

# Capítulo 6

## Chimeneas solares. Flujo laminar

### 6.1 Introducción

En este capítulo nos introduciremos en el estudio de los sistemas solares pasivos que son la razón de ser de este proyecto fin de carrera. Para empezar se tratará el flujo laminar en chimeneas solares variando las condiciones de contorno en sus paredes verticales (flujo de calor constante, isotermas o adiabáticas) y la relaciones de aspecto en su configuración geométrica.

Se representarán los resultados del número de Nusselt y del flujo másico en función del número de Rayleigh, así como en función de la relación de aspecto geométrica de la chimenea. Los resultados obtenidos de forma computacional se compararán con los encontrados en la bibliografía referente al tema en estudio.

Por último, los resultados obtenidos en este capítulo serán una base a tener en cuenta a la hora de estudiar la transición del flujo de laminar a turbulento, estudio que se llevará a cabo en el próximo capítulo.

### 6.2 Chimenea solar con condiciones isoterma – adiabática en sus paredes verticales

En esta sección se hará el estudio de una chimenea solar en la que se imponen las siguientes condiciones de contorno en sus paredes verticales; muro isoterma y pared acristalada adiabática. Las demás paredes de la chimenea serán adiabáticas.

Estudios similares para chimeneas solares, con estas condiciones de contorno predeterminadas, fueron desarrollados por A. K. da Silva & L. Gosselin (2005). En esta sección se compararán los resultados obtenidos por los publicados por dichos autores.

El estudio desarrollado se llevó a cabo para números de Rayleigh comprendidos entre  $10^5$  y  $10^8$ . Para cada uno de los valores de este número adimensional se fue variando la relación de aspecto de la chimenea que es la razón entre la distancia entre el muro vertical y la pared acristalada con respecto a la longitud del canal vertical.

Al representar los resultados de forma gráfica se comprueba que para esta configuración de chimenea solar existen máximos en dichas representaciones. Por tanto existe un valor de esa relación de aspecto para el cual se maximiza el rendimiento térmico, donde el número de Nusselt alcanza su máximo valor, así como otro valor de dicho parámetro para el que obtenemos un

máximo en el flujo másico. Este flujo másico ha sido representado en forma adimensional, definido como se muestra a continuación:

$$M = \frac{m}{\rho v} = \phi \cdot (Gr_L), \quad (6.1)$$

siendo  $m$  el gasto másico dimensional,  $Gr_L$  el número de Grashof y  $\phi$  la siguiente relación adimensional,

$$\phi = \frac{m}{\rho v (Gr_L)}. \quad (6.2)$$

Seguidamente se exponen las gráficas obtenidas tanto para el número de Nusselt en el muro, como para el flujo másico que atraviesa la chimenea. No se ha representado el número de Nusselt en la pared de cristal, pues al ser esta pared adiabática el número adimensional será idénticamente nulo en toda su longitud. Las gráficas para los valores de  $10^5$ ,  $10^6$ ,  $10^7$  y  $10^8$  del número de Rayleigh son las que siguen.

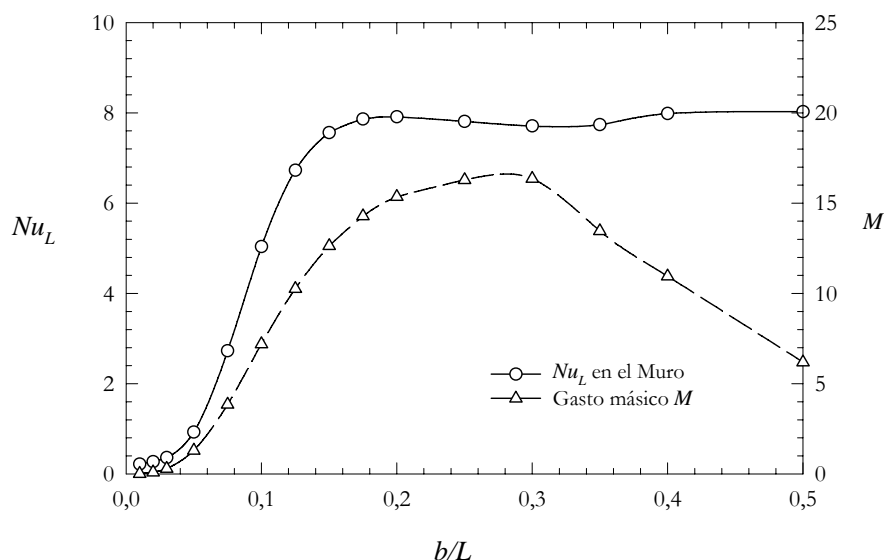


Figura 6.1. Representación del número de Nusselt en el muro y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto  $b/L$  para  $Ra_L = 10^5$ .

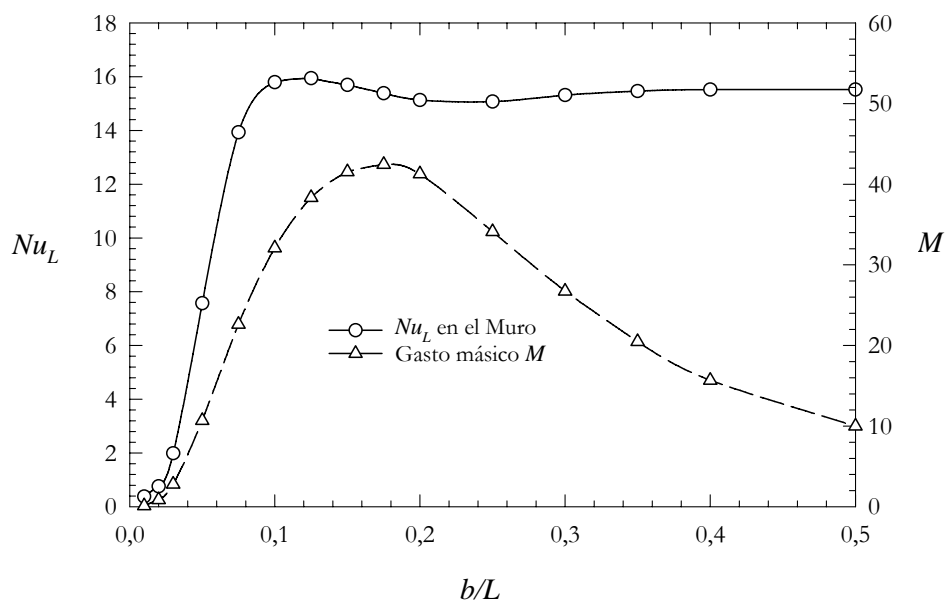


Figura 6.2. Representación del número de Nusselt en el muro y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto  $b/L$  para  $Ra_L = 10^6$ .

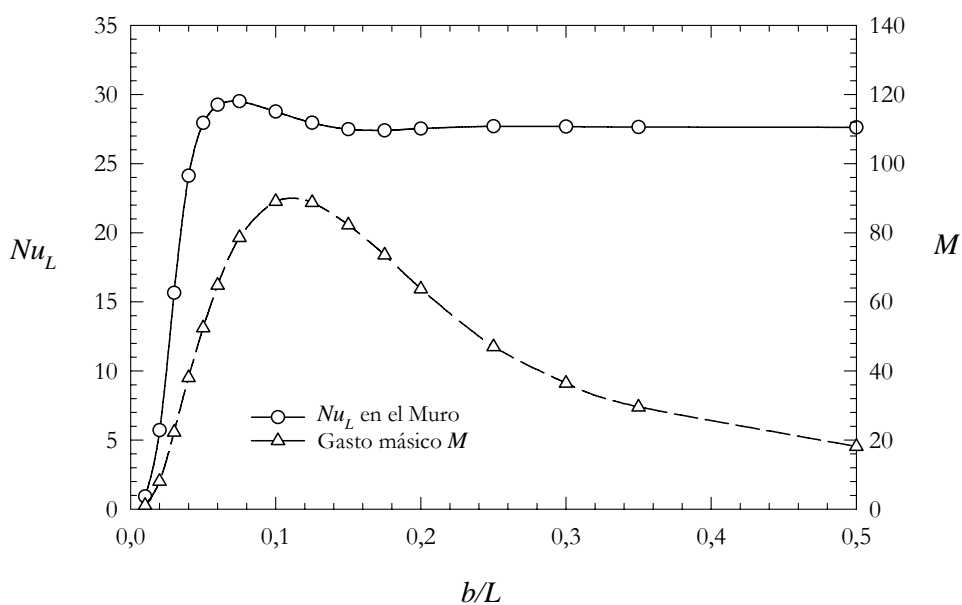


Figura 6.3. Representación del número de Nusselt en el muro y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto  $b/L$  para  $Ra_L = 10^7$ .

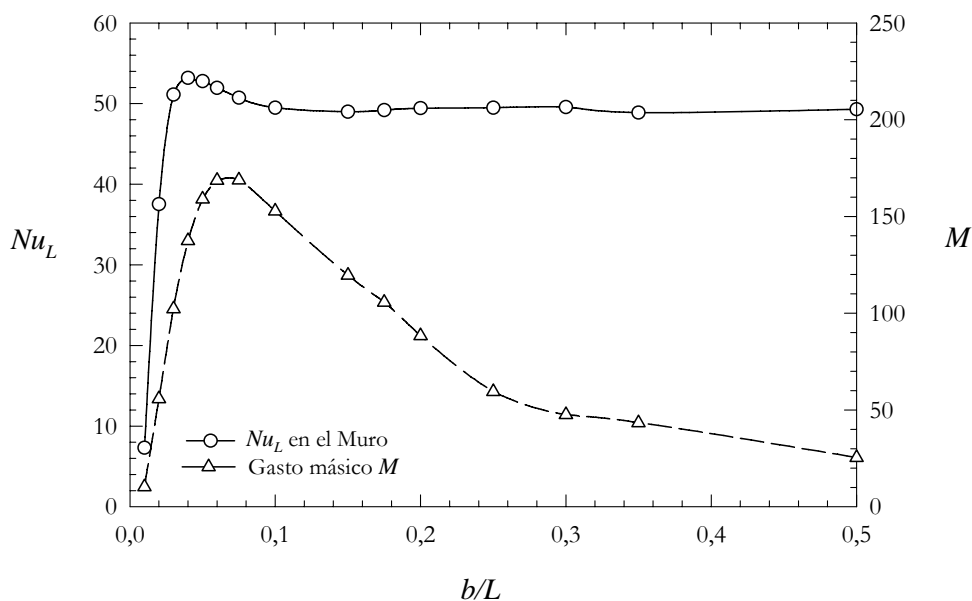


Figura 6.4. Representación del número de Nusselt en el muro y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto  $b/L$  para  $Ra_L = 10^8$ .

En primer lugar podemos observar en las anteriores representaciones que a medida que aumenta el número de Rayleigh, y con este la velocidad del flujo debido a los términos de flotación y la longitud del canal, mejora el proceso de transmisión de calor con una subida significativa del número de Nusselt. Ante la subida del número de Rayleigh y el consiguiente aumento de la velocidad debido a los términos de flotación, como ya hemos comentado, también obtenemos un aumento en la magnitud de los flujos másicos como era de esperar.

Si nos centramos en cada número de Rayleigh por separado, podemos apreciar en las figuras que en relaciones de aspecto pequeñas el Nusselt va decreciendo. Esto es debido a que el fluido en estas relaciones de aspecto, homogeniza y eleva su temperatura más que en anchuras mayores de la chimenea, sobre todo en la zona adyacente a la pared caliente. Por tanto, en estos casos, la transferencia de calor es menor ya que se reduce la diferencia de temperatura entre fluido y pared, descendiendo así el flujo de calor hacia el fluido y con este el número de Nusselt.

Al aumentar la relación de aspecto, la temperatura del fluido es más baja haciendo que el valor del número de Nusselt suba. Al llegar a un cierto valor del parámetro geométrico adimensional, el efecto chimenea, que acelera el fluido hacia la sección de salida mediante los fenómenos de convección natural, va perdiendo fuerza como consecuencia de tener que calentar una masa fluida cada vez mayor debido al aumento de la anchura del canal. Al perderse este efecto disminuye la transferencia de calor al fluido, así como el valor del flujo másico a través de la chimenea solar. Estas son las razones físicas que explican la existencia de los óptimos que se presentan en las anteriores gráficas.

En el trabajo publicado por A. K. da Silva & L. Gosselin (2005) se correlacionaron las relaciones de aspecto para las que se obtenía mayor eficiencia térmica. En este trabajo se fue variando la longitud del canal vertical, la altura de la entrada y la relación de aspecto comentada anteriormente, hasta llegar a optimizar la geometría de la chimenea en su totalidad. La correlación encontrada en esta publicación para la relación de aspecto adimensionalizada ( $D$  en este artículo) en función del número de Rayleigh fue:

$$D_{\text{opt}} \cong 2.8(Ra_L)^{-0.23}. \quad (6.3)$$

Con los máximos encontrados en las figuras anteriores se desarrolló una correlación similar a la presentada por los anteriores autores a partir del método de los mínimos cuadrados. La correlación de los resultados encontrados para las representaciones del número de Nusselt en función de la relación de aspecto fue:

$$(b/L)_{\text{opt}} \cong 2.3972(Ra_L)^{-0.2218} . \quad (6.4)$$

Esta correlación tiene un error menor del 5.47% en el peor de los casos, error aproximadamente igual al obtenido por A. K. da Silva & L. Gosselin (2005) en su aproximación que era del 5.6%.

La diferencia entre ambas expresiones, que radica en el orden de magnitud de su primer término, tal vez se deba a que la correlación obtenida en la bibliografía se basaba en resultados para números de Rayleigh comprendidos entre  $10^5$  y  $10^7$ , mientras que en nuestro caso se añadió un valor de Rayleigh de  $10^8$ . En la Figura 6.5 podemos ver la correlación de los datos obtenidos de forma computacional con la curva descrita en la expresión (6.4) sobre ejes logarítmicos.

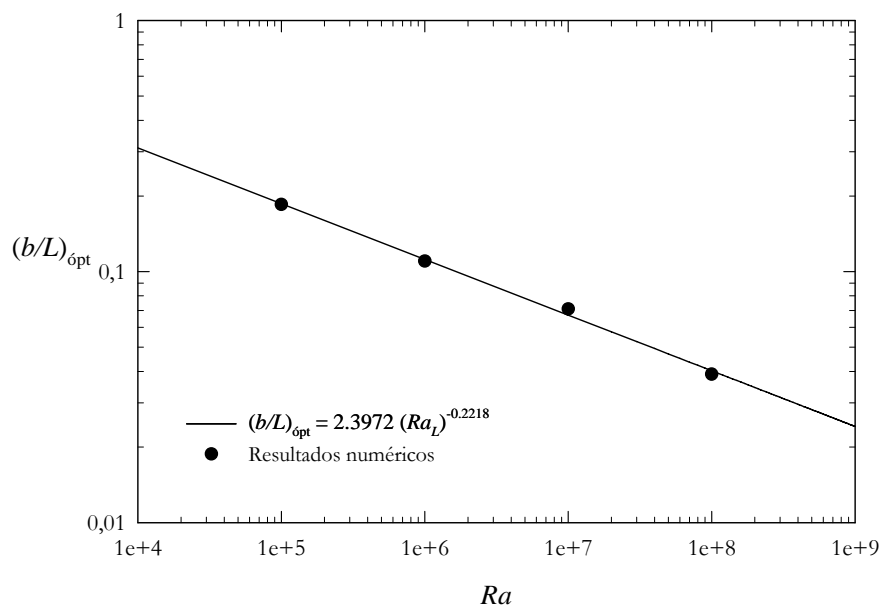


Figura 6.5. Representación de la relación de aspecto óptima que maximiza el número de Nusselt junto con la correlación obtenida para estos datos.

Para los máximos encontrados en relación al flujo másico se actuó de forma similar y la correlación encontrada para estos datos se muestra a continuación:

$$(b/L)_{\text{opt}} \cong 3.1089(Ra_L)^{-0.2077} . \quad (6.5)$$

Esta correlación presenta una fidelidad máxima con los datos obtenidos, ya que dichos datos se obtienen con un error máximo menor del 2%. La representación sobre ejes logarítmicos de esta correlación junto con los resultados arrojados por las simulaciones numéricas se muestra en la Figura 6.6.

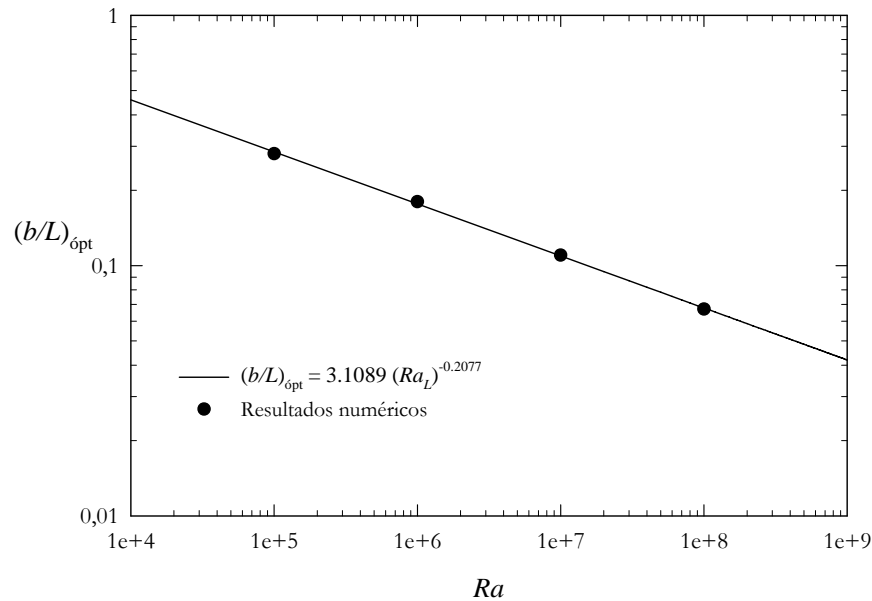


Figura 6.6. Representación de la relación de aspecto óptima que maximiza el flujo másico junto con la correlación obtenida para estos datos.

### 6.3 Chimenea solar con condiciones isoterma – isoterma en sus paredes verticales

El objeto de estudio en esta ocasión es una chimenea solar con condiciones de contorno isoterma en sus paredes verticales, tanto en el muro como en la pared de cristal. Las demás paredes, al igual que en la anterior configuración, son adiabáticas.

#### 6.3.1 Optimización geométrica

Se actuó en esta configuración de forma similar a como se hizo en la sección anterior con las condiciones isoterma – adiabática. Se desarrollaron simulaciones numéricas para números de Rayleigh comprendidos entre  $10^5$  y  $10^8$ , en las que se varió la relación de aspecto antes definida. En esta ocasión al ser las dos paredes verticales isoterma se representó el número de Nusselt tanto para el muro como para la pared de cristal. Las gráficas obtenidas para  $10^5$ ,  $10^6$ ,  $10^7$  y  $10^8$ , respectivamente, se muestran en las siguientes figuras.

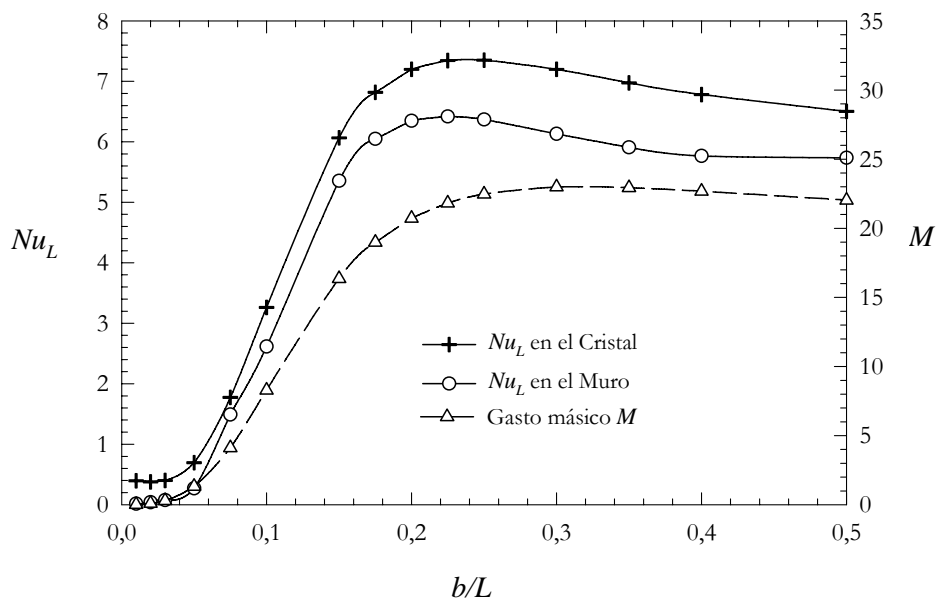


Figura 6.7. Representación del número de Nusselt tanto en el muro como en el cristal y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto  $b/L$  para  $Ra_L = 10^5$ .

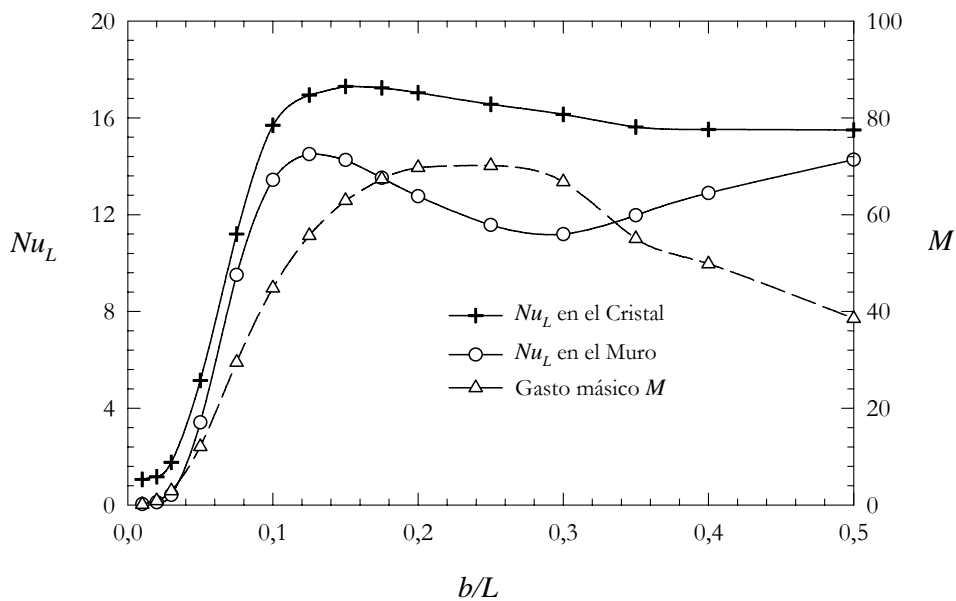


Figura 6.8. Representación del número de Nusselt tanto en el muro como en el cristal y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto  $b/L$  para  $Ra_L = 10^6$ .

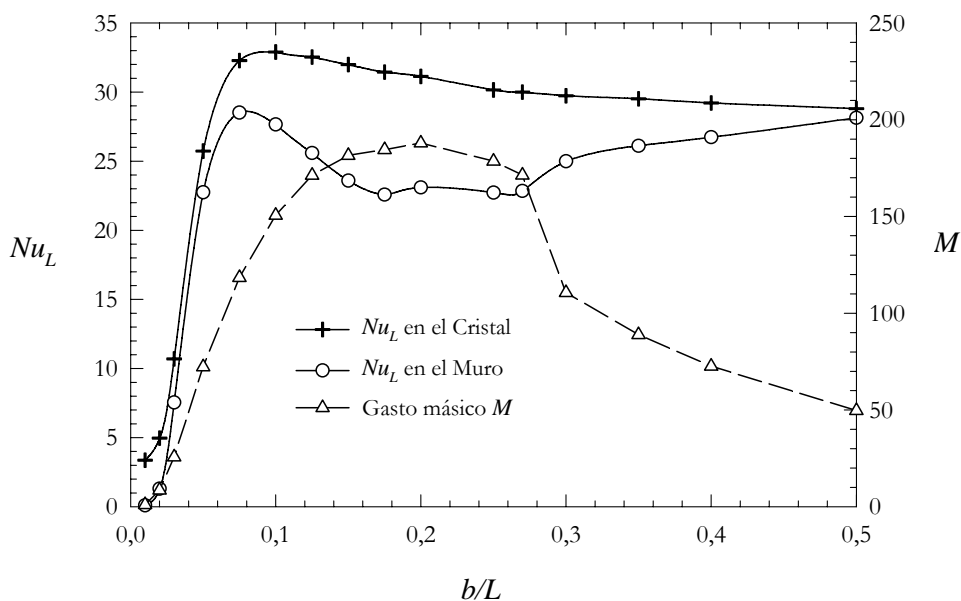


Figura 6.9. Representación del número de Nusselt tanto en el muro como en el cristal y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto  $b/L$  para  $Ra_L = 10^7$ .

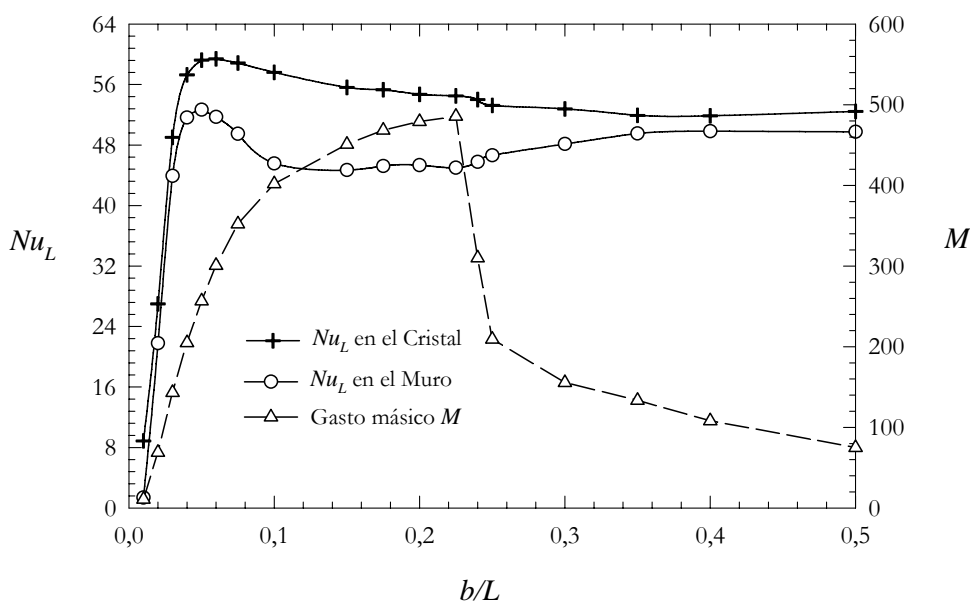


Figura 6.10. Representación del número de Nusselt tanto en el muro como en el cristal y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto  $b/L$  para  $Ra_L = 10^8$ .

Como podemos observar en las anteriores gráficas para esta configuración también se obtienen máximos en las representaciones del número de Nusselt tanto en el muro como en la pared de cristal. Al correlacionar estas relaciones de aspecto para las que se maximiza la transmisión de calor, en el caso de la pared de cristal, se obtiene la siguiente expresión:

$$(b/L)_{\text{opt}} \cong 2.8659(Ra_1)^{-0.2153} \quad (6.6)$$



Esta correlación fue obtenida por el método de los mínimos cuadrados y presentó un error máximo del 5.5%. En la Figura 6.11 podemos apreciar la aproximación de los resultados numéricos con esta expresión representada en ejes logarítmicos.

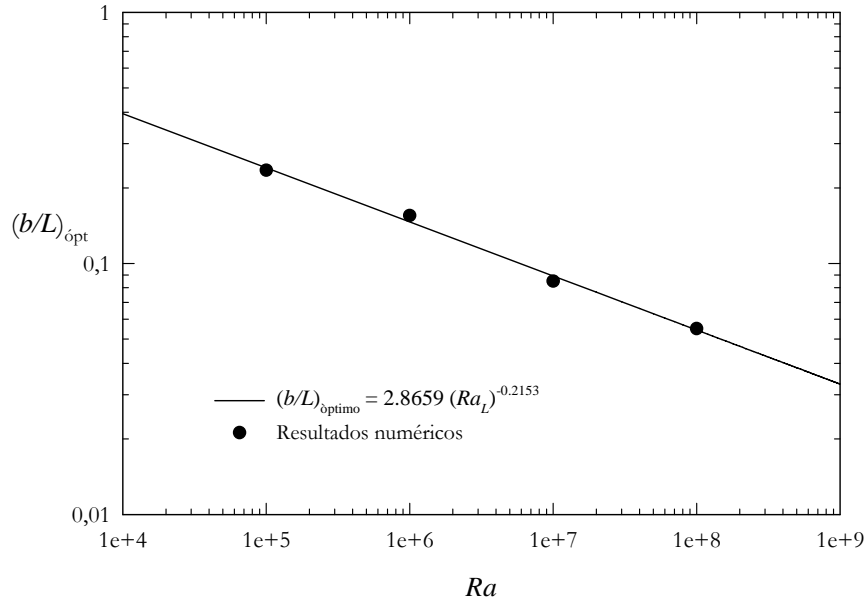


Figura 6.11. Representación de la relación de aspecto óptima que maximiza el número de Nusselt en el cristal junto con la correlación obtenida para estos datos.

En el caso del número de Nusselt en el muro también se llegó a correlacionar los resultados de la relación de aspecto óptima en función del número de Rayleigh, llegando a la expresión:

$$(b/L)_{\text{opt}} \cong 2.9434(Ra_L)^{-0.2261}. \quad (6.7)$$

Esta aproximación, obtenida como las anteriores por el método de los mínimos cuadrados, presenta un error máximo del 3.9%. En la Figura 6.12 se presenta en ejes logarítmicos junto con los resultados numéricos obtenidos, pudiendo apreciar la gran aproximación entre estos.

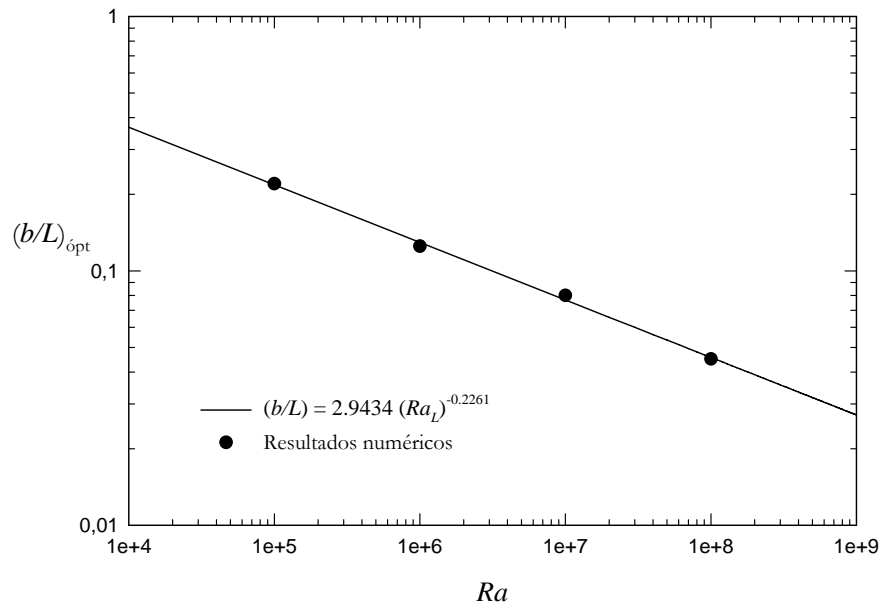


Figura 6.12. Representación de la relación de aspecto óptima que maximiza el número de Nusselt en el muro junto con la correlación obtenida para estos datos.

Para la relación de aspecto que presenta un máximo en el flujo másico no se ha podido presentar una correlación en función del número de Rayleigh. La razón puede residir en el hecho de que a medida que el número de Rayleigh aumenta, la caída del valor del flujo másico, una vez alcanzado el valor máximo, es mucho más acusada. Este comportamiento se puede deber a que al aumentar el número de Rayleigh, el aumento del flujo reverso o hacia abajo a partir de una cierta relación de aspecto que en nuestro caso puede coincidir con la relación que maximiza el flujo másico, no es proporcional al mostrado por el flujo en relaciones de aspecto inferiores. A continuación podemos ver una representación de estos valores óptimos que maximizan el flujo másico.

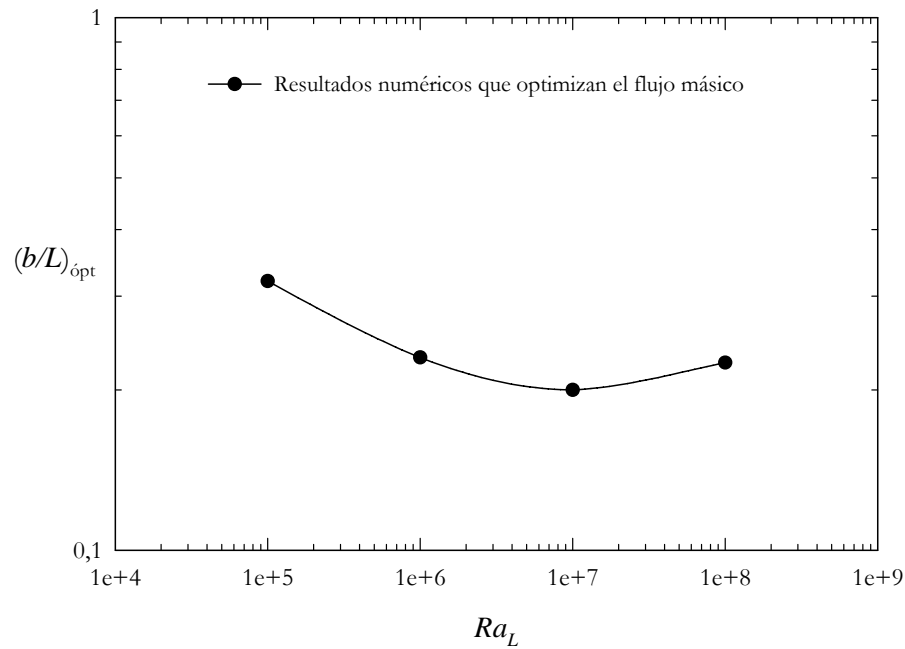


Figura 6.13. Representación de la relación de aspecto óptima que maximiza el flujo másico.

Sólo añadir, con respecto a estos máximos de flujo másico y transmisión de calor, que las razones físicas de la existencia de estos son las mismas que se describían en la anterior sección pero al variar las condiciones de contorno el flujo se comporta de forma distinta, hecho que puede impedir, como acabamos de ver, que estos máximos se puedan correlacionar e incluso, como veremos en la siguiente sección, existir.

### 6.3.2 Distribuciones de propiedades y zonas de recirculación

Las distribuciones de presión para relaciones de aspecto de 0.1 y 0.25 se muestran en las figuras siguientes, y un número de Rayleigh de  $10^7$ .

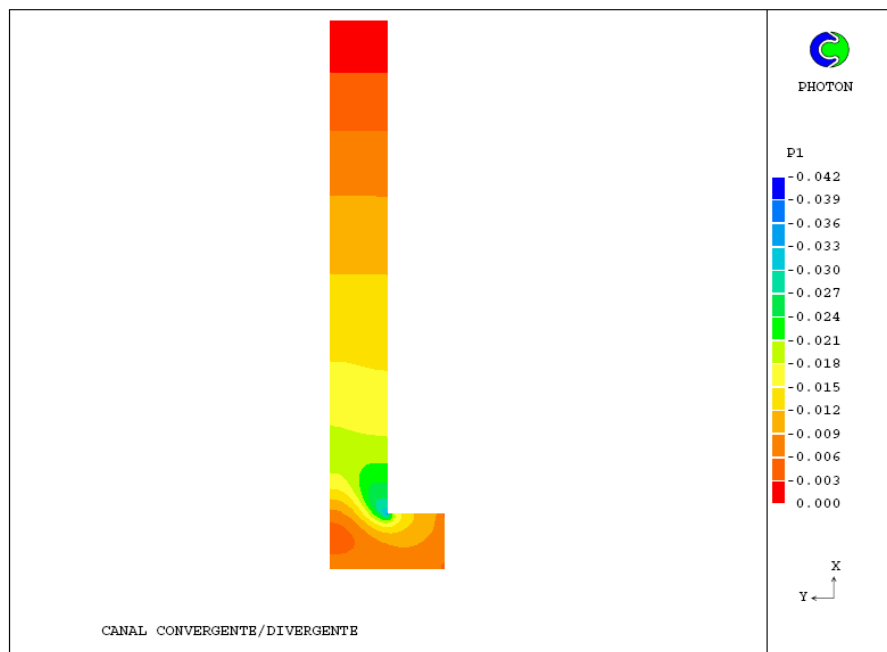


Figura 6.14. Distribución de presiones en una chimenea solar con condición isoterma en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de  $10^7$  y relación de aspecto  $b/L$  igual a 0.1.

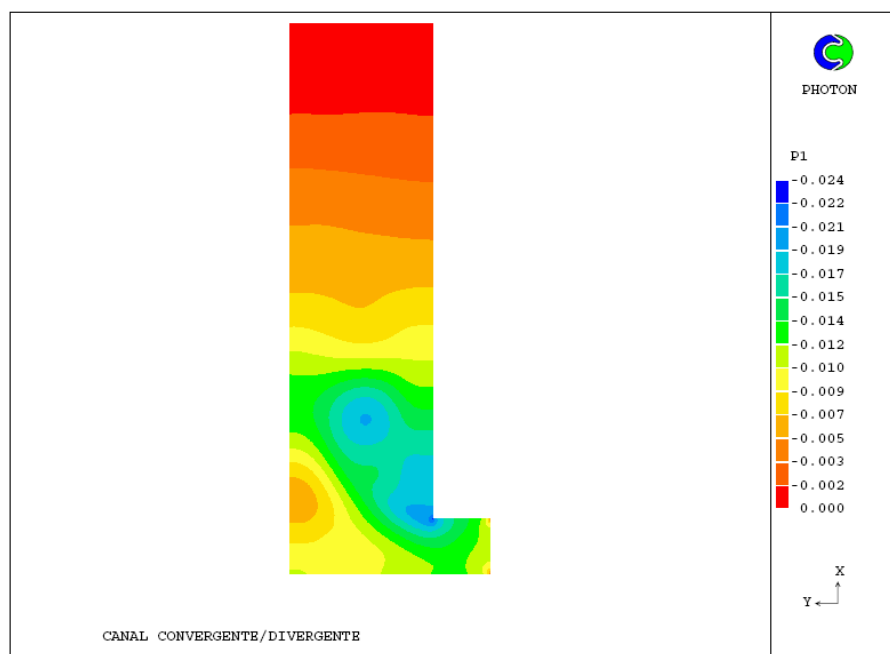
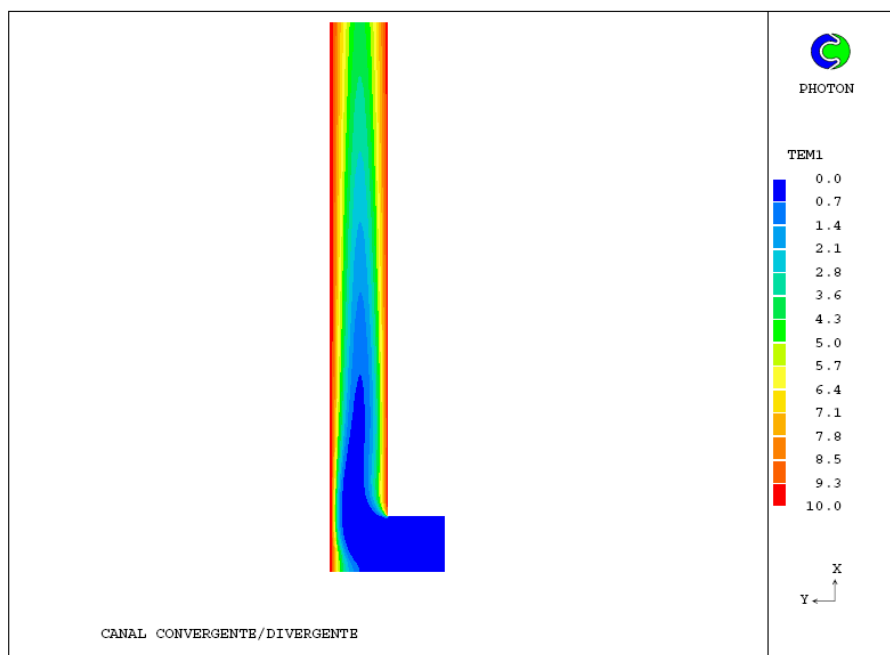


Figura 6.15. Distribución de presiones en una chimenea solar con condición isoterma en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de  $10^7$  y relación de aspecto  $b/L$  igual a 0.25.

Como era de esperar se produce una bajada de presión en el cambio de dirección de la chimenea con una posterior subida gradual para cumplir con la condición de contorno en la salida. En la Figura 6.14 al tener una relación de aspecto relativamente baja aún, no hay cambios significativos en la presión. Estos cambios se desarrollarán a medida que el parámetro geométrico adimensional aumente. Un ejemplo lo podemos apreciar en la Figura 6.15 con la distribución de presiones para una relación de aspecto  $b/L$  de 0.25, donde podemos ver como se crea una

depresión en la entrada de la chimenea que invade la mayor parte de esta. Este hecho es aún más acusado con valores de  $b/L$  mayores.

En lo referente a la distribución de temperaturas, aún para un  $b/L$  de 0.1 como podemos ver en la Figura 6.16, no existen zonas de flujo frío en el centro de la chimenea. Sólo destacar que en este caso ya se puede apreciar una especie de apéndice de fluido caliente en la esquina interior de la chimenea. Al ser el muro isoterma y llegar a este fluido frío, este apéndice en la distribución muestra en cierta medida la influencia de la temperatura de la pared junto con la fuerza del movimiento fluido por la recirculación que se va formando en esta región. Podemos observar como va creciendo esta zona de flujo caliente en las figuras 6.17 y 6.18, este crecimiento tiene mucho que ver con la recirculación del fluido presente en esta zona por la bajada de presión.



6.16. Distribución de temperaturas en una chimenea solar con condición isoterma en sus paredes verticales y un número de Rayleigh de  $10^7$  y relación de aspecto  $b/L$  igual a 0.1.

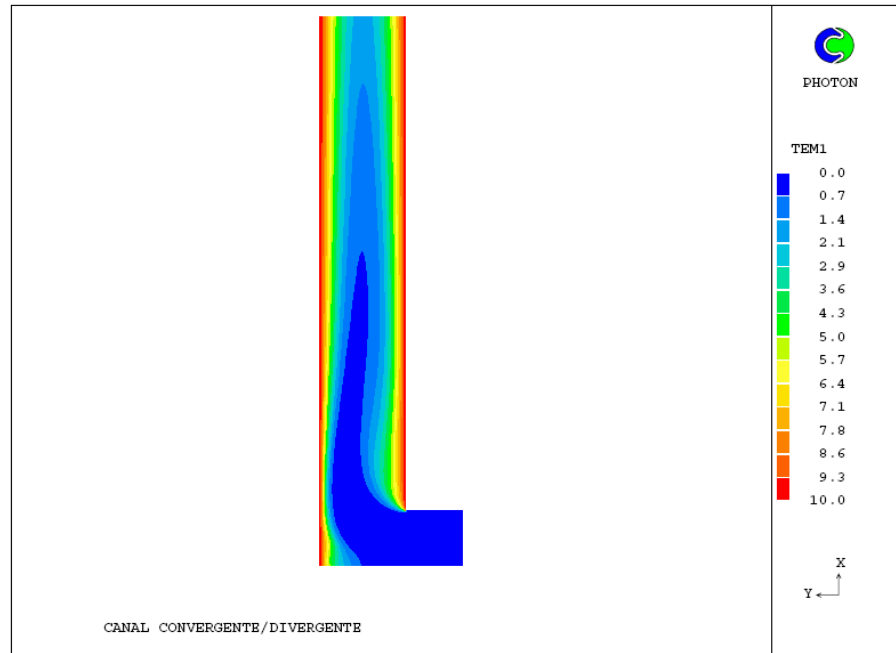


Figura 6.17. Distribución de temperaturas en una chimenea solar con condición isoterma en sus paredes verticales y un número de Rayleigh de  $10^7$  y relación de aspecto  $b/L$  igual a 0.15.

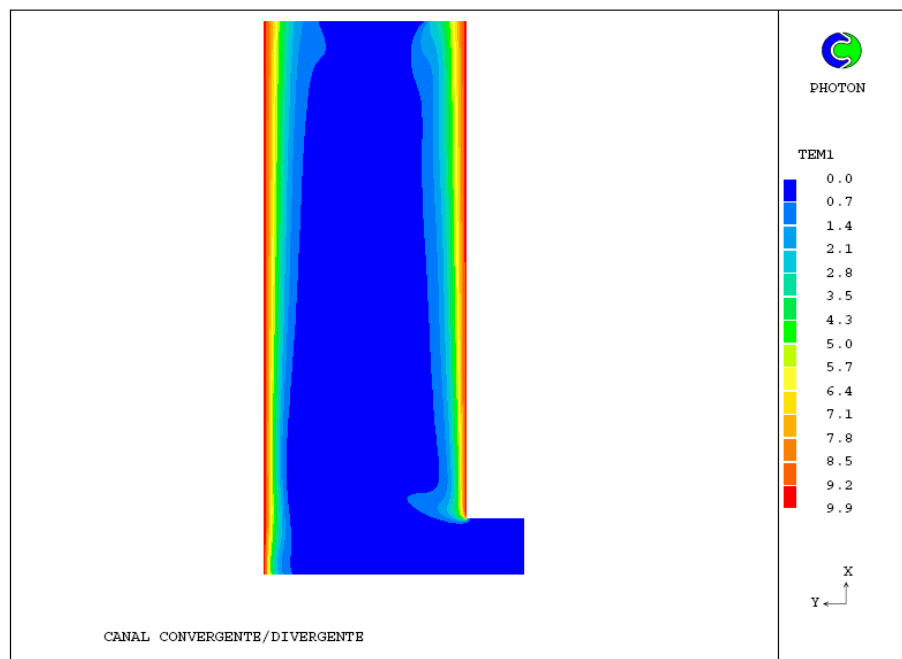


Figura 6.18. Distribución de temperaturas en una chimenea solar con condición isoterma en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de  $10^7$  y relación de aspecto  $b/L$  igual a 0.35.

En estas figuras también podemos ver como para relaciones de aspecto superiores a la óptima para la transmisión de calor tanto en el muro como en la pared de cristal, el fluido frío que circula por el interior de la chimenea aumenta considerablemente y se extiende por todo el canal vertical (Figura 6.18), ya que para estos valores de la anchura del canal el efecto chimenea va desapareciendo.

A continuación se muestra un detalle de la recirculación presente en el cambio de dirección y que es en parte responsable del comportamiento térmico del flujo.

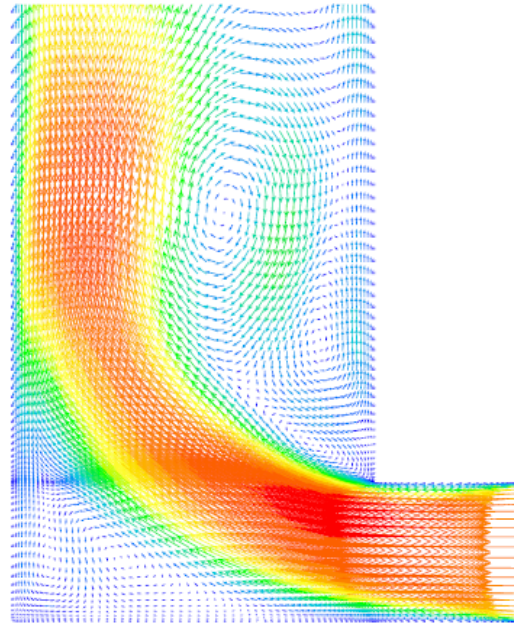


Figura 6.19. Detalle de la recirculación presente en el campo de velocidades para una relación de aspecto  $b/L$  igual a 0.25 y un número de Rayleigh de  $10^7$ .

A partir de las distribuciones de velocidades para esta configuración de chimenea solar se puede dar una explicación a la incapacidad para dar una correlación válida de la relación de aspecto óptima que maximiza el flujo másico en función del número de Rayleigh. Se pudo ver en la Figura 6.9, por ejemplo, que una vez alcanzado el máximo para el flujo másico llegaba un valor para la relación de aspecto donde este flujo caía de forma violenta, esto es debido a que el flujo reverso no crece de forma proporcional con el aumento de esta relación geométrica adimensional llegando incluso a unirse la zona de recirculación que existe en la entrada, pegada al muro, y la zona de flujo reverso procedente de la sección de salida. Esta peculiaridad se acentúa con el aumento del número de Rayleigh, llegando a localizarse esta caída del flujo másico justo tras alcanzar el máximo. A continuación se muestra este fenómeno para un Rayleigh de  $10^7$ , por ser probablemente el caso más representativo.

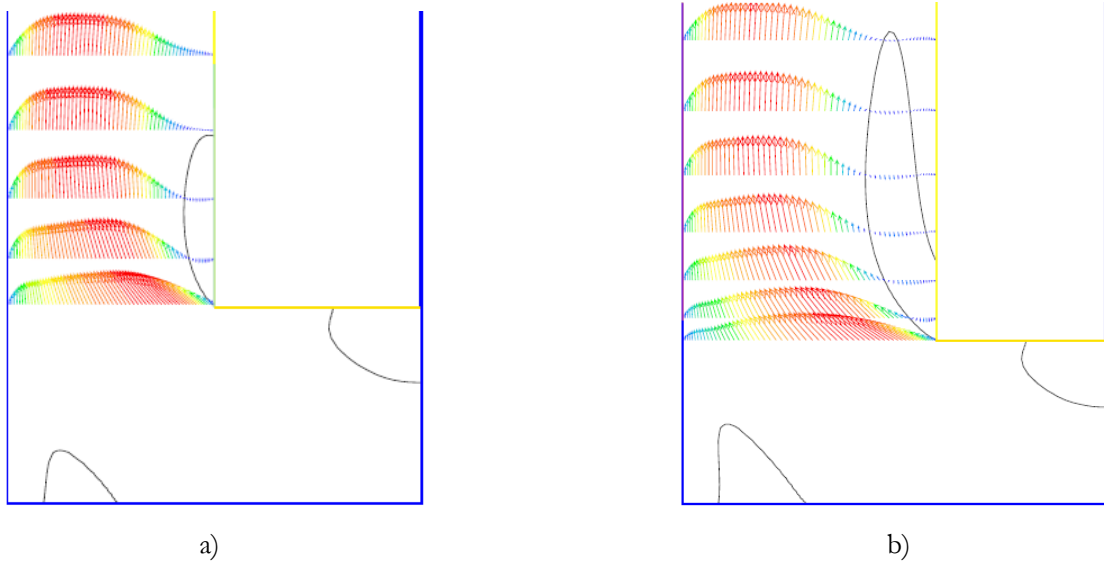


Figura 6.20. Zona de recirculación en la entrada del canal vertical en condiciones de calentamiento simétrico isoterma. a)  $b/L = 0.1$ ,  $Ra_L = 10^7$ . b)  $b/L = 0.15$ ,  $Ra_L = 10^7$ .

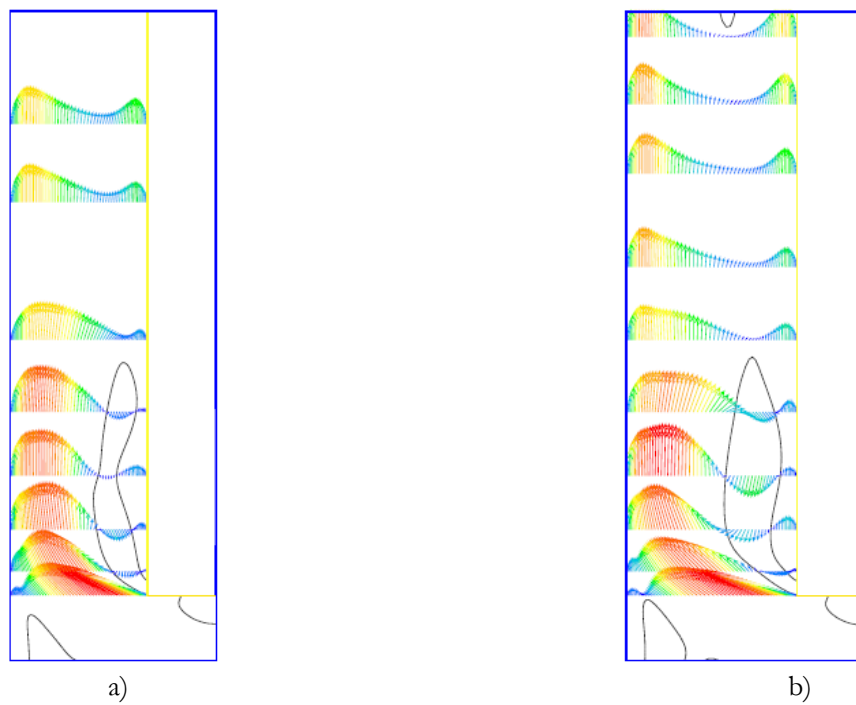


Figura 6.21. Zona de recirculación del canal vertical en condiciones de calentamiento simétrico isoterma. a)  $b/L = 0.2$ ,  $Ra_L = 10^7$ . b)  $b/L = 0.25$ ,  $Ra_L = 10^7$ .



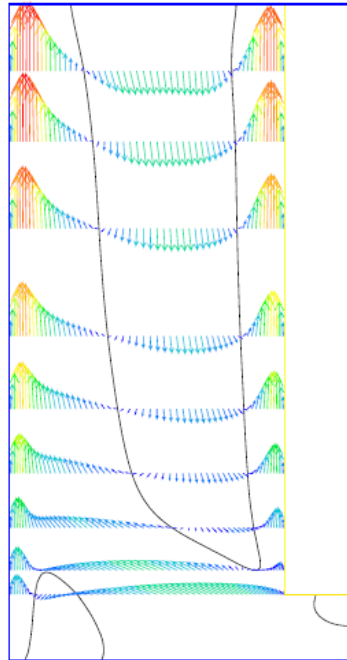


Figura 6.22. Zona de recirculación del canal vertical en condiciones de calentamiento simétrico isoterma,  $b/L = 0.4$  y  $Ra_L = 10^7$ .

En la Figura 6.20a se muestran las inversiones (contornos de color negro que representan las zonas de velocidad nula) y los perfiles de velocidad característicos de estas en el caso de una relación de aspecto  $b/L$  de 0.1. Como se puede ver, este flujo reverso se localiza en la entrada y en la parte interior del cambio de dirección de la chimenea y a medida que esta relación de aspecto crece, estas regiones aumentan su tamaño. Hasta alcanzar el parámetro adimensional un valor de 0.2 (Figura 6.21a), donde encontrábamos el máximo flujo másico, estas regiones han ido creciendo de forma progresiva. Superado este valor de  $b/L$ , estas regiones de inversión siguen creciendo hasta que este parámetro geométrico supera el valor de 0.3, valor para el que observábamos un acentuado descenso del flujo másico en la Figura 6.9. En esta zona el crecimiento de estas regiones abandona la progresión anterior y se desarrolla de forma mucho más acusada como podemos ver en la Figura 6.22 en la que  $b/L$  tiene un valor de 0.4, donde podemos apreciar que estas regiones de flujo reverso se han llegado a unir

En las figuras 6.21a y 6.21b se muestran perfiles de velocidad representativos para toda la extensión de la chimenea; con esto se quiere mostrar como al aumentar la anchura del canal y al llegar al final de este donde el flujo tiende a estabilizarse de las perturbaciones producidas por los cambios de dirección, el perfil de velocidades forma una especie de U que es característico de este tipo de flujos. Esta forma del perfil de velocidades tiene su explicación por la pérdida de la influencia del calentamiento de las paredes verticales en el flujo que pasa por el centro del canal vertical, el flujo en esta zona pierde la velocidad inducida por los fenómenos de convección natural y tiende a un estado de reposo puesto que la ecuación de continuidad debe cumplirse siempre, el flujo en esta zona central puede llegar a ser hacia abajo como se ve en las figuras.

Otra explicación complementaria sería que la depresión producida en el interior de la chimenea aumenta con la anchura de esta y al estar en contacto con el exterior a una presión constante, las velocidades cercanas a un valor nulo acaban por invertirse, esta razón sería consecuencia del cumplimiento de la ecuación de continuidad.

## 6.4 Chimenea solar con condiciones de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales

En este apartado vamos a tratar una configuración de chimenea solar en la que se impondrá un flujo de calor constante en cada una de sus paredes verticales. Las demás paredes de la chimenea, al igual que en las configuraciones tratadas anteriormente, serán adiabáticas.

### 6.4.1 Optimización geométrica

En esta ocasión se procedió de forma idéntica a como se ha ido haciendo a lo largo de este capítulo, se desarrollaron simulaciones para números de Rayleigh, que en este caso estaban comprendidos en el intervalo  $10^9$  -  $10^{11}$ , variando la relación de aspecto adimensional  $b/L$  y representando tanto los números de Nusselt en la pared de cristal y el muro como el flujo másico. Las representaciones para los números de Rayleigh  $10^9$ ,  $10^{10}$  y  $10^{11}$  se muestran a continuación.

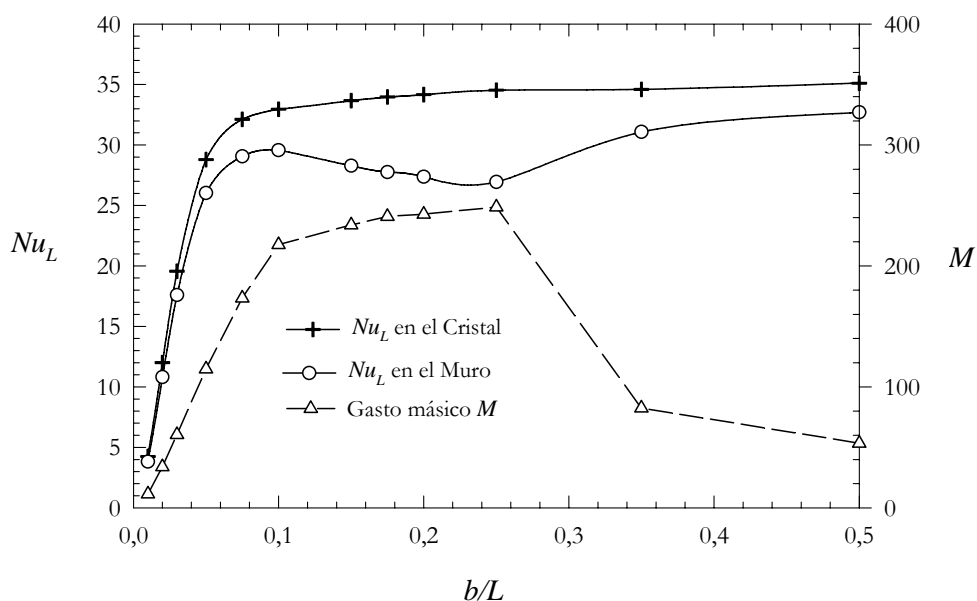


Figura 6.23. Representación del número de Nusselt tanto en el muro como en el cristal y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto  $b/L$  para  $Ra_L = 10^9$ .

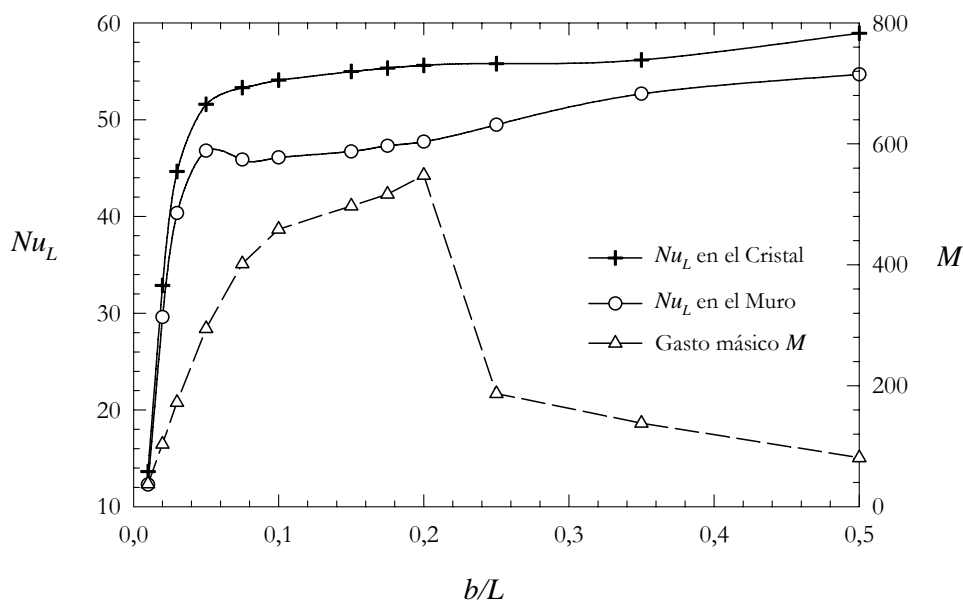


Figura 6.24. Representación del número de Nusselt tanto en el muro como en el cristal y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto  $b/L$  para  $Ra_L = 10^{10}$ .

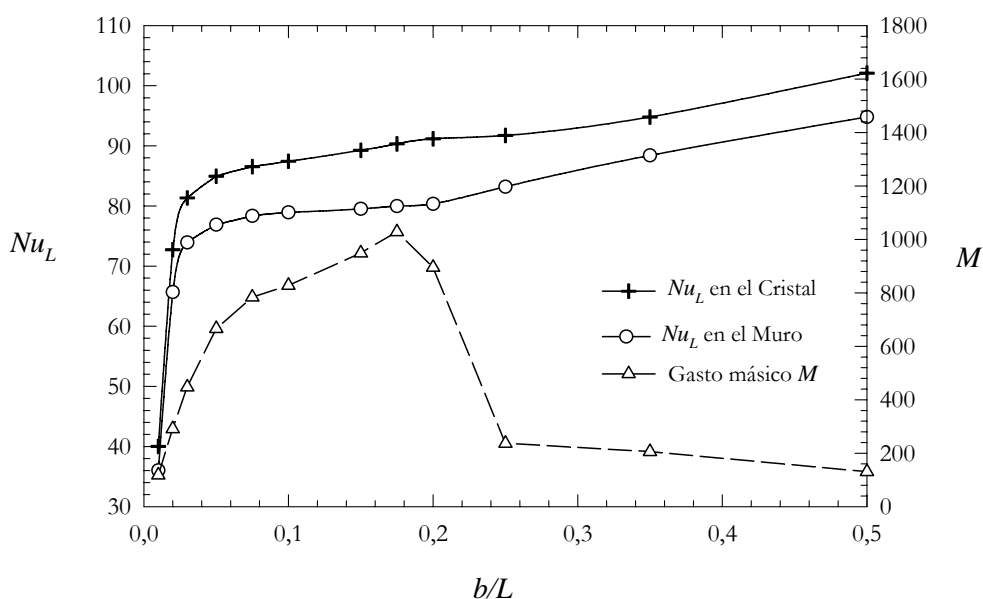


Figura 6.25. Representación del número de Nusselt tanto en el muro como en el cristal y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto  $b/L$  para  $Ra_L = 10^{11}$ .

Como podemos ver, en esta configuración no encontramos un óptimo para el número de Nusselt, ya esté evaluado en la pared de cristal o en el muro. La razón sólo podría ser explicada por un comportamiento del flujo distinto a las configuraciones anteriores con una variación en la distribución de propiedades que no favorece la existencia de este máximo en la transmisión de calor. Como ya hemos dicho en otras secciones de este mismo capítulo, la variación de las condiciones de contorno puede variar significativamente el flujo resultante a pesar de que el

comportamiento del flujo este basado en los mismos principios físicos, independientemente de las condiciones de contorno impuestas.

En cambio sí podemos observar un máximo en el flujo másico a través de la chimenea que responde a los principios físicos que se introdujeron en los anteriores apartados. No ha sido posible correlacionar estas relaciones de aspecto adimensionales en función del número de Rayleigh por tener un bajo coeficiente de correlación y un error con los resultados numéricos excesivamente grande. Al observar las gráficas anteriores vemos una caída muy acusada del flujo másico a partir del máximo en cada una de ellas. Este comportamiento es similar al presentado en la configuración isoterma – isoterma en la cual, como ya comentamos, ésta era probablemente la razón por la que no conseguimos una correlación satisfactoria para los datos obtenidos. En esta ocasión si se ha conseguido correlacionar las relaciones de aspecto óptimas que maximizan el flujo másico a partir de la siguiente aproximación:

$$(b/L)_{\text{opt}} \cong 1.2261(Ra_L)^{-0.0774} . \quad (6.8)$$

La aproximación de esta expresión es muy buena con un error máximo del 3.03% con respecto a los resultados numéricos. La aproximación de esta correlación con los datos arrojados por las simulaciones se muestra en la Figura 6.26.

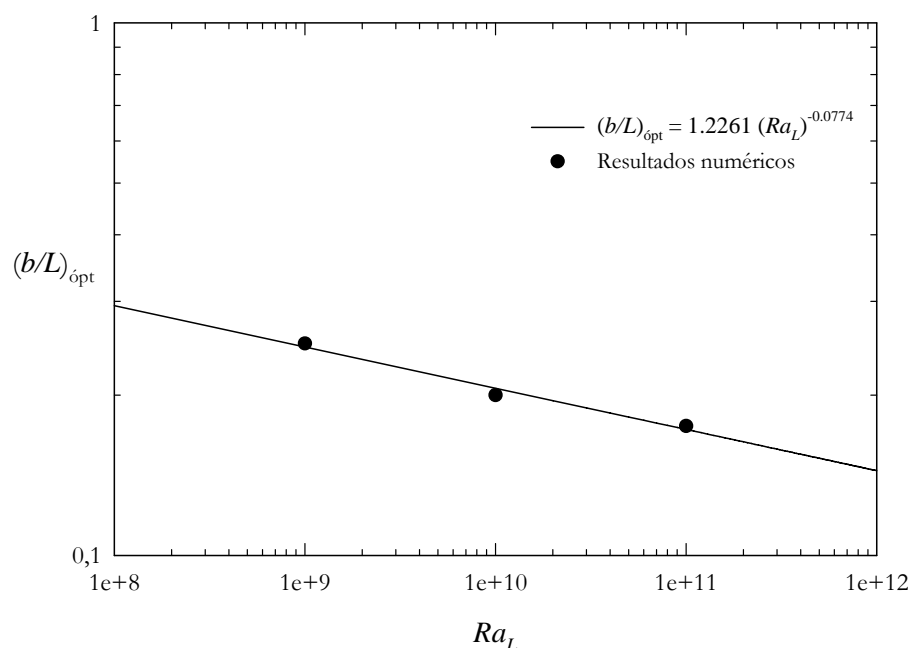


Figura 6.26. Representación de la relación de aspecto óptima que maximiza el flujo másico con la correlación obtenida para estos datos.

#### 6.4.2 Distribuciones de propiedades y zonas de recirculación

Las distribuciones de presión encontradas para esta configuración fueron muy semejantes a las mostradas en la sección anterior y variaban muy poco de un número de Rayleigh a otro.



Figura 6.27. Distribución de presiones en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de  $10^9$  y relación de aspecto  $b/L$  igual a 0.1.



Figura 6.28. Distribución de presiones en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de  $10^{10}$  y relación de aspecto  $b/L$  igual a 0.1.

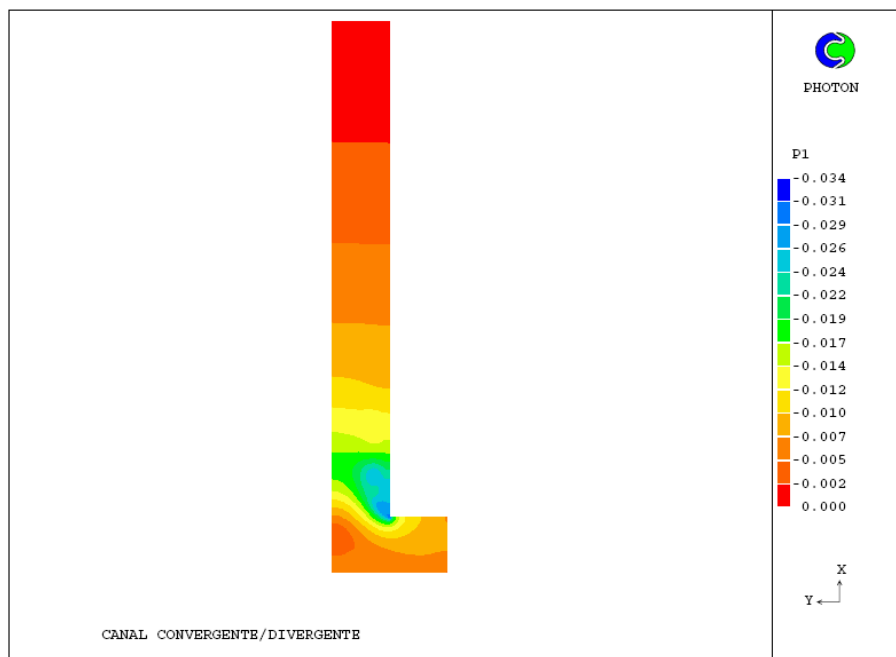


Figura 6.29. Distribución de presiones en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de  $10^{11}$  y relación de aspecto  $b/L$  igual a 0.1.

La única diferencia al aumentar el número de Rayleigh es que la depresión presente en el cambio de dirección va aumentando, aunque de forma muy sostenida. Esta depresión está también relacionada con la recirculación de la que hablábamos en la sección anterior, ya que es esta pérdida de presión la que genera cambios en la dirección del flujo. Al aumentar el número de Rayleigh, aumenta la velocidad inducida por los fenómenos de convección natural, disminuye la presión en esta zona y crece el tamaño de esta recirculación, llegando incluso a generarse otras recirculaciones contiguas a esta.

En lo referente a la distribución de temperaturas, al estar estudiando casos con números de Rayleigh mayores que los estudiados en la configuración anterior, las velocidades inducidas por los fenómenos de convección natural hacen que el desorden en el flujo sea mayor, como se ha explicado ya en el párrafo anterior, y el campo de temperatura sea más homogéneo para relaciones de aspecto geométricas grandes. Esto se refleja en una distribución de temperaturas en la que el apéndice característico de alta temperatura, del que se habló en el anterior apartado, es mucho más difuso y más grande, al ir aumentando la relación  $b/L$  como podemos apreciar en la siguiente figura. Además se puede ver que las temperaturas en la parte inferior del muro, que es la pared vertical de menor longitud, y el cristal son menores que en el caso isoterma. Lo que tenemos en estos casos es un flujo de calor constante que se absorbe mejor por el fluido, al principio del canal vertical, comparado con la cantidad de calor que se absorbía de una pared a temperatura constante.

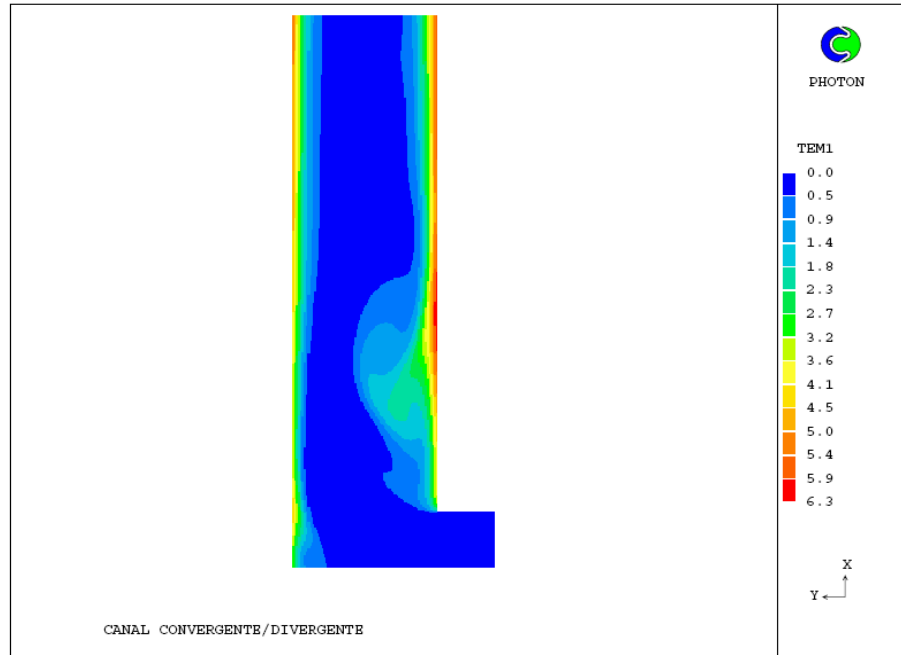


Figura 6.30. Distribución de temperaturas en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de  $10^9$  y relación de aspecto  $b/L$  igual a 0.25.

Para anchuras del canal pequeñas la distribución de temperaturas es muy semejante al caso isoterma, al igual que para relaciones de aspecto muy grandes, como se puede ver en la siguiente figura. En Figura 6.31 se muestra la distribución de temperatura para un parámetro  $b/L$  igual a 0.5, en esta se puede ver que, para este parámetro geométrico, el flujo frío en el centro ya está totalmente homogeneizado. Para valores altos de  $b/L$  la zona de temperaturas más altas empieza a limitarse al fluido adyacente al muro y al cristal con una distribución de temperaturas similar, como ya se ha dicho, al caso isoterma.

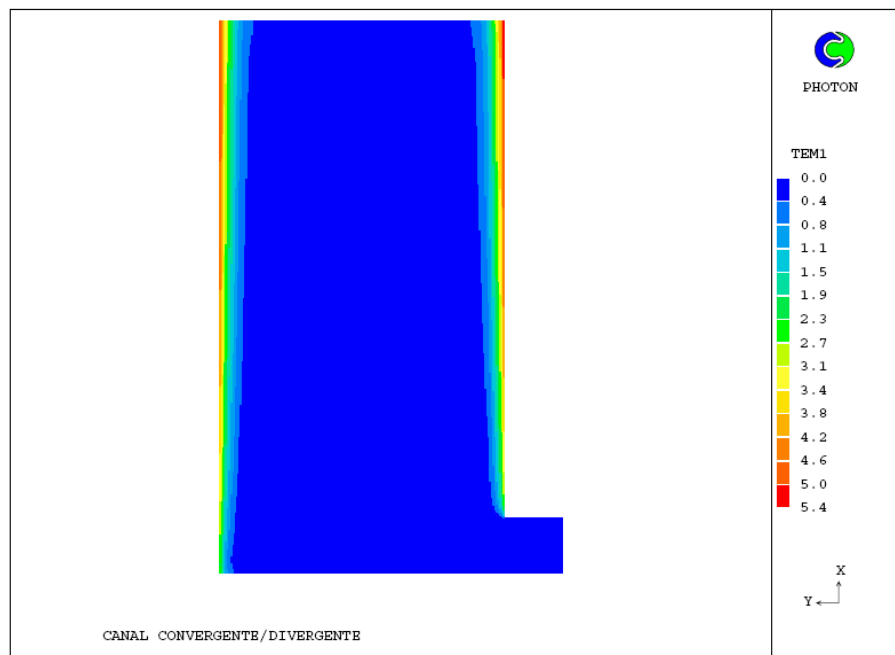


Figura 6.31. Distribución de temperaturas en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de  $10^9$  y relación de aspecto  $b/L$  igual a 0.5.

El mayor desorden del campo de velocidades del que hemos hablado, se puede ver en la siguiente figura donde se presenta la distribución de las velocidades en el interior de la chimenea solar para un número de Rayleigh de  $10^9$  y una relación  $b/L$  de 0.25. Este campo de velocidades resulta característico al aplicar las condiciones de contorno de flujo de calor simétrico en las paredes verticales e ir aumentando la relación de aspecto geométrica.

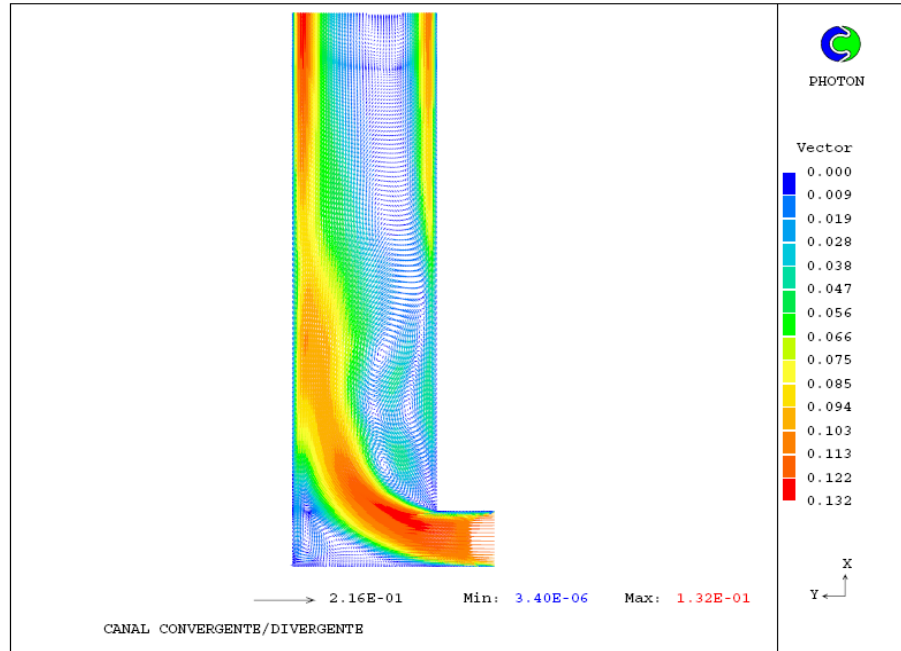


Figura 6.32. Distribución de velocidades en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de  $10^9$  y relación de aspecto  $b/L$  igual a 0.25.

En lo referente a la caída del flujo másico tras el máximo encontrado en las gráficas, la explicación para esta configuración de chimenea solar es la misma que describimos para el caso de paredes verticales isoterma. Se produce un flujo reverso que deja de ser proporcional al aumento de la anchura del canal. A continuación se muestra este fenómeno para un número de Rayleigh de  $10^{10}$ , quedando reflejado el crecimiento desproporcionado de esta región de flujo reverso entre un  $b/L$  de 0.2, óptima relación adimensional para el flujo másico, y 0.25.



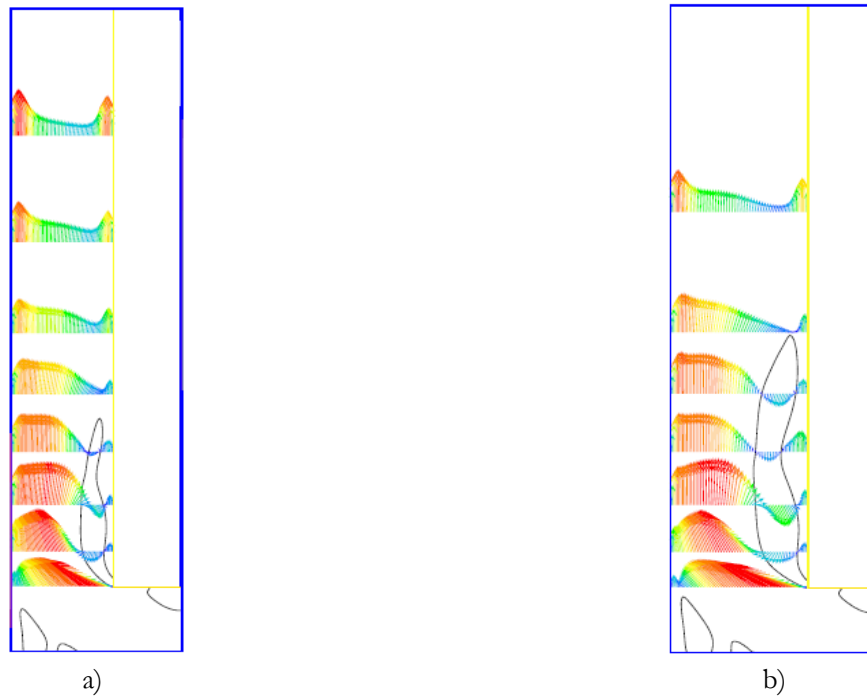


Figura 6.33. Zona de recirculación en la entrada del canal vertical en condiciones de flujo de calor simétrico. a)  $b/L = 0.15$ ,  $Ra_L = 10^{10}$ . b)  $b/L = 0.2$ ,  $Ra_L = 10^{10}$ .

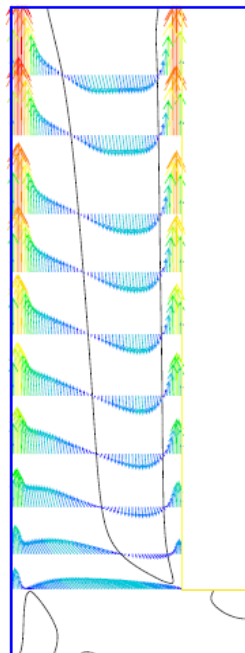


Figura 6.34. Inversión de velocidades para una relación de aspecto  $b/L$  de 0.25 y un número de Rayleigh de  $10^{10}$ .