

Capítulo 7

Chimeneas solares. Flujo turbulento

7.1 Introducción

En este capítulo se hará un tratamiento de las chimeneas solares similar al desarrollado en el capítulo anterior. La diferencia con el anterior capítulo radica en la introducción de las ecuaciones promediadas de Reynolds y el modelo de turbulencia $k - \omega$ en el código comercial PHOENICS a la hora de simular numéricamente estos problemas de convección natural. Con esto se pretende simular el flujo a través de la chimenea solar de la forma más real posible, ya que los números de Rayleigh obtenidos en este tipo de dispositivos bioclimáticos en la realidad hacen que el flujo a través de estos esté en régimen turbulento.

En primer lugar se representarán los resultados del número de Nusselt, evaluado tanto en el muro como en la pared de cristal, para diferentes números de Rayleigh y así poder evaluar el comportamiento del flujo en la zona de transición. Posteriormente se variará la relación de aspecto geométrica para diferentes números de Rayleigh estudiando el comportamiento del flujo ante estas variaciones. Todo esto se realizará para una configuración de chimenea solar con condiciones de contorno en sus paredes verticales de flujo de calor constante, similar a la última configuración tratada en el capítulo de flujo laminar, y para condiciones de paredes verticales isotermas, también tratadas en el anterior capítulo.

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

Como anteriormente se hizo en flujo laminar esta configuración impone unas condiciones de contorno de flujo de calor constante en sus paredes verticales y una condición adiabática en las demás paredes presentes en la chimenea.

Como se ha indicado en el apartado anterior en primer lugar se estudiará la transición de régimen laminar a turbulento a partir de los resultados obtenidos para números de Rayleigh comprendidos entre 10^{11} y 10^{15} , intervalo que acoge la mayoría de condiciones de funcionamiento reales de una chimenea solar, para una relación de aspecto de valor igual a 0.1. Parte del intervalo escogido para el número de Rayleigh pertenece a la zona de transición de flujo laminar a turbulento, razón por la que se han elegido estos valores para el número adimensional.

La gráfica obtenida se muestra a continuación, junto con los valores obtenidos en el anterior capítulo para flujo laminar y una relación de aspecto idéntica a la tratada en los casos turbulentos. También se han representado las correlaciones experimentales publicadas por Wirtz

& Stutzman (1982), que ya se introdujeron en el capítulo 5 para un canal simple, para poder disponer así de unos valores de referencia aunque estos valores hayan sido obtenidos para una geometría mucho más simple.

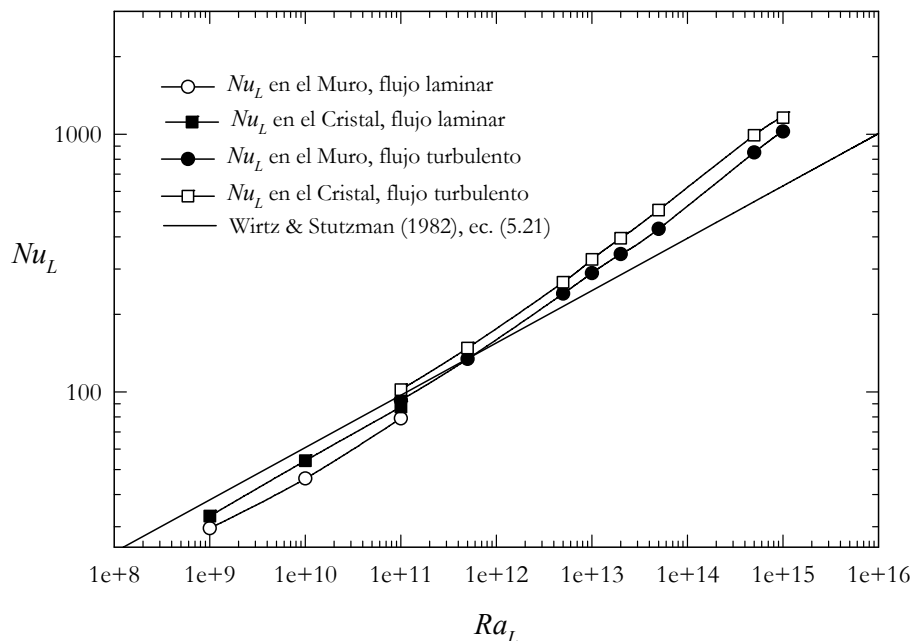


Figura 7.1. Número de Nusselt en función del número de Rayleigh tanto para flujo laminar como turbulento.

En este gráfico se puede ver que en la zona de resultados para simulaciones de flujo turbulento, tanto en la curva referente al muro como en la referente a la pared de cristal, se aprecian dos pendientes bien diferenciadas, una en la zona que parte de un Rayleigh de 10^{11} hasta un valor de, aproximadamente, $2 \cdot 10^{13}$ del mismo número adimensional y otra que parte de este punto llegando hasta el último valor representado del número de Rayleigh, 10^{15} .

7.2.1 Transición a la turbulencia y correlaciones para el número de Nusselt

La primera de ellas corresponde con los datos para un flujo de transición y la segunda para un flujo con turbulencia completamente desarrollada. Este cambio de pendiente es típico de este tipo de flujos al desarrollarse la turbulencia, aspecto que ya tratamos en el capítulo 5, donde se estudiaba el flujo a través de un canal simple vertical.

A partir de estos resultados numéricos se desarrollaron correlaciones del siguiente modo; se introdujo un valor aproximado para la transición a flujo con turbulencia desarrollada, que en nuestro caso fue $2 \cdot 10^{13}$, y se aproximaron a una función potencial. Se operó de forma semejante con los resultados obtenidos entre los números de Rayleigh de $2 \cdot 10^{13}$ y 10^{15} .

Para el caso del número de Nusselt en el muro la correlación obtenida para el flujo de transición, realizada por el método de los mínimos cuadrados como todas las que seguirán a esta, fue la siguiente:

$$Nu_{L,trans} \cong 0.1721(Ra_L)^{0.2479}, \text{ para } 10^{11} \leq Ra_L \leq 2 \cdot 10^{13}. \quad (7.1)$$

El error máximo con los datos obtenidos de esta aproximación es de 1.89%, por lo que la aproximación con los resultados numéricos es bastante fiable.

En el caso de flujo totalmente desarrollado, la correlación obtenida para el número de Nusselt en el muro se muestra a continuación.

$$Nu_{L,turb} \cong 0.0433(Ra_L)^{0.2917}, \text{ para } 2 \cdot 10^{13} \leq Ra_L \leq 10^{15}. \quad (7.2)$$

Para esta expresión el error máximo encontrado para los resultados arrojados por las simulaciones numéricas fue de un 0.88%, lo que se traduce en una excelente aproximación para los datos obtenidos.

En la Figura 7.2 se muestra la aproximación de estas expresiones sobre ejes logarítmicos, junto con la correlación obtenida para el número de Nusselt en el muro en flujo laminar que es la siguiente:

$$Nu_L \cong 0.2187(Ra_L)^{0.2354}, \quad (7.3)$$

y que presenta un error máximo del 5.81%. Como se puede ver en la gráfica estas correlaciones están casi solapadas.

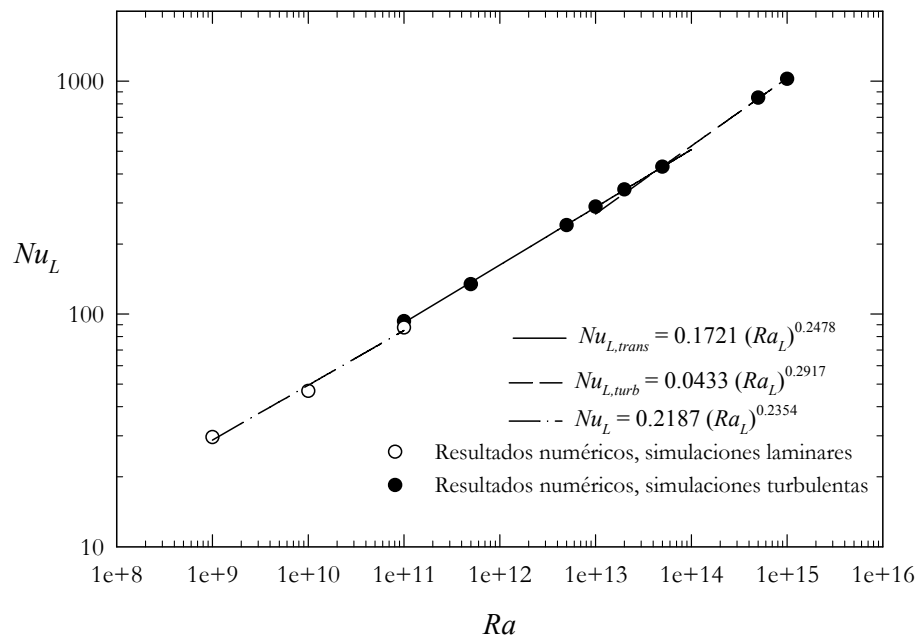


Figura 7.2. Representación de las correlaciones halladas del número de Nusselt en el muro para flujo de transición y turbulento, para flujo laminar y resultados numéricos obtenidos tanto para flujo laminar como turbulento.

Como se puede ver, los valores del número de Nusselt en las cercanías de un número de Rayleigh $2 \cdot 10^{13}$ se encuentran a medio camino entre la correlación para el flujo de transición y la de flujo con turbulencia totalmente desarrollada

En el caso de la pared de cristal, la correlación para el número de Nusselt en el flujo de transición es la que se muestra a continuación:

$$Nu_{L,trans} \cong 0.1547(Ra_L)^{0.2556}, \text{ para } 10^{11} \leq Ra_L \leq 2 \cdot 10^{13}. \quad (7.4)$$

El error máximo obtenido a partir de esta correlación es de un 2.16%.

La correlación obtenida para flujo con turbulencia plenamente desarrollada es la siguiente:

$$Nu_{L,turb} \cong 0.0762(Ra_L)^{0.2793}, \text{ para } 2 \cdot 10^{13} \leq Ra_L \leq 10^{15}. \quad (7.5)$$

Para esta expresión el mayor error dado para los resultados numéricos fue de un 2%, por lo que la fidelidad de estas dos expresiones es prácticamente la misma.

En la figura siguiente se muestra la fidelidad de las expresiones anteriores con los resultados numéricos. En esta gráfica también se ha representado la correlación hallada para el número de Nusselt en la pared de cristal en las simulaciones de flujo laminar, así como los datos numéricos en los que esta basada, para así poder apreciar la continuidad de esta con las correlaciones turbulentas. La expresión de la correlación laminar es la siguiente:

$$Nu_L \cong 0.6608(Ra_L)^{0.1896} . \quad (7.6)$$

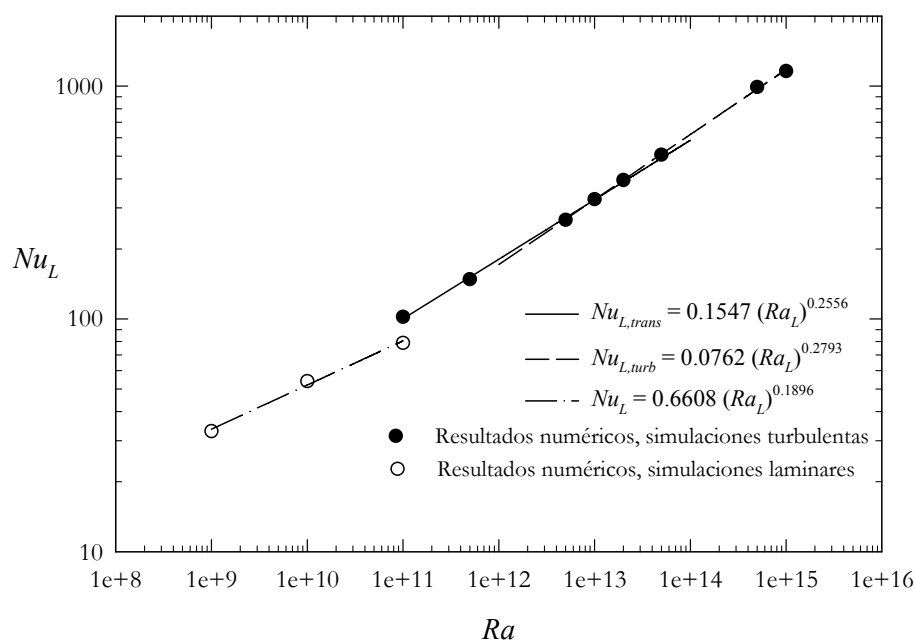


Figura 7.3. Representación de las correlaciones halladas del número de Nusselt en la pared de cristal para flujo de transición y turbulento, para flujo laminar y resultados numéricos obtenidos tanto para flujo laminar como turbulento.

En base a las figuras mostradas hasta ahora podemos decir que la zona de transición para una chimenea solar con condiciones de contorno de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales se encuentra para un número de Rayleigh cercano a $2 \cdot 10^{13}$, a partir de este valor los fenómenos relacionados con la turbulencia van marcando el comportamiento del flujo fluido. El valor encontrado para el tránsito a la turbulencia es bastante próximo a los valores encontrados experimentalmente para una placa plana (Bejan, 2003) que nos indica que las simulaciones parecen ser bastante realistas.

También se ha de señalar que todas las correlaciones halladas tienen una forma muy similar a la correlación típica dada por H. B. Awbi (1994) para el diseño de chimeneas solares. Esta correlación presentaba la forma $Nu_L = 0.1(Ra_L)^{1/3}$ y fue calculada por dicho autor utilizando las relaciones para una placa vertical.

7.2.2 Correlaciones para el flujo másico inducido

El flujo másico hallado en función del número de Rayleigh sigue una relación potencial al igual que el número de Nusselt. En este trabajo se han representado el flujo másico adimensional M , que ya se introdujo en el anterior capítulo, y el parámetro Φ definido por la expresión:

$$\Phi = \frac{M}{Ra_L}, \quad (7.7)$$

donde M es el flujo másico adimensional y Ra_L el número de Rayleigh.

En el caso del flujo másico adimensional la correlación encontrada de esta variable en función del número de Rayleigh para las simulaciones turbulentas fue:

$$M \cong 0.1619(Ra_L)^{0.3465}. \quad (7.8)$$

Para esta correlación el error máximo fue de 1.9% con respecto a los resultados numéricos. La excelente correlación de los datos se puede ver en la Figura 7.4. Como en las anteriores figuras se presenta también la correlación hallada para los datos obtenidos en flujo laminar, la aproximación en este caso presentaba la siguiente expresión:

$$M \cong 0.5464(Ra_L)^{0.2902}. \quad (7.9)$$

La aproximación en este caso no era tan buena, llegando el error a alcanzar el 5.05% en el peor de los casos.

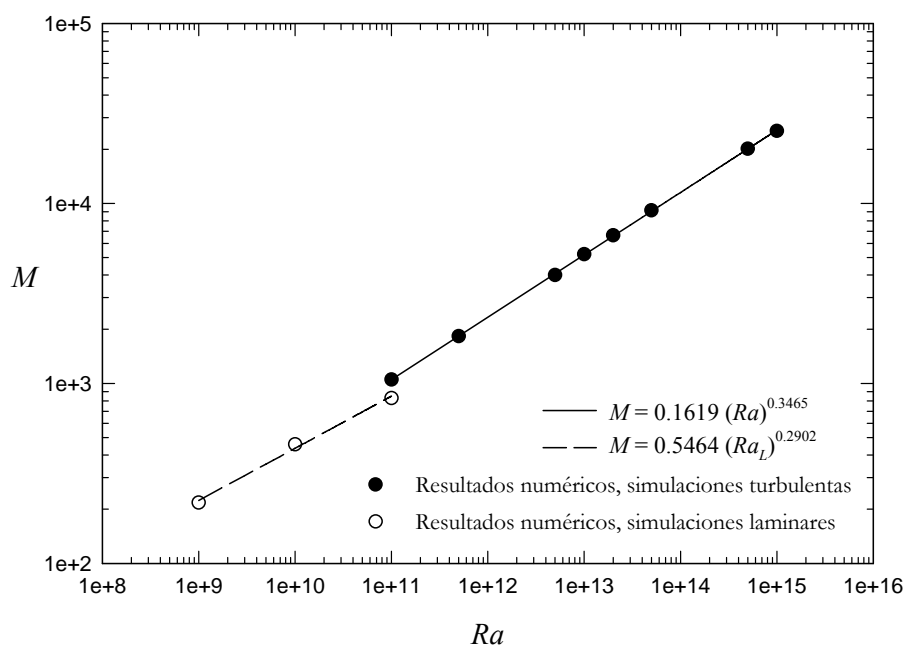


Figura 7.4. Representación de las correlaciones halladas del flujo másico adimensional para flujo turbulento, para flujo laminar y resultados numéricos obtenidos tanto para flujo laminar como turbulento.

En el caso del parámetro Φ , la correlación cambia el signo de la pendiente en ejes logarítmicos. Esta pendiente se hace negativa debido al exponente negativo de la expresión obtenida para flujo turbulento por mínimos cuadrados que vemos a continuación:

$$\Phi \cong 0.1619(Ra_L)^{-0.6534}. \quad (7.10)$$

En esta ocasión el error máximo es similar al encontrado para el flujo másico adimensional, 1.9%. Para los resultados en flujo laminar se obtuvo la correlación, que al igual que en el caso del flujo másico adimensional llegó a superar el 5% de error, que se muestra a continuación:

$$\Phi \cong 0.5515(Ra_L)^{-0.7102}. \quad (7.11)$$

En la Figura 7.5 se muestran la aproximación de estas correlaciones con los datos. También podemos ver que al igual que en la Figura 7.4 las correlaciones turbulenta y laminar tienen una gran continuidad.

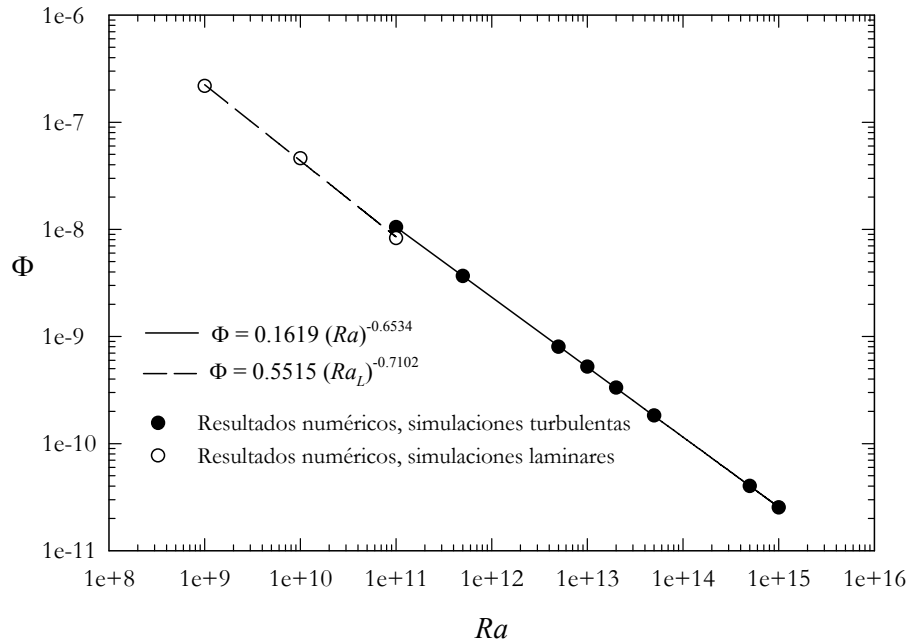


Figura 7.5. . Representación de las correlaciones halladas del parámetro Φ para flujo turbulento, para flujo laminar y resultados numéricos obtenidos tanto para flujo laminar como turbulento

Las representaciones gráficas de la distribución de las propiedades fluidas se muestran a continuación.

Las presiones no sufren cambios significativos con respecto al número de Rayleigh, podemos ver que los cambios son mínimos en las siguientes figuras donde se representa la distribución de presiones para unos números de Rayleigh de 10^{11} , $2 \cdot 10^{13}$ y 10^{15} .

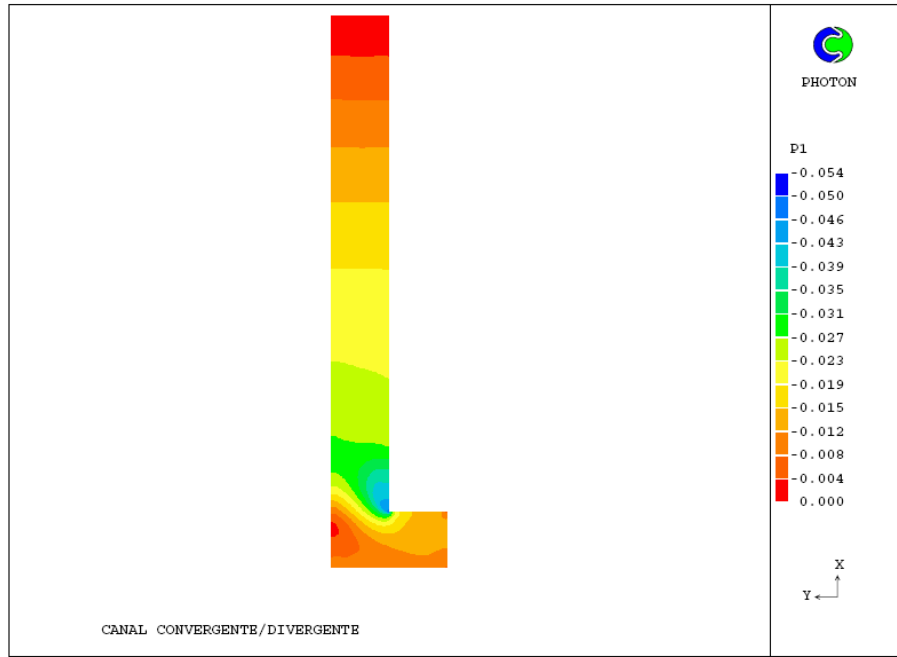


Figura 7.6. Distribución de presiones para flujo turbulento en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{11} y relación de aspecto b/L igual a 0.1.

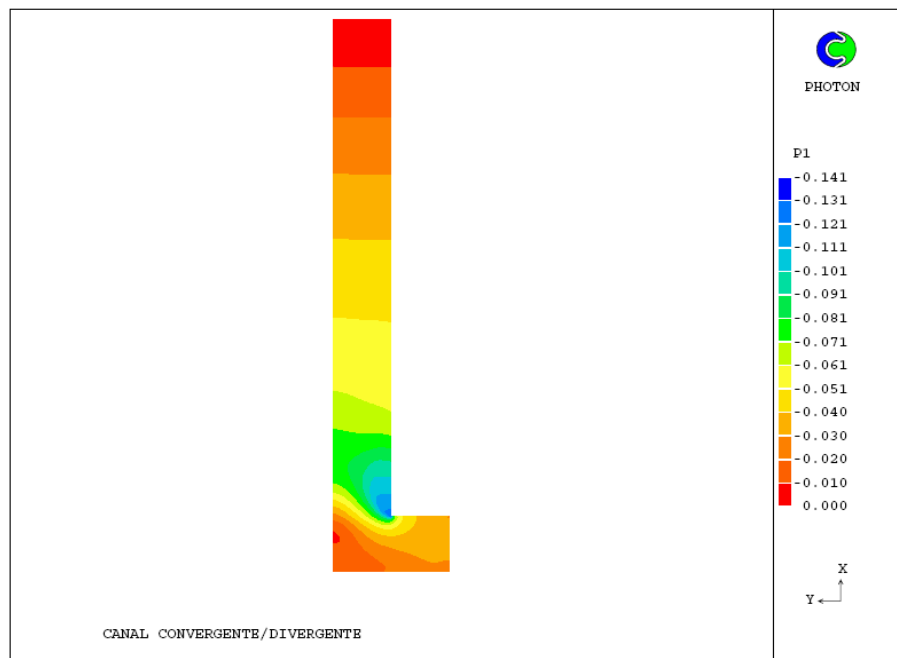


Figura 7.7. Distribución de presiones para flujo turbulento en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de $2 \cdot 10^{13}$ y relación de aspecto b/L igual a 0.1.

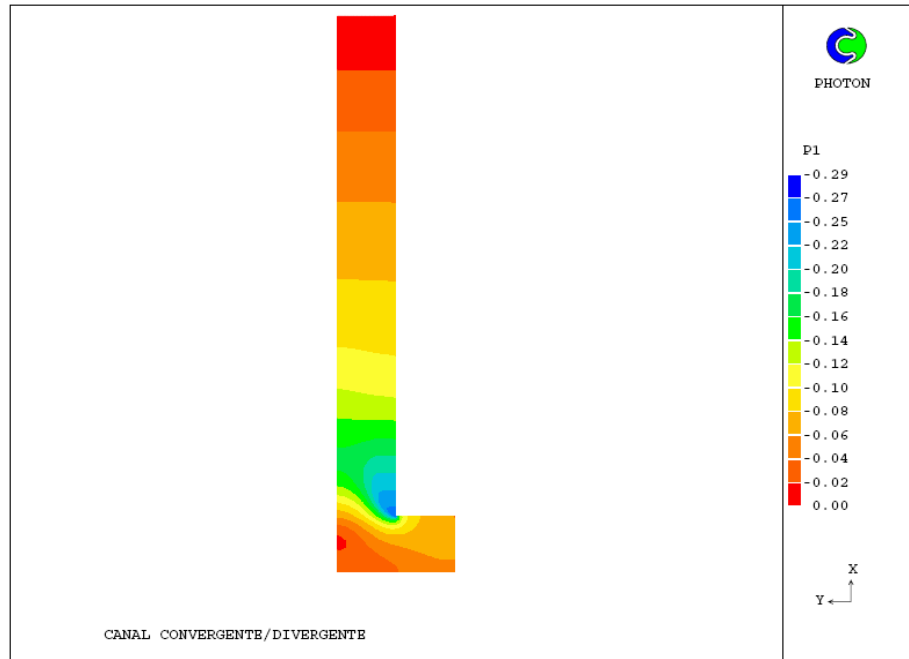


Figura 7.8. Distribución de presiones para flujo turbulento en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{15} y relación de aspecto b/L igual a 0.1.

Tan sólo apreciamos un aumento en la depresión característica de la zona del cambio de dirección con el aumento del valor del número adimensional, aunque este descenso de presiones no es significativo.

La variable que mejor representa el cambio del régimen del flujo a turbulento es una de las variables del modelo de turbulencia, la energía cinética turbulenta k . En las figuras 7.9, 7.10 y 7.11 se muestra la variación de esta variable para números de Rayleigh que representan la cercanía al flujo laminar, la zona de transición y el flujo de turbulencia totalmente desarrollada, al igual que se hizo con la variable presión.

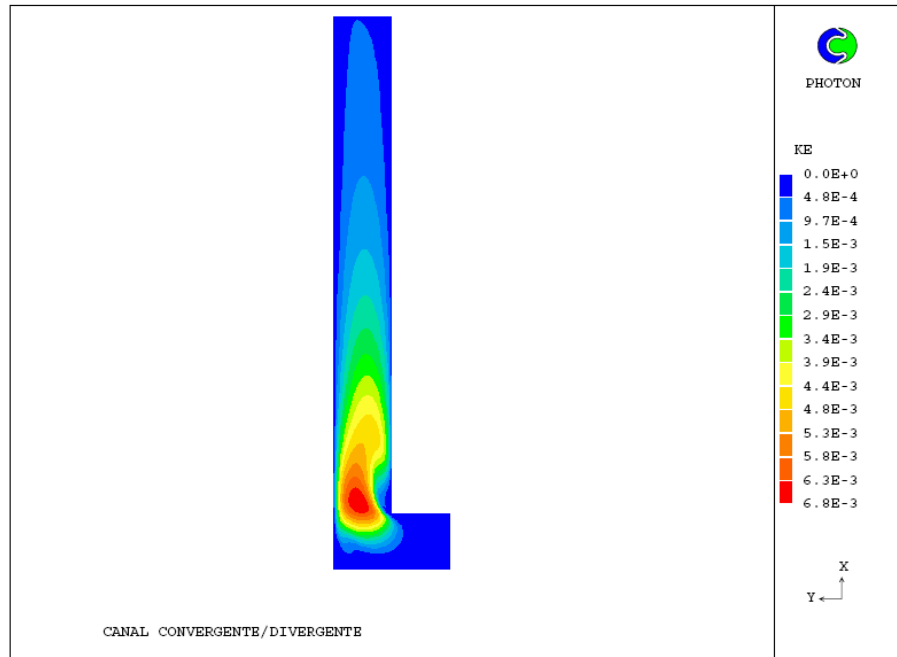


Figura 7.9. Distribución de la variable turbulenta k en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{11} y relación de aspecto b/L igual a 0.1.

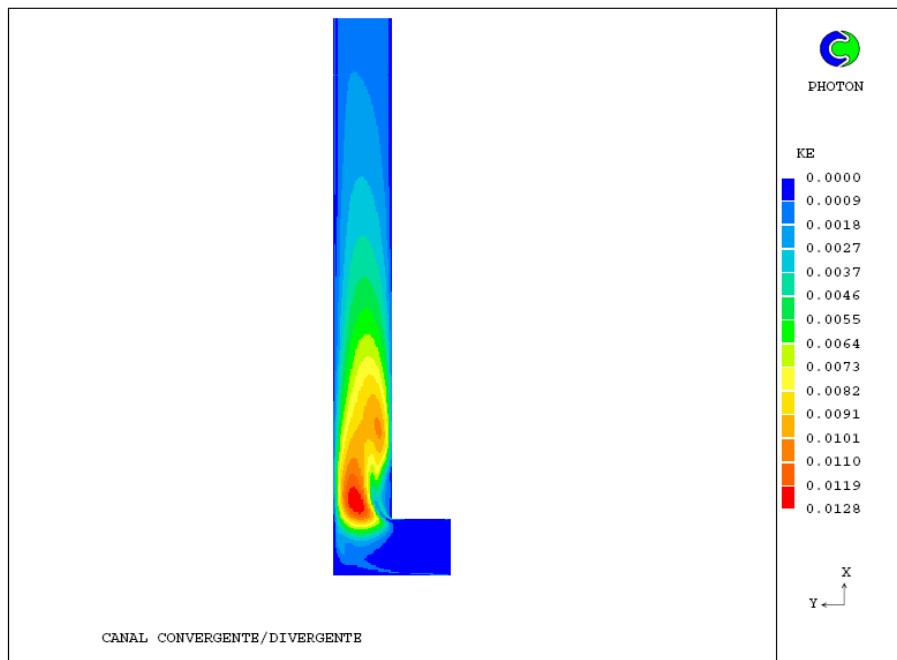


Figura 7.10. Distribución de la variable turbulenta k en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de $2 \cdot 10^{13}$ y relación de aspecto b/L igual a 0.1.

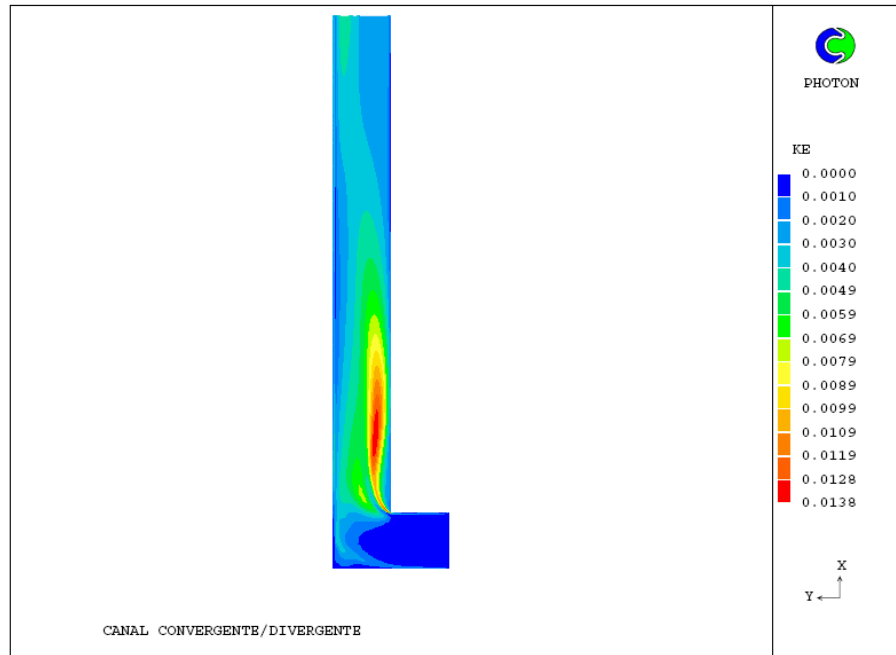


Figura 7.11. Distribución de la variable turbulenta k en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{15} y relación de aspecto b/L igual a 0.1.

En las anteriores figuras podemos ver como los valores de esta variable son cada vez más altos, sobretodo en la zona cercana a la sección de salida. Para números de Rayleigh bajos esta variable solo tiene valores altos en la zona del cambio de dirección debido al flujo reverso y recirculaciones inducidas en esta región por la depresión de la que se habló anteriormente. En la Figura 7.12 se muestra un detalle de la distribución de velocidades en esta zona para un número de Rayleigh de $5 \cdot 10^{12}$.

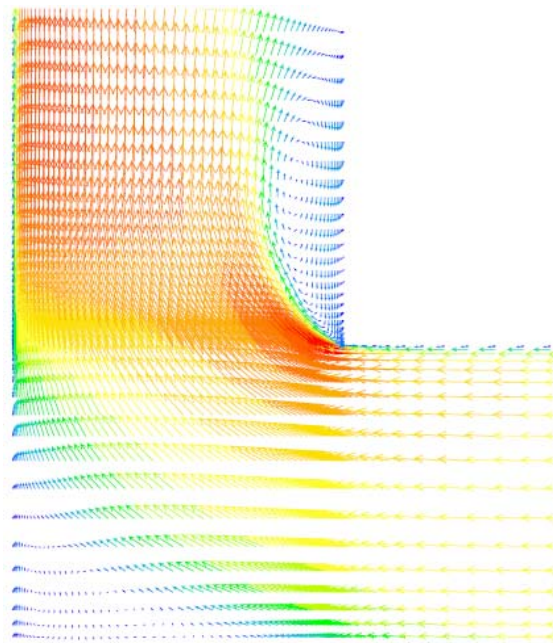


Figura 7.12. Detalle del campo de velocidades en el cambio de dirección de una chimenea solar de condiciones de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, Rayleigh igual a $5 \cdot 10^{12}$.

En lo que respecta a la variable ω del modelo de turbulencia tiene una distribución homogénea y sólo aumenta el valor cerca de las paredes y en la zona central de las recirculaciones donde la escala de la turbulencia disminuye significativamente.

Las diferencias en la distribución de temperaturas al variar el número de Rayleigh son mínimas, aquí es más importante la anchura de la pared, como vimos en el anterior capítulo, que la variación del este parámetro adimensional. Una distribución típica se muestra en la siguiente figura que representa esta característica para un Rayleigh de $5 \cdot 10^{14}$.

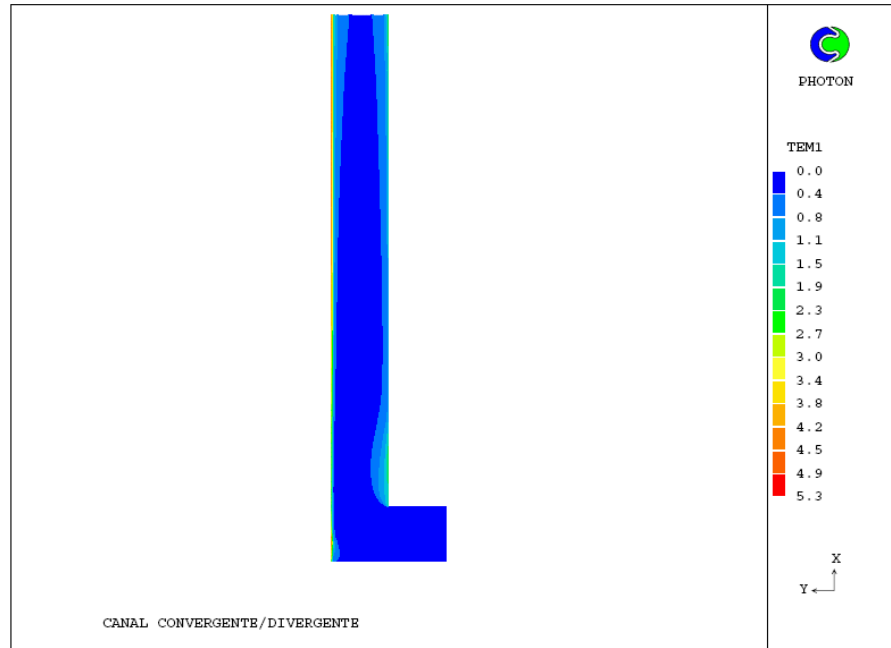


Figura 7.14. Distribución de temperaturas para flujo turbulento en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de $5 \cdot 10^{14}$ y relación de aspecto b/L igual a 0.1.

7.3 Chimenea solar con condiciones de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales. Variación geométrica

Al igual que se hizo en las simulaciones de régimen laminar, también se estudiará la variación de la relación de aspecto geométrica adimensional para condiciones de contorno de flujo de calor simétrico en las paredes verticales de la chimenea solar en flujo turbulento.

7.3.1 Optimización geométrica

El estudio se desarrolló para números de Rayleigh de 10^{11} , 10^{13} y 10^{15} . Se han representado los números de Nusselt en el muro y en la pared de cristal, así como el flujo másico adimensional para cada uno de los números de Rayleigh. Las gráficas resultantes fueron las siguientes.

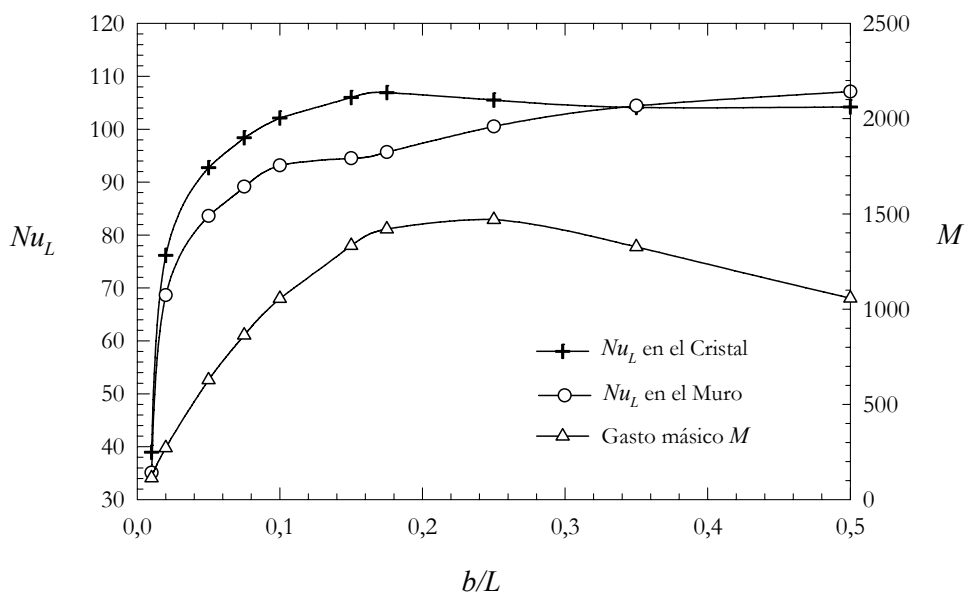


Figura 7.15. Representación del número de Nusselt tanto en el muro como en el cristal y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto b/L para $Ra_L = 10^{11}$ en flujo turbulento.

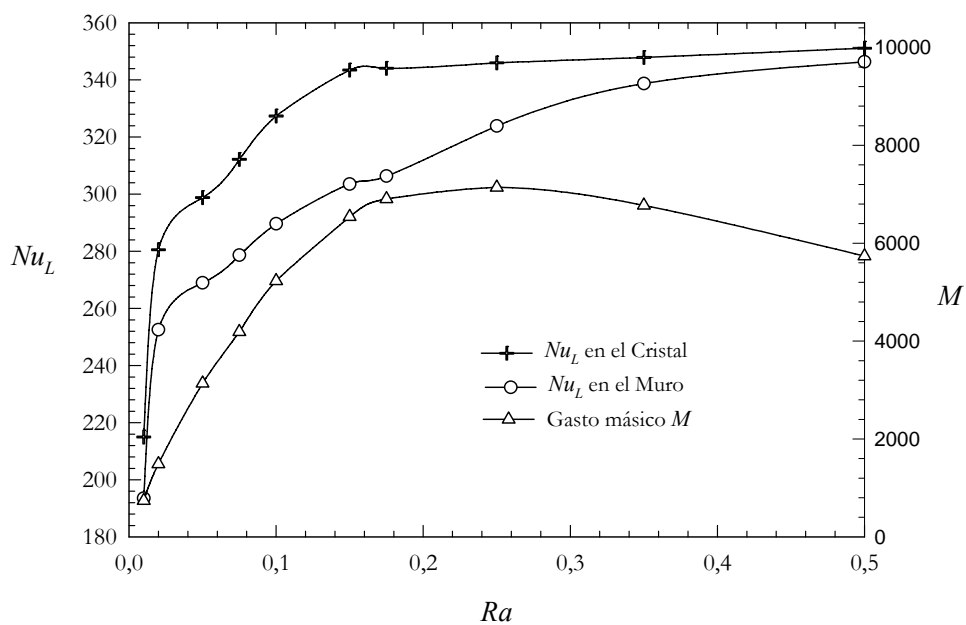


Figura 7.16. Representación del número de Nusselt tanto en el muro como en el cristal y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto b/L para $Ra_L = 10^{13}$ en flujo turbulento.

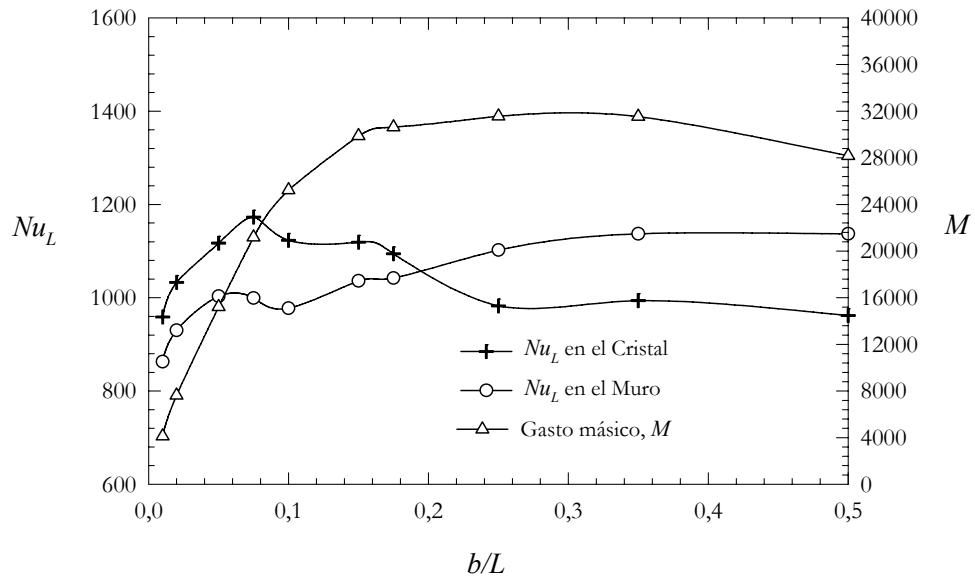


Figura 7.17. Representación del número de Nusselt tanto en el muro como en el cristal y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto b/L para $Ra_L = 10^{15}$ en flujo turbulento.

Podemos ver que en flujo turbulento seguimos sin obtener un máximo para la transmisión de calor en las chimeneas solares con este tipo de condiciones de contorno. Sólo obtenemos un máximo reseñable en el cálculo del Nusselt en el cristal para un número de Rayleigh de 10^{15} que podría ser debido a problemas computacionales más que a una semejanza con el flujo real.

En cuanto al flujo másico, este no presenta caídas violentas tras alcanzar el valor máximo como ocurría en flujo laminar y su relación de aspecto adimensional óptima responde a la siguiente correlación en función del número de Rayleigh:

$$(b/L)_{opt} \cong 0.1643(Ra_L)^{0.0161}. \quad (7.9)$$

La aproximación con los resultados numéricos es excelente, presentando un error máximo del 2.36%. En la siguiente figura podemos ver dicha aproximación.

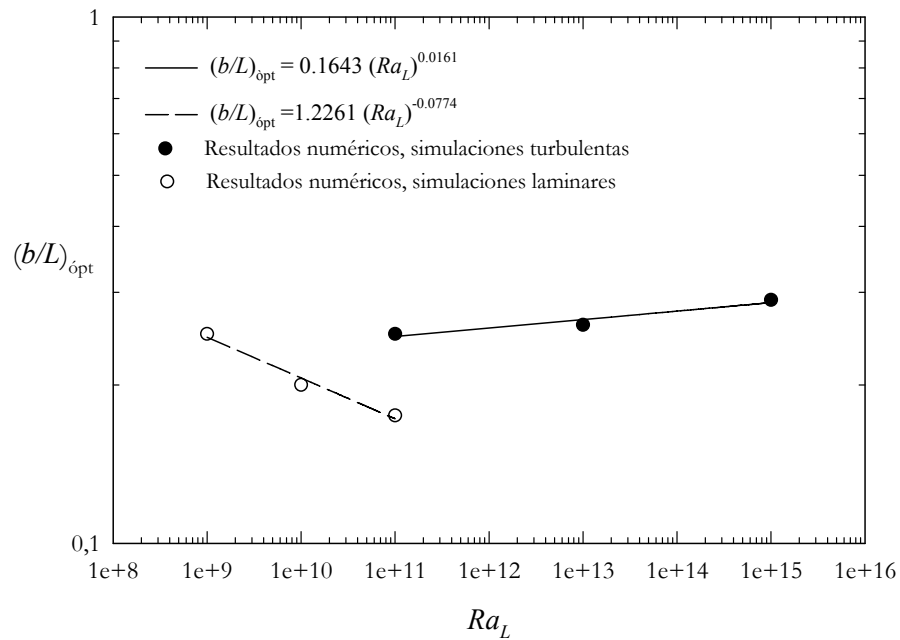


Figura 7.18. Representación de la relación de aspecto óptima que maximiza el flujo másico junto con las correlaciones obtenidas para los resultados numéricos, tanto para flujo turbulento como laminar.

Se ha representado junto con la correlación de los datos que se halló en flujo laminar, que como vemos se aleja bastante de la obtenida para flujo turbulento.

7.3.2 Distribuciones de propiedades. Zonas de recirculación

A continuación mostramos las distribuciones de presión para relaciones de aspecto adimensionales b/L de 0.1, 0.02, 0.15 y 0.35.

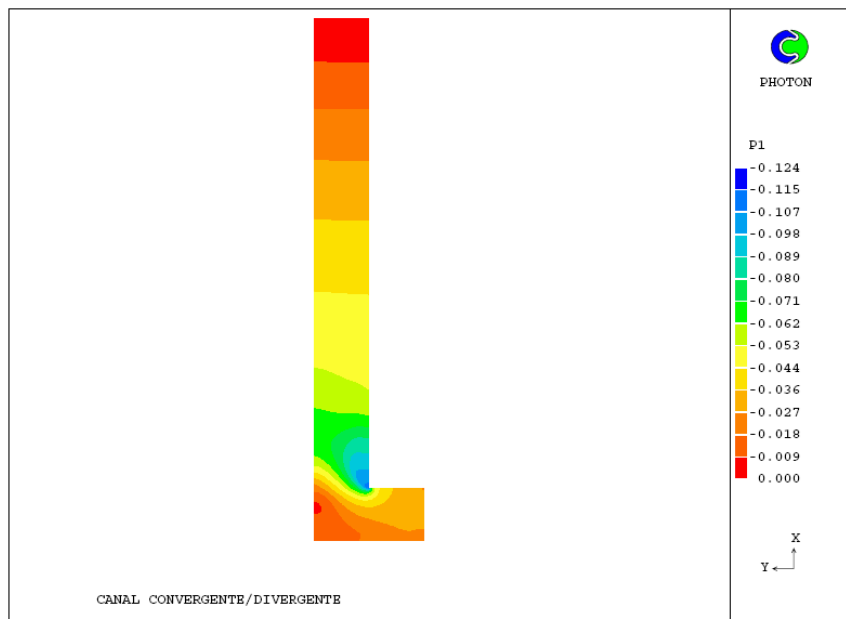


Figura 7.19. Distribución de presiones para flujo turbulento en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{13} y relación de aspecto b/L igual a 0.1.

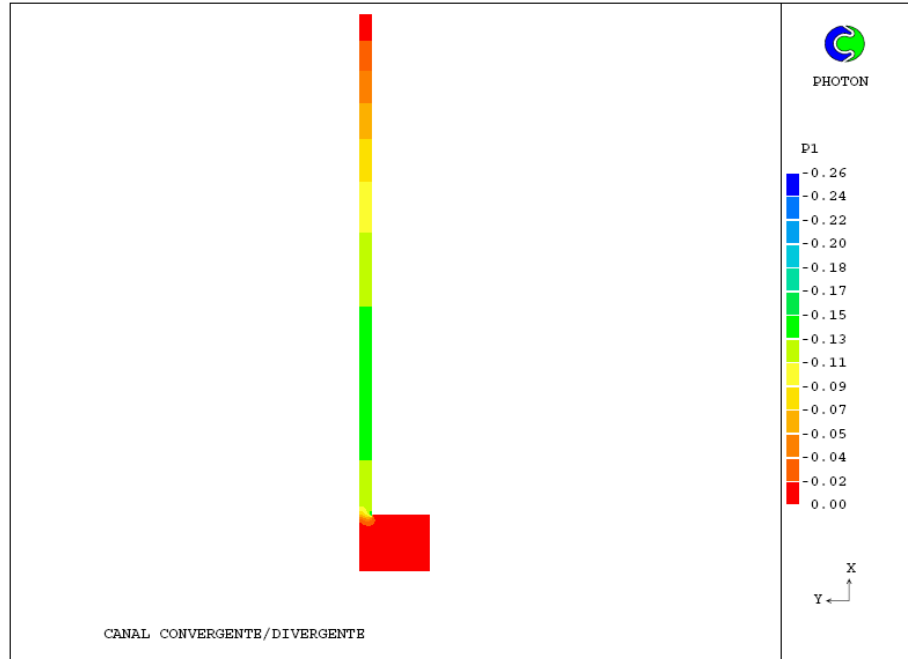


Figura 7.20. Distribución de presiones para flujo turbulento en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{13} y relación de aspecto b/L igual a 0.02.

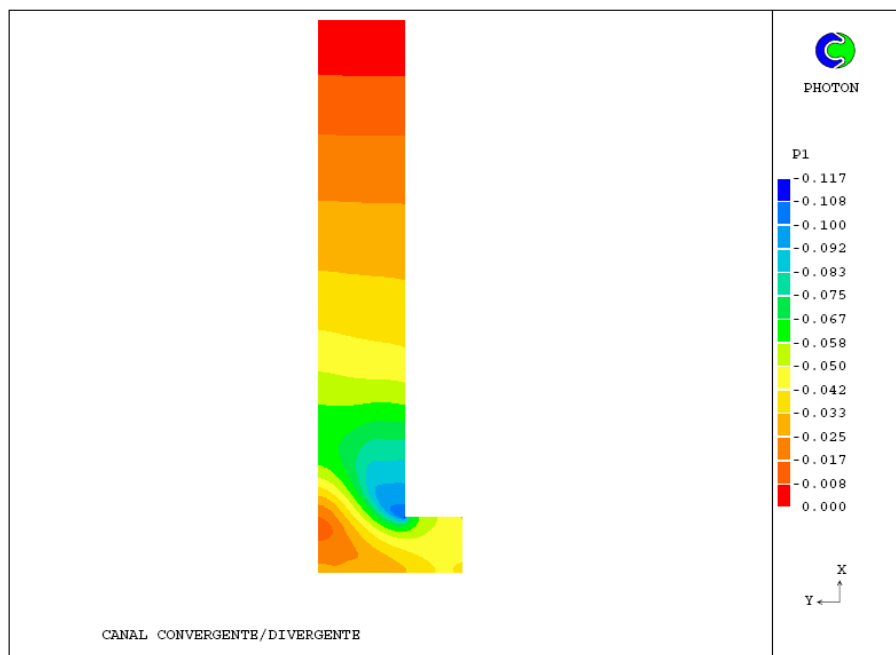


Figura 7.21. Distribución de presiones para flujo turbulento en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{13} y relación de aspecto b/L igual a 0.15.

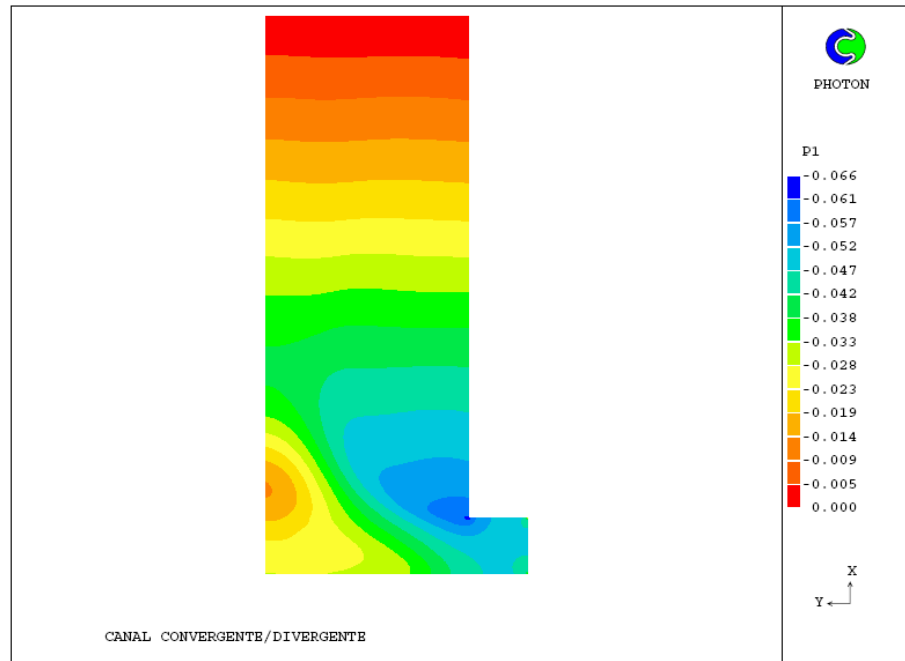


Figura 7.22. Distribución de presiones para flujo turbulento en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{13} y relación de aspecto b/L igual a 0.35.

En estas figuras podemos observar la tendencia del campo de presiones al aumentar o disminuir la relación de aspecto, como se puede ver el comportamiento es bastante parecido al que se obtuvo en flujo laminar. A medida que aumenta esta relación adimensional disminuye la presión en la zona del cambio de dirección y cuando este parámetro aumenta la caída es mucho menos acusada y el aumento de la misma en la sección es considerable.

Estas variaciones de presión tienen su consecuencia en el campo de velocidades, a continuación se puede ver el mismo para un b/L de 0.25 y un número de Rayleigh de 10^{13} .

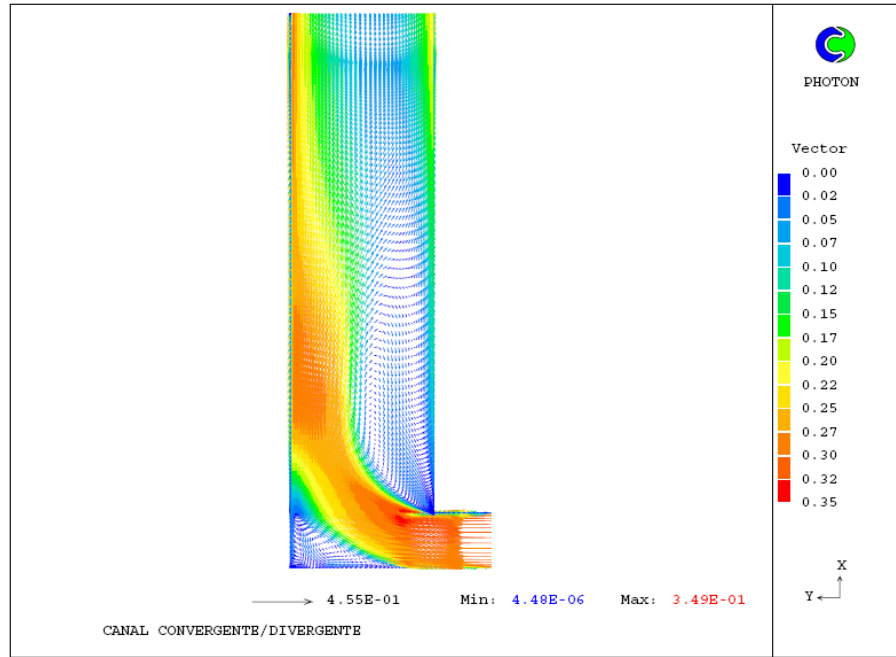


Figura 7.23. Distribución de velocidades para flujo turbulento en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^9 y relación de aspecto b/L igual a 0.25.

Las recirculaciones, al igual que ocurría en flujo laminar, siguen estando presentes. El hecho de que no exista una caída de flujo másico tan pronunciada como ocurría en flujo laminar al aumentar la relación de aspecto hace que las regiones de flujo reverso sean menores y por tanto las recirculaciones menos acusadas.

El flujo reverso que hemos mencionado se pueden comparar con las ofrecidas por las simulaciones laminares y ver que son de un crecimiento progresivo y sin brusquedades. En las siguientes figuras se muestra la variación con la anchura del canal de este flujo reverso, se recuerda que los contornos de color negro representan las zonas de velocidad nula.

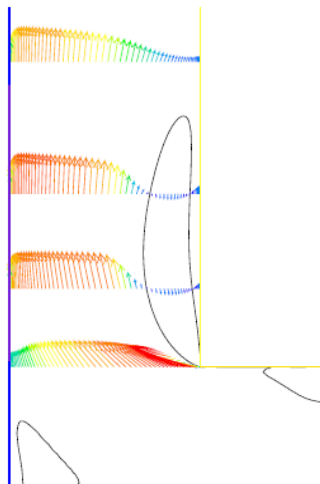


Figura 7.24. Zona de recirculación en la entrada del canal vertical en flujo turbulento con condiciones de flujo de calor simétrico, $b/L = 0.15$ y $Ra_L = 10^{13}$.

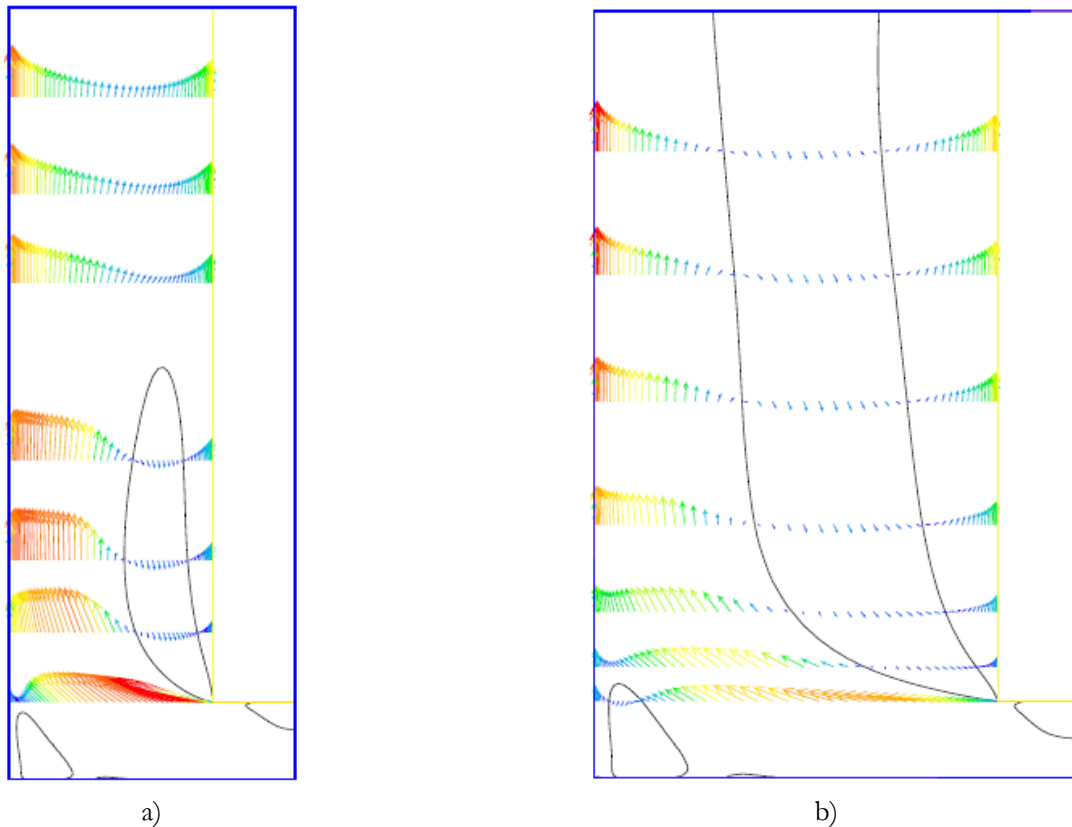


Figura 7.25. Zona de recirculación del canal vertical en flujo turbulento con condiciones de flujo de calor simétrico. a) $b/L = 0.25$, $Ra_L = 10^{13}$. b) $b/L = 0.5$, $Ra_L = 10^{13}$.

Un aspecto destacable de los perfiles de velocidad mostrados en la representación de estas inversiones es el perfil con forma característica de U, que ya se comentó en el capítulo de flujo laminar, encontrado en la región próxima a la sección de salida. Este perfil se puede apreciar claramente, por ejemplo, en la Figura 7.25a donde aún las inversiones no han llegado a la sección de salida.

La forma de este perfil de velocidades responde claramente a la obtenida por los investigadores A. M. Rodrigues, A. Canha da Piedade, A. Lahellec & J. Y. Grandpeix (2000) para flujo turbulento en una chimenea solar con condiciones de contorno de flujo de calor constante en sus paredes, al igual que las estudiadas en esta sección. Las chimeneas estudiadas por dichos investigadores no disponían del canal horizontal de entrada a la misma que se ha ubicado en las chimeneas solares tratadas en este proyecto, se limitaban a un canal vertical con una sección de entrada horizontal al final de la pared del muro. Las depresiones producidas por este cambio de dirección, presente en los casos estudiados en este trabajo, no se pueden comparar directamente los perfiles de velocidad. A pesar de todo, tal como decían estos autores, este perfil característico puede ser una señal de que los fenómenos turbulentos están presentes en el flujo fluido. Estos autores desarrollaron sus simulaciones para una anchura del canal constante variando el número de Rayleigh, aquí se ha conseguido desarrollar dicho perfil característico con la influencia extra del aumento de la anchura del canal vertical. Al tener un flujo más complicado, debido a los cambios de dirección, no se consiguió este perfil característico una forma clara sólo con variar el número de Rayleigh para una anchura constante.

Con respecto a la distribución de temperaturas no se sigue un comportamiento similar al caso laminar, se presenta un comportamiento más ordenado al igual que pasaba con el campo de velocidades. Podemos verlo en las siguientes figuras.

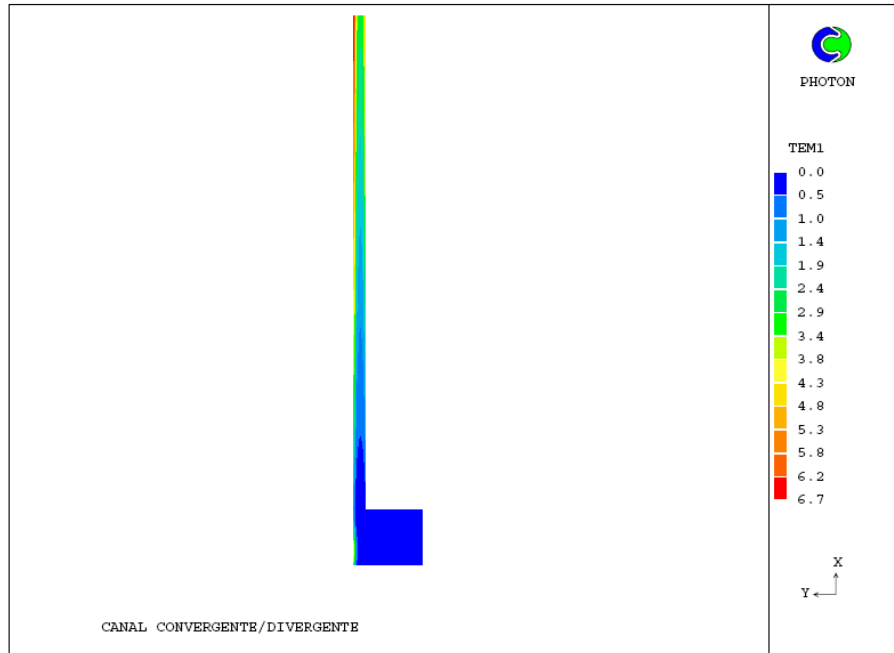


Figura 7.26. Distribución de temperaturas para flujo turbulento en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{13} y relación de aspecto b/L igual a 0.02.

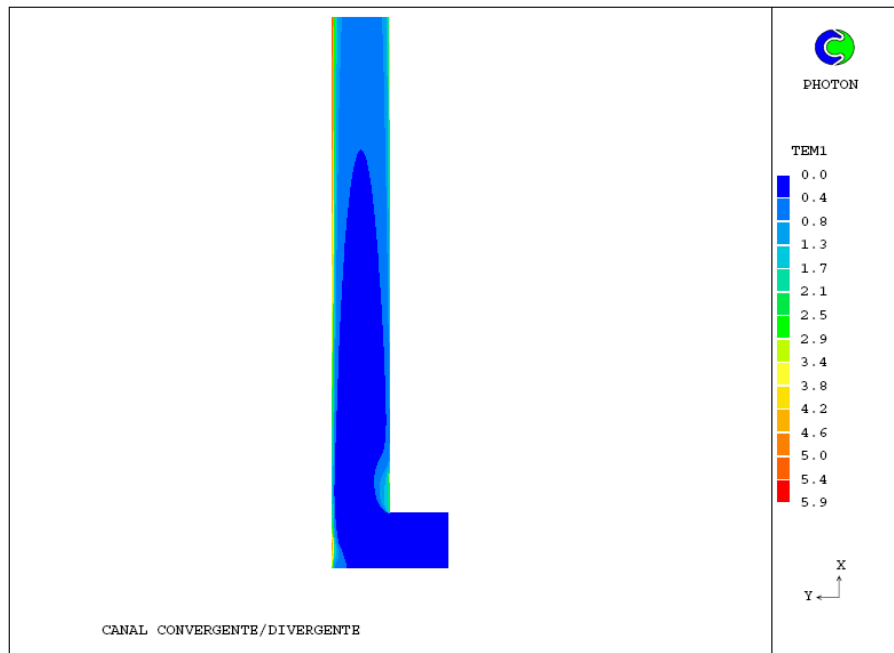


Figura 7.27. Distribución de temperaturas para flujo turbulento en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{13} y relación de aspecto b/L igual a 0.1.

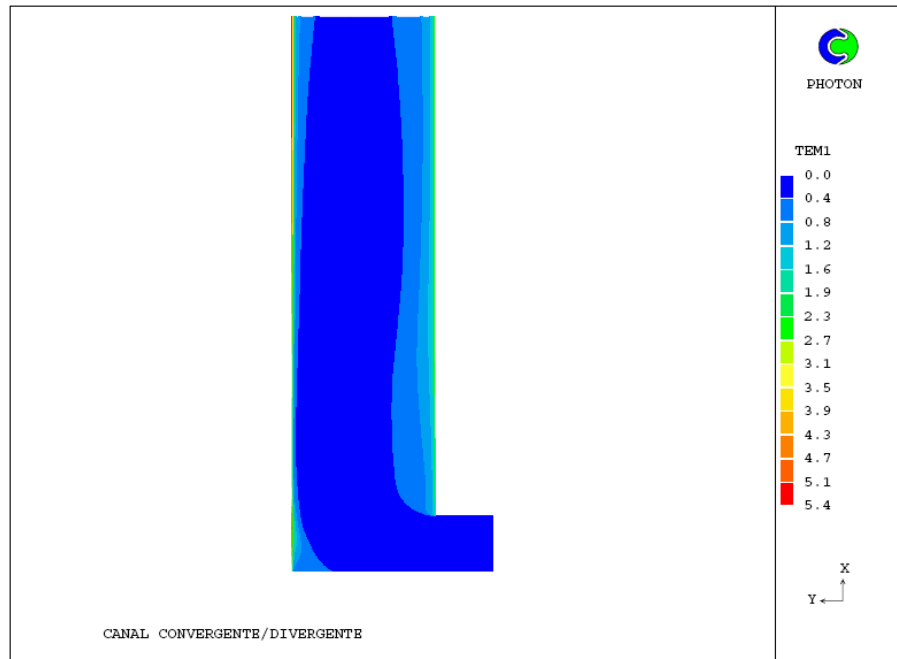


Figura 7.28. Distribución de temperaturas para flujo turbulento en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{13} y relación de aspecto b/L igual a 0.25.

Podemos apreciar que al aumentar la anchura del canal, Figura 7.28, vertical va creciendo la zona central de flujo frío, como era de esperar, pero el flujo caliente muestra una región más ordenada consecuencia de la nueva distribución de velocidades antes comentada. La zona caliente adyacente al muro siempre es más extensa que la adyacente al cristal debido a la mayor capacidad térmica del muro.

Para relaciones de aspecto pequeñas podemos ver, Figura 7.26, como el campo de temperaturas se hace cada vez más homogéneo llegando a igualar las temperaturas de muro y cristal.

Un indicador del desarrollo del flujo turbulento en la chimenea solar es la distribución de la variable turbulenta k , como ya se dijo en la anterior sección. A medida que aumenta el parámetro b/L esta variable va aumentando considerablemente su valor, como se puede apreciar en las siguientes figuras, sobre todo en la región cercana a la sección de salida. Este hecho muestra que la transición a la turbulencia puede ser más rápida con la variación de los parámetros geométricos manteniendo constante el número de Rayleigh, que con una subida del número de Rayleigh manteniendo invariable la geometría. Este fenómeno tiene lugar, probablemente, porque al mantener una anchura del canal de valor pequeño se limitan las fluctuaciones de las variables fluidas y con esto el desarrollo de la turbulencia.

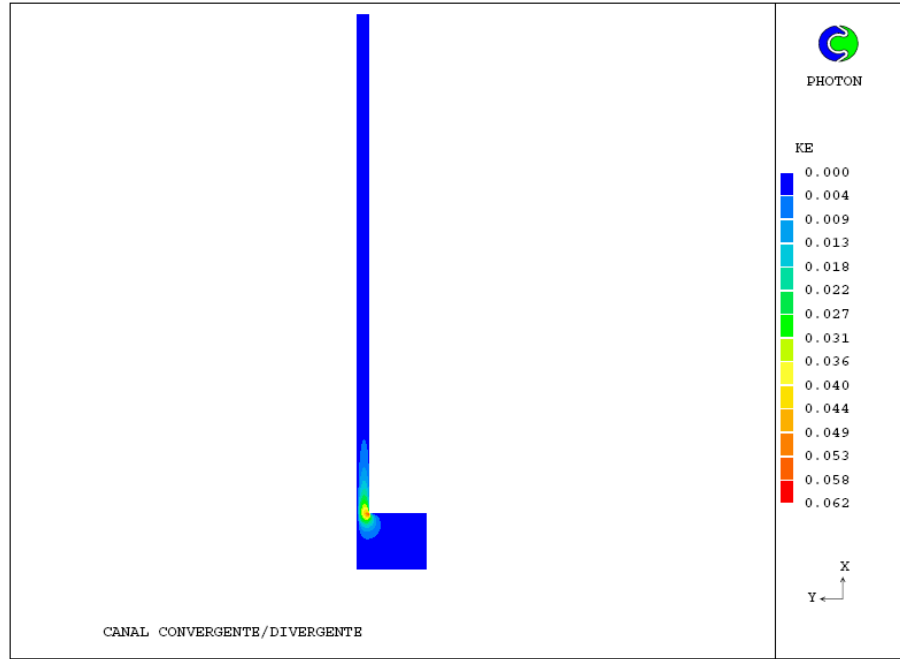


Figura 7.29. Distribución de la variable turbulenta k en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{13} y relación de aspecto b/L igual a 0.02.

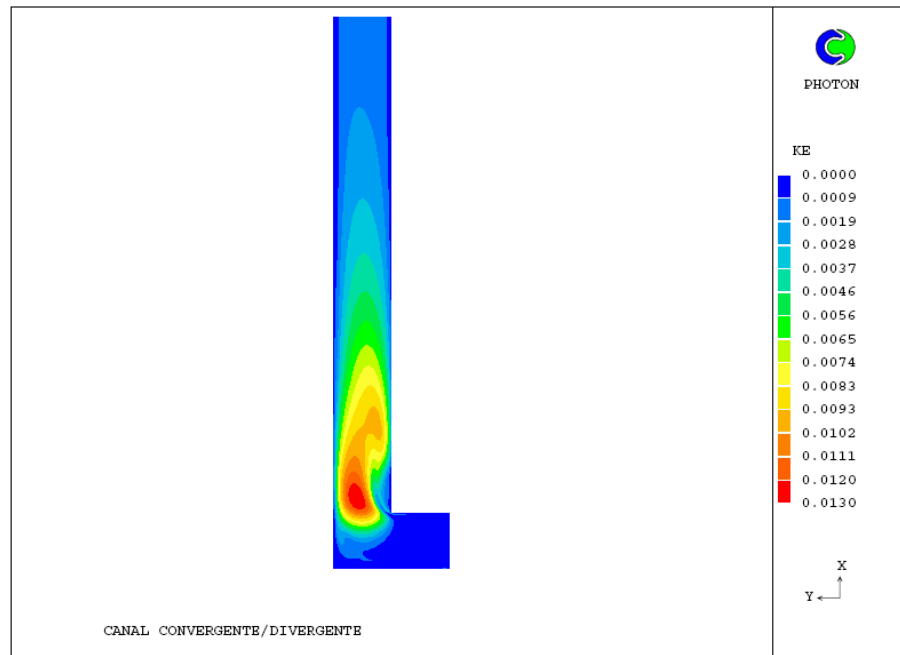


Figura 7.30. Distribución de la variable turbulenta k en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{13} y relación de aspecto b/L igual a 0.1.

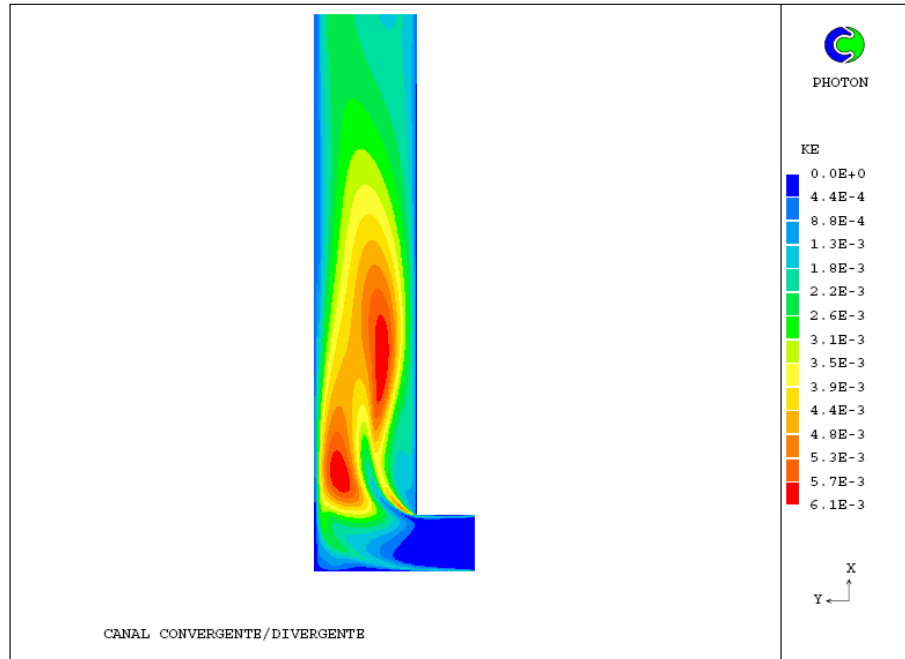


Figura 7.31. Distribución de la variable turbulenta k en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{13} y relación de aspecto b/L igual a 0.175.

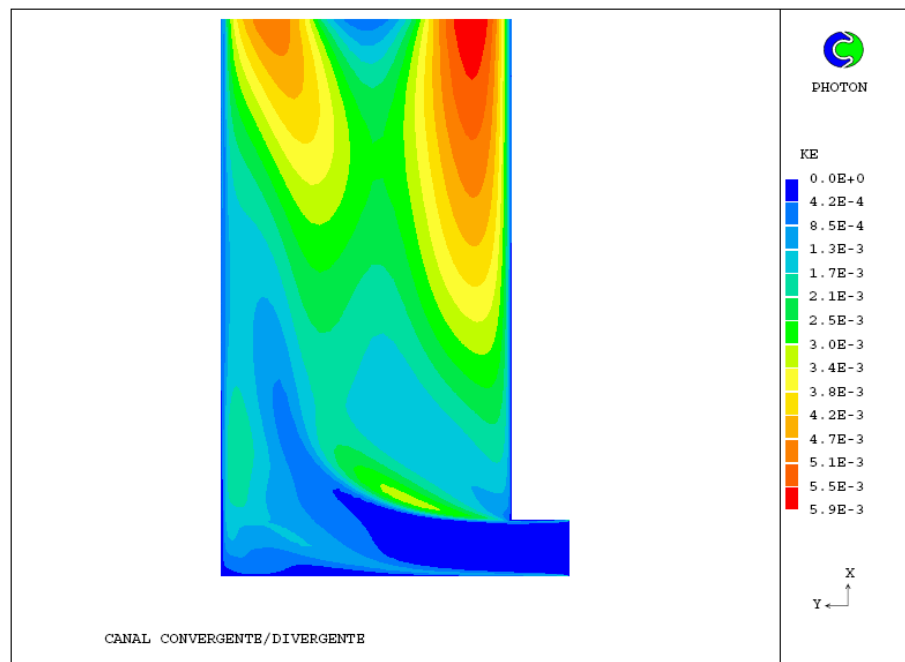


Figura 7.32. Distribución de la variable turbulenta k en una chimenea solar con condición de flujo de calor simétrico en sus paredes verticales, un número de Rayleigh de 10^{13} y relación de aspecto b/L igual a 0.5.

Por último la variable ω muestra una distribución muy similar a la presentada en la sección anterior, independientemente de la variación de la relación de aspecto geométrica de la chimenea.

7.4 Chimenea solar con condiciones isoterma - isoterma en sus paredes verticales

Hasta esta sección la configuración turbulenta estudiada ha sido la de flujo de calor simétrico en las paredes verticales, puesto que de alguna manera podía simular de modo más fiable la situación real de una chimenea solar. Tras ver el comportamiento tanto del número de Nusselt como del flujo másico adimensional y las particularidades que presenta, se ha decidido abordar también la condición de calentamiento isoterma, igual que se hizo en las simulaciones laminares con el ánimo de comparar los comportamientos.

Por tanto, la última configuración estudiada en flujo turbulento será la que presenta unas condiciones de contorno de temperatura constante en sus paredes verticales, siendo, como lo ha sido en todos los casos anteriores, las demás paredes de la chimenea adiabáticas.

7.4.1 Optimización geométrica

Se desarrollaron simulaciones numéricas para números de Rayleigh de 10^8 , $5 \cdot 10^{10}$ y 10^{12} . Las representaciones gráficas de los resultados obtenidos en estas simulaciones, número de Nusselt en muro y pared de cristal, así como el flujo másico adimensional, se muestran a continuación.

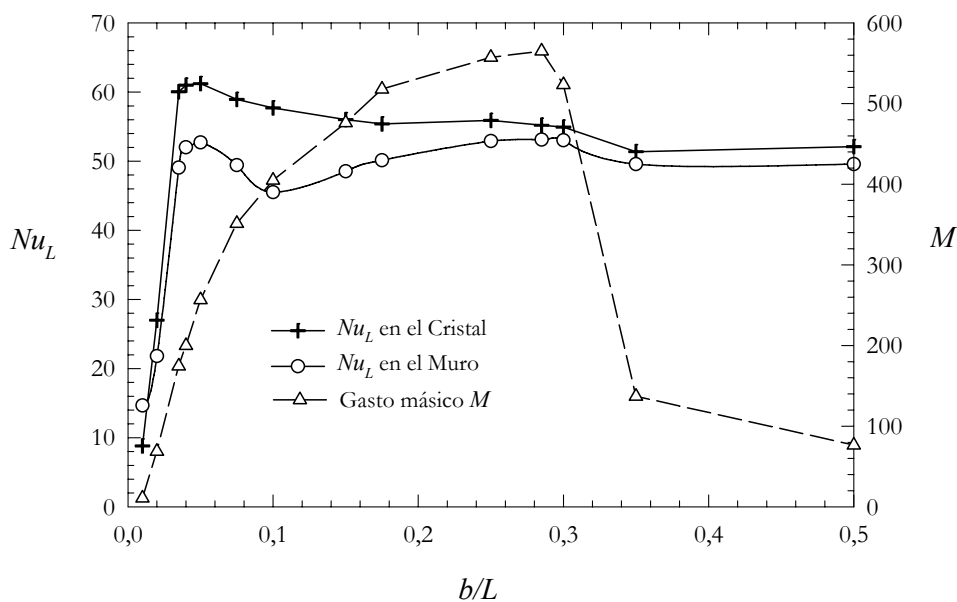


Figura 7.33. Representación del número de Nusselt tanto en el muro como en el cristal y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto b/L para $Ra_L = 10^8$ en flujo turbulento.

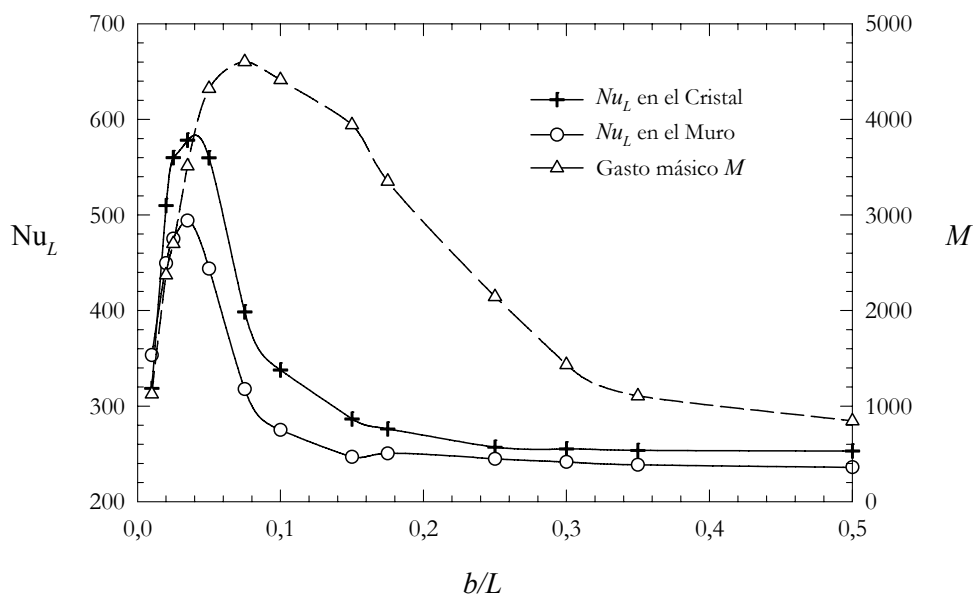


Figura 7.34. Representación del número de Nusselt tanto en el muro como en el cristal y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto b/L para $Ra_L = 5 \cdot 10^{10}$ en flujo turbulento.

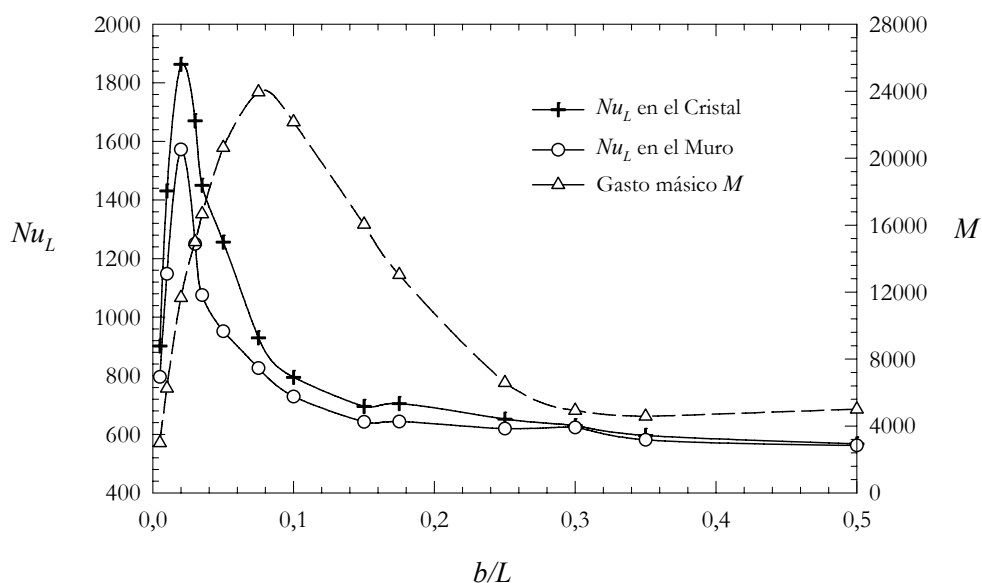


Figura 7.35. Representación del número de Nusselt tanto en el muro como en el cristal y el gasto másico adimensionalizado en función de la relación de aspecto b/L para $Ra_L = 10^{12}$ en flujo turbulento.

Como podemos ver, el comportamiento del flujo másico así como del número de Nusselt, tanto en el muro como en la pared de cristal, es semejante a como lo hacían en la misma configuración de chimenea solar para flujo laminar. Los respectivos máximos de estas representaciones se van desplazando a la izquierda a medida que aumenta el número de Rayleigh, siendo este fenómeno más acusado en flujo turbulento. Con respecto al flujo másico obtenemos aquí un comportamiento opuesto al flujo laminar en lo referente al desarrollo de la gráfica tras el alcance del máximo. Si en flujo laminar se empezaba con una caída suave que acababa siendo abrupta tras alcanzar cierto número de Rayleigh, en flujo turbulento el comportamiento es

inverso empezando con caídas pronunciadas para el más bajo de los números de Rayleigh y suavizándose esta caída al aumentar dicho número adimensional. Esto, como vimos anteriormente, representa una progresión de las zonas con flujo reverso más controlada, retrasándose el momento en el que la recirculación de la entrada, situada junto al muro, se une con el flujo reverso procedente de la sección de salida.

Se puede ver que tras analizar los resultados tanto laminares como turbulentos, la peculiar caída del flujo másico, se va suavizando al aumentar el número de Rayleigh tanto en la configuración que tratamos en esta sección como en la de flujo de calor simétrico en las paredes verticales que se estudió anteriormente.

No se ha conseguido correlacionar las relaciones de aspecto óptimas que maximizan el flujo másico, como tampoco ninguna de las que maximizan cualquiera de los números de Nusselt presentes en las gráficas. A continuación se representan estos óptimos junto con los obtenidos en flujo laminar, que maximizan el flujo másico, el número de Nusselt en el muro y el número de Nusselt en la pared de cristal respectivamente.

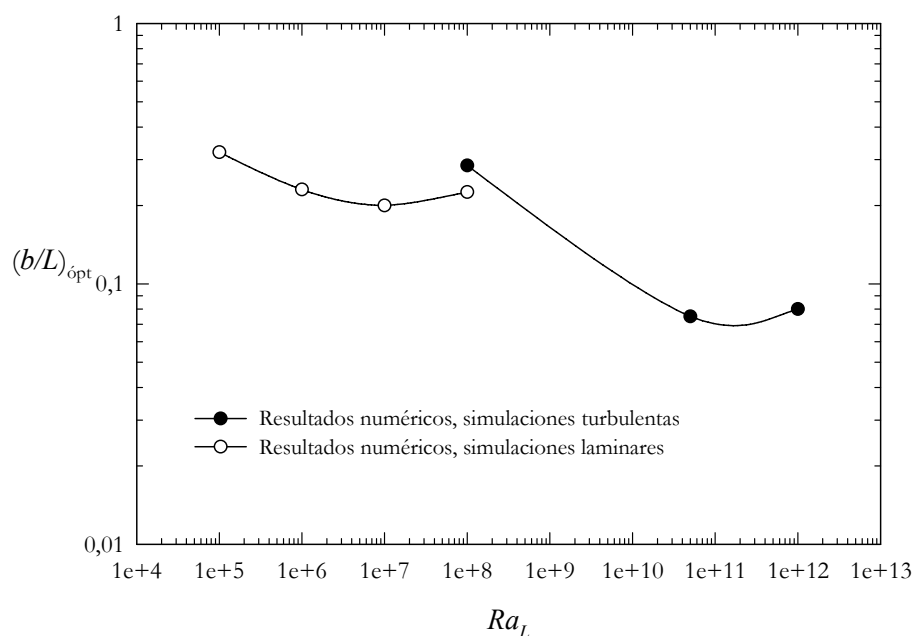


Figura 7.36. Representación de la relación de aspecto óptima que maximiza el flujo másico tanto para flujo turbulento como laminar.

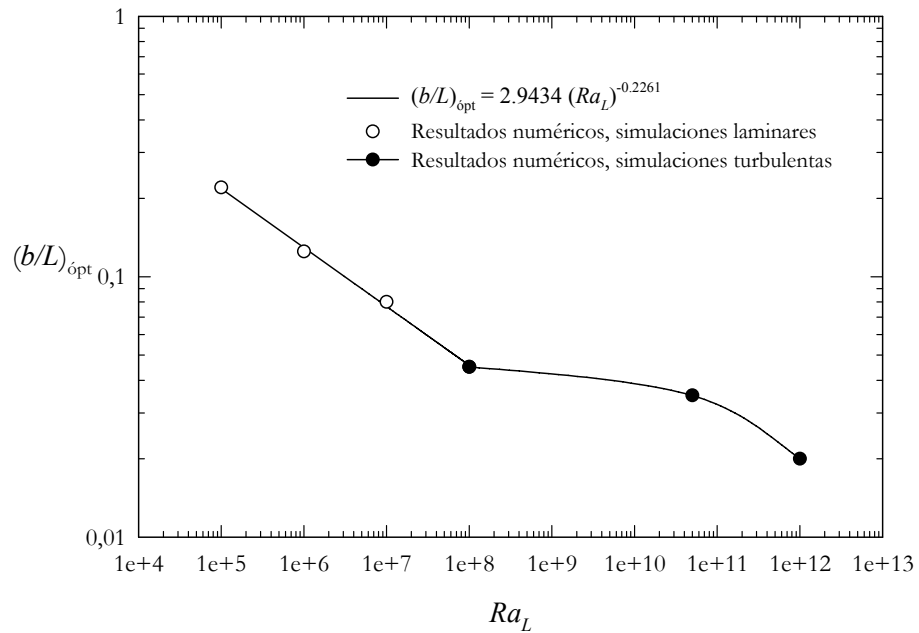


Figura 7.37. Representación de la relación de aspecto óptima que maximiza el número de Nusselt en el muro junto con las correlaciones obtenidas para los resultados numéricos, tanto para flujo turbulento como laminar.

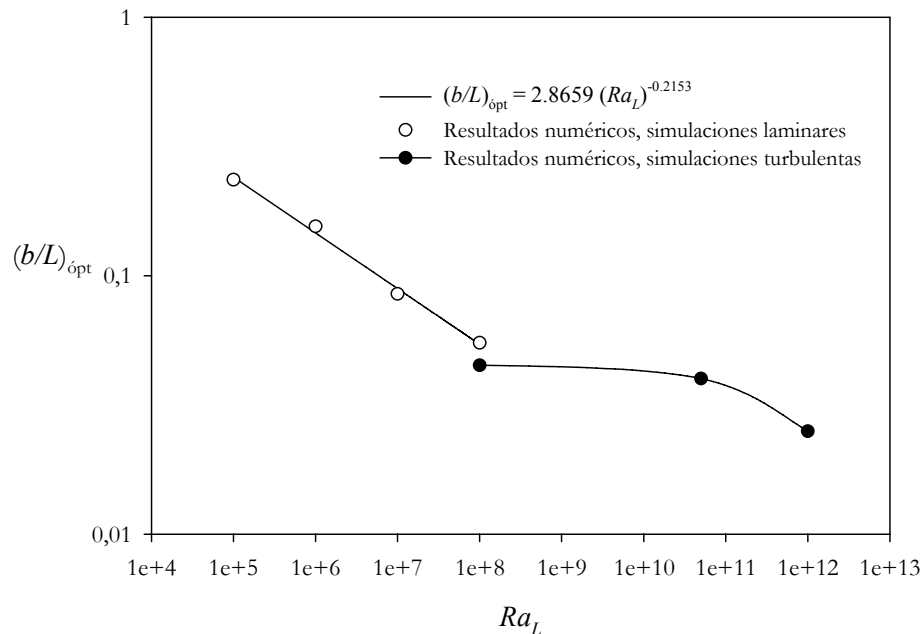


Figura 7.38. Representación de la relación de aspecto óptima que maximiza el número de Nusselt en la pared de cristal junto con las correlaciones obtenidas para los resultados numéricos, tanto para flujo turbulento como laminar.

Se puede observar en las tres gráficas que, a pesar de que algunos datos no eran correlacionables, en todas ellas existe una cierta continuidad, en sentido descendente, entre los resultados laminares y turbulentos. De esto se puede desprender que a medida que la turbulencia

se va desarrollando las relaciones de aspecto óptimas, en esta configuración de paredes isothermas, son de menor valor.

Como se puede ver se presenta un comportamiento muy distinto del que obtuvimos en la configuración de paredes con flujo de calor simétrico, cuyos óptimos que maximizaban el flujo másico no seguían ningún tipo de continuidad.

7.4.2 Zonas de flujo reverso

Como se ha explicado hasta el momento, el efecto del cambio en la configuración del flujo como consecuencia del desarrollo de las zonas de flujo reverso, que a su vez produce un comportamiento peculiar (caída brusca) del flujo másico inducido, ha aparecido en esta condición de calentamiento, como ocurrió para la condición de flujo de calor uniforme. Aunque no se presentan resultados en flujo laminar, se reproducen a continuación algunas figuras obtenidas con simulación laminar, y se comparan con otras con simulación turbulenta. La figura que se muestra a continuación ha sido obtenida por el Grupo de Investigación de Mecánica de Fluidos, en el desarrollo del Proyecto DPI2003-02719. Se muestra aquí para mostrar gráficamente las siguientes conclusiones finales:

- Para flujo laminar, y para un valor del número de Rayleigh suficientemente alto, han aparecido zonas de flujo reverso en la zona de entrada de los canales.
- Para flujo laminar, valores del número de Rayleigh mayores, y para un valor de la relación de aspecto suficientemente alto para cada valor del número de Rayleigh, han aparecido zonas de recirculación hacia el final del canal, que se han desarrollado hasta unirse con las zonas de recirculación de la entrada.
- La unión entre las zonas de recirculación de entrada y de salida ha motivado un cambio drástico en el aspecto cinemático del flujo, lo que ha llevado a producir un comportamiento del flujo másico inducido frente a la relación de aspecto muy diferente al del número de Nusselt medio frente a b/L .
- El efecto descrito, consistente en una caída brusca del flujo másico inducido para un cierto valor de la relación de aspecto, se ha reproducido igualmente en flujo turbulento. Sin embargo, en la simulación turbulenta, se produce un desplazamiento hacia mayores valores de b/L para los que aparece el efecto comentado, haciéndose este efecto más acusado a medida que aumenta el número de Rayleigh.
- Para flujo turbulento desarrollado, el desarrollo de las zonas de recirculación es más gradual, de modo que la caída del flujo másico inducido tiene lugar también de un modo más gradual, motivando de nuevo un cambio en el comportamiento del flujo másico versus b/L .

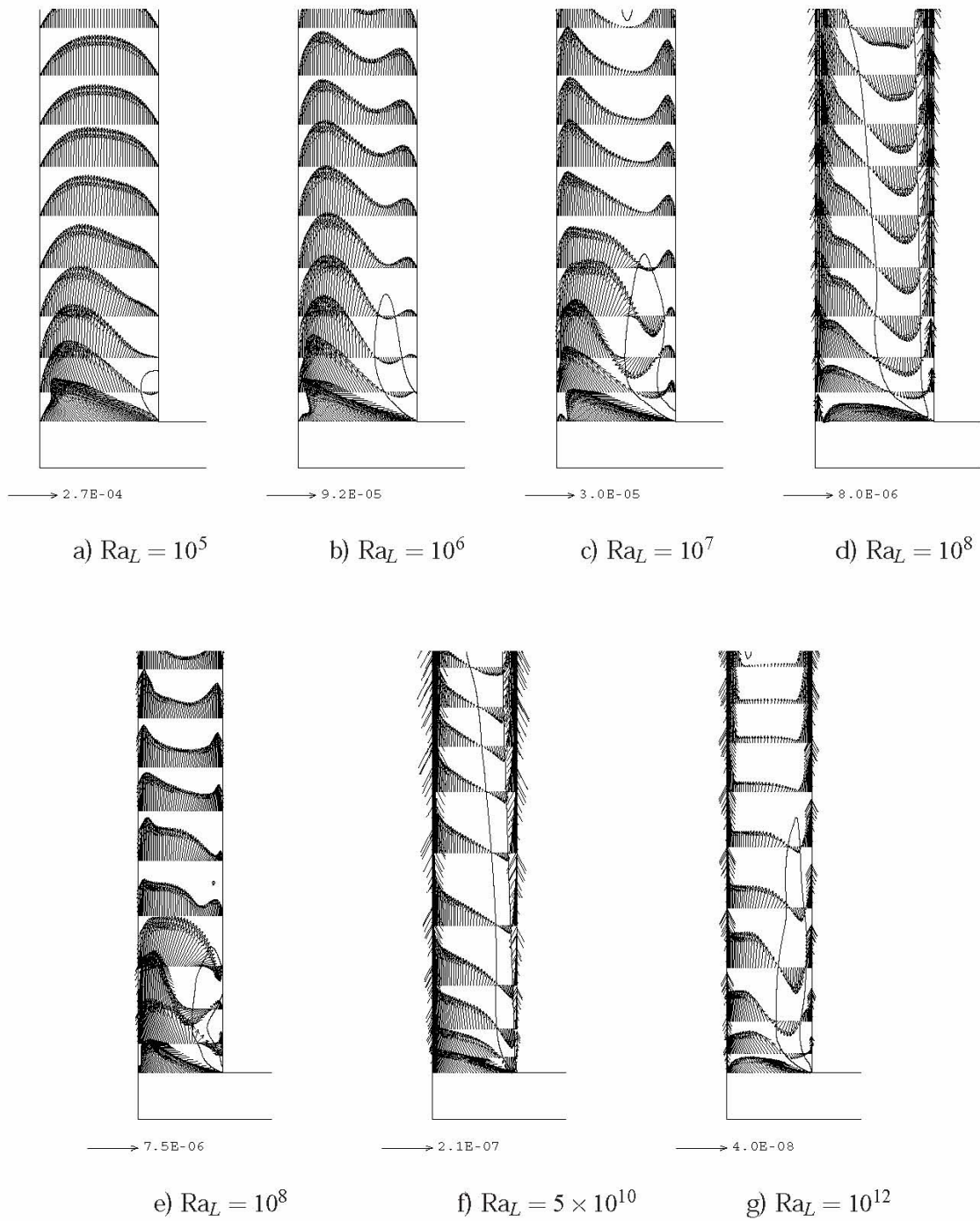


Figura 7.39. a)-d) Simulación laminar con $b/L = 0.25$. e)-g) Simulación turbulenta con $b/L = 0.175$. Con línea continua se ha indicado las zonas de flujo reverso en el espacio comprendido entre las placas verticales. Se ha indicado en cada caso el valor de $Ub/v(Gr_L)$.