

## ESTUDIO DE LA LONGITUD CARACTERÍSTICA PARA CONVECCIÓN NATURAL EN CAVIDADES TRAPEZOIDALES SIMÉTRICAS

### STUDY OF THE CHARACTERISTIC LENGTH FOR NATURAL CONVECTION IN SYMMETRIC TRAPEZOIDAL CAVITIES

Ester S. Esteban<sup>a</sup>, Ana M. Aramayo<sup>b</sup>, Nélide N. Farfán<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Departamento de Física – INENCO. Facultad de Ciencias Exactas, UNSa, Av. Bolivia 5150, 4400 Salta. Argentina. [s.esteban593@gmail.com](mailto:s.esteban593@gmail.com)*

<sup>b</sup>*Departamento de Matemática – INENCO. Facultad de Ciencias Exactas, UNSa, Av. Bolivia 5150, 4400 Salta. Argentina. [am.baranado@gmail.com](mailto:am.baranado@gmail.com)*

**Palabras clave:** trapecio simétrico, convección natural, longitud característica.

**Resumen.** En este trabajo se analiza numéricamente la convección natural en un recinto trapezoidal simétrico, que consiste de dos paredes verticales aisladas y dos paredes activas inclinadas en forma simétrica. La inclinación de las paredes inferior y superior, varían de 0° a 30°, en tanto que la diferencia de temperatura entre las mismas, entre 1°C y 30°C. Se mantiene fija la base menor del trapecio, en tanto que la base mayor crece a medida que aumenta el ángulo de inclinación. En trabajos anteriores se han estudiado las configuraciones: tipo ático y ático invertido, los resultados muestran que se establecen dos tipos de flujo: calentamiento inferior y lateral; este cambio se produce a un ángulo crítico. Para la geometría del trapecio simétrico, se tiene un comportamiento de flujo similar. Para los distintos saltos de temperatura, a medida que aumenta el ángulo de inclinación el número de celdas convectivas disminuye. A fin de estudiar la transferencia de calor se utiliza una correlación del tipo potencial entre el número de Nusselt y el número de Rayleigh. En trabajos anteriores, se ha encontrado una longitud característica para las geometrías tipo ático y ático invertido, en el presente trabajo, se analiza si estas longitudes siguen describiendo el comportamiento de flujo obtenido para la geometría simétrica.

**Keywords:** symmetrical trapezoid, natural convection, characteristic length.

**Abstract.** In this work, natural convection is numerically analyzed in a symmetrical trapezoidal enclosure, which consists of two isolated vertical walls and two symmetrically inclined active walls. The inclination of the lower and upper walls varies from 0° to 30°, while the temperature difference between them varies between 1°C and 30°C. The smaller base of the trapezoid remains fixed, while the larger base grows as the angle of inclination increases. In previous works, the configurations have been studied: attic type and inverted attic, the results show that two types of flow are established: bottom and lateral heating; this change occurs at a critical angle. For the geometry of the symmetric trapezoid, a similar flow behavior is obtained. For different temperature jumps, as the inclination angle increases, the number of convective cells decreases. In order to study heat transfer, a potential type correlation between the Nusselt number and the Rayleigh number is used. In previous works, a characteristic length has been found for the attic and inverted attic geometries; in the present work, it is analyzed whether these lengths continue to describe the flow behavior obtained for the symmetric geometry.

## 1 INTRODUCCIÓN

La convección natural permite el ahorro de energía, principal objetivo en las aplicaciones de ingeniería. En diversas investigaciones se busca el desarrollo de dispositivos que tienen como objetivo aumentar la tasa de transferencia de calor mediante el uso de diferentes geometrías y condiciones de contorno. Estos trabajos se han realizado tanto en forma experimental como numérica, y se han aplicado a destiladores y colectores solares, intercambiadores de calor y sistemas de refrigeración.

En el trabajo de [Abdulkadhim et al. \(2021\)](#) se realiza una revisión bibliográfica de la convección natural en recintos de geometría compleja tales como las trapezoidales. En todos los trabajos citados, se estudia recintos trapezoidales con paredes superior e inferior horizontales. En esta revisión se destaca la influencia de aspectos geométricos (ángulo de inclinación de paredes activas, razón de aspecto del recinto) y térmicos (número de Rayleigh y Prandtl) en la transferencia de calor.

En el trabajo de [Vijaya Kumara et al. \(2023\)](#) se estudia la convección natural en recintos trapezoidales porosos, con paredes superior e inferior horizontales y paredes laterales inclinadas aisladas. La pared superior se mantiene a temperatura constante, menor que la temperatura de la pared inferior. Los resultados muestran que la relación de aspecto y las temperaturas impuestas en la pared inferior, afectan significativamente al patrón de flujo dentro del recinto y a la transferencia de calor.

En los trabajos [Esteban et al. \(2015, 2016 y 2017\)](#) se estudia numéricamente la convección natural transitoria en un trapecio, de base mayor  $H_{max}$ , base menor  $H_{min}$  y altura  $L$ . Se ha variado la inclinación de las paredes activas y mantenido fijo  $H_{max}$  y  $L$ . Las razones de aspecto ( $A = H_{max}/L$ ) consideradas varía entre 0,1 y 1,2. Los resultados muestran la existencia de un cambio de flujo de calentamiento por debajo (multicelular) a calentamiento lateral (unicelular), a un determinado ángulo crítico ( $\gamma_{crit}$ ). La longitud característica para razones de aspecto menores a 0,8 y calentamiento inferior, es la proyección vertical de la pared inclinada ( $P_v$ ); en tanto que para calentamiento lateral es el promedio de la base menor y mayor del trapecio ( $H_{prom}$ ). Para razones de aspecto mayores a 0,8, en cambio, se ha tomado como longitud característica a  $H_{prom}$  para los casos de calentamiento inferior y  $P_v$  para calentamiento lateral.

Los trabajos mencionados anteriormente dan cuenta que la inclinación, en sentido opuesto de las paredes superior e inferior determinan el comportamiento de flujo dentro de la cavidad. En este tipo de geometría, compiten las fuerzas de flotación y las viscosas en las capas límites inferior y superior. A fin de considerar sólo el efecto de la inclinación de una de las paredes activa, en los trabajos [Esteban et al. \(2019, 2021, 2022 y 2023\)](#), se ha estudiado la geometría tipo ático y ático invertido, manteniendo fijo  $H_{min}$  y  $L$  y variado la inclinación de una pared activa. Para ambas geometrías se determina que la longitud característica, para el caso de calentamiento inferior, debe disminuir a medida que aumenta la inclinación. En tanto que, para el calentamiento lateral, la longitud apropiada es  $H_{max}$ .

En el presente trabajo se analiza numéricamente la convección natural en un recinto trapezoidal simétrico, que consiste de paredes verticales aisladas y paredes activas inclinadas en forma simétrica. La inclinación de las paredes inferior y superior, varían de  $0^\circ$  a  $30^\circ$ , en tanto que la diferencia de temperatura entre las mismas, entre  $1^\circ\text{C}$  y  $30^\circ\text{C}$ . Se mantiene fijo  $H_{min}$ , en tanto que  $H_{max}$  aumenta con el ángulo de inclinación. Para esta geometría, se establecen dos tipos de flujo: calentamiento inferior y lateral; este cambio se produce a un ángulo crítico. Para los distintos saltos de temperatura, a medida que aumenta el ángulo de inclinación el número de celdas convectivas disminuye. En trabajos anteriores, se ha encontrado una longitud característica para las geometrías tipo ático y ático invertido, en el presente trabajo, se analiza si esta longitud sigue describiendo el comportamiento de flujo obtenido para el caso simétrica.

## 2 MODELO MATEMATICO Y NUMERICO

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

$$\text{De continuidad:} \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

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

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

Donde  $\mathbf{u}$ , es el campo de velocidad,  $T$  de temperatura,  $P$  de presión,  $\mathbf{g}$  de gravedad. En tanto que  $\rho$ ,  $\nu$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ , 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 aisladas; pared inferior a temperatura igual a  $T_C$ , pared superior a  $T_F$ ; inicialmente todo el recinto se encuentra estanco y a  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ . Las paredes inferior y superior están activas, se impone una temperatura mayor a la superficie inferior. El salto de temperatura ( $\Delta T$ ) varía entre  $1^\circ\text{C}$  y  $30^\circ\text{C}$ .

En la [figura 1](#), se muestra el dominio de cálculo, consistente de un trapecio simétrico de base mayor  $H_{max}$ , base menor  $H_{min}$  y altura  $L$ . Se fija  $H_{min} = 0,05\text{m}$  y  $L = 0,3\text{m}$ , se varía el ángulo de inclinación tanto de la pared superior como inferior ( $\pm\gamma$ ). La variación de la inclinación va de  $0^\circ$  a  $30^\circ$ .

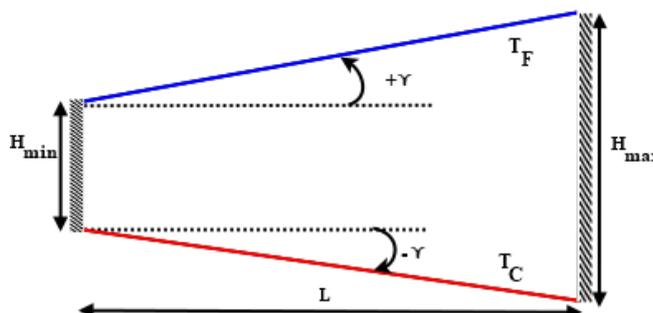


Figura 1: Dominio de cálculo y condiciones de contorno.

Se utiliza el software **OpenFOAM 3.0.1** para resolver las ecuaciones y obtener los campos de temperatura y velocidad. Para la visualización de los patrones de flujo y el cálculo de los gradientes de temperatura, se ha utilizado utilidades de OpenFOAM (OF) para postprocesamiento. El solver 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. El avance temporal se ha realizado hasta 3600 s, en los casos que ha sido posible. La discretización del dominio de cálculo se ha realizado utilizando elementos hexaédricos, generados mediante la aplicación de OF (*BlockMesh*).

## 3 PATRONES DE FLUJO

En esta sección se muestra algunos patrones de flujo obtenidos en el interior de la cavidad. En la [figura 2](#) se presenta los patrones de velocidades para un salto de temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , a distintos ángulos de inclinación, para  $t = 3600\text{ s}$ . Se puede observar la disminución del número de celdas convectivas a medida que aumenta la inclinación, como así también el incremento en las escalas de velocidades. A  $\gamma = 9^\circ$  se obtienen tres celdas principales, una en la base mayor,

otra en la base menor y una tercera en la parte central; este número de celdas se mantiene hasta  $\gamma=12^\circ$ . En la mayoría de los casos simulados, se ha observado que en la base mayor se forman dos celdas convectivas pequeñas en la parte inferior y superior, las que aumentan de tamaño e intensidad, a medida que incrementa el ángulo de inclinación.

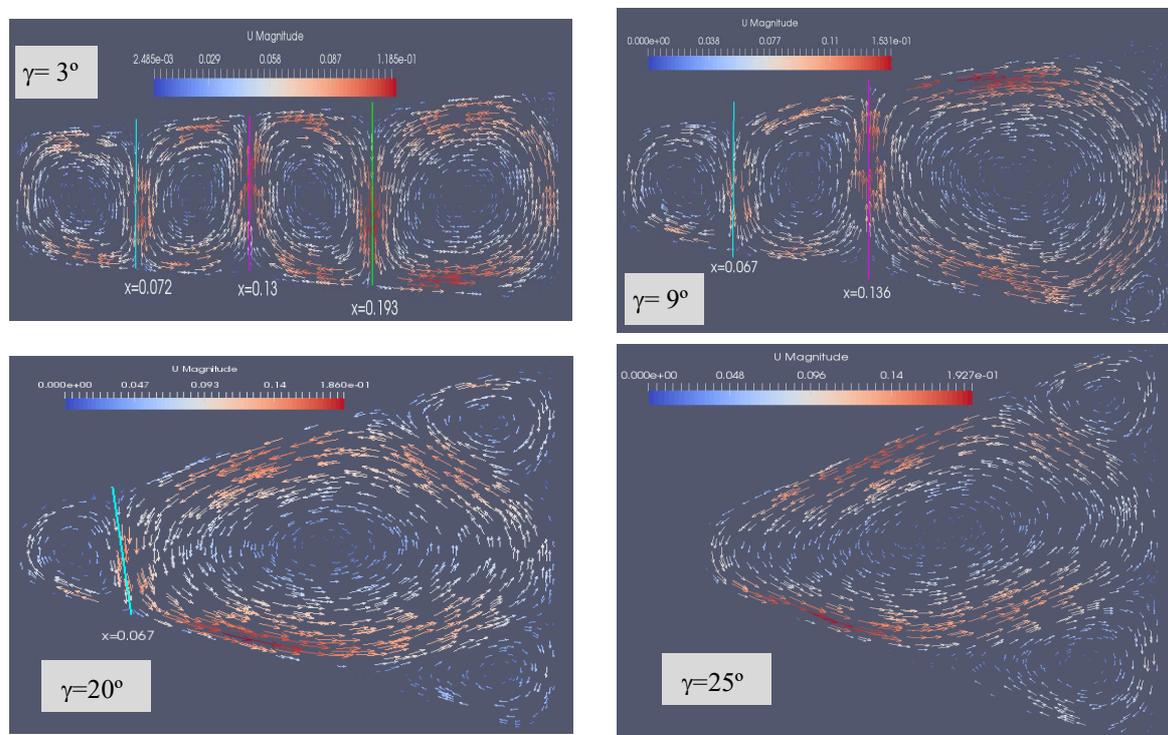


Figura 2: Campos de velocidad,  $\Delta T=25^\circ\text{C}$ .

En las gráficas, también, se ha indicado las posiciones de las plumas ascendentes y descendentes. Para el caso de dos celdas convectivas principales a izquierda y derecha, a partir de determinado ángulo, la pluma ya sea ascendente o descendente se inclina ( $\Delta T=25^\circ\text{C}$ ,  $\gamma=20^\circ$ ) hasta que la celda de la derecha ocupa casi por completo la cavidad.

De acuerdo a los campos obtenidos se tiene convección de Rayleigh-Bernard para ángulos menores a  $\gamma_{crit}$ , y para ángulos mayores, convección natural por calentamiento lateral ( $\Delta T=25^\circ\text{C}$ ,  $\gamma=25^\circ$ ). Para este último caso, si bien existen tres celdas convectivas, la celda principal ocupa casi la totalidad de la cavidad mientras que las celdas secundarias se ubican en la parte superior e inferior de la base mayor, estos casos se han considerado como convección natural por calentamiento lateral.

En las configuraciones de tipo ático y ático invertido, se ha observado, que a medida que aumenta la inclinación de la pared superior e inferior, respectivamente; disminuye la cantidad de celdas. Este efecto también se presenta en el caso simétrico, aunque con la diferencia de que el ángulo crítico es mayor en este último. En la [Tabla 1](#) se presentan los ángulos críticos en los que ocurre el cambio de flujo, de multicelular a unicelular, para las tres configuraciones y para los distintos saltos de temperatura. Para todos los saltos de temperatura, el ángulo crítico para el ático invertido es menor que para el ático y éste a su vez menor que para el trapecio simétrico.

La [figura 3](#) muestra algunos campos de velocidad para los ángulos críticos (mostrados en la [Tabla 1](#)), para distintos saltos de temperaturas, a  $t=3600$  s. En la mayoría de los casos, la celda principal tiene orientación horaria y la pluma convectiva presenta una leve inclinación a la derecha. Por otro lado, la celda izquierda (adyacente a la base menor) tiene casi el mismo

tamaño que las celdas secundarias que se forman a la derecha, en la cercanía de la base mayor. Esta característica plantea la disyuntiva si el tipo de comportamiento de flujo, sea considerado como calentamiento inferior o de lado.

$\Delta T$ (°C)	1	2	4	5	10	15	20	25	30
Ático	19	16	17	17	15	18	17	18	16
Ático invertido	19	16	18	17	15	16	16	16	16
Simétrico	27	26	26	24	22	23	23	24	26

Tabla 1: Ángulos críticos (°) para las tres configuraciones.

Por otro lado, la evolución temporal del flujo muestra un comportamiento oscilatorio, a partir de  $\Delta T=15$  °C, aspecto que se puede observar en la [figura 4](#), en la que se grafica el flujo de calor promedio espacial ( $\bar{Q}''$ ) en función del tiempo, el que se calcula del siguiente modo:

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

Donde  $k$  es la conductividad térmica del aire,  $n$  la normal y  $S$  el área de la pared inclinada.

Los patrones mostrados en la [figura 4](#), muestran que a medida que aumenta el salto de temperatura hay mayor inestabilidad. Para  $\Delta T=15^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$  y  $25^\circ\text{C}$  el comportamiento oscilatorio observado se explica de la siguiente manera: en general, se parte de una configuración de cuatro celdas convectivas ([figura 3](#)), una principal ubicada en la parte central de la cavidad (con sentido horario o antihorario) y tres secundarias ubicadas en la parte superior e inferior de la base mayor y una tercera en la base menor (todas con sentido contrario a la celda principal). La celda principal crece (no sólo en tamaño sino también en velocidad) hasta estrangular a la celda izquierda (base menor) quedando por algún tiempo tres celdas; y alternadamente la celda inferior o superior pasa a ser la celda principal. Este comportamiento se repite en el tiempo. En cambio, para  $\Delta T=10^\circ\text{C}$ , el comportamiento estable se debe a que las cuatro celdas convectivas se establecen tempranamente y persisten hasta  $t=3600\text{s}$ .

#### 4 DISCUSION DE LAS LONGITUDES CARACTERISTICAS

En esta sección se analiza las longitudes características para los dos tipos de flujos obtenidos: calentamiento lateral e inferior (convección de Rayleigh Bernard). En primer lugar, se propone trabajar con las longitudes utilizadas en [Esteban et al. \(2019\)](#) y [\(2023\)](#), para los casos de convección por calentamiento lateral y de Rayleigh – Benard, respectivamente.

Como se ha señalado anteriormente, cuando las inclinaciones superan el ángulo crítico ([Tabla 1](#)), se observan patrones de flujo característicos de calentamiento lateral. En estos casos, se forma una celda principal que ocupa la mayor parte del recinto, junto con dos celdas secundarias en las esquinas adyacentes a la base mayor (ver [Figura 2](#),  $\gamma=25^\circ$ ). Por otro lado, para incrementos de temperatura menores que  $\Delta T=15^\circ\text{C}$  los resultados convergen hasta una inclinación de  $\gamma=30^\circ$ . Sin embargo, para saltos de temperatura mayores, esta convergencia se alcanza a inclinaciones menores.

El estudio teórico indica que la dependencia del número de Nusselt en función del número de Rayleigh, calculados en términos de una longitud característica, es del tipo potencial, dado por:

$$\overline{Nu}_H = C_1 Ra_H^{C_2} \quad (5)$$

donde  $C_1$  es un coeficiente del orden 0,1;  $C_2$  igual a  $\frac{1}{3}$  para el caso de Rayleigh-Bernard y

$\frac{1}{4}$  para calentamiento lateral, Bejan (2013).

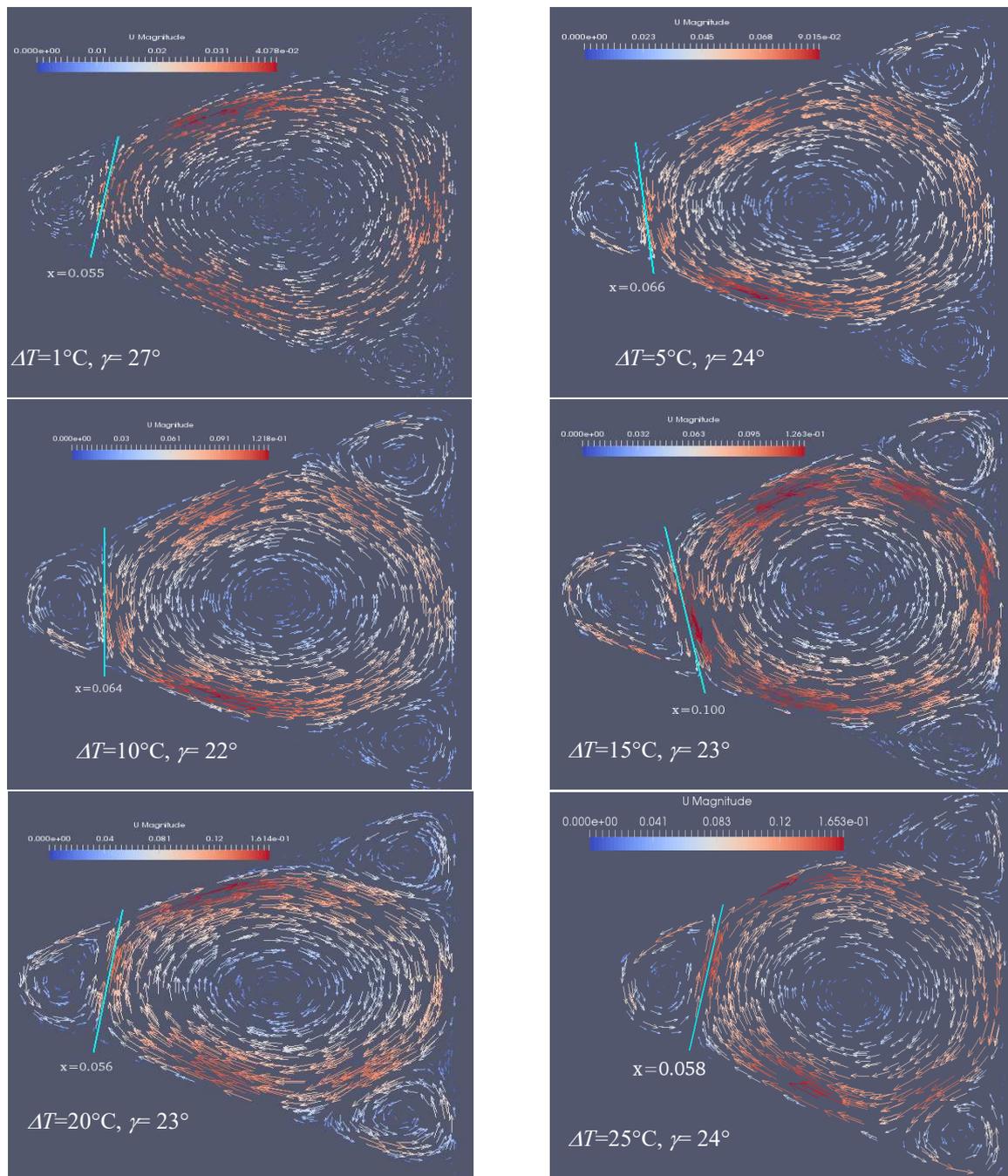


Figura 3: Campos de velocidad, para ángulos críticos.

#### 4.1 Calentamiento lateral

Para el caso de calentamiento lateral se ha utilizado como longitud característica, al igual que en las geometrías tipo ático y ático invertido,  $H_{max}$  dada por:

$$H_{max} = H_{min} + 2 * L * \tan(\gamma)$$

En la figura 5, se presenta en escala doble logarítmica, los valores de  $Nu$  vs.  $Ra$  en términos de  $H_{max}$  y la correlación potencial. Se puede apreciar que el exponente de Rayleigh es cercano

a  $\frac{1}{4}$  y que el ajuste es muy bueno. Por lo tanto, se puede afirmar que esta longitud es apropiada, ya que describe adecuadamente el comportamiento del flujo en el interior de la cavidad.

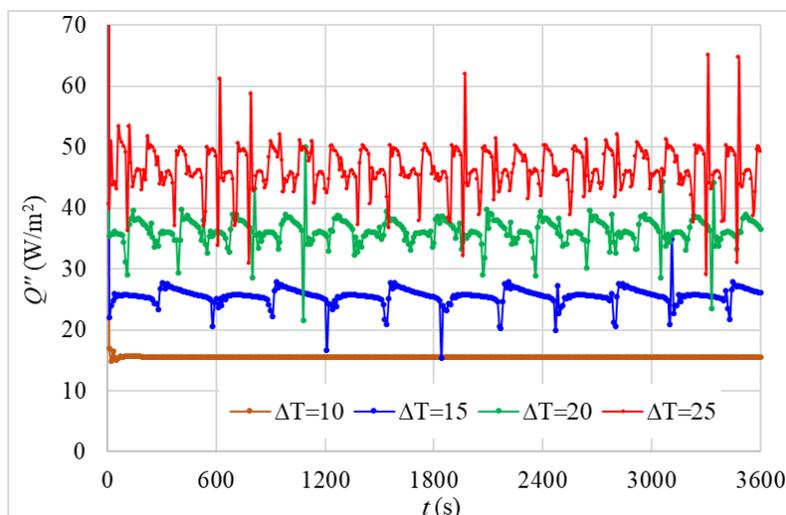


Figura 4: Evolución temporal del flujo de calor, para  $\gamma_{crit}$

## 4.2 Convección de Rayleigh Benard

La longitud característica propuesta en [Esteban et al. \(2023\)](#), para las geometrías de ático y ático invertido (para el caso de calentamiento inferior), viene dada por una variación lineal decreciente con la tangente del ángulo de inclinación, de la forma:

$$H_k = H_{min} - k * L * \tan(\gamma) \quad (6)$$

donde  $0 < k < 1$

En el mencionado trabajo, se obtuvo una buena correlación entre  $Nu$  vs.  $Ra$ , tomando  $k=0,46$  (denominado  $H_3$ ). Por lo que, como primer paso, se usa esta longitud para correlacionar  $Nu$  con  $Ra$ , para el caso del trapecio simétrico. La correlación potencial obtenida es:  $Nu = 0,083Ra^{0,3563}$ , el exponente de  $Ra$  es superior a  $1/3$ , el ajuste es bastante bueno ( $R^2 = 0,9691$ ). Sin embargo, se obtienen valores de  $Ra$  menores al valor crítico (1700) y valores de  $Nu$  menores a 1, que no describen el comportamiento convectivo multicelular, obtenidos en los flujos. Esto indica que no es conveniente utilizar  $H_3$  como longitud característica, para esta geometría.

Si bien para las geometrías ático y ático invertido, las correlaciones entre el número de Nusselt y Rayleigh, obtenidas con las longitudes del tipo (ecuación 6), para los casos multicelulares, concuerdan con lo reportado teóricamente por autores tales como [Bejan](#); estos valores decrecen rápidamente y se hacen negativos para ángulos mayores a  $19^\circ$  (ver [figura 7](#)). Teniendo en cuenta que, para la geometría simétrica, se obtiene flujo multicelular hasta  $\gamma=27^\circ$ , la longitud a estudiar no puede ser del tipo lineal.

Por lo expresado anteriormente, se ha buscado otra función para representar la longitud característica, que sea decreciente con el aumento de la inclinación, pero cuyo decrecimiento no sea tan abrupto. Se ha recurrido a una función racional, teniendo en cuenta que:

$$\frac{a}{1+r} \approx a - a * r + a * \frac{r^2}{2} - a * \frac{r^3}{6}$$

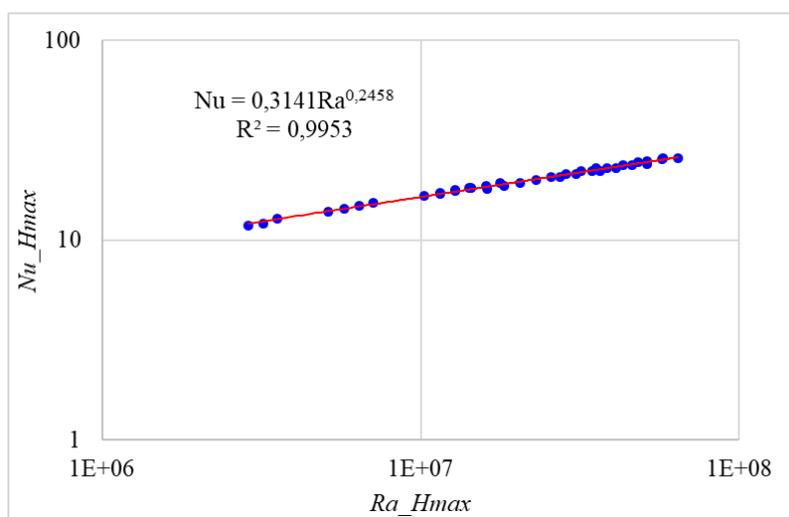


Figura 5: Correlación  $Nu$  vs  $Ra$ , para el calentamiento lateral, tomando como longitud característica  $H_{max}$

Tomando:  $a = H_{min}$  y  $a * r = k * L * \tan(\gamma)$ , se tiene que  $H_k$  es la aproximación lineal de la siguiente función racional:

$$H_k \approx \frac{H_{min}}{1 + \frac{k * L * \tan(\gamma)}{H_{min}}} \quad (7)$$

Realizando los pasos algebraicos apropiados, la longitud racional propuesta queda de la forma:

$$R_k = \frac{H_{min}^2}{H_{min} + k * L * \tan(\gamma)} \quad (8)$$

Es factible utilizar la expresión anterior, ya que dimensionalmente tiene unidades de longitud. En la [figura 6](#) se grafica la longitud característica  $H_3$  ([ecuación 6](#)) y la longitud racional  $R_k$  ([ecuación 8](#)) para  $k=0,46$ . Se puede observar que ambas curvas son decrecientes, sin embargo, la del tipo lineal decrece más rápidamente y se hace negativa para ángulos mayores a  $19^\circ$ , en tanto que la del tipo racional es positiva para todas las inclinaciones consideradas en este trabajo.

Realizando las correlaciones potenciales ([ecuación 5](#)) entre  $Nu$  y  $Ra$ , tomando como longitud característica  $R_k$ , [ecuación 8](#), para distintos valores de  $k$ , se obtiene los coeficientes ( $C_1$ ), exponentes ( $C_2$ ) y  $R^2$ , mostrados en la [tabla 2](#).

Para todos los valores de  $k$  mostrados en la [tabla 2](#), el exponente de  $Ra$  es muy cercano a  $1/3$  y el coeficiente que acompaña al  $Ra$  es cercano a  $0,1$ ; lo que concuerda con la bibliografía de referencia. La correlación que mejor ajusta es la que corresponde a  $k=0,52$ , en la [figura 7](#) se presenta la correlación correspondiente a este valor de  $k$ , el coeficiente de correlación cuadrático ( $R^2$ ) muestra una dispersión razonable. Sin embargo, con esta longitud característica, se continúan obteniendo valores de  $Ra$  menores al valor crítico (1700) y valores de  $Nu$  menores a 1, que no corresponden a la convección multicelular con calentamiento inferior. Esto nos indica que es necesario analizar si patrones como los mostrados en [figura 3](#), para  $\gamma=27^\circ$ ,  $\Delta T=1^\circ\text{C}$ , siguen correspondiendo al calentamiento inferior o deben considerarse como calentamiento lateral; o bien, realizar un cambio de escala en la longitud característica propuesta.

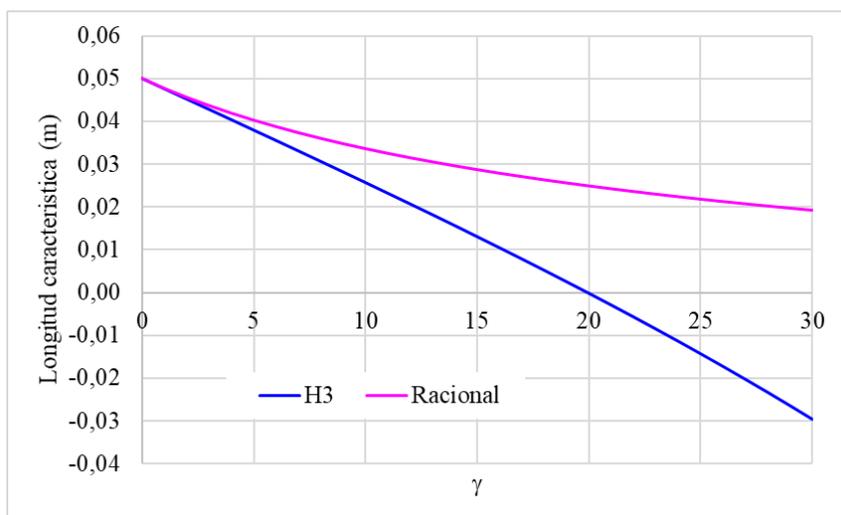


Figura 6: Longitudes características propuestas vs. inclinación.

$k$	$C_1$	$C_2$	$R^2$
0,60	0,0919	0,3379	0,8747
0,56	0,0940	0,3354	0,8695
0,54	0,0952	0,3341	0,8667
0,52	0,0960	0,3331	0,8642
0,50	0,0978	0,3312	0,8609

Tabla 2: Coeficientes de las correlaciones potenciales.

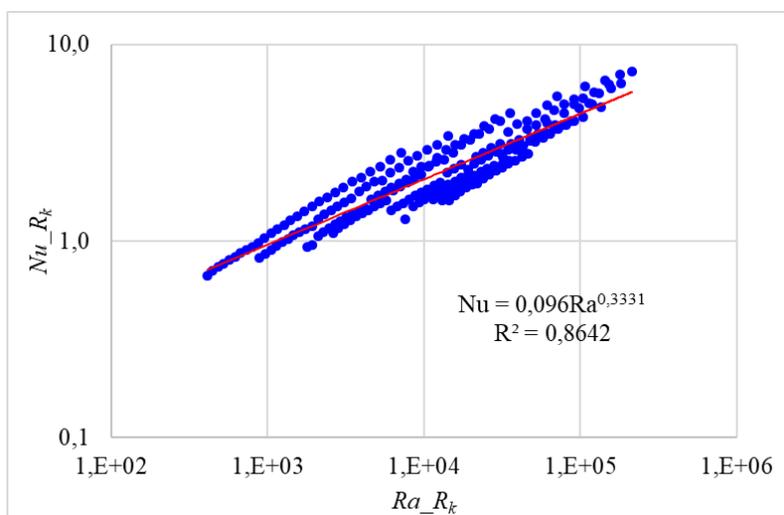


Figura 7: Correlación  $Nu$  vs  $Ra$ , para  $R_k$ , con  $k=0,52$

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado si la longitud característica propuesta para geometrías más sencillas (ático y ático invertido) pueden utilizarse en el trapecio simétrico. Para ello se ha obtenido una correlación  $Nu$  vs.  $Ra$  del tipo potencial, que presenta un  $R^2$  bastante bueno, aunque con un exponente superior que  $\frac{1}{3}$ . Por otro lado, esta longitud tiene el inconveniente que toma valores negativos para ángulos de inclinación mayores a  $19^\circ$ . Dado que los resultados muestran un comportamiento multicelular para ángulos hasta  $\gamma=27^\circ$ , se ha optado por una

expresión del tipo racional (ecuación 8), que disminuye de manera menos abrupta que la relación lineal (ecuación 6), utilizada anteriormente.

Para la longitud  $R_k$ , aunque el exponente de la correlación potencial obtenida es muy bueno, el coeficiente cuadrático de correlación,  $R^2=0,8642$  indica una dispersión considerable. Esto podría estar relacionado con la elección del ángulo crítico, que señala el cambio de flujo de calentamiento inferior a calentamiento lateral, un aspecto que requiere mayor análisis.

Por otro lado, para el cálculo del número de Nusselt se ha utilizado el promedio temporal aritmético de  $Q''$ , para todos los casos simulados. Sabiendo que el promedio aritmético se ve muy influenciado por los valores extremos, las oscilaciones observadas en la evolución temporal de  $Q''$  (figura 4) sugieren la necesidad de elegir algún otro tipo de promedio.

## REFERENCIAS

- Abdulkadhim A., Abed I., Said N. An exhaustive review on natural convection within complex enclosures: Influence of various parameters. *Chinese Journal of Physics* 74 365–388, 2021.
- Bejan A. *Convection Heat Transfer*. 4th Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- Esteban E., Aramayo A., Cardón L. Efecto de la inclinación y de la separación de las paredes activas, en la transferencia de calor en recintos trapezoidales calentados por debajo. *Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 3, 08.173-08.183, 2015.
- Esteban E., Aramayo A., Cardón L. Estudio numérico de la transferencia de calor en recintos trapezoidales de baja razón de aspecto calentados por debajo. *Mecánica Computacional*, Vol XXXIV, 1827-1841, 2016.
- Esteban E., Aramayo A., Cardón L., Chauque F., Aldana Correa D. Estudio de la longitud característica para convección natural en recintos trapezoidales. *Mecánica Computacional*, Vol XXXV, 2415-2429, 2017.
- Esteban E., Aramayo A., Copa B. Convección natural en cavidades con pared superior horizontal e inferior inclinada. *Mecánica Computacional*, vol. XXXIX, págs. 1239-1248, ISSN 2591-3522, 2022.
- Esteban E., Aramayo A., Copa B. Estudio de la longitud característica para convección natural multicelular en geometrías trapezoidales, *AVERMA*, Vol. 25, pp. 145-154, 2021 ISSN 2796-8111 ASADES. Puerto Madryn, 2021.
- Esteban E., Aramayo A., Farfán N. 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, 2023
- Esteban E., Aramayo A., Jaime G. Convección Natural Transitoria en Cavidades Trapezoidales Tipo Ático. *Mecánica Computacional*, vol. XXXVII, págs. 1939-1950. ISSN 2591-3522, 2019.
- Vijaya Kumara V.M., Aswatha, Pavan K.S., Sagar Reddy A.S., Sai charan R.V., Sharath B.S. Effect of aspect ratio on the onset of natural convection in porous trapezoidal enclosures *Materials Today: Proceedings* 92 314–321, 2023.
- OpenFOAM. The OpenFOAM Foundation. Dirección URL: <https://openfoam.org/>. 2015.