

## **6 RESULTADOS**

En este estudio se desarrollaron dos casos para la propagación del aire caliente en el recinto, el primero consiste en entender lo que ocurre en el fenómeno cuando se modifica el valor de la energía que entrega la fuente de calor al sistema y así conocer como se afecta la temperatura y la velocidad del fluido en el recinto. El segundo caso consistió en modificar el valor del número de Froude para observar los efectos que ocasiona en el fenómeno estudiado. En este trabajo se observa el comportamiento del escalar pasivo que en investigaciones posteriores corresponderá al modelo de combustión de fracción de mezcla.

### **6.1 Efectos en la propagación del aire caliente en el recinto debidos al incremento de la energía que cede la fuente de calor**

La energía que cede la fuente de calor al sistema, propicia el movimiento del aire caliente del recinto. La fuente de calor al ceder energía al recinto modifica la temperatura del aire que se encuentra cercano a esta, la densidad del aire cambia como consecuencia de la transferencia de calor entre la fuente de calor y el aire, el aire caliente posee una densidad menor al aire frío, por lo cual el aire caliente asciende a la parte más alta del recinto.

Como existe una pared horizontal que divide al recinto en dos niveles, el aire no puede seguir ascendiendo, por lo cual se mueve bajo el techo del primer nivel. El aire llega a las paredes laterales del primer nivel, como no pueden atravesar las paredes, el aire circula hacia abajo hasta llegar casi al nivel del suelo, de igual forma el aire no puede atravesar el suelo, por lo cual el aire se traslada sobre el suelo hasta llegar cerca de la fuente del aire caliente. Hay que recordar que en la trayectoria mencionada el aire cede energía en forma de calor al recinto, por lo cual la temperatura de este aire caliente disminuye, y la de sus alrededores aumenta.

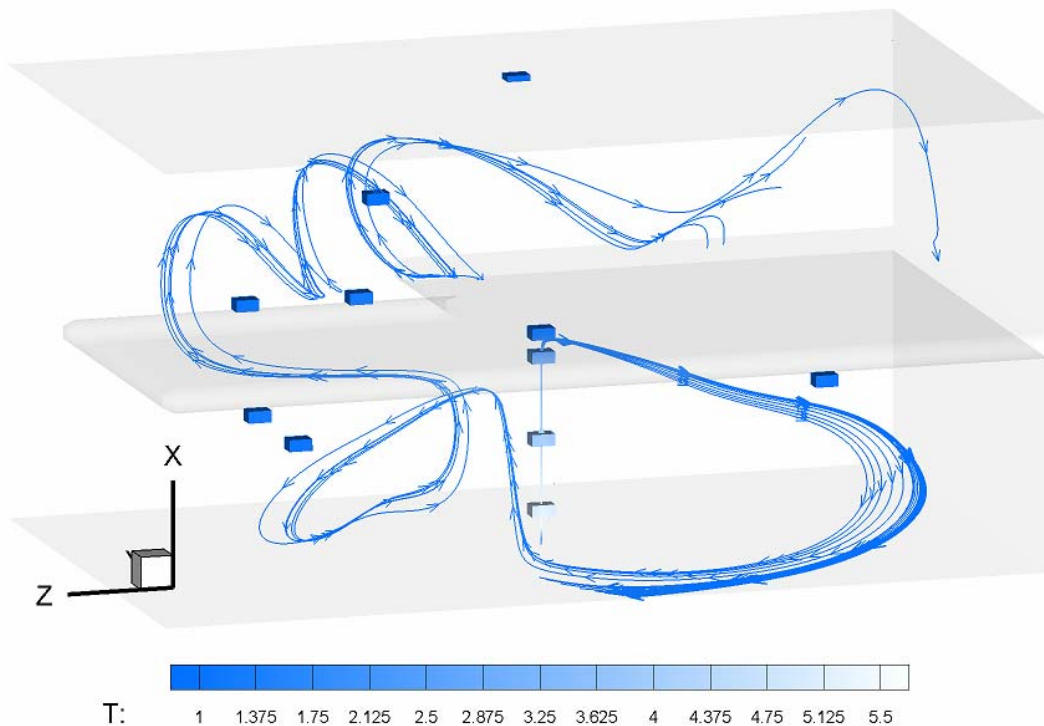


Figura 6.1.1: Visualización de la propagación del aire en el recinto con Energía cedida por la fuente  $Q= 900$ , un número de Froude  $F= 0.2$  en un paso de tiempo de 5

Cuando el aire caliente se aproxima a la fuente de calor, comienza a ascender nuevamente por el recinto, como el aire posee ahora una temperatura menor, su recirculación ocurre en un espacio menor al que tenía en un principio, pues el espacio que ocupó inicialmente es ocupado por aire más caliente. Sin embargo en esta nueva propagación el aire busca ascender nuevamente y la recirculación comienza a ser en forma radial a la fuente de calor, hasta llegar a la zona de acceso al segundo nivel. Cuando llega ahí, el aire caliente sigue ascendiendo hasta el techo del segundo nivel (figura 6.1.2).

La temperatura del aire depende de la energía que cede la fuente al recinto, lo cual provoca que la recirculación se comporte de forma diferente. En la figura 6.1.1 se puede apreciar la recirculación y propagación del aire caliente de forma clara, sin embargo al final de esta simulación se pueden observar los vórtices formados los cuales son más complejos conforme el tiempo transcurre (figura 6.1.2).

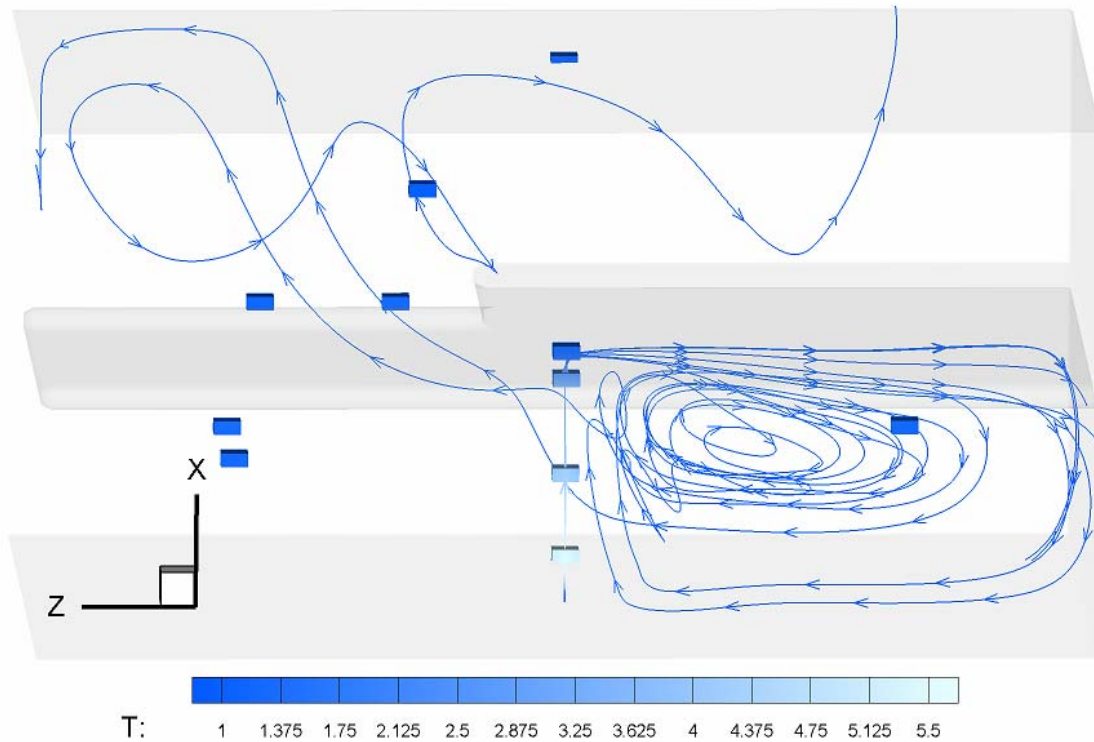


Figura 6.1.2: Visualización de la propagación del aire en el recinto con Energía cedida por la fuente  $Q= 900$ , un número de Froude  $F= 0.2$  en un paso de tiempo de 10

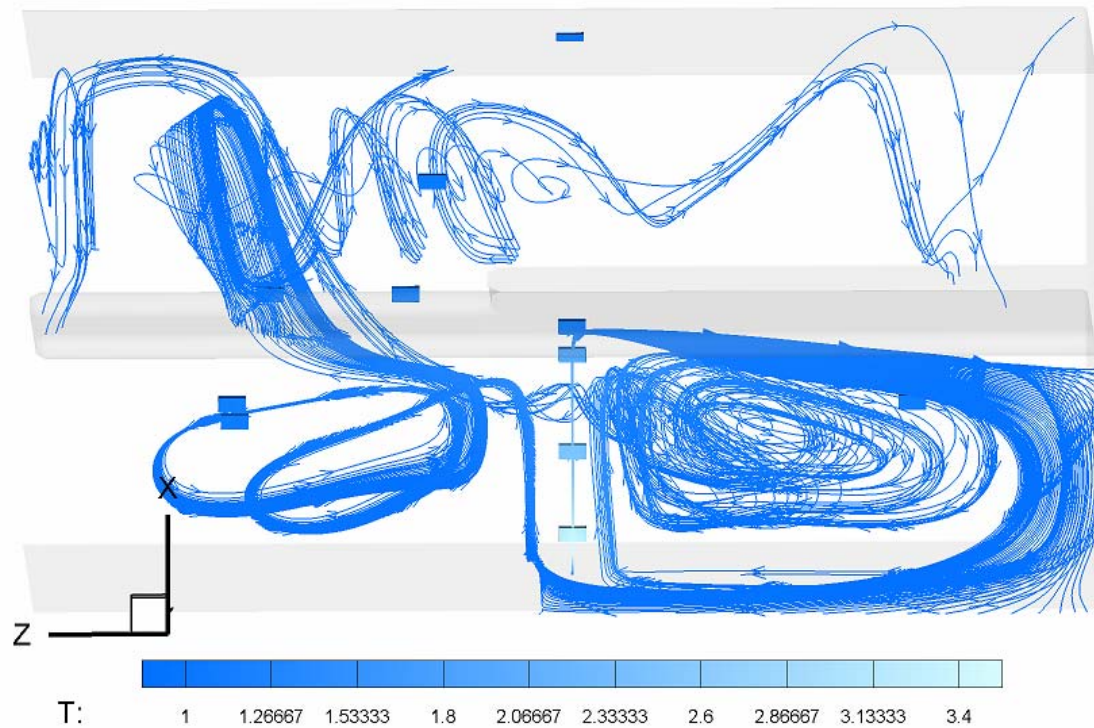


Figura 6.1.3: Visualización de la propagación del aire en el recinto con Energía cedida por la fuente  $Q= 300$ , un número de Froude  $F= 0.2$  en un paso de tiempo de 10

En la figura 6.1.2 se observa cómo la recirculación es más compleja, incluso es más difícil distinguir la recirculación de cada línea de trayectoria, debido a los vórtices forados en la simulación. La recirculación que se aprecia en dicha figura pertenece a dos líneas de trayectoria que llegan a la parte superior, lo cual nos da una idea de la complejidad del movimiento del fluido en el sistema.

En la figura 6.1.3 se aprecia la circulación del aire caliente dentro del recinto, además es posible observar que cuando la energía de entrega es mayor, visualizar el movimiento del fluido es más difícil debido a que los cambios en el sistema son más violentos lo cual es consecuencia de variar la energía que cede la fuente de calor al recinto.

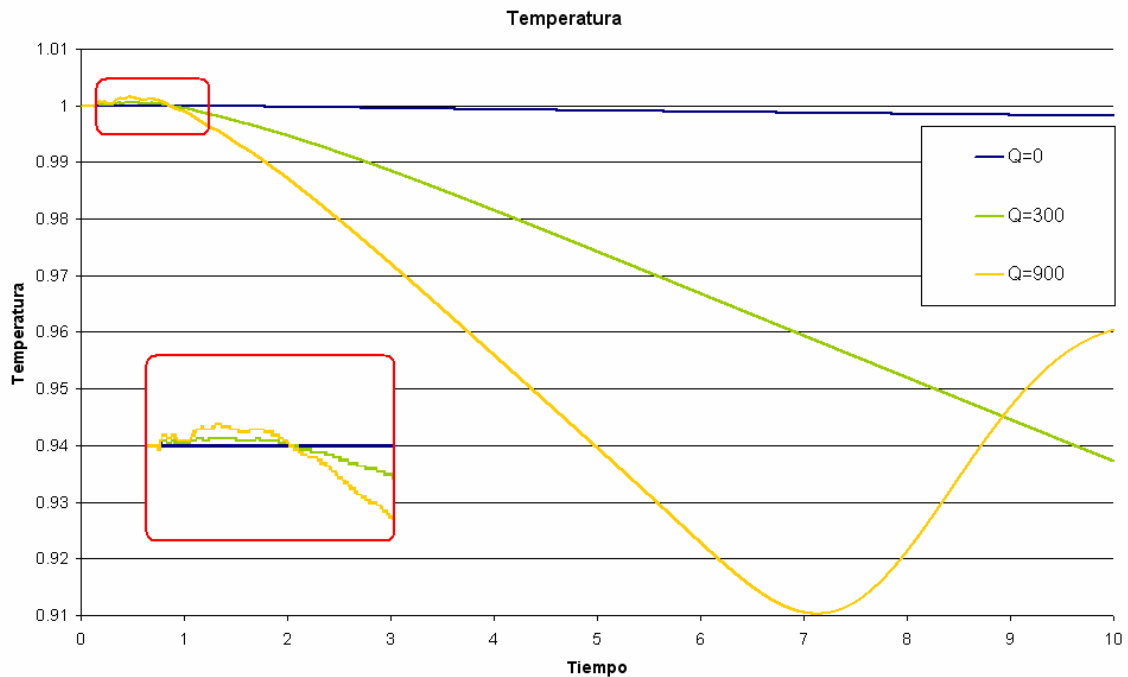
### **6.1.1 Efectos en la Temperatura del Recinto**

Las gráficas de comparación de resultados de las simulaciones realizadas a diferentes valores de energía de entrega de la fuente, muestra la existencia de fluctuaciones de temperatura al inicio de las simulaciones (gráfica 6.1.1). Dichas fluctuaciones son el resultado del tiempo de transición que tarda el sistema en estabilizarse, es decir el tiempo en el cual el sistema llega a una solución a partir de las condiciones establecidas como datos. Posteriormente las fluctuaciones disminuyen y convergen a una curva de temperatura alisada.

El significado físico de estas fluctuaciones son las ondas acústicas ocasionadas por el incremento de temperatura inicial de la parrilla. Como en un principio, las condiciones son cero (para la entrega de energía de la fuente) y el cambio al valor propuesto es inmediato, se produce un cambio de presión importante, lo cual se refleja en esas pequeñas oscilaciones. Finalmente el comportamiento del sistema llega a una estabilidad, en la cual las variaciones son mínimas. En la gráfica 6.1.1 se observan las fluctuaciones del fenómeno para distintas simulaciones y como se alisan las curvas de temperatura.

Las gráficas de comparación de temperatura de cada *punto de monitoreo* mostraron para todos los casos, que la curva de la temperatura del fluido posee

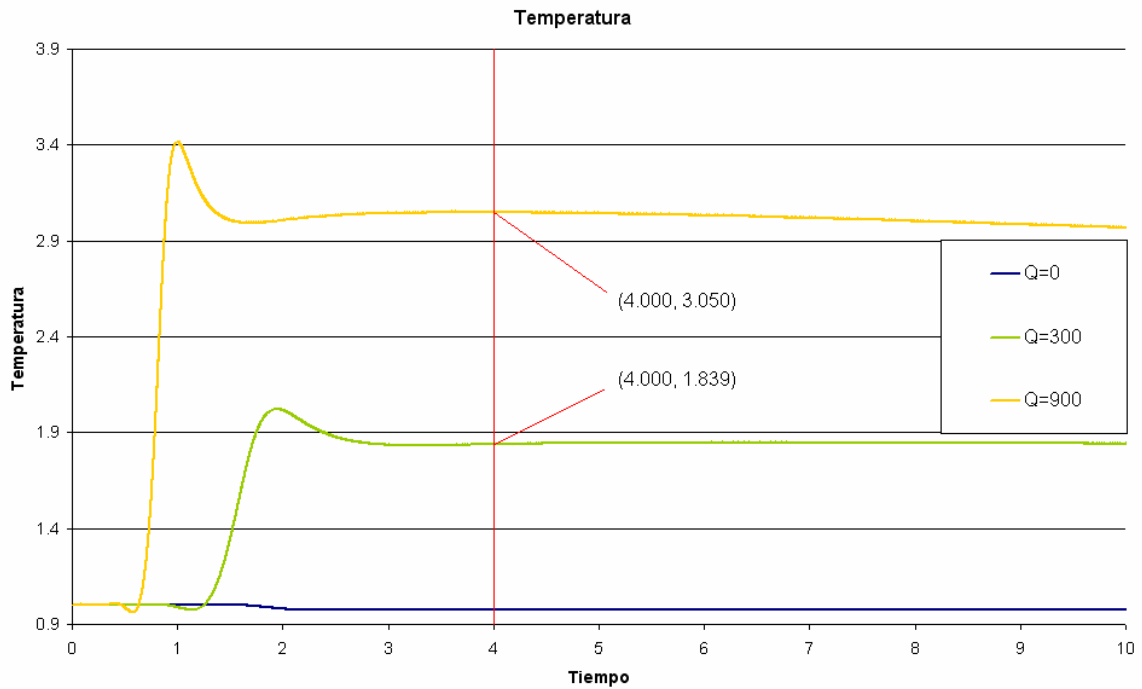
valores menores a la temperatura de referencia al inicio de cada simulación, posteriormente la temperatura comienza a incrementarse y finalmente sobrepasa el valor de referencia. Dicha disminución de la temperatura se debe a la expansión del aire caliente en el recinto, como resultado del comienzo de la propagación del aire caliente, lo cual se observa en las gráfica 6.1.1 y 6.1.2.



Gráfica 6.1.1: Temperatura vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q = 0$ ,  $Q = 300$  y  $Q = 900$ , con Froude  $F=0.2$  del punto de la zona 3 coordenadas (79, 39, 40)

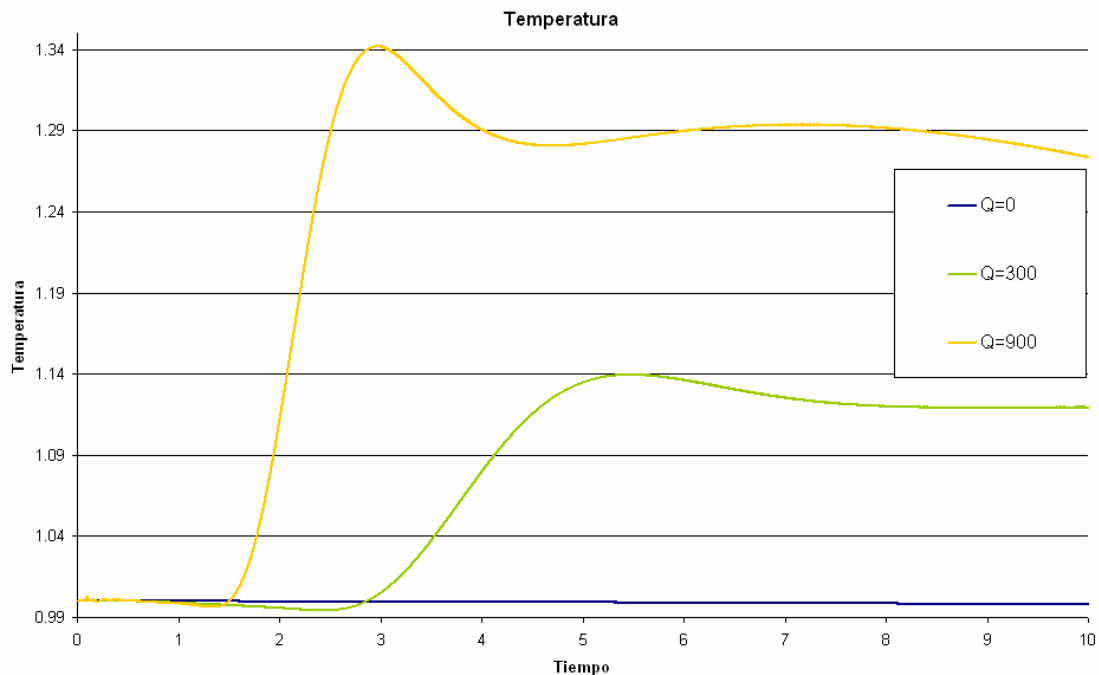
Cabe señalar que en el punto de monitoreo más lejano, es decir el que se encuentra en la parte superior del recinto (gráfica 6.1.1), se observó que el tiempo de simulación es demasiado corto para poder observar este efecto de forma clara, pero analizando las curvas de temperatura de dicha gráfica, podemos ver que en los últimos instantes de la simulación comienza a haber un aumento de temperatura, sin embargo no es posible observar el momento en el cual las curvas de temperatura sobrepasan el valor de la temperatura de referencia. Como consecuencia de su lejanía, en dicho punto se tienen las temperaturas más bajas del sistema.

En los resultados obtenidos de los *puntos de monitoreo*, se observó cómo el aumento de la energía entregada por la fuente provoca un incremento importante en la temperatura. Para la zona 1, se tiene un aumento entre una simulación y otra hasta de 60% para un mismo instante de tiempo (gráfica 6.1.2).



Gráfica 6.1.2: Temperatura vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q = 0$ ,  $Q = 300$  y  $Q = 900$ , con Froude  $F=0.2$  del punto de la zona 1 coordenadas (34, 30, 40)

Los valores, para los *puntos de monitoreo* localizados en la zona de acceso al segundo nivel (zona 2) aumentan hasta en un 30% en un mismo instante. Los incrementos alrededor de los puntos más distantes son más pequeños. Sin embargo las perturbaciones iniciales en la zona 1 son menores en el tiempo respecto a las otras dos zonas del recinto, además el aumento en la temperatura es más rápido y el sistema tarda menos en converger a una solución, es decir las variaciones iniciales disminuyen con el tiempo de simulación mas no en amplitud, como resultado del incremento de la energía de entrega de la fuente de calor, este comportamiento se debe a las razones mencionadas anteriormente. En las gráficas 6.1.2 y 6.1.3 se observan los detalles mencionados.



Gráfica 6.1.3: Temperatura vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q = 0$ ,  $Q = 300$  y  $Q = 900$ , con Froude  $F=0.2$  del punto de la zona 2 coordenadas (40, 47, 52)

En las gráficas de resultados, se encontraron otro tipo de fluctuaciones en las curvas de temperatura, localizadas después del valor máximo de la temperatura en las gráficas, sin embargo, a diferencia de las primeras, estas fluctuaciones son debidas a la recirculación del aire en el recinto (figura 6.1.4) es decir, como el aire caliente sube y el aire frío baja debido a la diferencia de densidades, en determinado momento el aire caliente que se encuentra en uno de los *puntos de monitoreo*, es desplazado por aire más frío, esto se desarrolla de forma continua, solo es posible ver este efecto en las zonas 2 y 3, porque las fluctuaciones son casi imperceptibles para la zona 1 debido a su cercanía con la fuente.

Un efecto importante es el ocurrido entre dos puntos de la zona 1, el que se encuentra más cerca del techo del primer nivel de coordenadas (38, 30, 40) y el punto de coordenadas (34, 30, 40), figura 6.1.5.

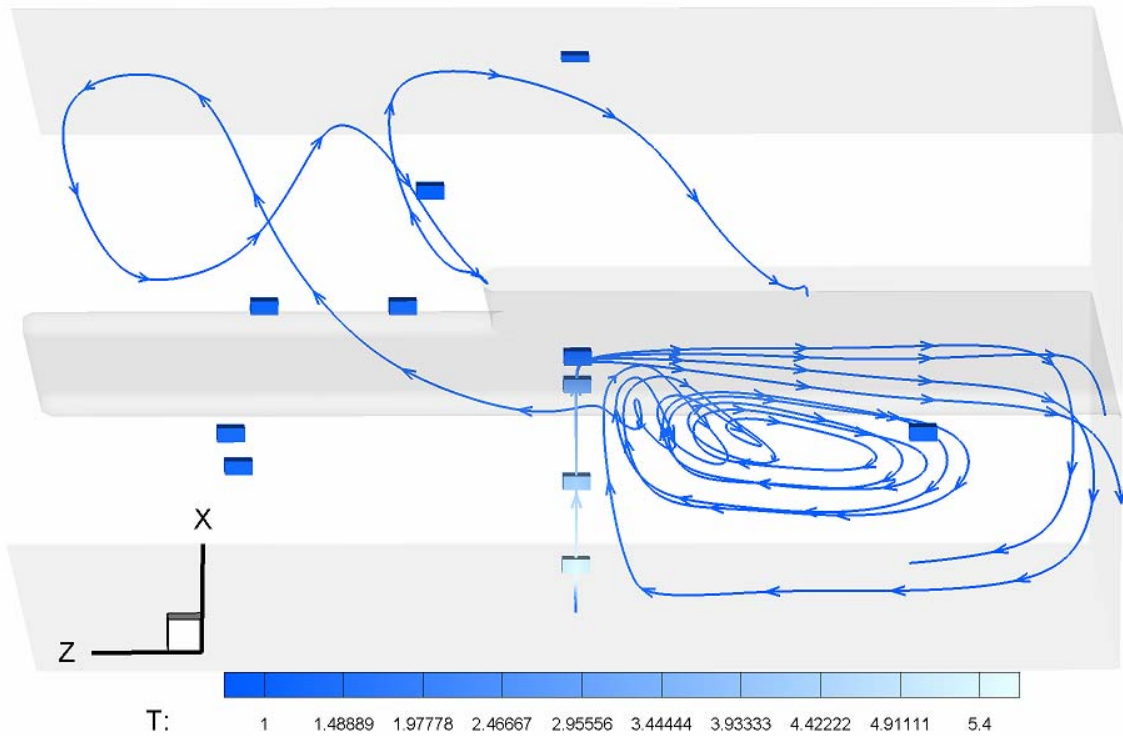


Figura 6.1.4: Visualización de líneas de Trayectoria para  $Q=900$  y Froude  $F=0.2$

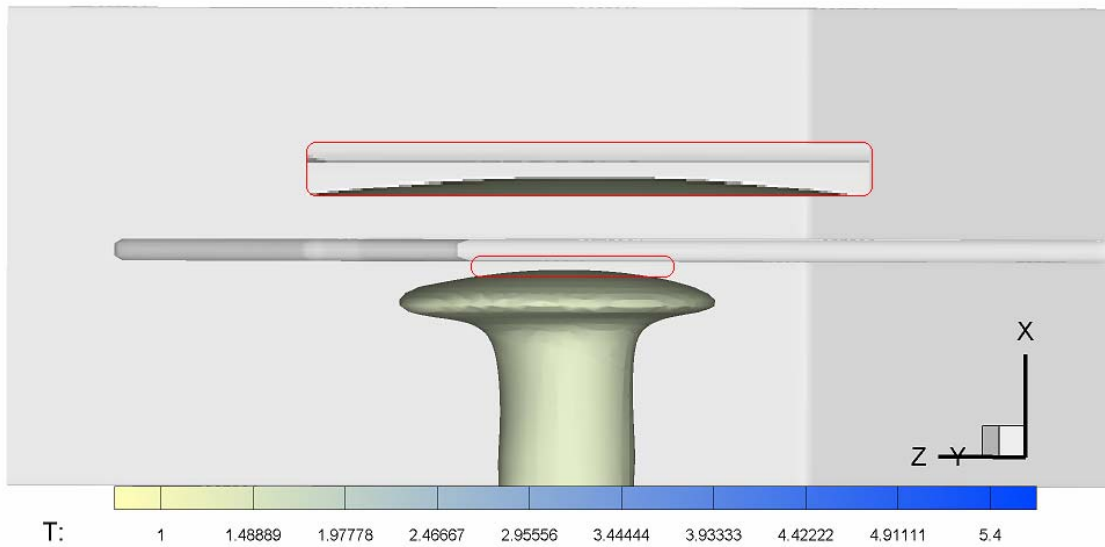


Figura 6.1.5: Zona de Transición para una simulación con  $Q=900$  y una  $T = 1.245$

Entre estos dos puntos mencionados existe una diferencia importante de temperaturas debido a las condiciones de frontera del techo del primer nivel, por lo cual hay una zona donde el valor de la temperatura de propagación se desploma hasta una temperatura cercana a la temperatura del techo.



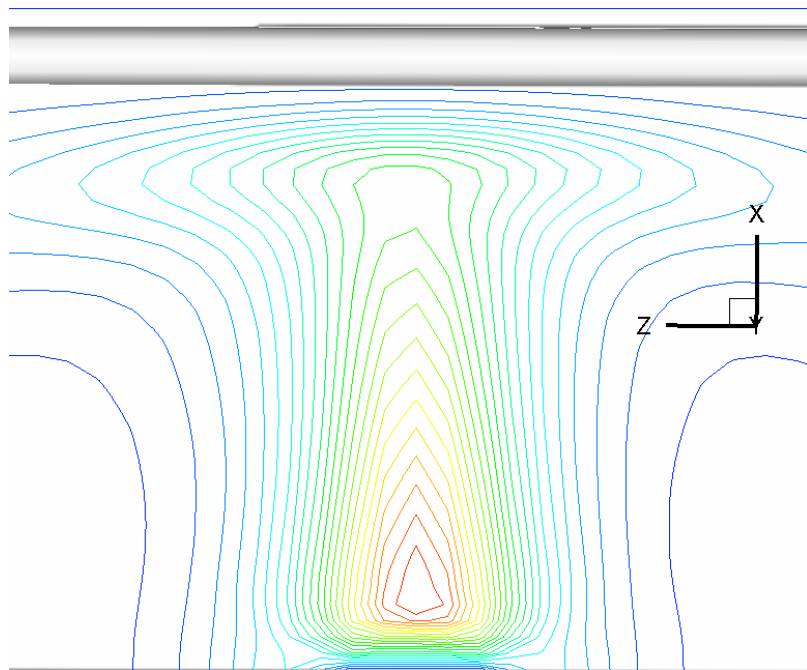


Figura 6.1.6: Líneas de contorno de la Zona de Transición para una simulación con  $Q=900$  y una  $T = 1.245$

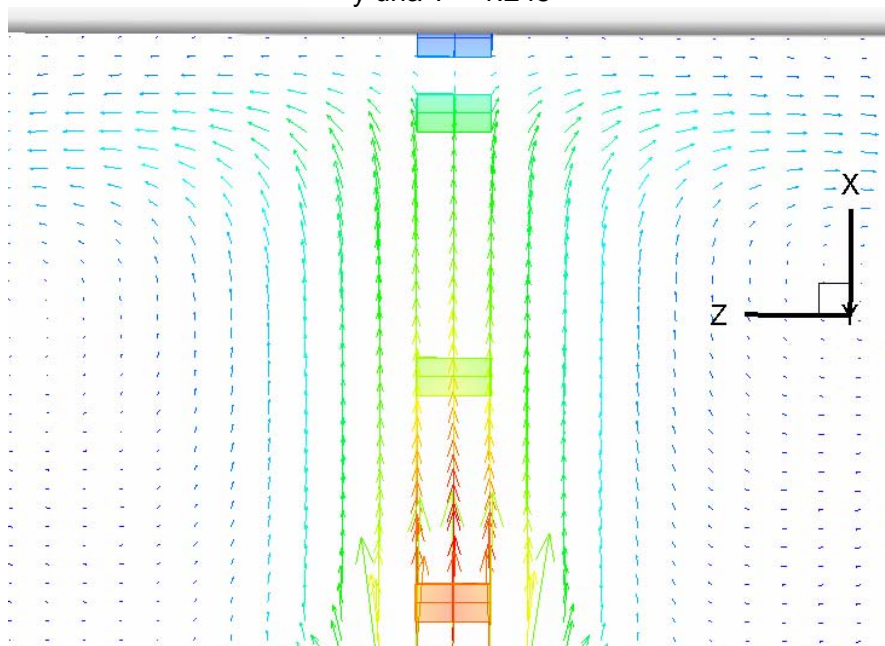
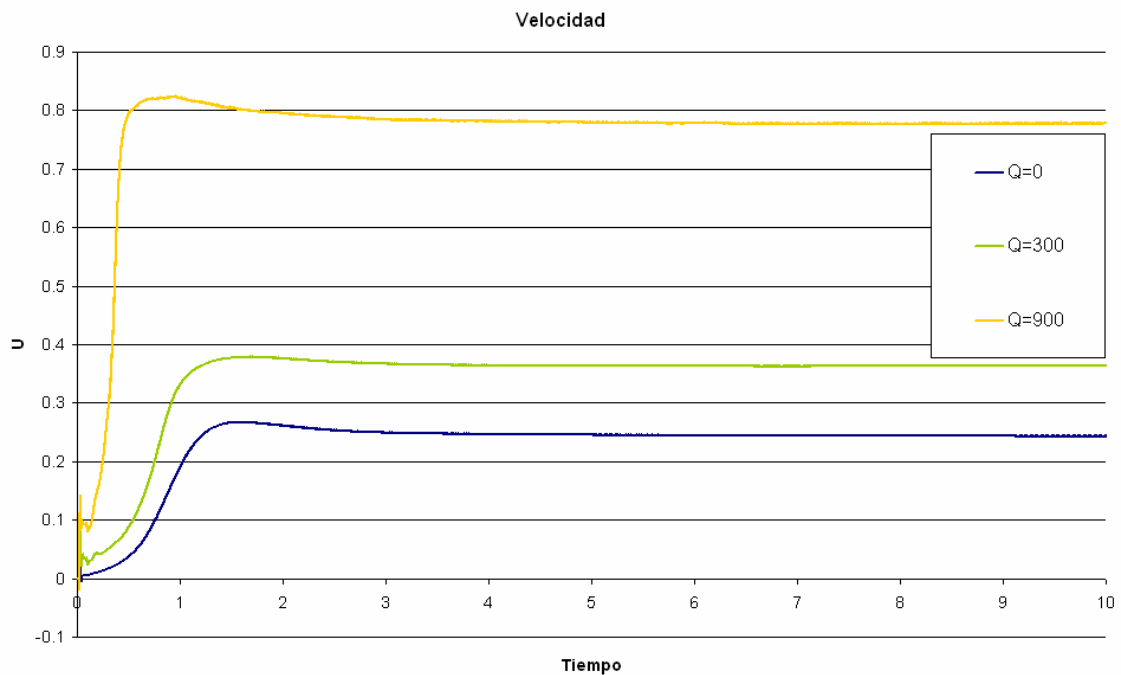


Figura 6.1.7: Vectores de Temperatura en la Zona de Transición para una simulación con  $Q=900$  y una  $T = 1.245$

En las figuras 6.1.6 y 6.1.7 se observa como afecta la condición de frontera del techo a la temperatura del fluido y a la propagación del aire caliente, ya que en dicha zona hay una transición abrupta en la temperatura.

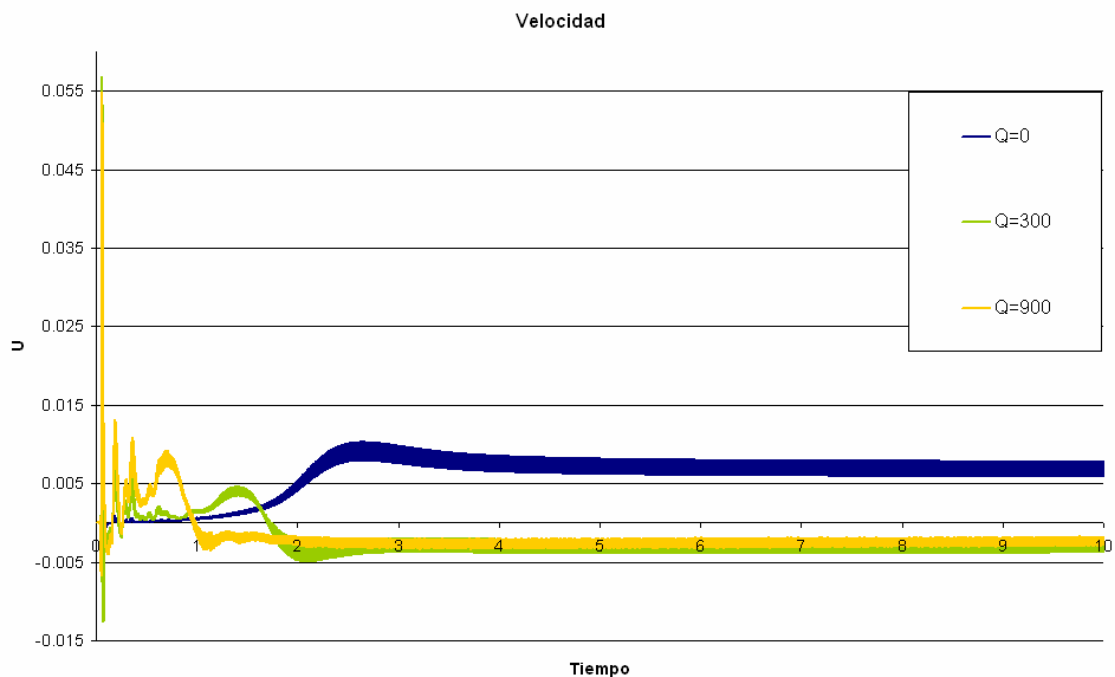
### 6.1.2 Efectos en la Velocidad del Fluido

Con base en los resultados obtenidos se observó de forma clara como en los Puntos de monitoreo las velocidades desarrolladas por el fluido son más grandes conforme aumenta el valor de la energía de entrega de la fuente al sistema, como se puede apreciar en la siguiente gráfica, en la cual se observa el incremento de la magnitud de la velocidad en un punto de la zona 1.



Gráfica 6.1.4: Velocidad del Fluido en la componente U vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de Q= 0, Q= 300 y Q= 900, con número de Froude  $F=0.2$  del punto de la zona 1 de coordenadas (20, 30, 40)

En las gráficas de la zona 1, se aprecian las velocidades más altas como resultado de la cercanía con la fuente de energía de los *puntos de monitoreo* de dicha zona. Además en esta zona se observa como las velocidades son más estables que en cualquier otra zona, de hecho el cambio de velocidad es mínimo a lo largo de las simulaciones, como se ve en la gráfica 6.1.4.



Gráfica 6.1.5: Velocidad del Fluido en la componente U vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 0$ ,  $Q= 300$  y  $Q= 900$ , con número de Froude  $F=0.2$  del punto de la zona 1 de coordenadas (38, 30,40)

En el punto más cercano al techo del primer nivel, se observó como la velocidad es menor en esta zona, debido a que la propagación del aire ocurre antes de llegar a la altura de ese punto, como este punto está muy cerca del techo, también se apreció la condición de no deslizamiento del fluido en este fenómeno, en la gráfica 6.1.5 se observa este efecto.

Las figuras 6.1.7, 6.1.8 y 6.1.9 son imágenes del fenómeno en las cuales se observan iso-superficies de velocidades, las cuales ayudan a poder visualizar las velocidades en las zonas próximas al techo del primer nivel, las cuales son cercanas a cero.

En las imágenes también se muestra como conforme se aproxima el valor de la velocidad a cero, las iso-superficies se extienden en el recinto, pero sigue manteniendo una distancia regular a la pared que corresponde al techo del primer nivel.

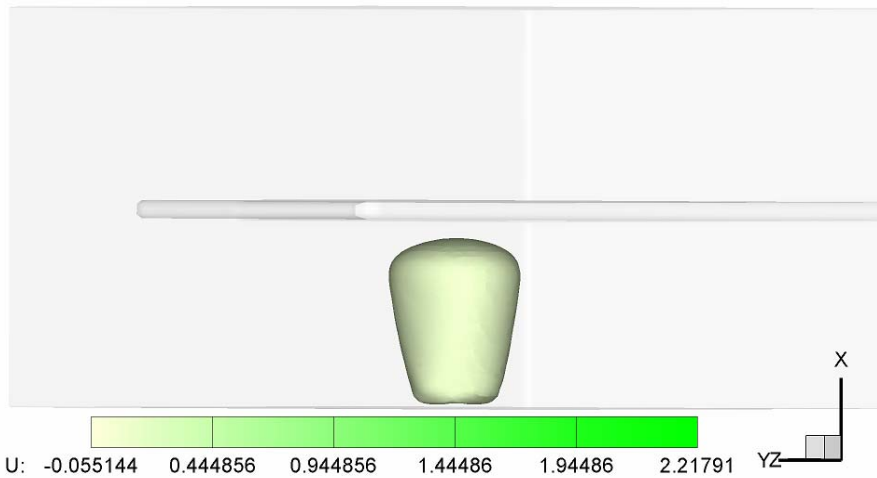


Figura 6.1.7: Visualización del fenómeno con  $Q=900$ , con una velocidad de 0.128, Froude  $F=0.2$ .

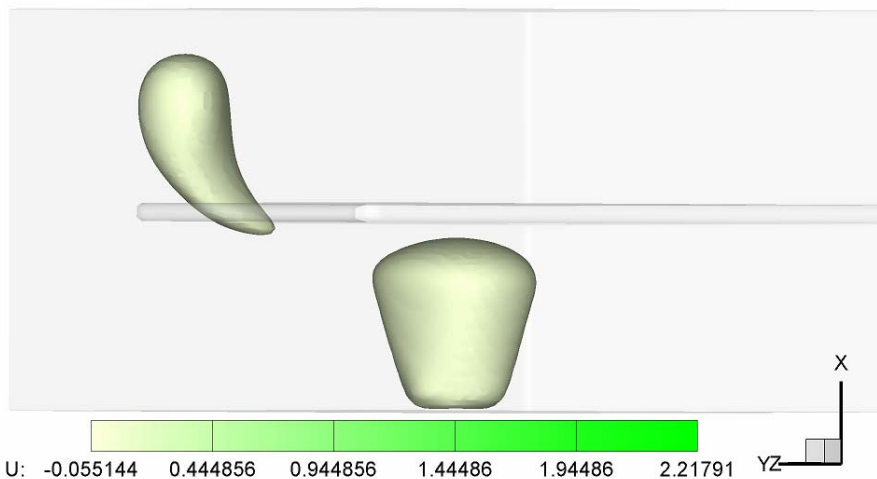


Figura 6.1.8: Visualización del fenómeno con  $Q=900$ , con una velocidad de 0.082, Froude  $F=0.2$ .

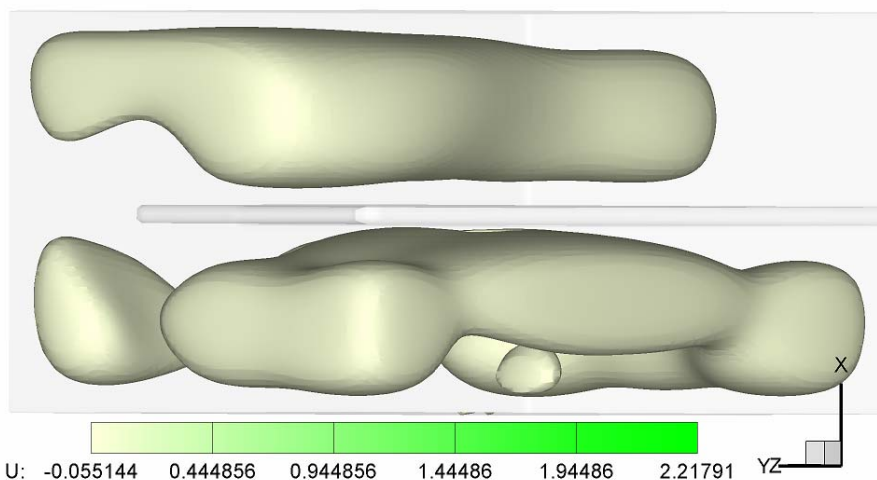
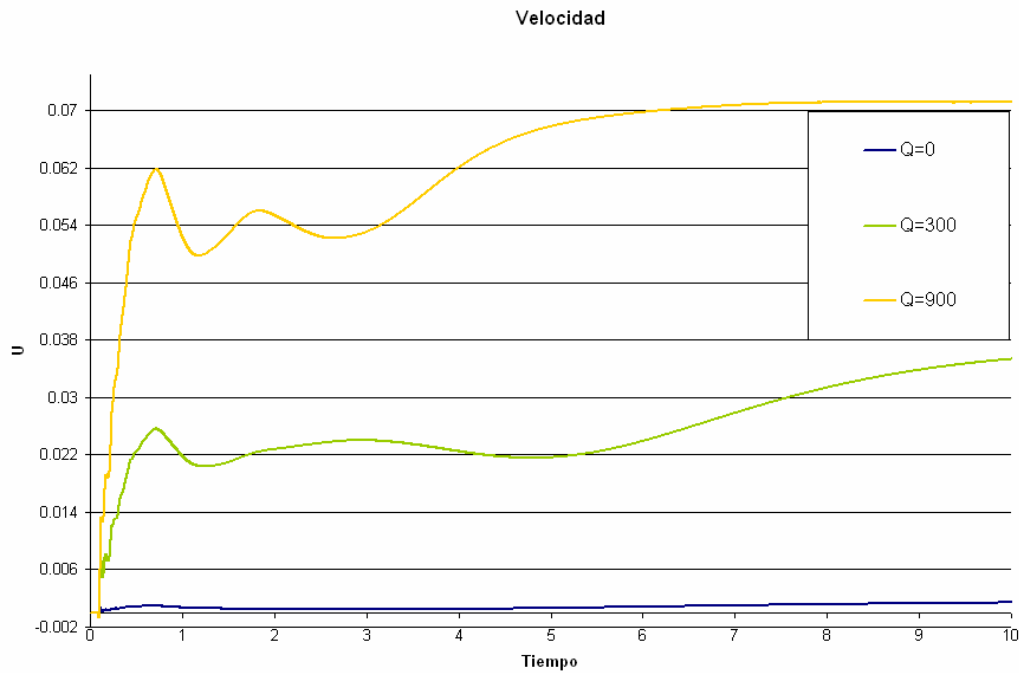


Figura 6.1.9: Visualización del fenómeno con  $Q=900$ , con una velocidad de -0.006, Froude  $F=0.2$ .

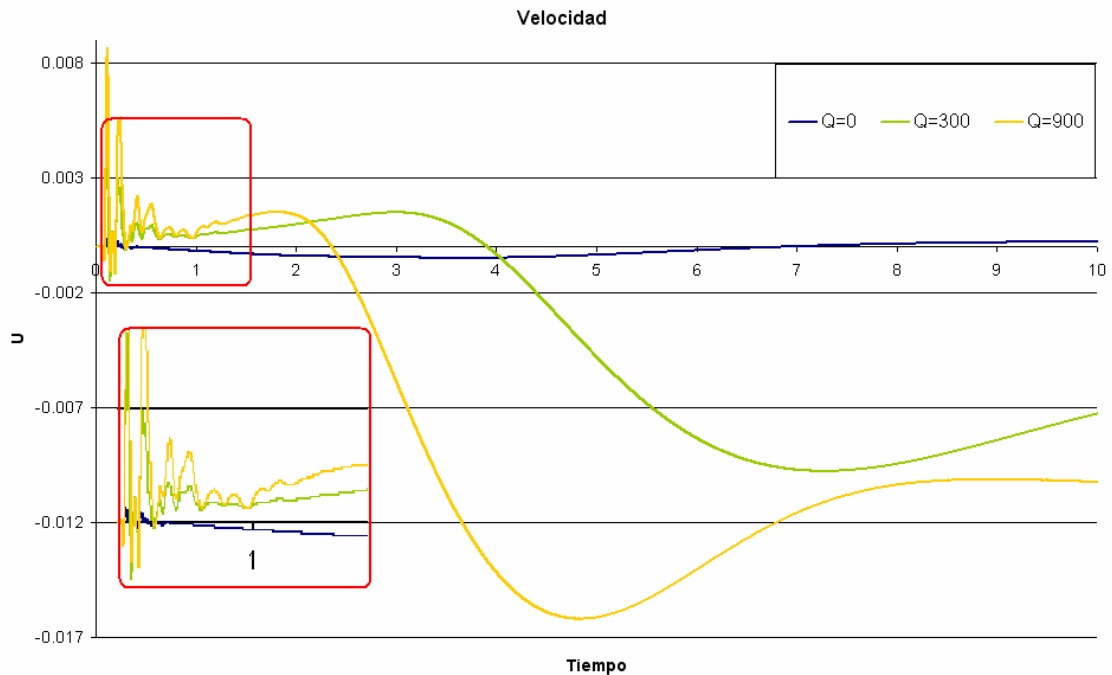
En las gráficas correspondientes a la zona 2 (gráfica 6.1.6) se pudo ver un comportamiento similar al de la zona 1, con magnitudes de velocidades más pequeños, sin embargo se observó que las curvas de velocidad son oscilantes a diferencia de la zona más cercana a la fuente en la cual las curvas de velocidad son alisadas.



Gráfica 6.1.6: Velocidad del Flujo en la componente U vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 0$ ,  $Q= 300$  y  $Q= 900$ , con número de Froude  $F=0.2$  del punto de la zona 2 de coordenadas (40, 47,62)

En la zona 3 se observaron velocidades negativas del fluido, dichas velocidades son el resultado de una recirculación hacia abajo del aire, debido a que no puede continuar ascendiendo por el techo del primer piso, sin embargo en la zona de acceso al segundo nivel (zona 2) las velocidades no disminuyen, sino que aumentan, dado que el aire caliente sigue ascendiendo.

En la zona 2 y 3 se pudo apreciar cómo las perturbaciones iniciales son similares a las de temperaturas ya analizadas anteriormente, sin embargo, las curvas de velocidad tardan más tiempo en llegar a una solución alisada (gráfica 6.1.7).

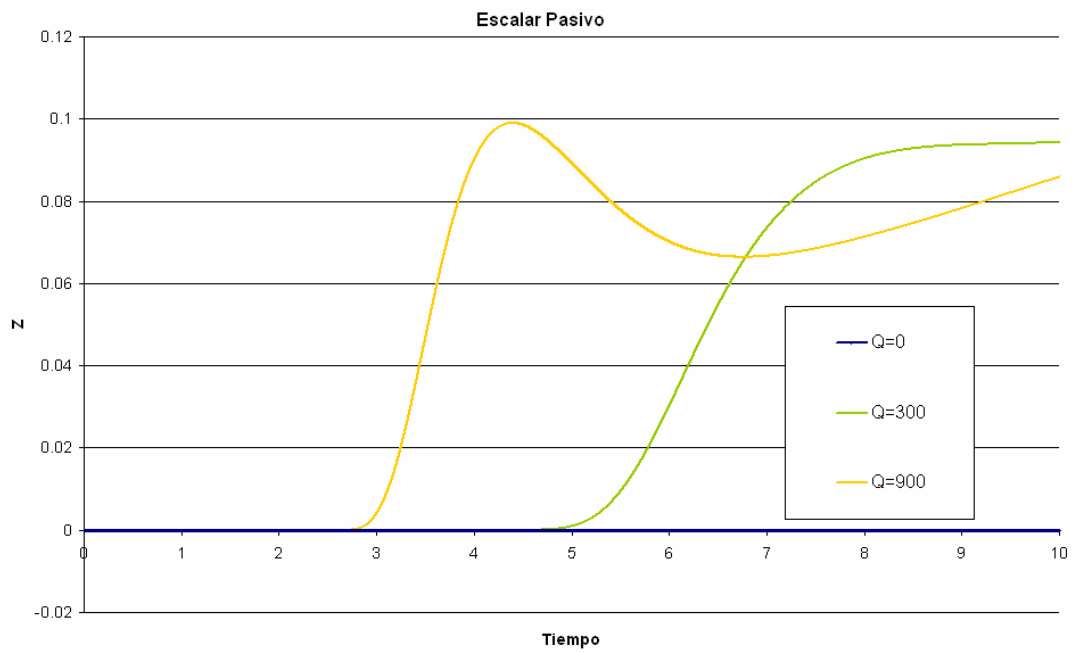


Gráfica 6.1.7: Velocidad del Fluido en la componente U vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 0$ ,  $Q= 300$  y  $Q= 900$ , con número de Froude  $F=0.2$  del punto de la zona 3 de coordenadas (27, 15, 65)

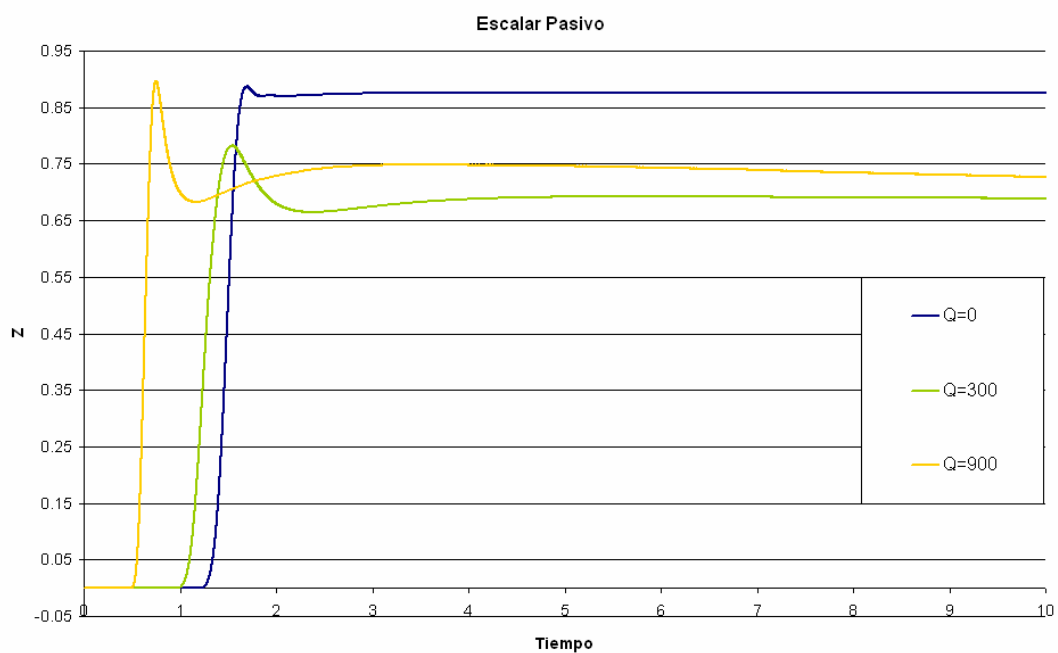
### 6.1.3 Efectos en el Modelo del Escalar Pasivo

Se observó en este estudio con base en las gráficas obtenidas que la cantidad de energía entregada por la fuente afecta la velocidad con la cual se propaga el aire caliente en el recinto, como era de esperarse, pues se puede ver que conforme la cantidad de energía de entrega de la fuente aumenta, el escalar pasivo llega a valores más grandes, además la propagación del aire caliente se lleva a cabo de forma más rápida, como se puede notar en la gráfica 6.1.8.

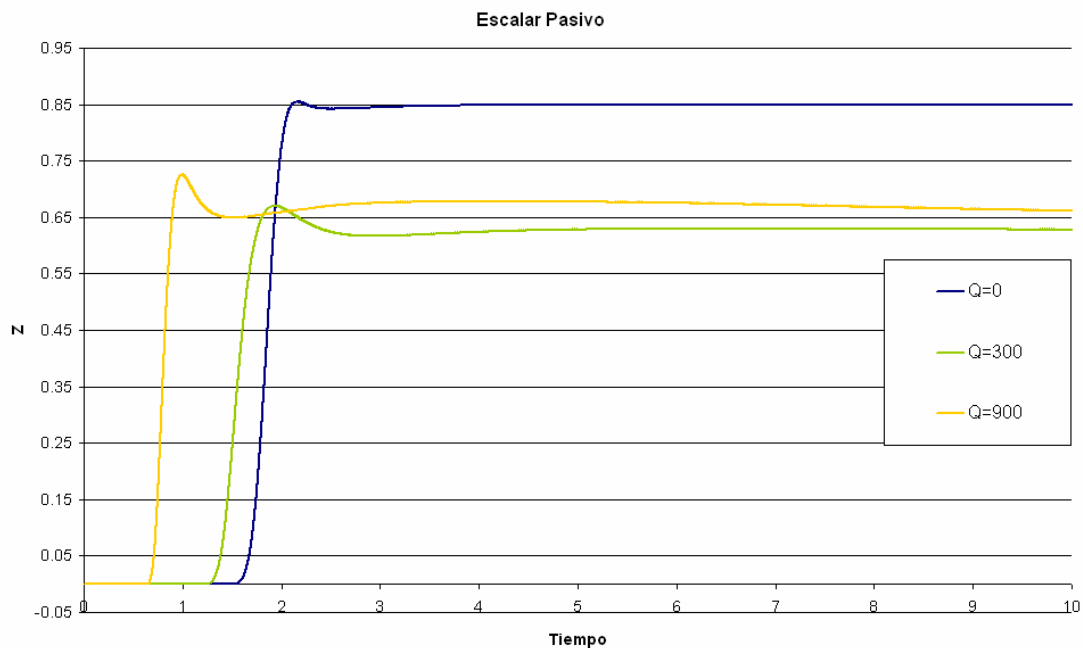
Un aspecto interesante es que cuando no hay entrega de energía por parte de la fuente en la zona 1 la magnitud del escalar pasivo se mantiene casi constante, de hecho está en un rango de valores desde 0.85 hasta 0.90, sin embargo, para las demás zonas el valor de este escalar pasivo posee un valor de cero. Para este estudio se puede notar que cuando la energía de entrega de la fuente es mayor, se alcanzan valores de Z mayores, con excepción de la zona uno, donde se mantiene constante la curva para  $Q= 0$  y supera a las otras dos curvas.



Gráfica 6.1.8: Velocidad del Flujo en la componente U vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 0$ ,  $Q= 300$  y  $Q= 900$ , con número de Froude  $F=0.2$  del punto de la zona 3 de coordenadas (40, 47, 62)



Gráfica 6.1.9: Velocidad del Flujo en la componente U vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 0$ ,  $Q= 300$  y  $Q= 900$ , con número de Froude  $F=0.2$  del punto de la zona 3 de coordenadas (20, 30, 40)



Gráfica 6.1.10: Velocidad del Fluido en la componente U vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q=0$ ,  $Q=300$  y  $Q=900$ , con número de Froude  $F=0.2$  del punto de la zona 3 de coordenadas (34, 20, 40)

Es posible notar que para este estudio el escalar pasivo posee un valor máximo seguido por un valor mínimo, posteriormente se llega a una curva casi constante, en la zona uno no es posible notarlo, pero en las otras dos zonas si, (gráfica 6.1.9 y gráfica 6.1.10).



#### 6.1.4 Notas del apartado

En esta parte del estudio se desarrolló un análisis detallado acerca de los efectos en la temperatura y la velocidad del fluido ocasionados como resultado de modificar la cantidad de energía que entrega la fuente de calor al recinto.

En esta sección se pudo encontrar como se afectó la temperatura, la velocidad del fluido y el modelo del escalar pasivo, con base en las gráficas obtenidas en los puntos de monitoreo, las líneas de trayectorias obtenidas, y también el uso de las líneas de contorno y las iso-superficies empleadas, lo cual facilitó la observación de los efectos ocasionados.

La temperatura del fluido fue la variable más afectada, ya que los cambios observados fueron muy evidentes. Se analizó el comportamiento de la temperatura del recinto mediante la comparación de lo que sucedió con el fluido cuando la fuente de calor entregó diferentes cantidades de energía al sistema.

La velocidad del fluido se vio afectada de menor forma, sin embargo, fue posible notar algunos cambios y observar su naturaleza. Cabe señalar que en este caso se tomó una componente de la velocidad para su graficación. La componente utilizada es la componente  $u$  ó  $u_1$  del vector de velocidad, que corresponde a la dirección vertical  $x$  del recinto cerrado por lo cual todas las gráficas e imágenes referidas a este análisis se basaron en dicha componente.

Se analizó el comportamiento del modelo del escalar pasivo, en el cual se pudo observar como se ve afectada la rapidez de la propagación del aire caliente debido al cambio de energía que entrega la fuente al recinto.

Pudiendo analizar los efectos obtenidos para las diferentes zonas del recinto, se apreciaron las similitudes o las diferencias para dichas zonas con base en los distintos resultados obtenidos, lo cual ayudo a dar el panorama general del comportamiento del fenómeno.

## 6.2 Efectos en la propagación del aire caliente en el recinto debidos a la variación del número de Froude

El número de Froude afecta la propagación del aire en el recinto debido a la relación que proporciona entre las fuerzas inerciales del fluido y las fuerzas gravitacionales. El fluido se comporta distinto dependiendo de la variación de este parámetro adimensional, a continuación se da una explicación acerca de la propagación del aire en el recinto cuando se varía el número de Froude. Hay que recordar que el número de Froude tomó valores de  $F=0.2$ ,  $F=0.02$  y  $F= 0.002$  con un valor fijo de  $Q=300$ .

Como se explicó en el apartado anterior, el aire se propaga de la misma forma, sin embargo, los vórtices que se generan en la propagación son diferentes cuando el número de Froude varía.

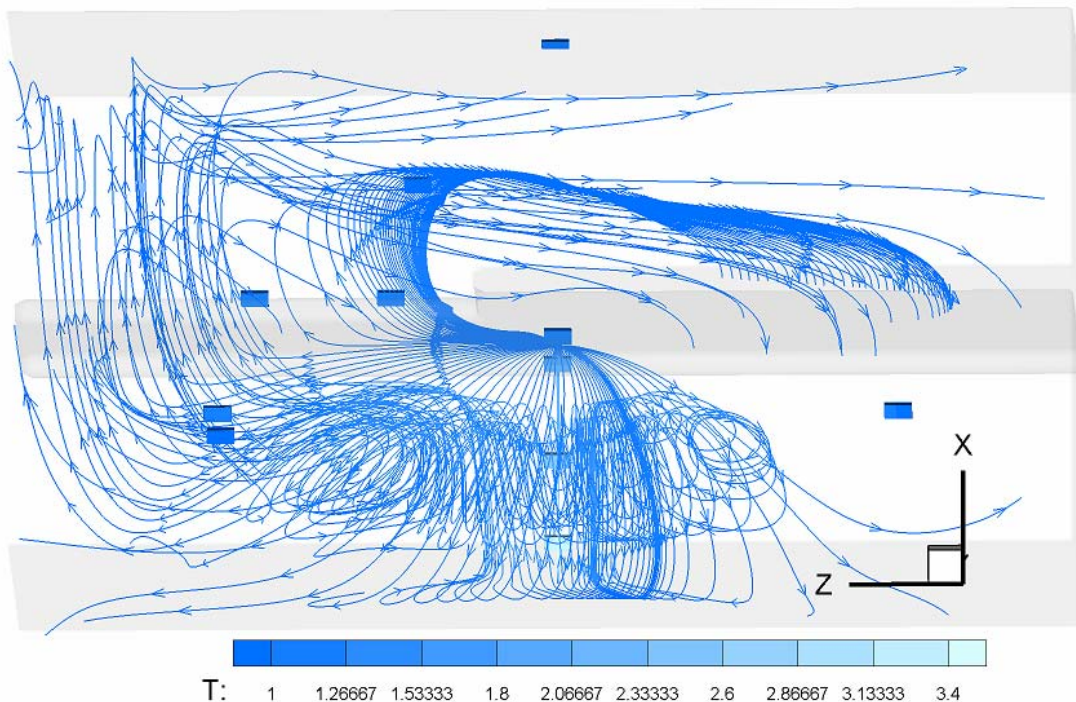


Figura 6.2.1: Visualización de la propagación del aire en el recinto con Energía cedida por la fuente  $Q= 300$ , un número de Froude  $F= 0.002$  en un paso de tiempo de 10

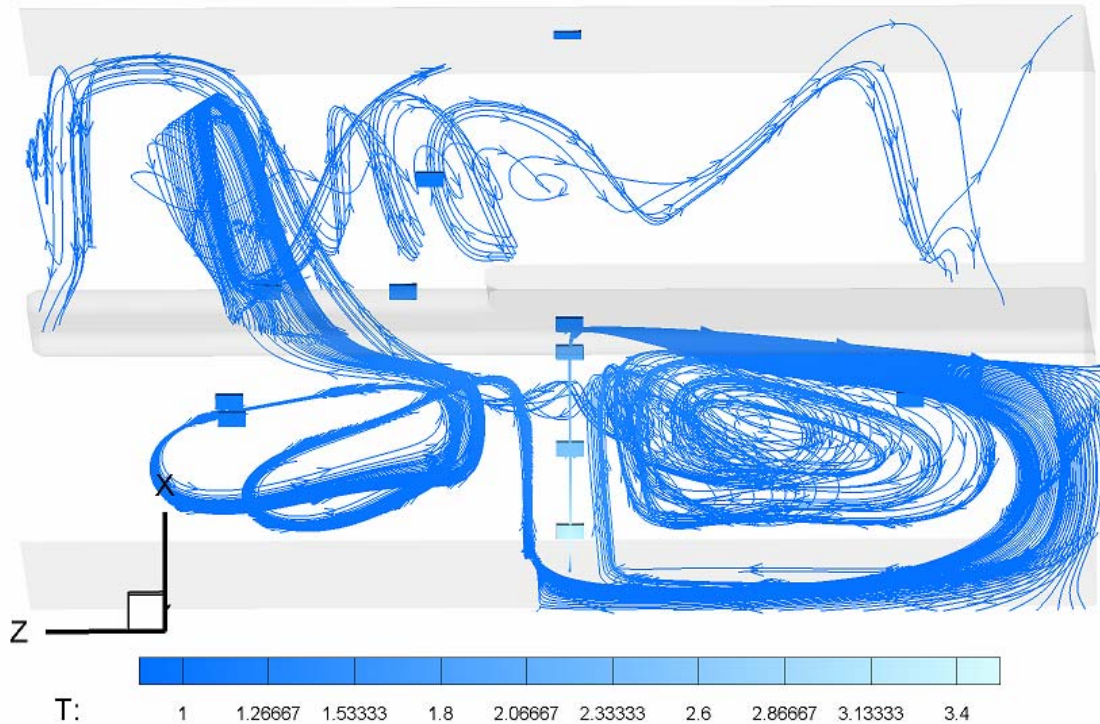


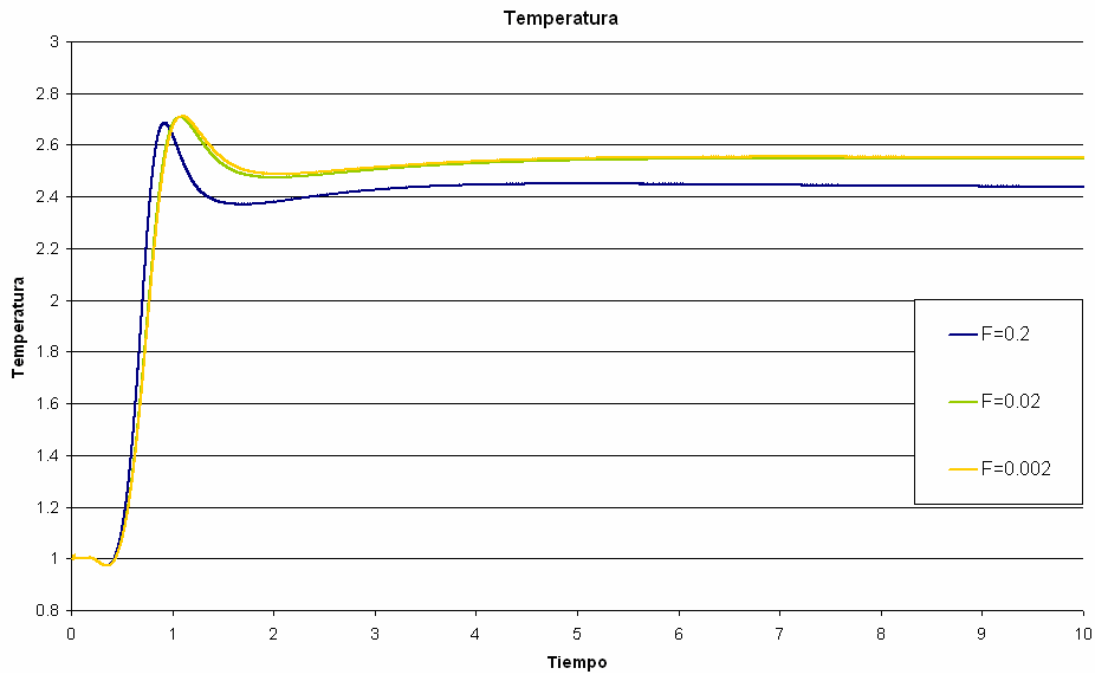
Figura 6.2.2: Visualización de la propagación del aire en el recinto con Energía cedida por la fuente  $Q= 300$ , un número de Froude  $F= 0.2$  en un paso de tiempo de 10

Un número de Froude pequeño nos indica que las fuerzas inerciales son mayores a la gravitación y por lo tanto el fluido se mueve con mayor dificultad debido a los cambios de densidad, esto se observa en que la propagación es más ordenada con un número de Froude menor, debido a que la velocidad de referencia depende del valor del número de Froude, y por lo cual con un número de Froude mayor, la velocidad de referencia es mayor, por lo cual es más fácil que se genere un movimiento del fluido más desordenado (figura 6.2.1), si se observa la figura 6.2.2, se puede notar que la propagación ya no es tan ordenada como la figura 6.2.1.

Además si se observa el acceso al segundo nivel se nota más la diferencia entre las simulaciones. Por lo cual se puede notar como con un número de Froude más pequeño, la propagación es más ordenada que cuando el número de Froude es más grande. Esto podría indicar una mayor turbulencia para valores grandes del número de Froude.

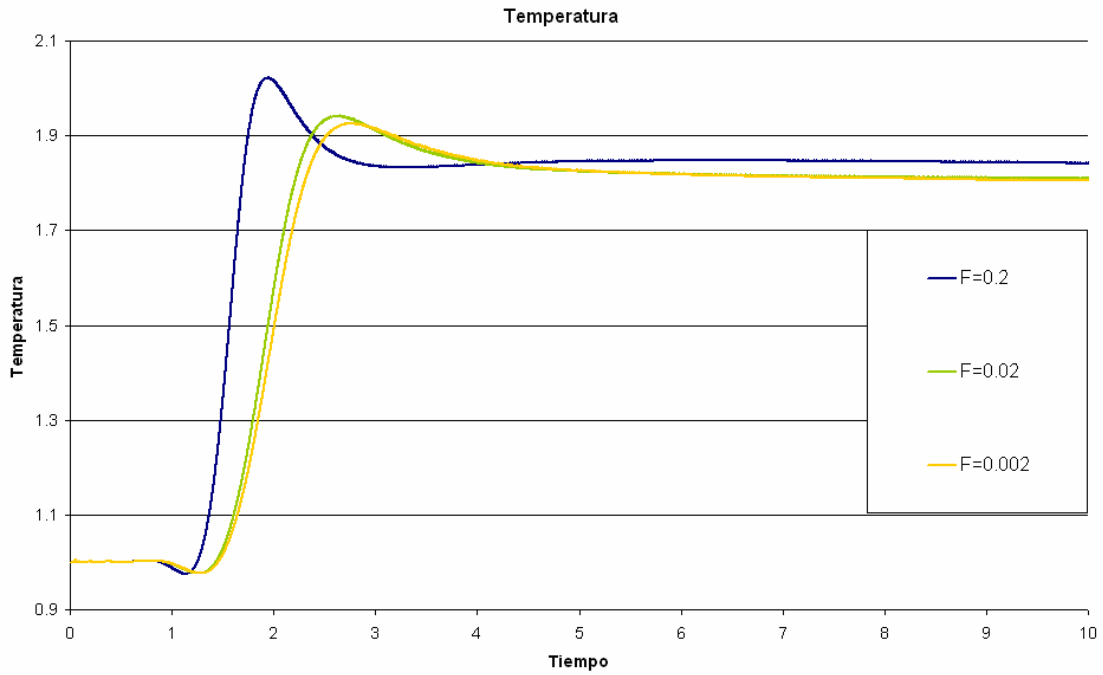
## 6.2.1 Efectos en la Temperatura del Recinto

En este estudio se puede observar que la temperatura cambia muy poco cuando el número de Froude es modificado, a continuación se muestra un análisis de este efecto.

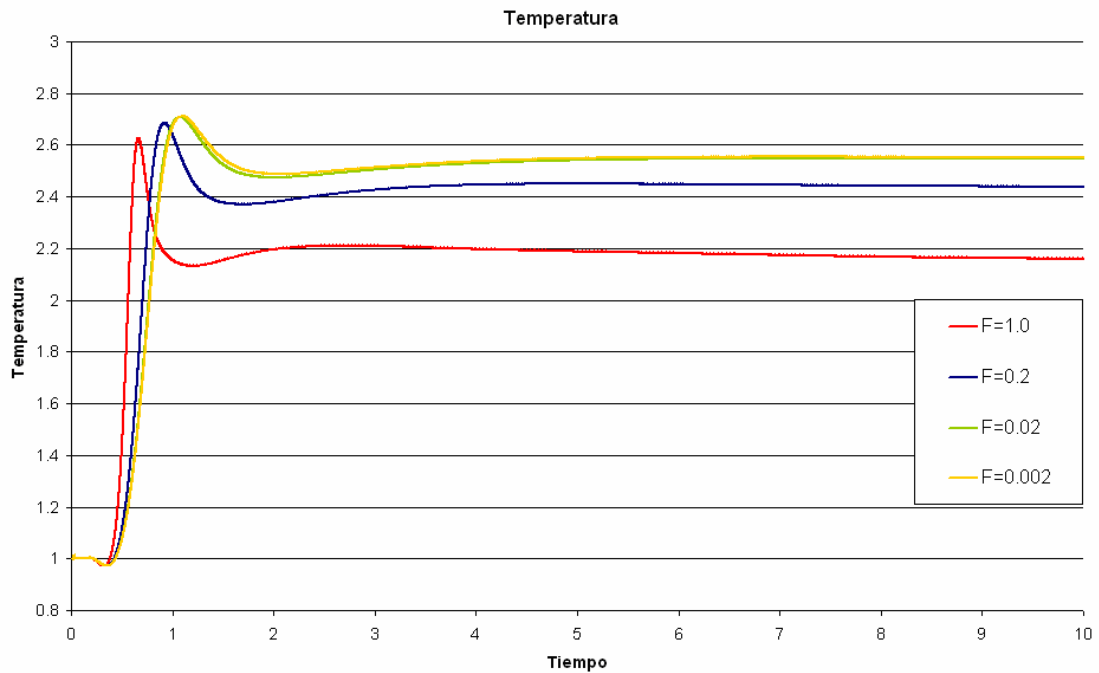


Gráfica 6.2.1: Temperatura del Fluido vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 300$ , número de Froude  $F= 0.2$ ,  $F= 0.02$  y  $F= 0.002$  del punto de la zona 1 de coordenadas (20, 30, 40)

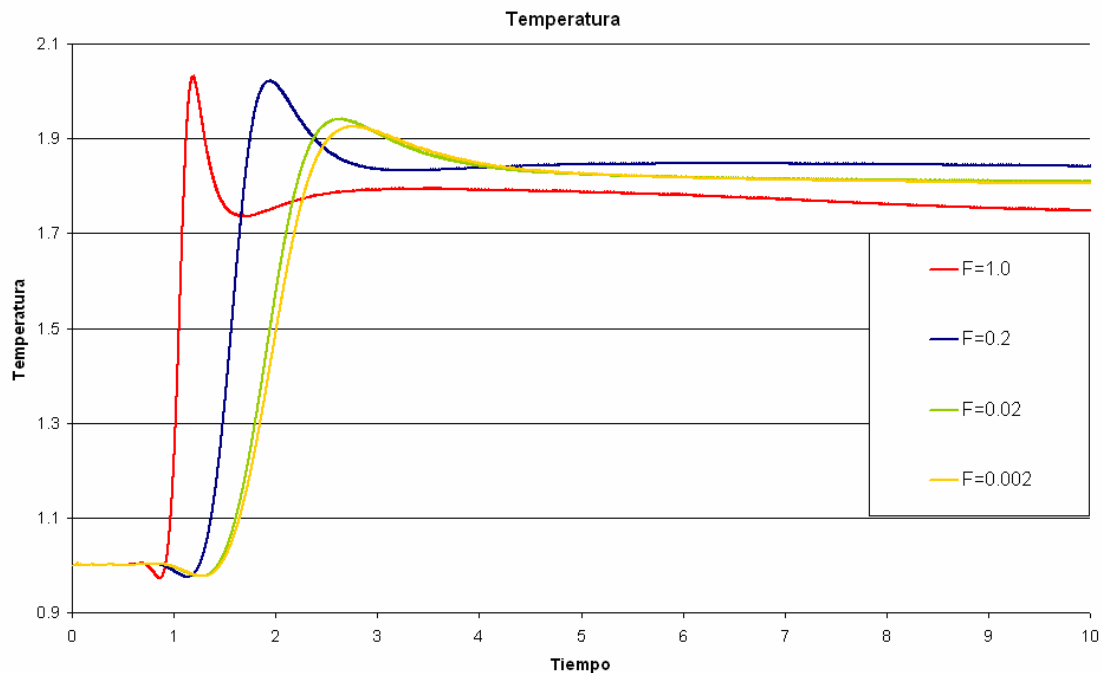
En la zona 1 del recinto los cambios de temperatura cuando se modifica el número de Froude no son perceptibles, en la gráfica 6.2.1 se observa como la variación entre las simulaciones realizadas no es muy clara. También se puede apreciar como el máximo de la temperatura se atrasa conforme el número de Froude disminuye grafica 6.2.2. En este estudio se observó que en algunos casos el máximo de la temperatura es menor con un número de Froude más grande, sin embargo, se tienen casos donde ocurre lo contrario como se observa en las figuras anteriores. Para poder tener un mejor panorama de este fenómeno se adicionó una nueva simulación, la cual permitió tener una curva que ayudara a observar la naturaleza de la temperatura, gráficas 6.2.3 y 6.2.4.



Gráfica 6.2.2: Temperatura del Fluido vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 300$ , número de Froude  $F= 0.2$ ,  $F= 0.02$  y  $F= 0.002$  del punto de la zona 1 de coordenadas (34, 30, 40)



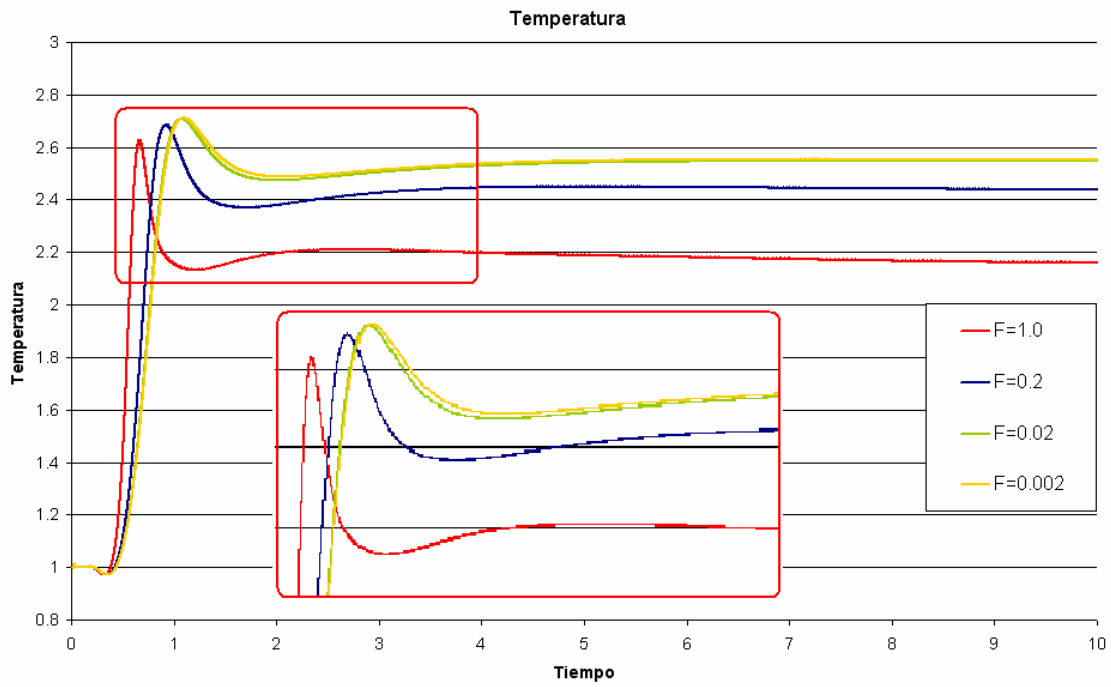
Gráfica 6.2.3: Temperatura del Fluido vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 300$ , número de Froude  $F= 1.0$ ,  $F= 0.2$ ,  $F= 0.02$  y  $F= 0.002$  del punto de la zona 1 de coordenadas (20, 30, 40)



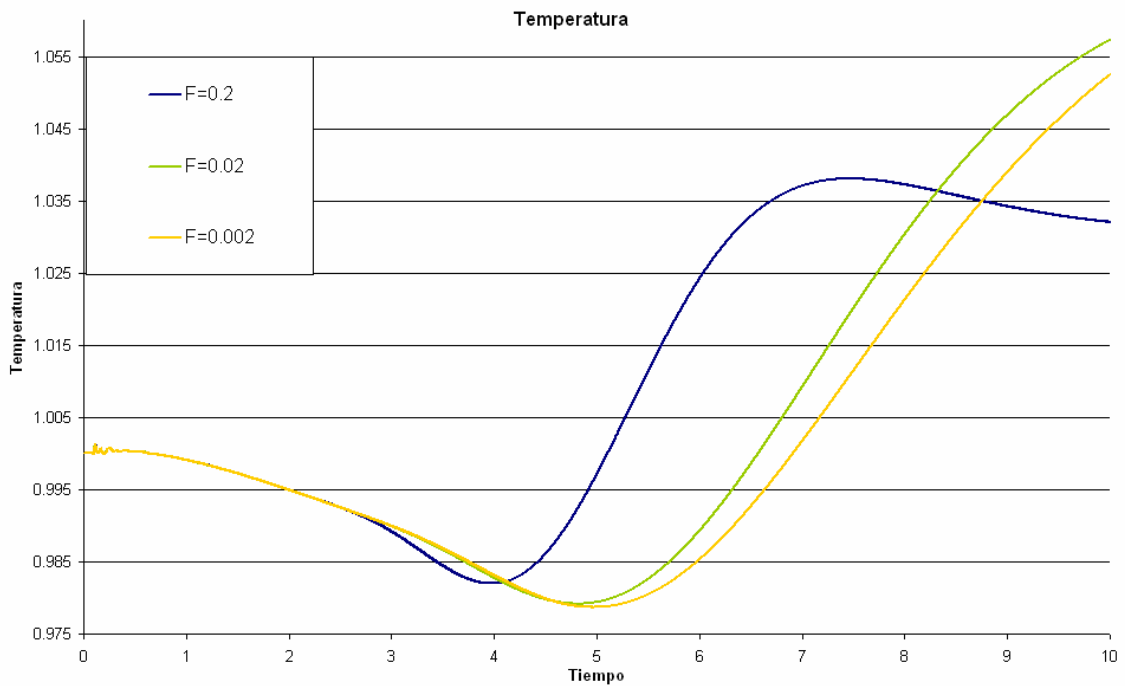
Gráfica 6.2.4: Temperatura del Fluido vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 300$ , número de Froude  $F= 0.2$ ,  $F= 0.02$  y  $F= 0.002$  del punto de la zona 1 de coordenadas (34, 30, 40)

En las gráficas 6.2.3 y 6.2.4 se puede notar un mayor desarrollo en las curvas de las temperaturas, es posible observar que el tiempo en el cual ocurre el máximo de temperatura es menor, como se comentó anteriormente, y además se puede observar como ocurre una caída en el valor de la temperatura, y posteriormente la temperatura sube y baja debido a la recirculación del aire como se comentó en el capítulo anterior, sin embargo, con esta nueva curva es posible ver el fenómeno más desarrollado, por lo cual se observa que la temperatura tiende a mantenerse en una temperatura que decae.

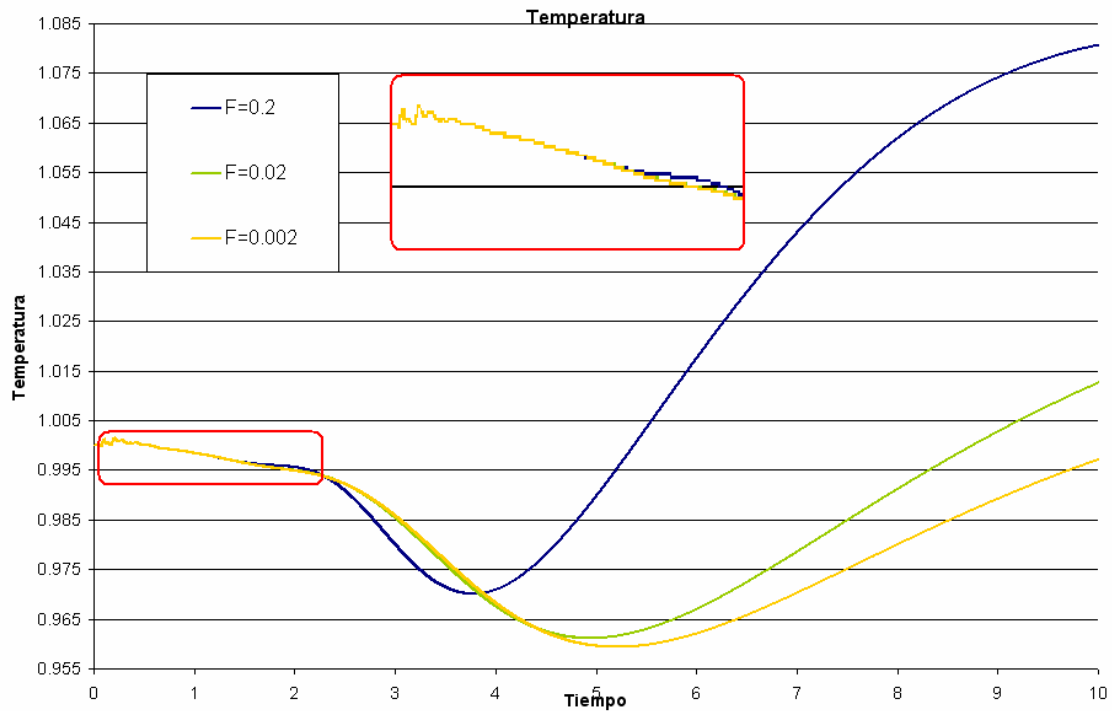
Se puede observar a partir de la comparación de las curvas que después del máximo de temperatura se llega a un punto de temperatura mínima local, y existe una concavidad que es inversamente proporcional a la diferencia entre el máximo y el mínimo, por lo cual si las diferencias son muy grandes, la concavidad es poca en el tiempo, sin embargo si el máximo y el mínimo son similares en valor esta concavidad es mayor.



Gráfica 6.2.5: Temperatura del fluido vs tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q=300$ , número de Froude  $F=0.2$ ,  $F=0.02$  y  $F=0.002$  del punto de la zona 1 de coordenadas (20, 30, 40)



Gráfica 6.2.6: Temperatura del fluido vs tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q=300$ , número de Froude  $F=0.2$ ,  $F=0.02$  y  $F=0.002$  del punto de la zona 2 de coordenadas (40, 47, 62)



Gráfica 6.2.7: Temperatura del Fluido vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 300$ , número de Froude  $F= 0.2$ ,  $F= 0.02$  y  $F= 0.002$  del punto de la zona 3 de coordenadas (27, 30, 15)

Este efecto no se observa de forma clara hasta que se grafica el fenómeno con un Froude con valor de 1.0, porque gracias a esta simulación es posible observar la tendencia de las familias de curvas que se relacionan con el cambio en el número de Froude. Por lo cual con estas observaciones se puede decir que para la gráfica 6.2.5 la temperatura del fluido cuando se tiene un valor del número de Froude de 0.2, le falta bajar su temperatura, mientras que para las otras dos curvas de temperatura, Froude de 0.02 y 0.002, sus valores de temperatura subirán y después este valor descenderá, sin embargo es necesario un tiempo de simulación más grande para poder observar esta situación de manera más clara.

Otro efecto que se observa es que conforme aumenta la altura en el recinto, el máximo de las temperaturas es menor, pero además la diferencia entre los valores de temperatura máximos es mayor entre las curvas de temperatura, puesto que en la zona 1 se observa que los máximos de las curvas de temperatura poseen valores similares, sin embargo en la zona 2 y en algunos puntos de monitoreo de



la zona 3 la diferencia es mayor. Esto se debe a que las fuerzas gravitacionales afectan la propagación del fluido y por lo tanto también la de su temperatura, ya que el transporte de energía es principalmente por convección.

Se observa también en la en la gráfica 6.2.7 que las perturbaciones iniciales no son afectadas por el número de Froude.

### 6.2.2 Efectos en la Velocidad del Fluido

En este estudio se obtuvieron resultados que respaldan esta observación dado que se puede notar como la velocidad aumenta o disminuye en magnitud, conforme el número de Froude cambia.

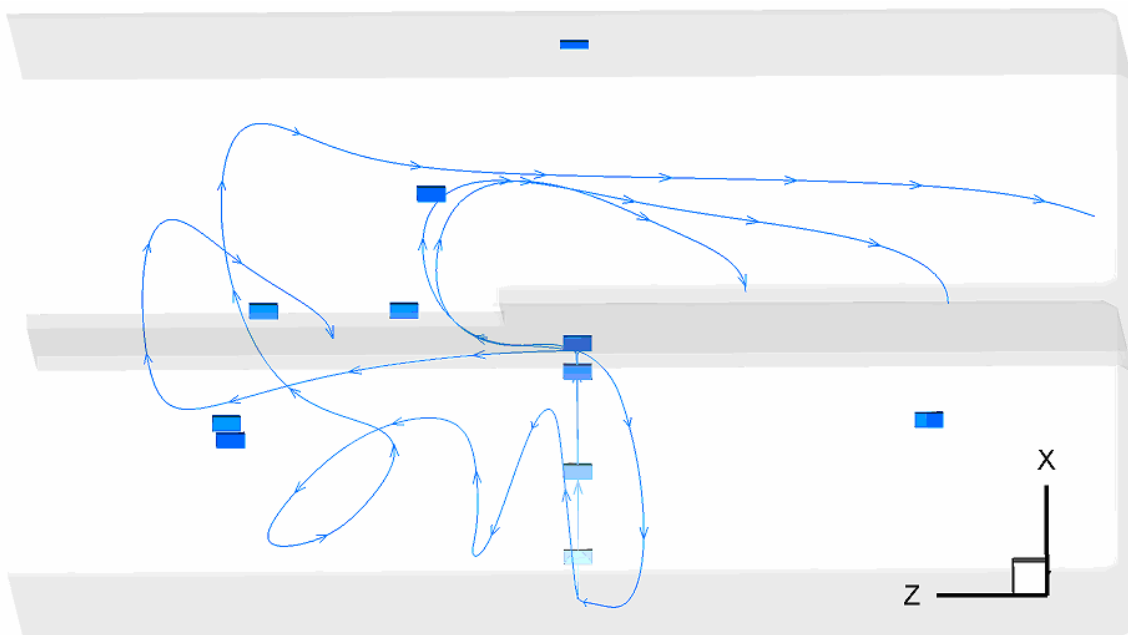
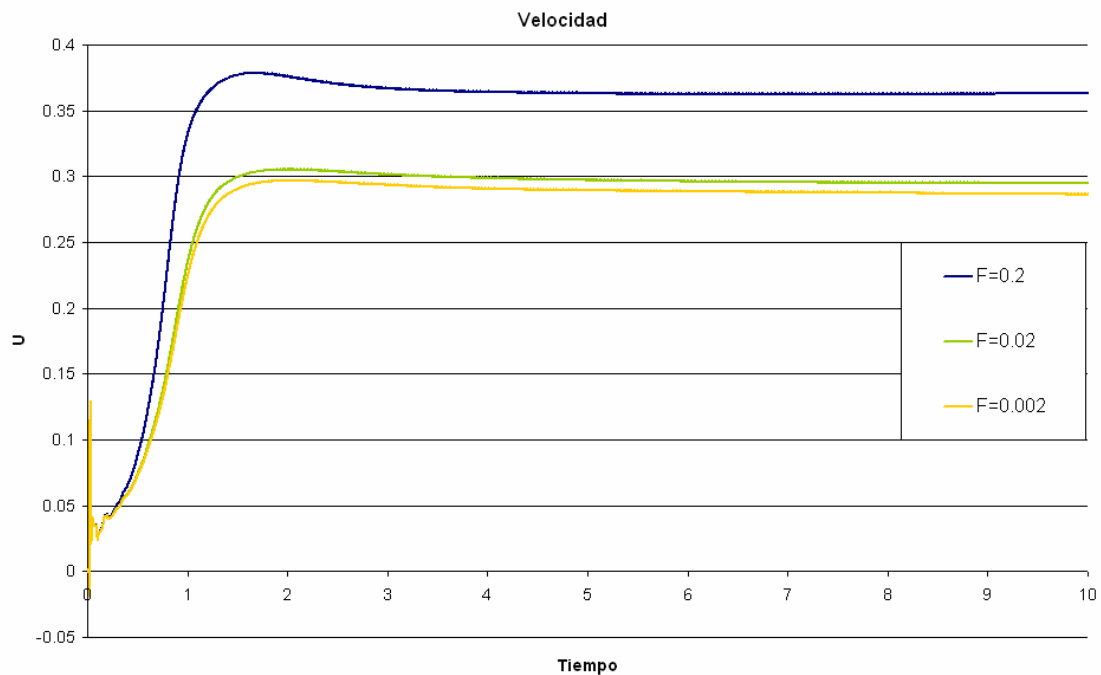


Figura 6.2.4: Visualización del fenómeno con  $Q=300$  y Froude  $=0.02$

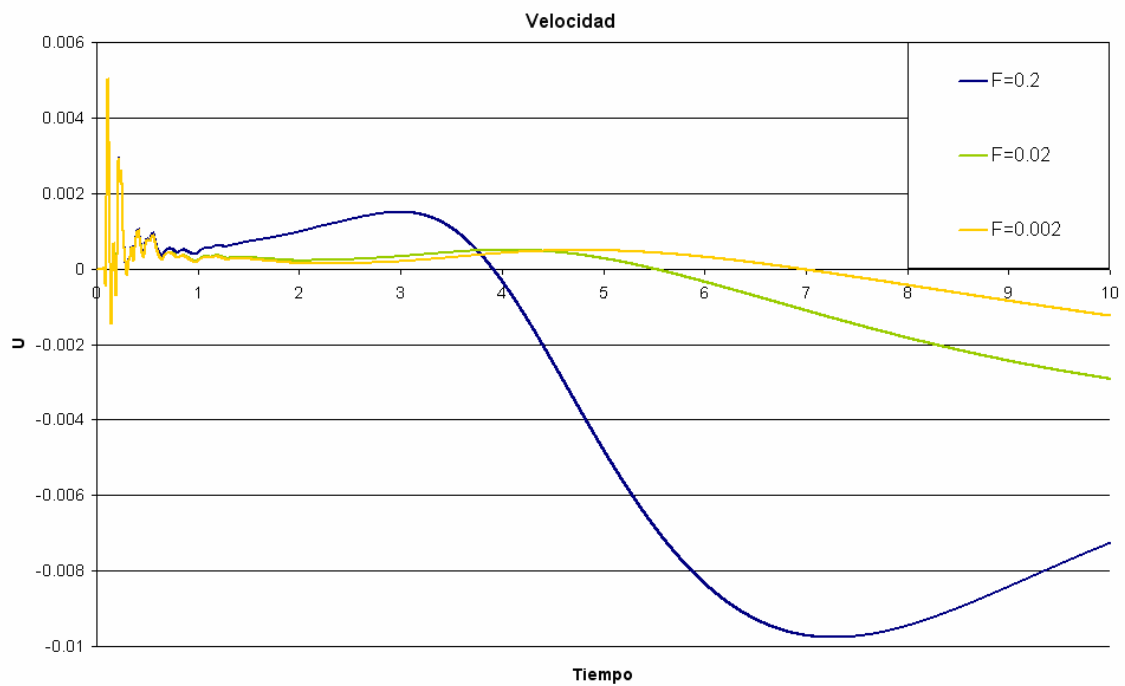
Este efecto de disminución de velocidad se puede explicar como el resultado de que el fluido se ve afectado por las fuerzas gravitacionales del sistema, como el número de Froude es una relación entre la fuerza de inercia del fluido, en las cuales se ve involucrada la velocidad del mismo, y las fuerzas gravitacionales del recinto. La trayectoria se ve afectada por el Froude, como se explicó anteriormente, en la figura 6.2.4 se observan 2 trayectorias del aire en el recinto

En la gráfica 6.2.8 pueden observar los datos obtenidos para la componente u del vector velocidad, en el cual se observa cómo cuando el número de Froude es más pequeño, el fluido tiene velocidades más bajas que en una simulación con un número de Froude más grande.



Gráfica 6.2.8: Velocidad del Fluido en la componente U vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 300$ , número de Froude  $F= 0.2$ ,  $F= 0.02$  y  $F= 0.002$  del punto de la zona 3 de coordenadas (20, 30, 40)

A pesar de esta situación, en las zonas más lejanas, este comportamiento no es tan evidente, dado que el fenómeno estudiado no se desarrolla completamente en dichas zonas, sin embargo, se puede notar de mejor forma las perturbaciones iniciales, las cuales no varían debido al número de Froude, gráfica 6.2.9.



Gráfica 6.2.9: Velocidad del Fluido en la componente U vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 300$ , número de Froude  $F= 0.2$ ,  $F= 0.02$  y  $F= 0.002$  del punto de la zona 3 de coordenadas (27, 15, 65)

Con base en las gráficas obtenidas a partir de las simulaciones se pudo observar el efecto de no deslizamiento en el punto más cercano al techo del primer nivel, gráfica 6.2.10, puesto que las velocidades son muy pequeñas, como se nota en las siguientes imágenes, en las cuales se observan los vectores de la velocidad en el fenómeno.

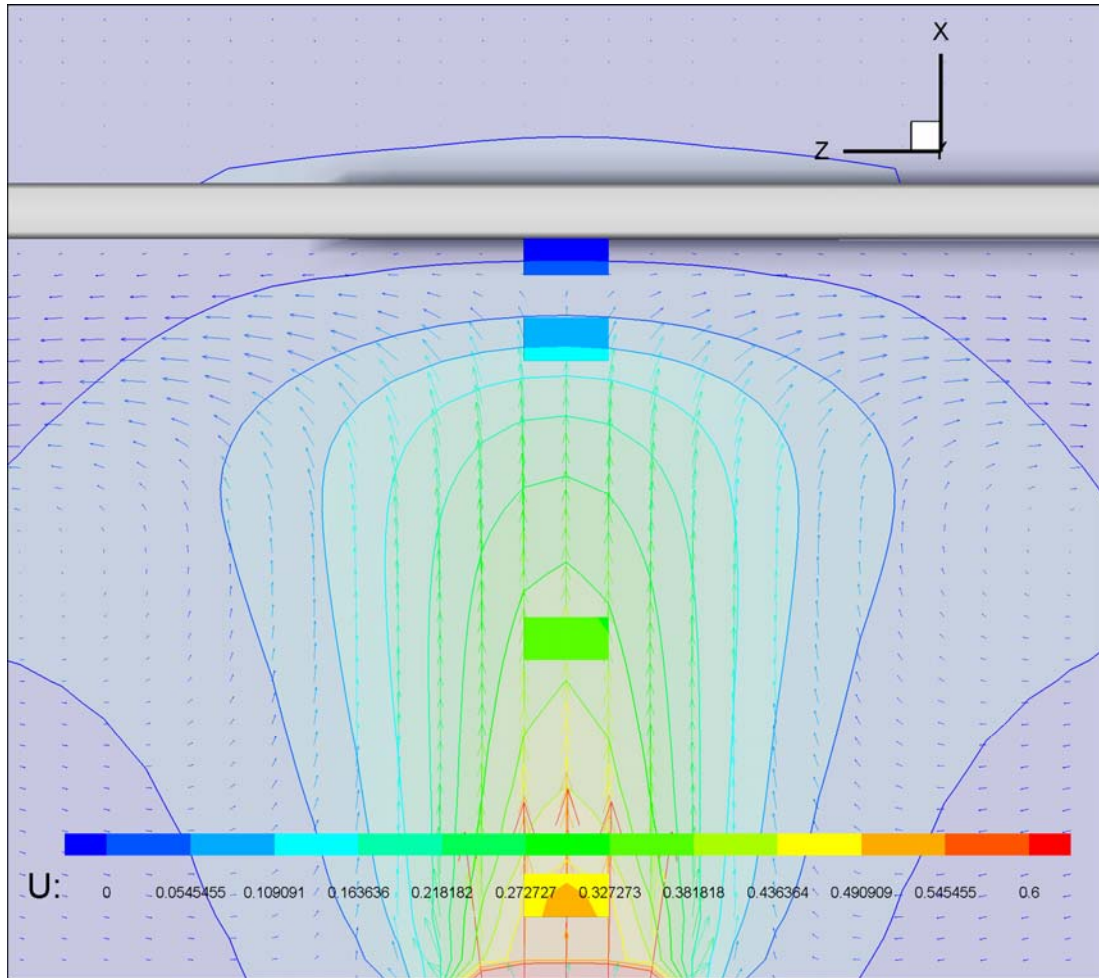
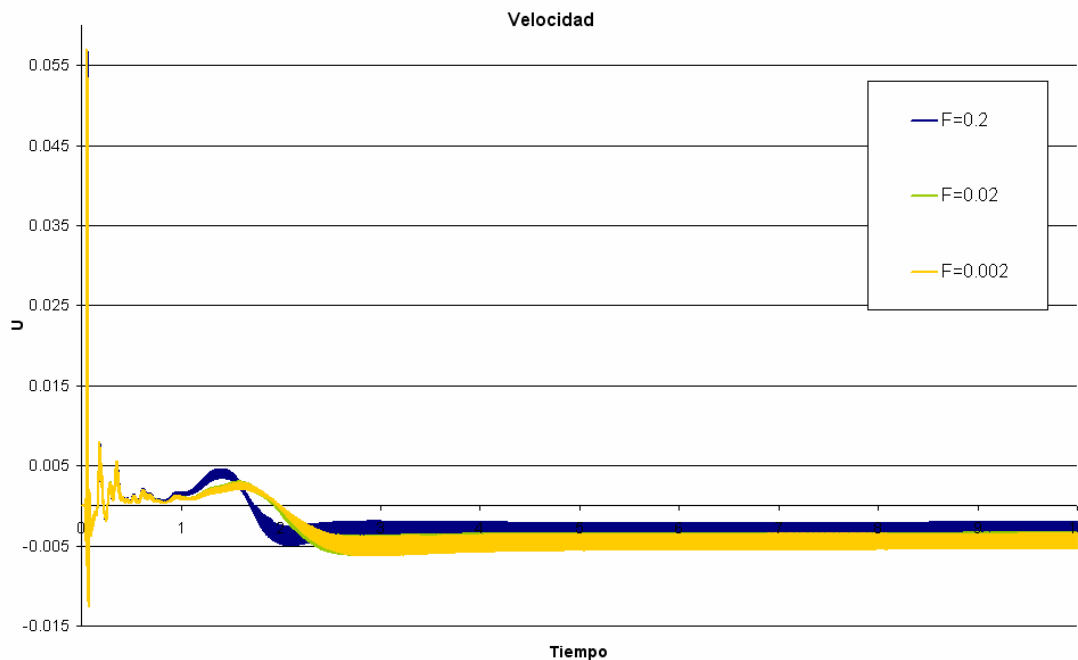


Figura 6.2.5: Visualización del fenómeno con  $Q=300$  y Froude  $=0.02$

En esta primer imagen se observan algunos de los *puntos de monitoreo* del sistema, en los cuales se pueden apreciar las velocidades que le corresponden, además se observan algunas curvas de nivel que ayudan a ver las magnitudes de las velocidades. Se puede distinguir como cerca del techo del primer nivel la velocidad disminuye y se observa un cambio en la dirección del fluido, lo cual explica los valores bajos de la velocidad en el Punto (38, 30, 40) que se muestra en la gráfica 6.2.10.



Gráfica 6.2.10: Velocidad del Fluido en la componente U vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 300$ , número de Froude  $F= 0.2$ ,  $F= 0.02$  y  $F= 0.002$  del punto de la zona 3 de coordenadas (38, 30, 40)

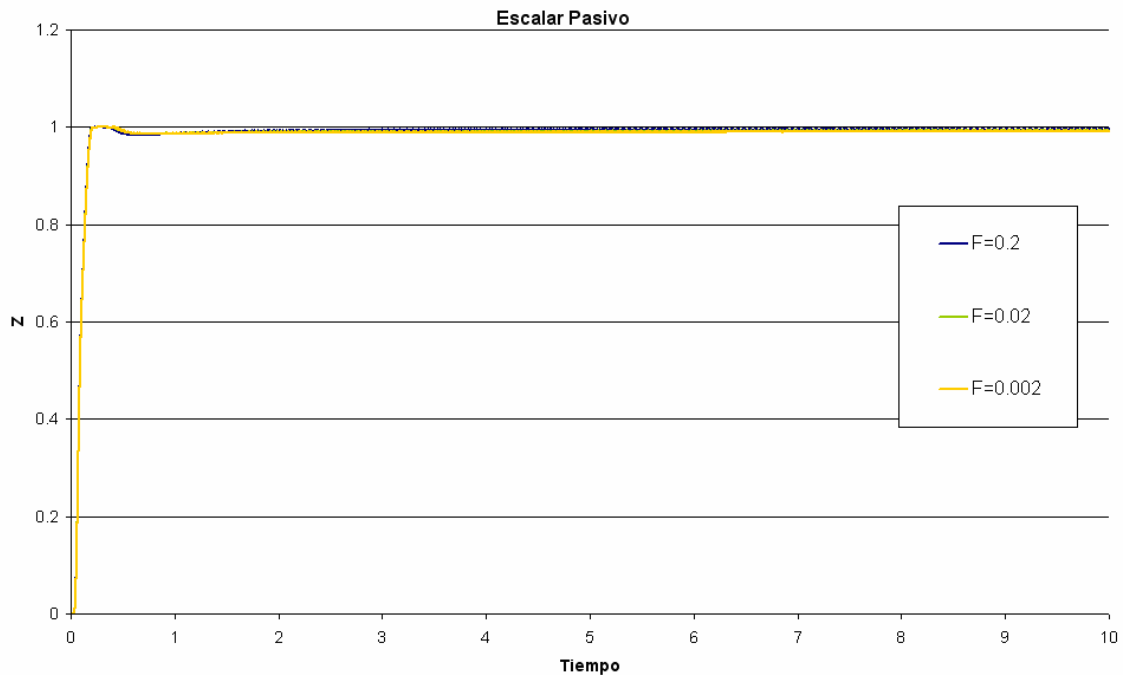
En la gráfica 6.2.10.se observa como la velocidad es muy pequeña y además es en sentido opuesto al eje  $x$  del sistema, es decir, el fluido va hacia abajo, además existen perturbaciones a lo largo de la simulación, pero son resultado de la condición de no deslizamiento del fluido con respecto al techo del primer nivel y resultado de que el fluido al subir a la parte superior del primer nivel, y no poder pasar debido al techo, cambia su dirección, en este caso, hacia abajo como se aprecia en la gráfica 6.2.10 y en la figura 6.2.4 y 6.2.5.

### 6.2.3 Efectos en el Modelo del Escalar Pasivo

Para observar cómo se ve afectado el modelo de escalar pasivo propuesto para este estudio, se utilizaron los datos obtenidos en los *puntos de monitoreo*.

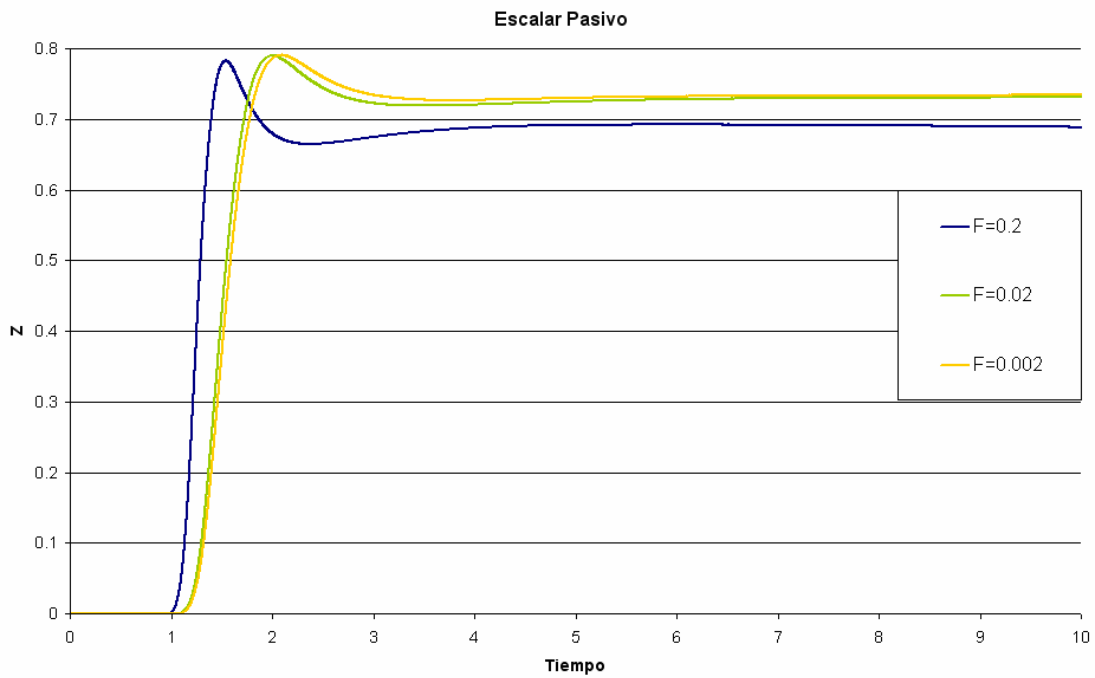
Se puede observar que los valores más elevados para la fracción de mezcla se encuentran en la zona 1, en los cuales se llega hasta valores de la unidad.

Sin embargo el valor de este escalar pasivo decrece de forma muy rápida conforme se aleja el monitoreo de la fuente de calor, si se observan las siguientes gráficas 6.2.11, 6.2.12 y 6.2.13 los valores del punto de monitoreo más cercano del monitoreo con coordenadas (8, 30, 40) a los valores del siguiente punto (20, 30, 40) los valores decrecen hasta en un 25%,

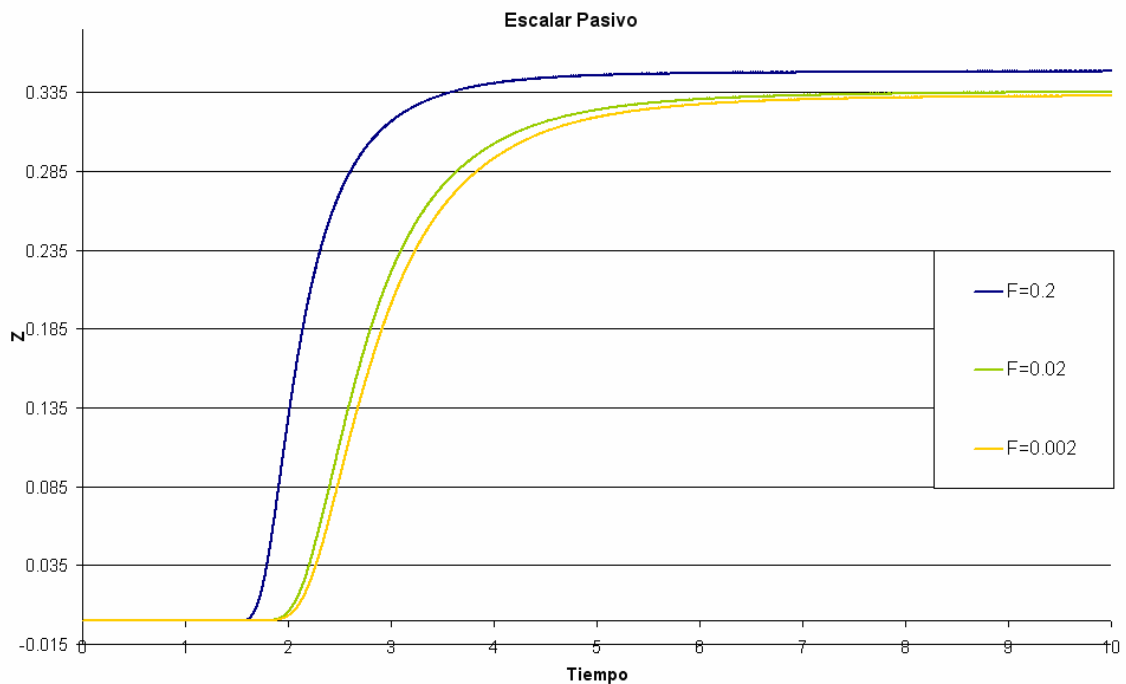


Gráfica 6.2.11: Temperatura del Fluido vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 300$ , número de Froude  $F= 0.2$ ,  $F= 0.02$  y  $F= 0.002$  del punto de la zona 1 de coordenadas (8, 30, 40)

De hecho el punto más lejano de esta zona, gráfica 6.2.13 disminuyen sus valores del escalar pasivo hasta un 33% con respecto a los de la gráfica 6.2.11, lo cual indica que en este estudio la propagación toma un tiempo mayor al que se dispone en cada simulación, sin embargo, se puede notar gracias a las demás gráficas de los puntos de control cómo se desarrolla la propagación en el recinto.

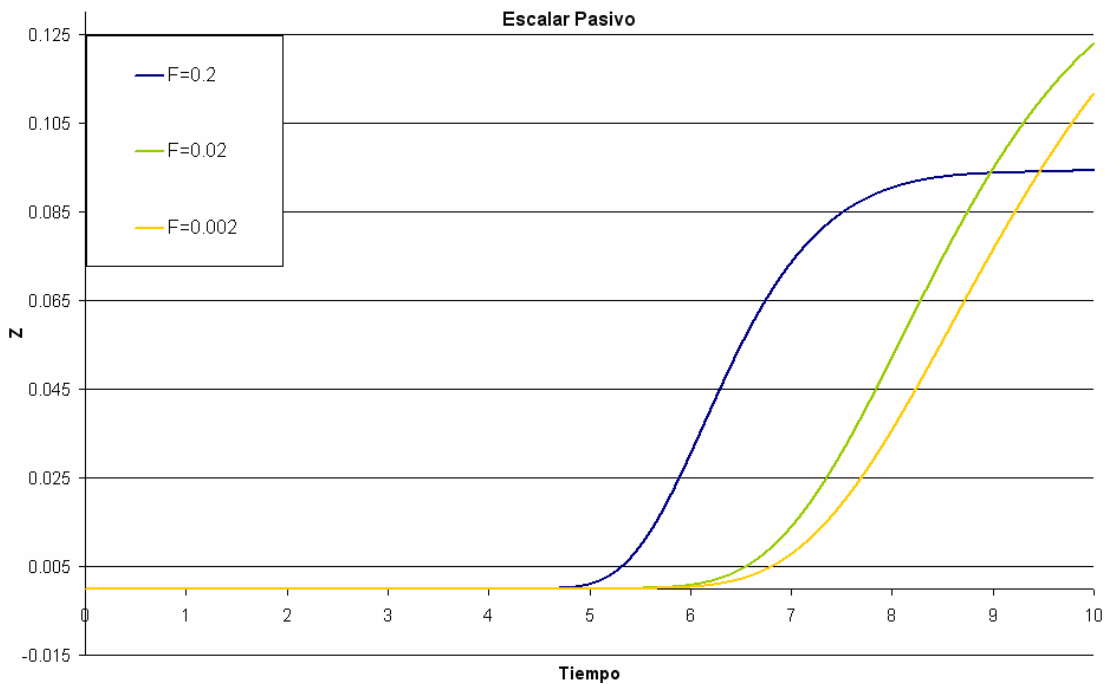


Gráfica 6.2.12: Temperatura del Fluido vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 300$ , número de Froude  $F= 0.2$ ,  $F= 0.02$  y  $F= 0.002$  del punto de la zona 1 de coordenadas (20, 30, 40)



Gráfica 6.2.13: Temperatura del Fluido vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 300$ , número de Froude  $F= 0.2$ ,  $F= 0.02$  y  $F= 0.002$  del punto de la zona 1 de coordenadas (38, 30, 40)

En los puntos extremos, es decir el punto más cercano a la fuente y el más lejano, las gráficas son casi constantes y no es posible ver lo que ocurre desde el inicio hasta el valor que se tienen casi en toda la simulación, este efecto no ocurre en los demás puntos, por lo cual en dichos puntos se puede apreciar que se llega a un máximo de la fracción de mezcla y que después el valor de Z decae para posteriormente mantenerse casi constante, como se observa en la gráfica 6.2.12.



Gráfica 6.2.14: Temperatura del Fluido vs Tiempo para una entrega de energía de la fuente de  $Q= 300$ , número de Froude  $F= 0.2$ ,  $F= 0.02$  y  $F= 0.002$  del punto de la zona 2 de coordenadas (40, 47, 62)

Cabe señalar que a partir del punto (38, 30, 40) las curvas de Fracción de mezcla se modifican y la perturbación de la cual se habló desaparece, en las gráficas posteriores se observa una mayor diferencia entre las curvas obtenidas para diferentes números de Froude, que se comentará más adelante.

En todas las gráficas con excepción de la gráfica 6.2.13, la curva para un número de Froude mayor es superior a las demás, mientras que en las demás gráficas esto no se nota con tanta claridad, de hecho en ocasiones para un número de Froude mayor, se tienen valores del escalar pasivo menores, figura 6.2.14. Esto es



muy similar a las curvas de temperatura ya mencionadas, las gráficas del escalar pasivo tienen esa inconsistencia acerca de un comportamiento claro. Sin embargo podemos llegar a conclusiones parecidas a las de las gráficas de la temperatura, puesto que en todas las gráficas se puede observar que para un número de Froude mayor, el máximo valor para esa simulación ocurre antes que para el mismo fenómeno con un número de Froude más pequeño. También se observa que las diferencias entre las curvas es más evidente para los puntos de monitoreo más alejados de la fuente. Esta última observación se debe a que conforme el número de Froude es más pequeño, el aire tarda un poco más en extenderse por todo el recinto debido a que al aire le cuesta más moverse en el recinto.

#### 6.2.4 Notas del apartado

En este apartado, se observaron las consecuencias causadas por modificar el número de Froude en las simulaciones, se elaboró un análisis acerca de cómo se afectan las variables de temperatura, velocidad del fluido y el modelo escalar pasivo en el recinto a lo largo del fenómeno.

Cómo ya se mencionó, el número de Froude es una variable adimensional que relaciona las fuerzas inerciales del fluido con respecto a las fuerzas gravitacionales del sistema en el que se desarrolla el fenómeno.

Se analizó primero el efecto que causa el número de Froude en la temperatura del fluido a lo largo de las zonas de estudio y de los *puntos de monitoreo* del recinto. Se pudo observar que la temperatura varía muy poco con respecto al número de Froude, sin embargo, fue posible establecer las razones de este efecto.

La velocidad del fluido, tuvo los cambios más evidentes, sobre todo en las gráficas, las imágenes de las líneas de trayectorias y líneas de contorno permitieron observar lo que ocurre en el techo del primer nivel.

Finalmente se observó el comportamiento del modelo de escalar pasivo, del cual se observaron los efectos que causó el variar el número de Froude.