf{g}[1 - \beta(T - T_0)] \quad (3)$$

Donde \mathbf{u} , es el campo de velocidad, T de temperatura, P de presión, \mathbf{g} de gravedad. En tanto que ρ , ν , α , β , son la densidad, viscosidad, difusividad térmica y el coeficiente de expansión volumétrica, del fluido, respectivamente, evaluados en la temperatura de referencia T_0 .

Se han considerado las siguientes condiciones de borde e iniciales:

- paredes verticales: $\mathbf{u} = \mathbf{0}$, $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$
- pared inferior: $\mathbf{u} = \mathbf{0}$, $T = T_C$, pared superior: $\mathbf{u} = \mathbf{0}$, $T = T_F$
- inicialmente todo el recinto se encuentra estanco y a $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Donde n , es la normal a la pared y T_C es mayor que T_F . El cálculo es transitorio y se itera hasta 3600 segundos.

Una vez obtenidos numéricamente los campos de velocidad y temperatura, se pueden calcular distintos parámetros de interés, tales como el flujo de calor promedio en las paredes activas, definido por:

$$\bar{Q}'' = -\frac{k}{s} \iint_S \frac{\partial T}{\partial n} dS \quad (4)$$

Donde S es el área de la superficie sobre la que se calcula el promedio y k es la conductividad térmica del fluido. Si bien la determinación de este flujo se realiza en todas las iteraciones temporales, los resultados mostrados en este trabajo corresponden al promedio temporal.

Se ha calculado el flujo de calor promedio, tanto en la pared inferior como superior, en este trabajo se muestra los resultados para las paredes inclinadas.

3. METODOLOGÍA UTILIZADA

Se ha utilizado el software OpenFOAM (OF) 3.0.1 para la resolución numérica del sistema de ecuaciones diferenciales con las condiciones de borde e iniciales descritos en la sección anterior, se obtuvieron los campos de temperatura y velocidad. Este software es de código abierto y se puede adaptar los resolutores ya implementados, para utilizarlos en otros problemas. Posee librerías y diccionarios en los que es factible modificar condiciones de borde e iniciales para cada campo. También se puede elegir los esquemas y métodos de resolución de las ecuaciones discretas.

Para la visualización de los patrones de flujo se ha utilizado una utilidad de OF para postprocesamiento, denominada ParaFoam.

El resolvidor de OF utilizado es buoyantBoussinesqPimpleFoam. Se ha seguido la metodología habitual en el cálculo numérico: independencia de red (convergencia espacial), se ha trabajado con cinco mallas y la variable que permite la elección de la misma es el flujo de calor Q'' , en la pared superior. En cuanto al avance temporal se ha iterado hasta 3600 s con un paso de tiempo de 0,01 s. Las dimensiones del dominio de cálculo son: largo $L=0,3m$, altura de la base menor del trapecio $H_{min}=0,05m$.

Además, OF cuenta con distintas herramientas que permiten el cálculo de parámetros, por ejemplo, gradientes de temperatura, magnitud de campo de velocidad, y en particular el flujo de calor en los bordes del dominio de cálculo, no aislados.

4. PATRONES DE FLUJO

En esta sección se presentan los patrones de flujo obtenidos en las tres geometrías planteadas, a fin de compararlas. En figura 2 y 3, se presentan los campos de velocidad para $\Delta T=5^{\circ}C$, $20^{\circ}C$. En la figura 2 para $\gamma=6^{\circ}$ y en la figura 3, los correspondientes a $\gamma=20^{\circ}$. En todos los casos, con el aumento de salto de temperatura, aumenta la intensidad de las celdas convectivas (medidas por la magnitud de u).

Para $\gamma=6^{\circ}$ (figura 2), los flujos desarrollados en el interior de los recintos son multicelulares y para ambos saltos de temperatura no varían la cantidad de celdas convectivas. Existe una correspondencia entre los flujos obtenidos en el ático como en el ático invertido, en cambio para el trapecio simétrico, la cantidad de celdas es menor que para las otras geometrías. Sin embargo, como se muestra en el trabajo Esteban et al. (2023), existen casos ($\Delta T \geq 25^{\circ}C$, $\gamma \geq 12^{\circ}$) tales que no se conserva la misma cantidad de celdas convectivas en la cavidad ático y ático invertido.

Para $\gamma=20^{\circ}$ (figura 3), los patrones de flujo para las configuraciones ático y ático invertido son unicelulares, en el primer caso la celda convectiva es antihoraria, en tanto que, para el segundo es horaria. Con esta inclinación en el trapecio simétrico, se obtiene un flujo multicelular, caracterizado por una celda principal antihoraria que ocupa la mayor parte del dominio y tres celdas de menor tamaño en las esquinas del trapecio. Cabe aclarar que, para este último caso, el ángulo de inclinación de las paredes activas γ es menor que γ_{crit} .

Bergman et al. (2011), analiza el efecto de las inclinaciones de las placas. Para una placa horizontal, la fuerza de flotación es exclusivamente normal a la superficie. En cuanto a la placa inclinada, los patrones de flujo y la transferencia de calor dependen en gran medida de si la superficie es fría o caliente y de la orientación de la misma. Para una superficie fría orientada hacia abajo y una superficie caliente orientada hacia arriba, el flujo es impulsado por plumas descendentes y ascendentes, respectivamente. La conservación de la masa dicta que el fluido frío (caliente) que desciende (asciende) de una superficie sea reemplazado por un fluido ascendente (descendente) más caliente (más frío) del ambiente, y la transferencia de calor es mucho más efectiva, que si la placas fueran verticales.

Por otro lado, Bejan A. (2013) estudia el efecto de la inclinación de un recinto rectangular sobre la transferencia de calor convectiva, considerando el calentamiento lateral e inferior. El ángulo de inclinación, tiene un efecto dramático sobre la transferencia de calor y las características de flujo en el recinto. A medida que el ángulo de inclinación disminuye de 90° a 0° , el mecanismo de transferencia de calor cambia de convección unicelular a convección de Bénard. La transferencia de calor, presenta un máximo para calentamiento inferior y disminuye hasta el valor correspondiente al valor del calentamiento lateral.

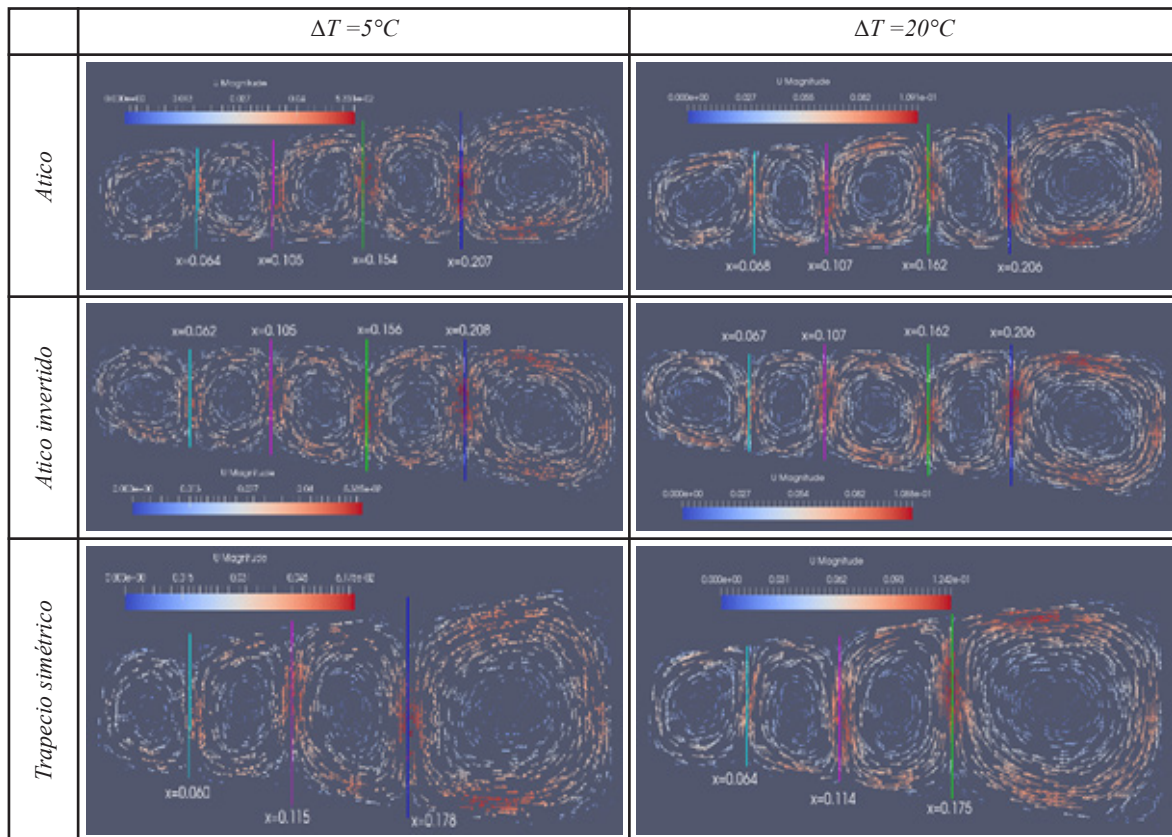


Fig. 2 Campos de velocidad para $\gamma = 6^{\circ}$, en las tres configuraciones $\Delta T = 5^{\circ}C$, $20^{\circ}C$

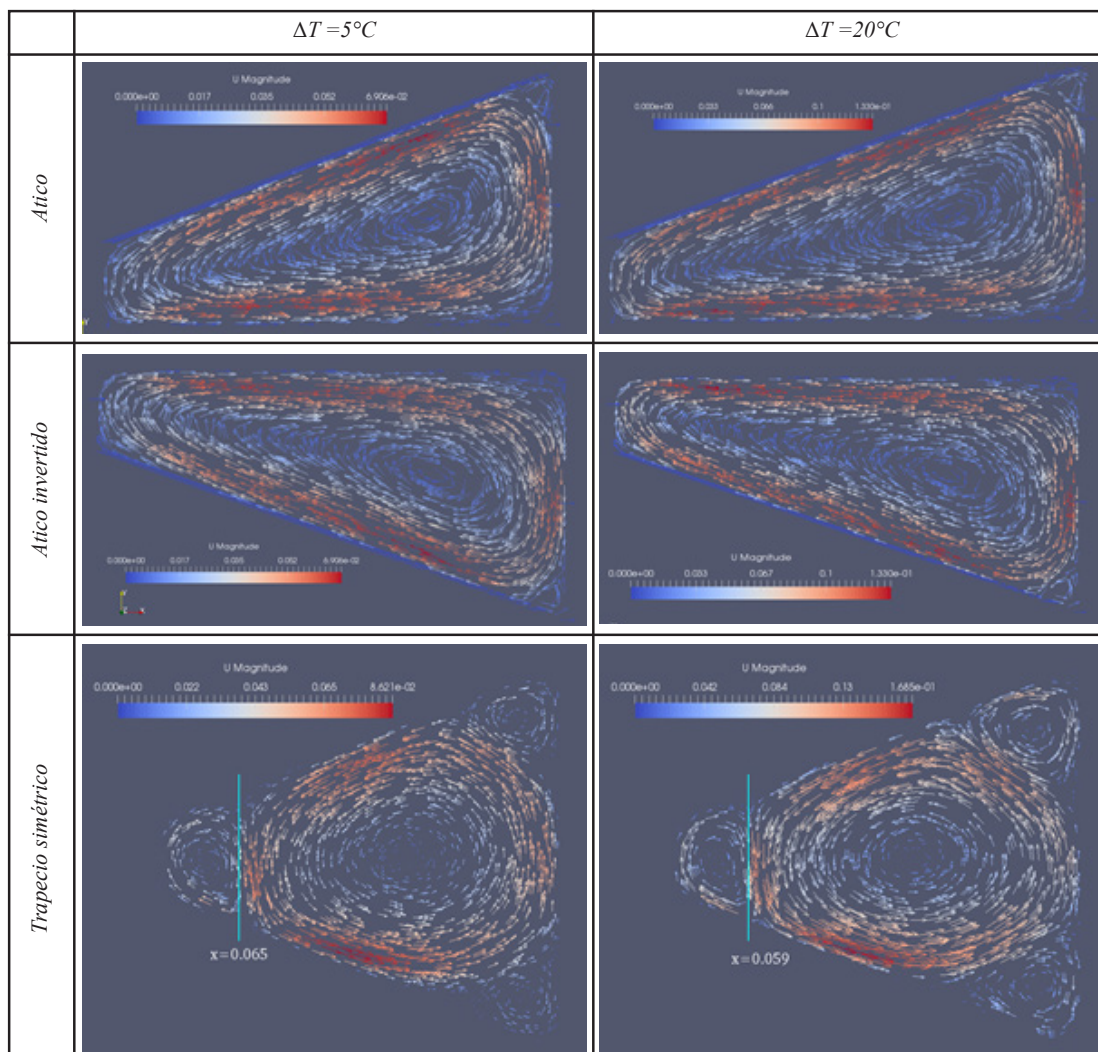


Fig. 3 Campos de velocidad para $\gamma = 20^{\circ}$, en las tres configuraciones y $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$, 20°C

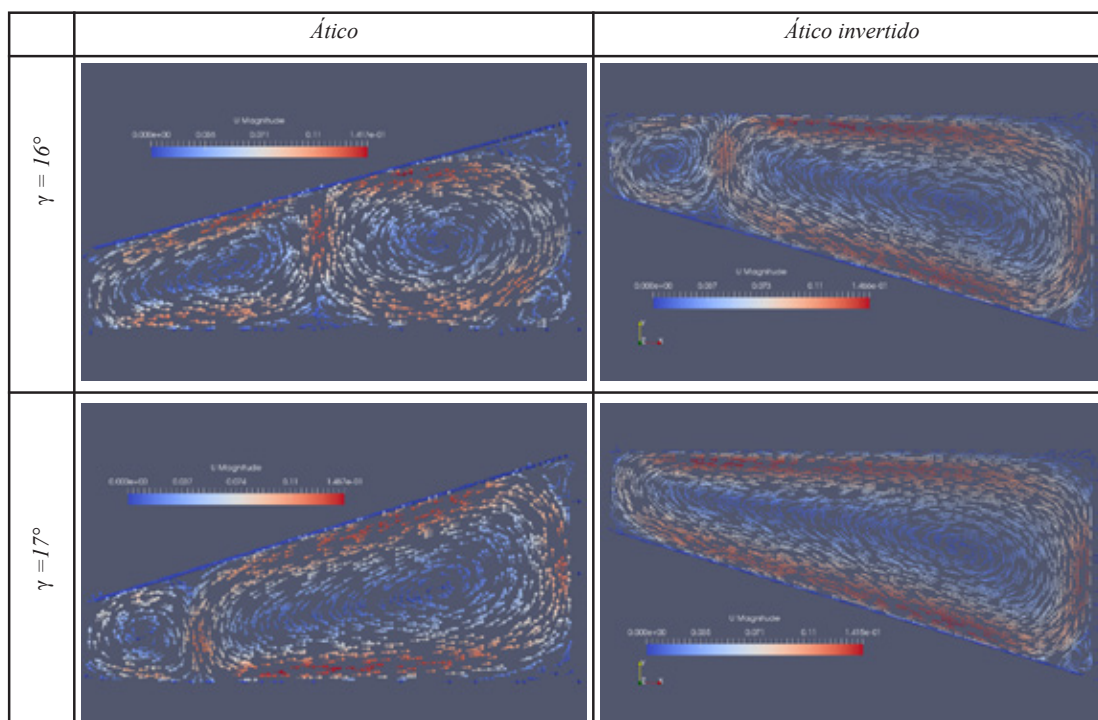


Fig. 4 Campos de velocidad para $\Delta T = 25^{\circ}\text{C}$ para ático y ático invertido

Los patrones obtenidos en este trabajo, revelan la influencia de la inclinación de las paredes activas en sentido positivo o negativo, en particular teniendo en cuenta el efecto del término de flotación, que produce la convección natural.

El efecto de la inclinación en sentido positivo (ático) o negativo (ático invertido), puede producir distintos comportamientos de flujo en el interior de las cavidades, como se puede observar en la figura 4, en la que se muestra el efecto de la inclinación de las paredes activas, en la configuración ático y ático invertido, para un mismo salto de temperatura ($\Delta T=25^\circ\text{C}$). Para $\gamma=16^\circ$, en ambas cavidades el flujo es multicelular, con dos celdas convectivas. Sin embargo, para el ático invertido se forma una celda principal que ocupa más de la mitad de la cavidad, en tanto que para el ático no hay una celda dominante. En $\gamma=17^\circ$, para el ático invertido se forma una única celda principal (flujo unicelular), en tanto que para el ático el flujo continúa siendo multicelular.

5. FLUJO DE CALOR PROMEDIO

En esta sección se presenta los gráficos del flujo de calor promedio calculados mediante la ecuación (4), para las tres geometrías, se analiza el efecto de la inclinación de las paredes activas, del salto de temperatura impuesto y del tipo de geometría de la cavidad

5.1. Variación con el ángulo de inclinación

En esta subsección se presenta el análisis de la transferencia de calor para cada una de las configuraciones estudiadas y el efecto que tiene la inclinación de las paredes activas. En las figuras 5, 6 y 7, se muestran Q'' en función del ángulo de inclinación, para cada uno de los saltos de temperatura. En la figura 5 para el ático, en la figura 6 para el ático invertido y en la figura 7, para

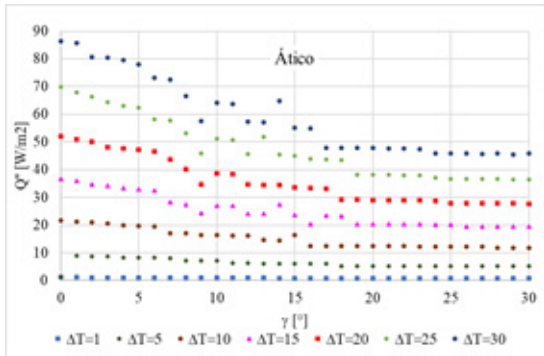


Fig. 5. Flujo de calor vs. ángulo de inclinación, para el ático.

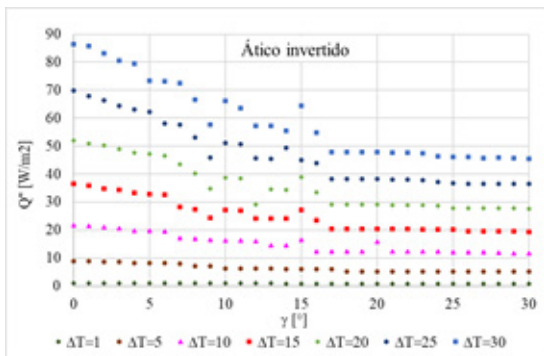


Fig. 6. Flujo de calor vs. ángulo de inclinación, para el ático invertido.

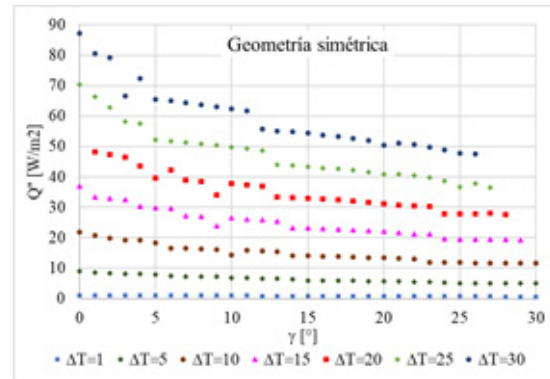


Fig. 7. Flujo de calor vs. ángulo de inclinación, para el trapecio simétrico.

el trapecio simétrico. Se han incluido todos los valores de Q'' para los que se ha alcanzado el estado estacionario.

En todos los casos, a medida que aumenta la inclinación, el flujo de calor disminuye hasta alcanzar un valor prácticamente constante. Por otro lado, a medida que aumenta el salto de temperatura, el flujo de calor incrementa. La disminución del flujo de calor ocurre hasta llegar a un ángulo crítico, a partir del cual se mantiene prácticamente constante.

Las distintas gráficas de Q'' en función de γ muestran, en las tres configuraciones, una mayor influencia de la inclinación de las paredes, a medida que aumenta el salto de temperatura.

En la tabla 1 se presenta el ángulo crítico para cada una de las configuraciones y salto de temperatura. En este ángulo crítico se produce el cambio de tipo de régimen de flujo multicelular a unicelular.

Tabla 1: Ángulos críticos para las tres configuraciones

ΔT	Ático	Ático invertido	Simétrico
1	19	19	27
5	17	17	24
10	15	15	22
15	18	16	23
20	17	16	23
25	18	16	23
30	16	16	24

Como se puede observar, el ángulo crítico para la configuración del ático invertido es menor o igual que para las otras dos configuraciones, siendo mayor para el trapecio simétrico. Al comparar con la figura 3, para un ángulo de inclinación $\gamma = 20^\circ$, en el caso del ático y ático invertido el flujo es unicelular, en tanto que, para la geometría simétrica, sigue siendo multicelular.

En términos térmicos, los resultados numéricos confirman lo planteado teóricamente para todas las geometrías: el flujo de calor aumenta con el incremento del salto de temperatura. Sin embargo, respecto a la inclinación de las paredes activas, se observa un efecto diferente. Hasta cierto ángulo crítico, la inclinación de las paredes tiene un impacto en la transferencia de calor, pero más allá de ese punto, su influencia disminuye.

5.2. Comparación entre las tres configuraciones

En las figuras 8 y 9, se presenta los gráficos de la transferencia de calor en función del ángulo de inclinación, para las tres con-

figuraciones, en la figura 8 el correspondiente a $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, en la figura 9, para $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$.

Se observa que los valores de flujo promedio para el ático y el ático invertido son prácticamente idénticos. Hasta el ángulo crítico de la configuración del ático invertido, los valores de Q'' del trapecio simétrico son menores que los correspondientes a las otras dos configuraciones (régimen multicelular). Sin embargo, para inclinaciones entre el ángulo crítico del ático invertido y del trapecio simétrico, los valores de Q'' de esta última configuración superan a los de las otras configuraciones. A partir del ángulo crítico del trapecio simétrico, el flujo de calor es prácticamente igual, para las tres configuraciones (régimen unicelular). Esta situación se repite para los demás saltos de temperatura.

En base a estos resultados, se puede apreciar que la inclinación de las dos paredes activas (trapecio simétrico) no favorece a la transferencia de calor, en el régimen multicelular.

Con el objetivo de cuantificar el efecto de la inclinación de la(s)

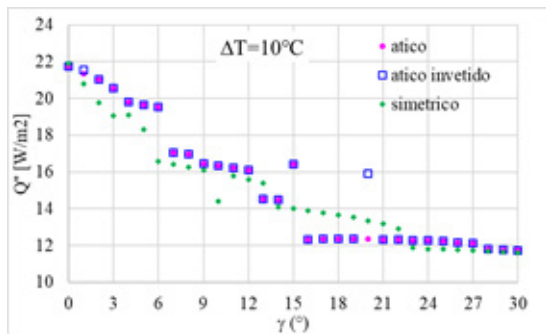


Fig. 8. Flujo de calor vs. ángulo de inclinación, para las tres configuraciones a $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$

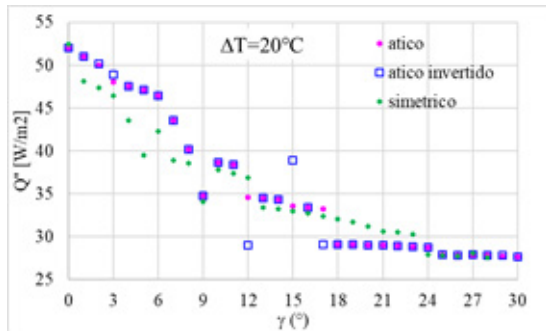


Fig. 9. Flujo de calor vs. ángulo de inclinación, para las tres configuraciones a $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$

pared(es) activa(s), se ha determinado la relación entre Q'' para un ángulo dado, respecto de Q'' a $\gamma = 0$ (Q''_0). En la tabla 2, se muestran los cocientes, para las tres configuraciones, para dos saltos de temperatura $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ y 20°C .

Según los valores de la tabla, al aumentar el ángulo de inclinación, disminuye la relación Q'' / Q''_0 , hasta alcanzar un valor prácticamente constante a partir del ángulo crítico. Además, se observa que esta disminución alcanza aproximadamente el 53%, para las tres configuraciones. Comportamiento que se observa para todos los saltos de temperatura simulados, no mostrados en el presente trabajo.

5.3. Variación con el salto de temperatura

En esta subsección se presentan el flujo de calor en función del salto de temperatura, parametrizado con el ángulo de inclinación. En la figura 10, el correspondiente al ático, en la figura 11, para el ático invertido y en la figura 12, para el trapecio simétrico. Para mejor visualización, se ha elegido algunos ángulos de inclinación, que representan a los distintos tipos de flujo obtenido.

En general, la dependencia de Q'' con ΔT , es prácticamente lineal y a medida que aumenta el ángulo de inclinación, la pendiente de estas rectas disminuye. Las excepciones a esta regla, se producen para los ángulos en los que cambia el tipo de régimen. Por ejemplo, para $\gamma=18^{\circ}$, en la geometría del ático (figura 10) para algunos saltos de temperatura, el flujo es multicelular, en tanto que para otros es unicelular (tabla 1).

Como se mencionó previamente, en el caso de la geometría del ático, a partir de un ángulo de inclinación de 20° , el flujo de calor se vuelve prácticamente independiente del ángulo. Esto significa que las curvas correspondientes a ángulos de 24° y 30° (ver Figura 10) se superponen. De manera similar, para el ático invertido (Figura 11) y la geometría simétrica (Figura 12), también se observa esta superposición de curvas a partir de cierto ángulo de inclinación.

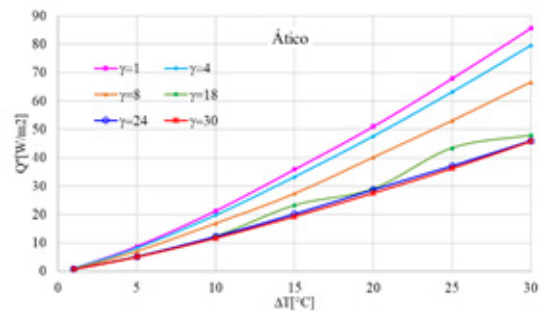


Fig. 10. Flujo de calor vs. ΔT , para el ático

Tabla 2: Relación entre $Q''(\gamma)$ respecto a $Q''(0)$, para las tres configuraciones

	γ	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°	22°	24°	26°	28°
$\Delta T=10^{\circ}\text{C}$	Ático	0,98	0,97	0,95	0,91	0,90	0,90	0,78	0,78	0,75	0,74	0,67	0,57	0,57	0,57	0,57	0,56	0,56	0,54
	Ático invertido	0,99	0,97	0,95	0,91	0,90	0,90	0,78	0,78	0,75	0,74	0,67	0,57	0,57	0,73	0,57	0,56	0,56	0,54
	Simétrico	0,95	0,90	0,87	0,87	0,84	0,76	0,75	0,74	0,66	0,71	0,64	0,64	0,62	0,61	0,59	0,54	0,54	0,53
$\Delta T=20^{\circ}\text{C}$	Ático	0,98	0,97	0,95	0,91	0,90	0,90	0,78	0,78	0,75	0,74	0,67	0,57	0,57	0,57	0,57	0,56	0,56	0,54
	Ático invertido	0,98	0,96	0,94	0,91	0,91	0,89	0,84	0,77	0,74	0,56	0,66	0,64	0,56	0,56	0,56	0,55	0,53	0,53
	Simétrico	0,92	0,90	0,88	0,83	0,75	0,81	0,74	0,73	0,72	0,70	0,63	0,62	0,61	0,59	0,58	0,53	0,53	0,53

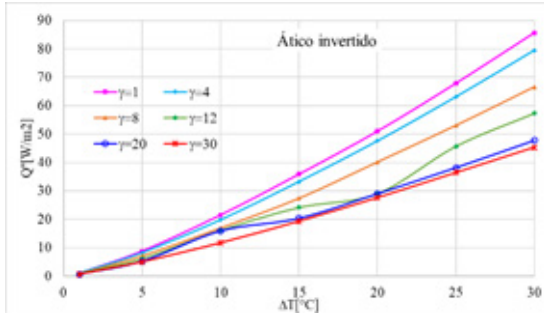


Fig. 11. Flujo de calor vs. ΔT , para el ático invertido

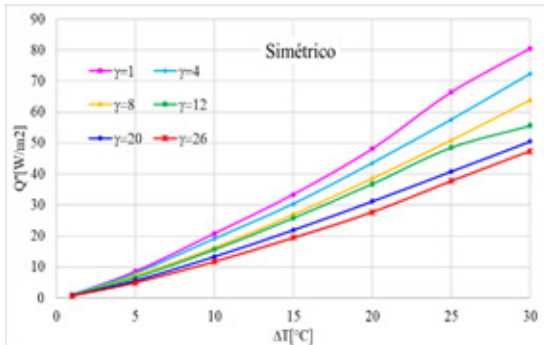


Fig. 12. Flujo de calor vs. ΔT , para el trapecio simétrico

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se presentan los resultados numéricos de la transferencia de calor en tres tipos de cavidades trapecoidales: tipo ático, ático invertido y simétrico. En estas geometrías, las paredes verticales se mantienen aisladas, mientras que las paredes superior e inferior están activas. La temperatura de la pared inferior es mayor que la de la superior, con saltos de temperatura que varían entre 1°C y 30°C . Además, la inclinación de las paredes activas varía entre 0° y 30° . A continuación, se señalan las características que se pueden destacar:

- Para la geometría rectangular, el flujo es multicelular (calentamiento inferior) y a medida que aumenta el ángulo la inclinación de las paredes activas, para las tres configuraciones, el flujo cambia a unicelular (calentamiento lateral).
- El ángulo crítico en el que se produce el cambio de tipo de régimen, para todos los saltos de temperatura, es menor o igual para el ático invertido, comparando con las otras dos configuraciones, y es mayor para el trapecio simétrico (tabla 1).

- El flujo de calor aumenta con el incremento del salto de temperatura, en todos los casos.
- Al inclinar las paredes activas, la disminución de la transferencia de calor puede alcanzar hasta un 53% respecto al obtenido para la geometría rectangular.
- Para un ángulo de inclinación dado, el aumento de Q' con ΔT , es prácticamente lineal.
- Para todos los saltos de temperatura e inclinación de la pared activa, los valores del flujo de calor para el ático y el ático invertido son prácticamente iguales. La inclinación simultánea de las paredes activas (trapecio simétrico) produce una disminución en la transferencia de calor, respecto a las otras dos configuraciones estudiadas.

REFERENCIAS

- Abdulkadhim A., Abed I., Said N. (2021) *An exhaustive review on natural convection within complex enclosures: Influence of various parameters*. Chinese Journal of Physics Vol. 74 pp. 365–388.
- Bejan A. (2013) *Convection Heat Transfer*. 4th Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Bergman T., Lavine A., Incropera F., Dewitt D. (2011) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*: 7th Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Esteban E. S. Tesis de Doctorado en Ciencias Área Energías Renovables, 2007. *Sistemas Regenerativos de Destilación Solar en Circuito Cerrado*. Director: Luis Saravia, Co-Director: Luis Cardón
- Esteban E., Aramayo A., Jaime G. (2019). *Convección Natural Transitoria en Cavidades Trapezoidales Tipo Ático*. Mecánica Computacional, vol. XXXVII, págs. 1939-1950. ISSN 2591-3522.
- Esteban E., Aramayo A., Copa B. (2022). *Convección natural en cavidades con pared superior horizontal e inferior inclinada*. Mecánica Computacional, vol. XXXIX, págs. 1239-1248, ISSN 2591-3522.
- Esteban E., Aramayo A., Farfán N. (2023). *Longitudes Características para Convección de Bénard: Geometrías Trapezoidales*. Acta de la XLV Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente Vol. 10, pp 72-81. ISBN 978-987-29873-1-2
- OpenFOAM. The OpenFOAM Foundation. Dirección URL: <https://openfoam.org/> (2015)