



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Modelado de Flujos de Convención Natural con  
Grandes Diferencias de Temperatura

Autor

Titouan Lecuyer

Director

Guillermo Hauke Bernardos

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2021

# ÍNDICE

TABLA DE ILUSTRACIONES .....	3
RESUMEN .....	4
INTRODUCCIÓN .....	5
I.    Análisis del código de elementos finitos .....	6
A.    Introducción.....	6
B.    Curvas .....	7
a.    Los parámetros .....	7
b.    Flujo de trabajo .....	8
C.    Análisis de convergencia .....	10
D.    Elegir la solución más adecuada.....	14
E.    Conclusión del Análisis del código de elementos finitos .....	14
II.   Sistema de refrigeración natural y Simulaciones de Torres de Viento .....	15
A.    Introducción.....	15
B.    Modelos 2D de Torres de Viento 2D.....	16
Generación de malla .....	18
C.    Simulación .....	18
a.    Programa .....	18
b.    Simulación Ensa .....	19
c.    Simulaciones efectuadas .....	20
d.    Condiciones de contorno.....	20
D.    Resultado obtenido.....	21
E.    Mejoras posibles para un uso cotidiano.....	32
F.    Conclusión .....	32
CONCLUSIÓN.....	33
BIBLIOGRAFIA .....	34

# TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Cavity cuadrada impulsada por la flotabilidad. Configuración del problema.	7
Ilustración 2: Cavity cuadrada impulsada por la flotabilidad isoterma	8
Ilustración 3: Curvas $\varepsilon = 0.01$ $Ra = 10^6$ . Full Navier-Stokes	10
Ilustración 4: Curvas $\varepsilon = 0.01$ $Ra = 10^6$ . Boussinesq SUPG	10
Ilustración 5: Curvas $\varepsilon = 0.01$ $Ra = 10^6$ . Boussinesq SGS	11
Ilustración 6: Curvas $\varepsilon = 0.1$ $Ra = 10^6$ . Full Navier-Stokes	12
Ilustración 7: Curvas $\varepsilon = 0.1$ $Ra = 10^6$ . Boussinesq SUPG	13
Ilustración 8: Curvas $\varepsilon = 0.1$ $Ra = 10^6$ . Boussinesq SGS	13
Ilustración 9: Casa histórica (Aghazadeh) con torres de viento en Abarkuh, Irán	16
Ilustración 10: Esquema de funcionamiento	17
Ilustración 11: Modelo 1 de Torre de Viento	17
Ilustración 12: Modelo 2 Cúpula apta para el viento	18
Ilustración 13: Condiciones de contorno. Full Navier-Stokes	21
Ilustración 14: Condiciones de contorno. Boussinesq	21
Ilustración 15: Malla 1 Torre de Viento	22
Ilustración 16: Malla 2 Torre de Viento	22
Ilustración 17: Malla 2 Simulación FullNS Torre de Viento. Temperatura	23
Ilustración 18: Malla 2 Simulación Boussinesq Torre de Viento. Temperatura	23
Ilustración 19: Malla 2 Simulación FullNS Torre de Viento. Velocidad	24
Ilustración 20: Malla 2 Simulación Boussinesq Torre de Viento. Velocidad	24
Ilustración 21: Malla 2 Simulación FullNS Torre de Viento. Sensación térmica	25
Ilustración 22: Malla 2 Simulación Boussinesq Torre de Viento. Sensación térmica	25
Ilustración 23: Malla 1 Cúpula apta para el viento	26
Ilustración 24: Malla 2 Cúpula apta para el viento	26
Ilustración 25: Malla 2 Simulación FullNS. Cúpula Temperatura	27
Ilustración 26: Malla 2 Simulación Boussinesq. Cúpula Temperatura	27
Ilustración 27: Malla 2 Simulación FullNS. Cúpula Velocidad	28
Ilustración 28: Malla 2 Simulación Boussinesq. Cúpula Velocidad	28
Ilustración 29: Malla 2 Simulación FullNS Cúpula. Sensación térmica	29
Ilustración 30: Malla 2 Simulación Boussinesq Cúpula. Sensación térmica	29
Ilustración 31: Malla 2 Simulación Full NS Torre de Viento - Viento 5m/s – Sensación termina	31
Ilustración 32: Malla 2 Simulación Full NS Torre de Viento - Viento 15m/s – Sensación termina	31

# RESUMEN

Este trabajo es una investigación sobre la eficiencia de un sistema de climatización natural pasiva que se llama la torre de viento.

Este tipo de ventilación existe desde hace muchos siglos y en este trabajo se va a realizar un estudio y análisis más científico del sistema desde diferentes puntos de vista.

En primer lugar, se estudian los parámetros de simulación más adecuados para las torres de viento. A tal efecto se realizan simulaciones de una cavidad cuadrada calentada diferencialmente, con diversos parámetros de un código de elementos finitos, de manera que aporte una base estable para los análisis de las torres.

En segundo lugar, se realizan las simulaciones de dos modelos de torres de viento. Se analizan las diferencias entre las temperaturas y las velocidades en la vivienda, y la velocidad del viento en el exterior.

Por fin, después analizar estas simulaciones, se estudian mejoras posibles para un uso más eficiente.

# INTRODUCCIÓN

Durante estos dos últimos meses, se ha efectuado la investigación de diversos temas de interés mayor. El objetivo es evidenciar la importancia y el potencial de la aplicación de las torres de viento, para obtener una fuente de climatización natural y pasiva. De esta manera, el estudio se divide en dos partes principales, que son:

En primer lugar, el análisis del código de elementos finitos para el caso de una cavidad cuadrada calentada diferencialmente. El estudio de esta parte es esencial para entender el buen funcionamiento de la parte siguiente. En este análisis, se efectúan cálculos sobre una geometría cuadrada 2D con condiciones iniciales y de contorno, tanto esenciales como naturales. Lo que se analiza son los parámetros idóneos de cálculo, a través del estudio de la convergencia de los resultados y la velocidad de cálculo.

Una vez efectuado el estudio de las curvas, se pueden encontrar los parámetros más adecuados que combinan todas las condiciones que se necesitan para la parte siguiente de las simulaciones sobre la geometría de las torres de viento.

En un segundo lugar, se realizan las simulaciones de dos geometrías 2D de torres de viento, muy diferentes entre sí, para una mejor comparación. La primera geometría, es una vivienda en forma de rectángulo como las torres de viento tradicionales con una apertura unidireccional para que el viento entre y salga separadamente. La segunda geometría presenta una forma redonda similar a una cúpula. Por consiguiente, el viento circula de una manera que entra por la apertura superior y sale por la puerta principal de la vivienda. Entonces, con estas dos geometrías muy distintas, será posible analizar las ventajas e inconvenientes de cada configuración.

Para realizar las simulaciones, la geometría se discretiza en una malla con las condiciones iniciales y de contorno adecuadas.

Por último, con los análisis de simulaciones, se analizan los puntos positivos y negativos de cada configuración y se puede elegir la mejor geometría con los puntos a mejorar.

# I. Análisis del código de elementos finitos

## A. Introducción

El análisis del código de elementos finitos consiste en comparar dos modelos para calcular los flujos impulsados por la flotabilidad utilizando métodos estabilizados. Es decir, los resultados de este análisis comparan la convergencia de cada método numérico con diferentes parámetros. Para poder realizar este análisis, se utilizará el caso del flujo en una cavidad cuadrada y así obtener los mejores resultados.

Los dos modelos principales utilizados se basan en un enfoque unificado para resolver flujos compresibles e incompresibles. La primera estrategia utilizada en este análisis es la aproximación de Boussinesq para tener en cuenta las fuerzas impulsadas por la diferencia de temperatura. En concreto, este método modela los términos térmicos en la ecuación de momento a través de un término fuente no lineal que depende de la temperatura. Para resolver este modelo se emplean dos métodos estabilizados de elementos finitos (SUPG y SGS).

Pero antes de empezar el análisis, es importante remarcar que esta aproximación de Boussinesq plantea problemas para los altos números de Rayleigh, que se manifiestan en la lentitud o falta de convergencia.

La segunda aproximación se basa en las ecuaciones compresibles de Navier-Stokes (Full Navier-Stokes), que introduce la termodinámica de densidad variable del líquido o del gas sin ningún término de flotabilidad artificial, por lo tanto, sin introducir ningún modelo de aproximación en las ecuaciones de Navier-Stokes. Para resolver este modelo se emplea un método estabilizado de elementos finitos (SUPG).

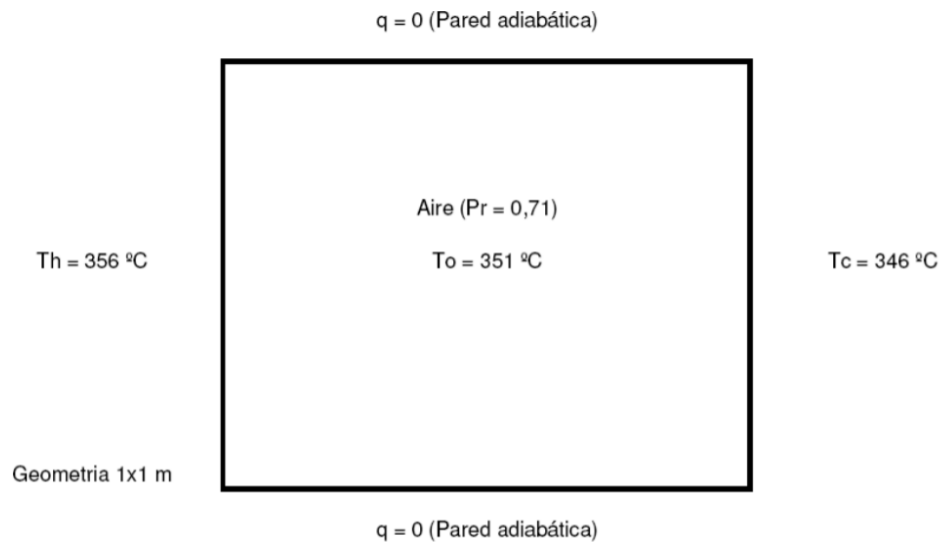
## B. Curvas

### a. Los parámetros

Se obtienen de estas curvas de convergencia para los dos modelos, como visto en la introducción (Full Navier-Stokes y Boussinesq). Para cada método numérico, se analiza el efecto de estos parámetros:

- Delta de tiempo
- Tolerancia de GMRES
- Precondicionador
- Matriz de estabilización: diagonal, clásica, Polner, Polner Compresible

La obtención de estas curvas se efectúa con el *benchmark* de la cavidad cuadrada calentada diferencialmente, que se caracteriza por dos número adimensionales: Épsilon (  $\varepsilon$  ) y el número de Rayleigh (  $Ra$  ), que se definen a continuación:

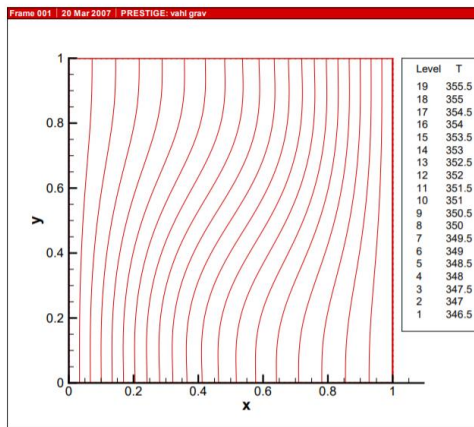


*Ilustración 1: Cavidad cuadrada impulsada por la flotabilidad. Configuración del problema.*

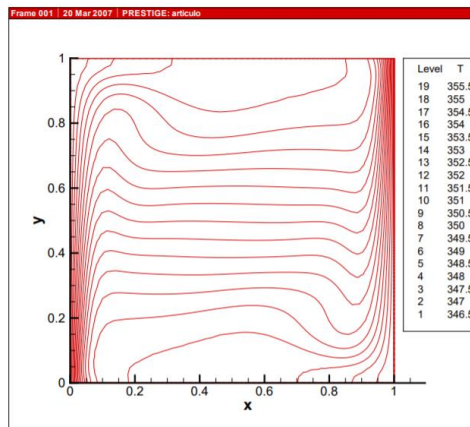
$$\varepsilon = \frac{\Delta T}{2 T_o} = \frac{T_h - T_c}{2 T_o}$$

$$Ra = Pr \frac{g \rho_0^2 (T_h - T_c) L^3}{T_0 \mu_0^2}$$

$$Ra = 10^3$$



$$Ra = 10^6$$



*Ilustración 2: Cavity cuadrada impulsada por la flotabilidad isothermas*

Entonces, variando estos dos parámetros (Épsilon y Rayleigh) se analizan los casos siguientes:

$\epsilon$	Ra
0,01	$10^6$
0,01	$10^4$
0,1	$10^6$
0,6	$10^6$

*Casos analizados para el análisis del código de elementos finitos*

#### b. Flujo de trabajo

Para obtener los resultados sobre el *benchmark*, la universidad y especialmente el departamento de mecánica de fluidos, utiliza el sistema operativo Linux para simular, y ver los resultados.



Linux es un sistema operativo tipo Unix. Fue concebido para dotar a los ordenadores personales de un sistema operativo gratuito o de muy bajo coste, comparable a las versiones clásicas de Unix, que suelen ser más caras. Permite gestionar la ejecución de aplicaciones tanto en un terminal como en un servidor.

La principal originalidad de Linux en comparación con otros sistemas operativos de la competencia, como Microsoft Windows, Mac OS u otros UNIX propietarios, es que consta de un núcleo y un software libres.

El software libre no es necesariamente libre, y a la inversa, no todo software no comercial es libre. Es en virtud de sus derechos de autor que los contribuyentes al software libre conceden las cuatro libertades, que son utilizar el software sin restricciones, estudiar el software, modificarlo para adaptarlo a las propias necesidades y redistribuirlo bajo ciertas condiciones especificadas.

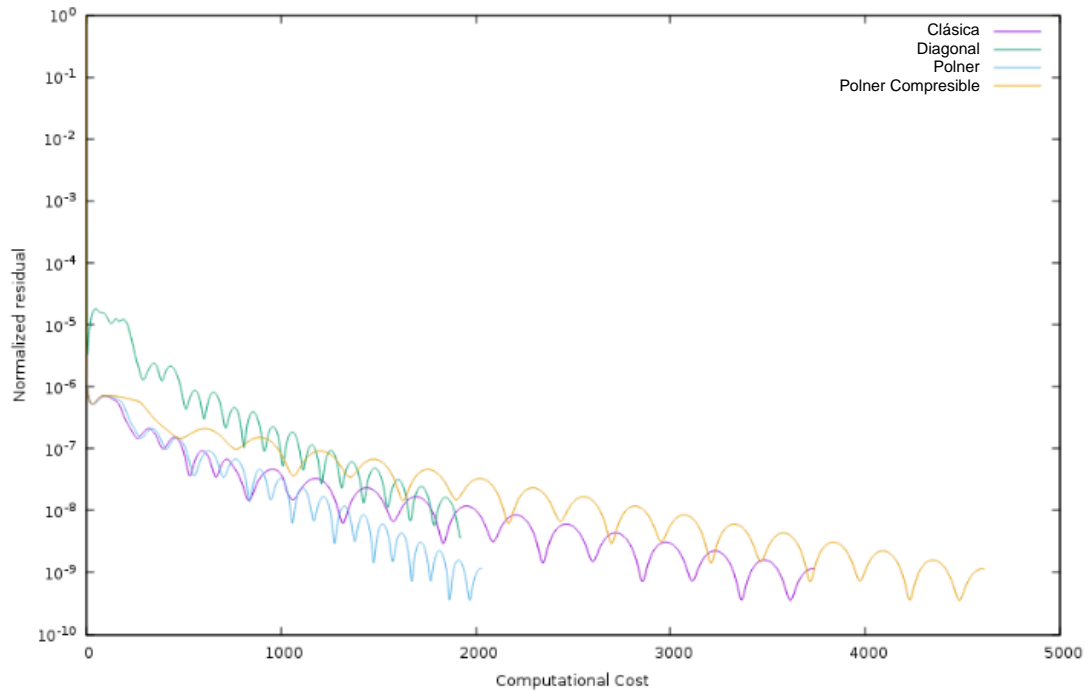
Durante el Trabajo Fin de Grado, Linux se utiliza para trabajar sobre las simulaciones del código de elementos finitos y también leer las curvas y analizar los datos de las simulaciones con programas.

- El programa Ensa se utiliza para efectuar las simulaciones. Iniciado con Linux, el programa Ensa necesita una geometría y un input para funcionar. En este input, encontramos las datos y parámetros de la simulación, como dicho antes: Delta de tiempo, la Tolerancia y el Precondicionador y la matriz de estabilización.
- Iniciado con Linux, el programa Gnuplot es el programa que nos permite leer las curvas generadas con el programa Ensa y comparar las convergencias.

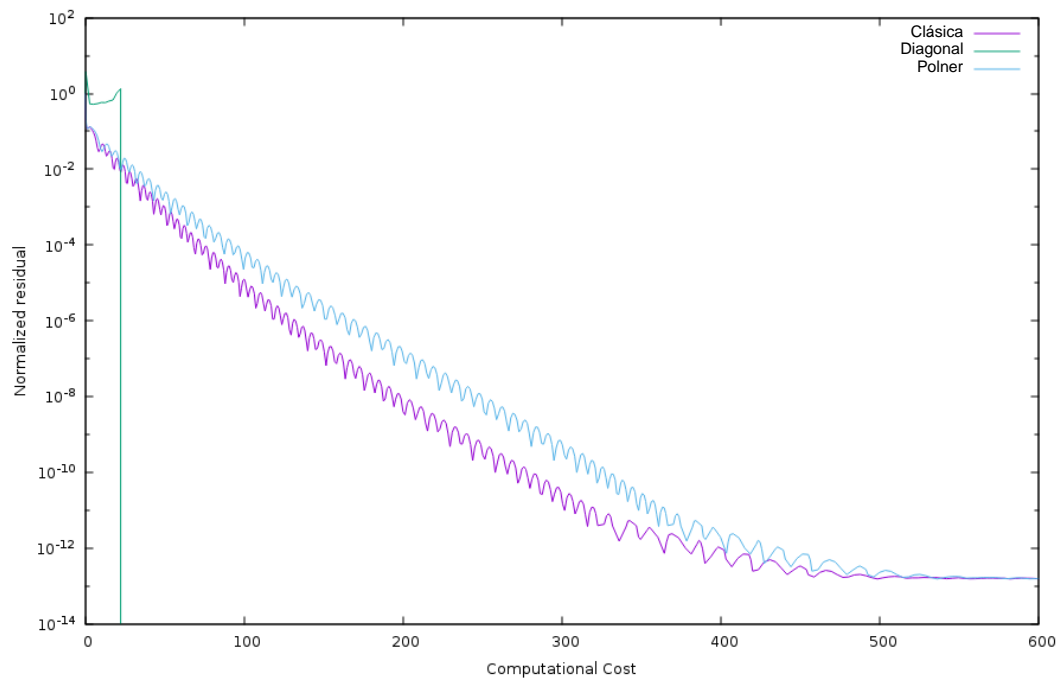
Gracias a estos dos programas, obtenemos las curvas de convergencia para el *benchmark* de la Cavidad para todos los casos estudiados.

## C. Análisis de convergencia

Curvas obtenidas con  $\varepsilon = 0.01$   $Ra = 10^6$ .



*Ilustración 3: Curvas  $\varepsilon = 0.01$   $Ra = 10^6$ . Full Navier-Stokes*



*Ilustración 4: Curvas  $\varepsilon = 0.01$   $Ra = 10^6$ . Boussinesq SUPG*

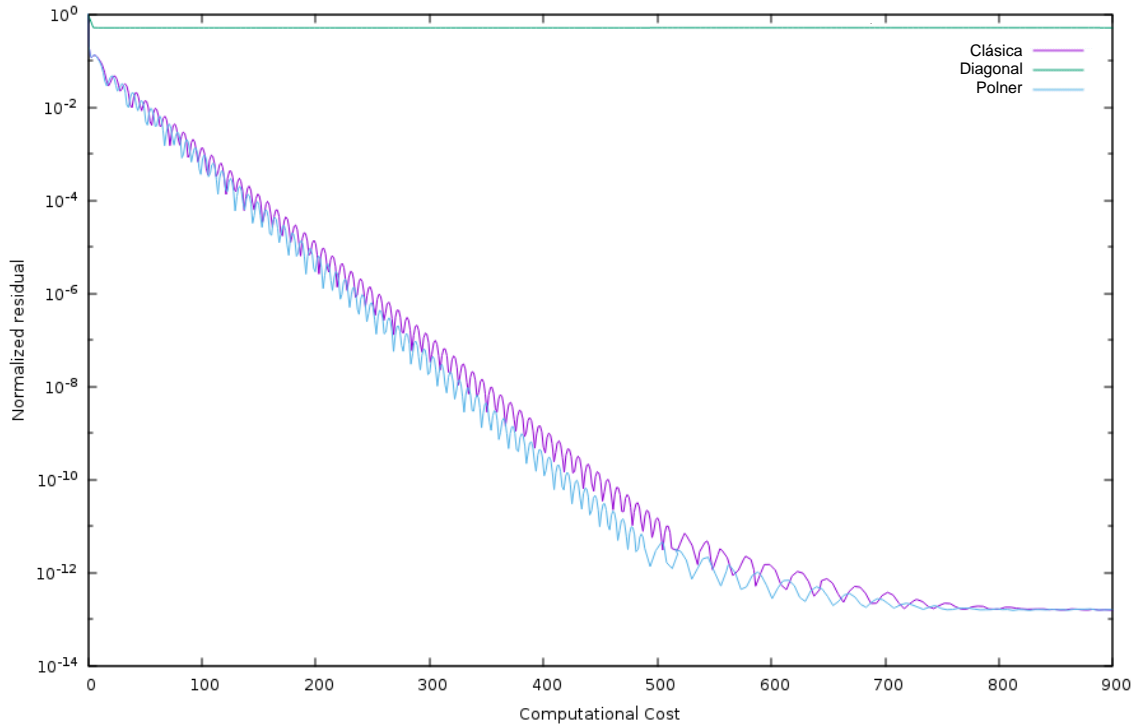


Ilustración 5: Curvas  $\varepsilon=0.01$   $Ra=10^6$ . Boussinesq SGS

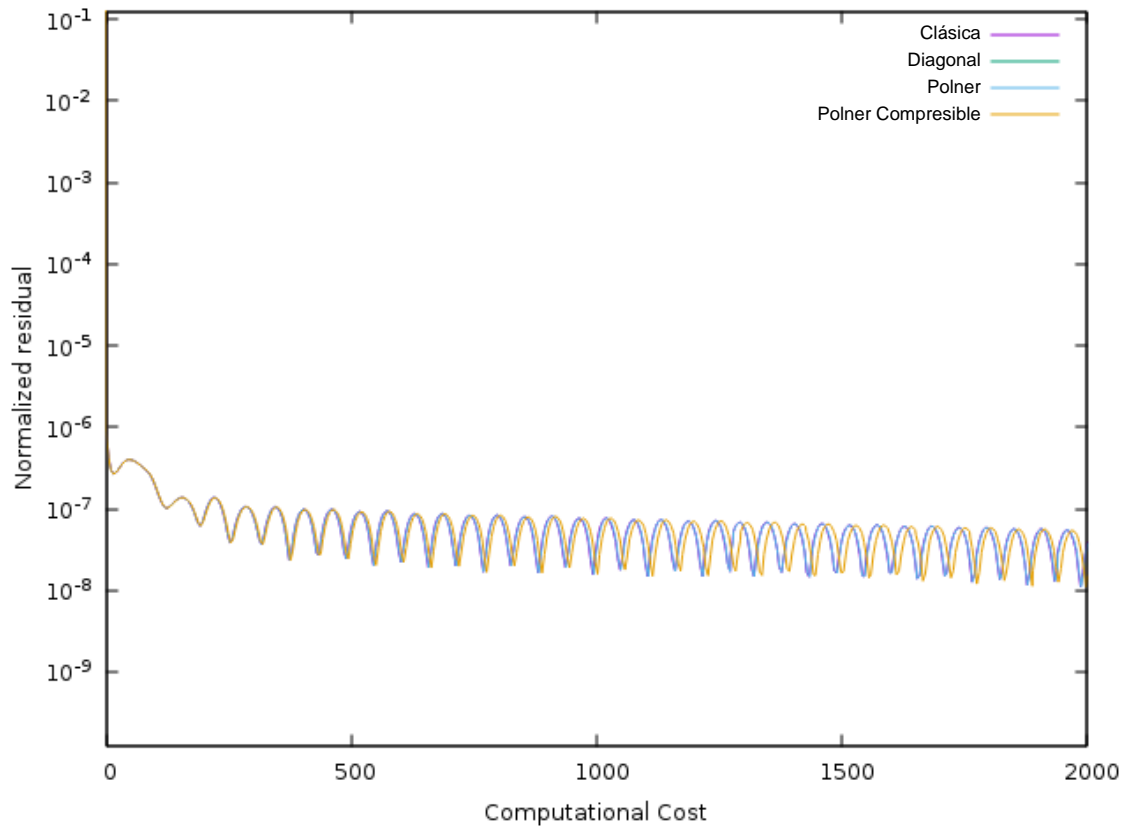
En estos análisis, las curvas presentan en el eje de las abscisas el *Computational Cost* en segundos. Para explicar, los análisis de convergencia del código de elementos finitos sobre de la cavidad cuadrada se pueden realizar en función del Time Step y del Computational Cost. Con el Time Step, tenemos el resultado en función del número de interacciones, sin embargo, a veces, esto no es representativo del tiempo de cálculo, ya que puede cambiar considerablemente con los parámetros (menos si la convergencia es rápida en cada paso temporal). Por eso, representamos la evolución del residuo en función del CPU-Time o Computational Cost en Segundos para obtener resultados uniformes.

Entonces, encontramos diferentes tasas de convergencia dependiendo de los parámetros del método numérico.

El Computational Cost, permite decir que tenemos una convergencia alrededor de 2000s para el método de full Navier-Stokes y de 400-500s para los métodos de Boussinesq SUPG y SGS. Pero el Normalized Residual es mucho más importante en las simulaciones con Boussinesq SUPG y SGS (alrededor de  $10^{-12}$ ) que es más pequeño que en el método de Full Navier-Stokes ( $10^{-9}$ ). También, se analiza que, para cada

curva la matriz de estabilización más versátil sería la clásica o Polner, para todos los métodos numéricos. Se muestra que la convergencia es más rápida con la curva de Clásica y Polner.

Para comparar, se presentan aquí las curvas de convergencia obtenidas con  $\varepsilon = 0.1$  y  $Ra = 10^6$ , lo cual representa mayores diferencias de temperaturas en la cavidad que en el caso anterior:



*Ilustración 6: Curvas  $\varepsilon = 0.1$   $Ra = 10^6$ . Full Navier-Stokes*

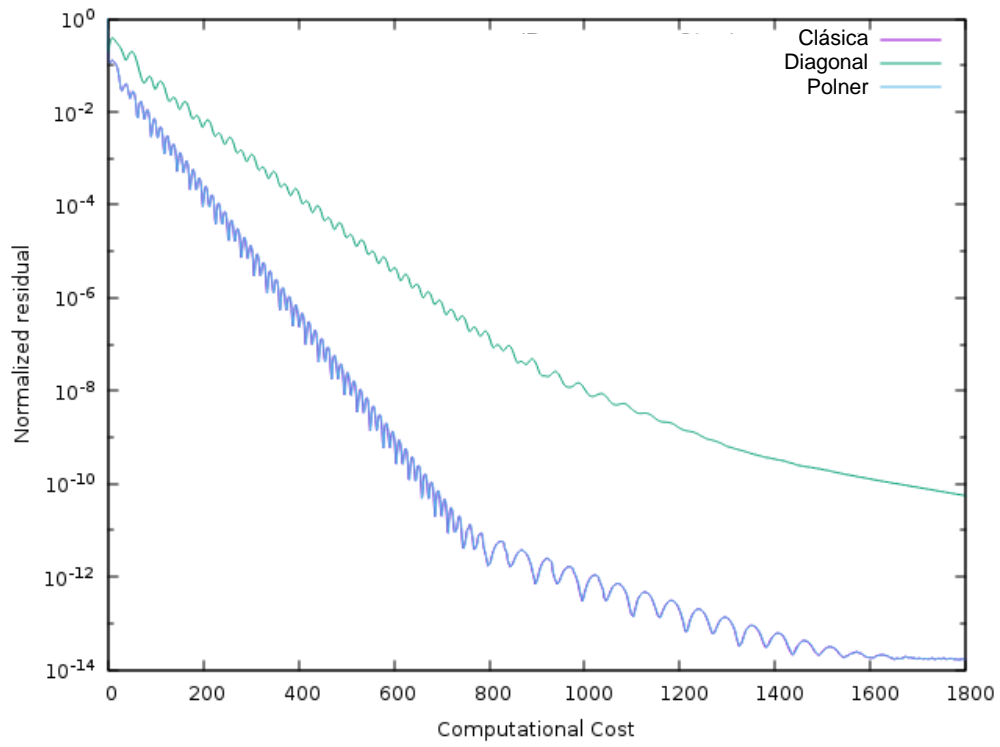


Ilustración 7: Curvas  $\varepsilon = 0.1$   $Ra = 10^6$ . Boussinesq SUPG

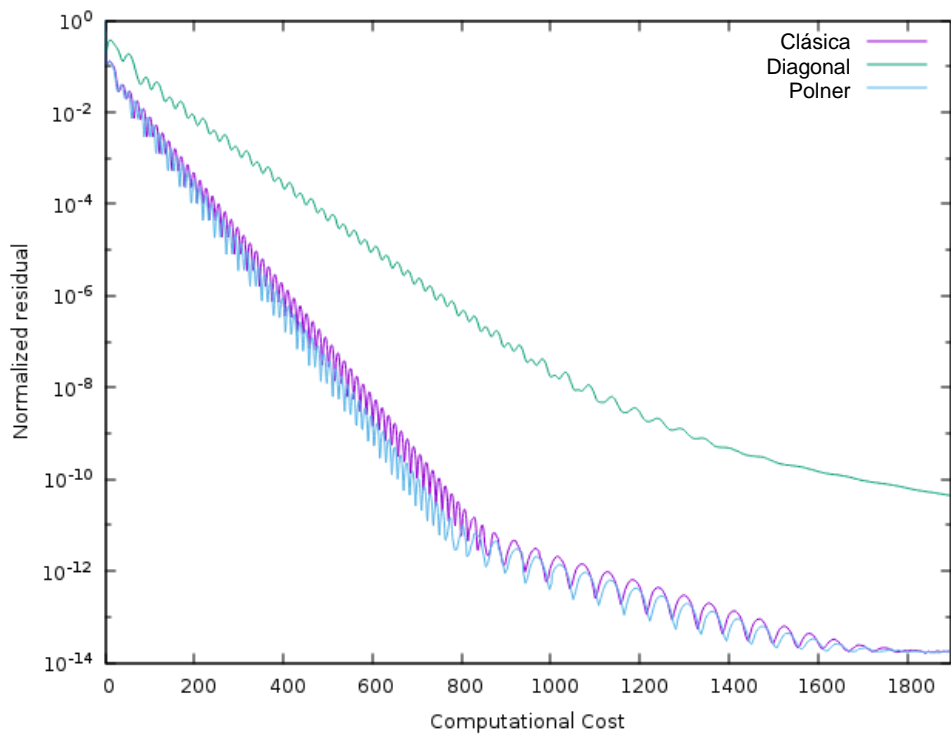


Ilustración 8: Curvas  $\varepsilon = 0.1$   $Ra = 10^6$ . Boussinesq SGS

Por lo tanto, encontramos con estas curvas que tenemos una vez más, resultados muy diferentes. Con un Épsilon más grande, el modelo de Full Navier-Stokes, converge en

500 s, antes que Boussinesq (tanto para SUPG como SGS), los que convergen alrededor de 800 s. Para las curvas de Boussinesq SUPG y SGS, existe convergencia, pero más lenta que con un  $\epsilon$  pequeño.

## D. Elegir la solución más adecuada

Como hemos visto en los párrafos anteriores, con nuestro análisis tenemos una convergencia más importante con un  $\epsilon$  bajo. Sobre el número de Rayleigh, su valor es el mismo en casi todos los casos y no afecta en el caso de análisis del código de elementos finitos para esta geometría. Es así que los ejemplos informáticos muestran que la aproximación termodinámica, que no introduce ningún término artificial en las ecuaciones de Navier-Stokes, es conceptualmente más sencilla que los métodos basados en la aproximación de Boussinesq, pero una convergencia más lenta.

## E. Conclusión del Análisis del código de elementos finitos

Finalmente, el análisis del código de elementos finitos nos permite entender el funcionamiento de las simulaciones con los diferentes modelos y parámetros posibles. Como hemos visto antes, todas las simulaciones y las lecturas de curvas se efectúan con el sistema operativo Linux que permite prepararnos para las siguientes simulaciones. Finalmente, con el análisis efectuado sobre las simulaciones y su convergencia, encontramos una selección de parámetros inicial para nuestra próxima etapa relativa al estudio de los sistemas de climatización natural con el método de torres de viento.

## II. Sistema de refrigeración natural y Simulaciones de Torres de Viento

### A. Introducción

Actualmente, la población mundial está viviendo un cambio debido al agotamiento de los recursos naturales y el calentamiento global. Sobre datos de ingenieros, investigadores científicos del CNRS (Centro Nacional de Investigaciones Científicas) y del CEA (Comisariado para la energía atómica y las energías renovables) y de sitios meteorológicos las temperaturas en 2100 pueden aumentar 7°C en Europa.

Las consecuencias de este fenómeno aumentan por el crecimiento económico y demográfico, especialmente en países emergentes y calurosos, debido también a que viviendas y empresas recurren a la instalación de sistemas de aire acondicionado. Este tipo de refrigeración es responsable del 10% del consumo mundial de electricidad y la utilización de este aire acondicionado será la segunda mayor de demanda de electricidad en las tres próximas décadas.

Utilizado durante siglos para proporcionar una ventilación natural y una refrigeración en el interior de los edificios, el sistema de torres de viento es un dispositivo arquitectónico tradicional de Irán y Baréin especializado en dirigir el viento exterior de estas zonas dentro de un edificio, y obtener una fuente fría de aire al interior.

La región central de Irán es desértica, y la carencia de humedad en el aire genera grandes diferencias de temperatura entre el día y la noche. Así, el aire va de fresco a extremadamente cálido en verano y con muy baja humedad relativa todo el día. Las ciudades del desierto están cercanas o en torno a oasis, a fin de asegurarse la provisión de agua. Son además de trama muy cerrada: calles estrechas, de paredes altas y blanqueadas con cal para reducir al mínimo la absorción del calor solar. Los edificios y casas tienen patios profundos, y terrazas donde sus habitantes duermen en las noches calurosas de verano.

En esta parte, vamos a estudiar el funcionamiento de estas torres de viento sobre diferentes referencias. Gracias a los estudios realizados en la parte anterior, las especificaciones para las simulaciones son reutilizables.

El objetivo global de esta parte es encontrar claramente si la utilización de las torres de viento para obtener un sistema de climatización natural es eficiente y si la instalación en una ciudad europea puede ser posible con las temperaturas adecuadas (tener en cuenta de la temperatura en verano).



*Ilustración 9: Casa histórica (Aghazadeh) con torres de viento en Abarkuh, Irán*

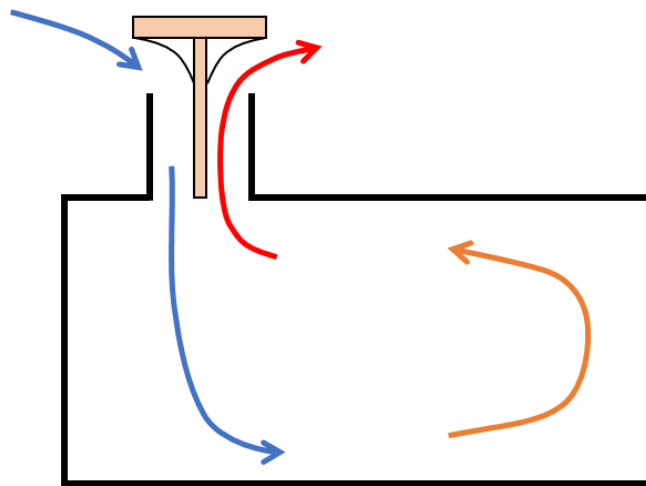
## B. Modelos 2D de Torres de Viento 2D

En primer lugar, para la comprensión del tema, vamos a ver el funcionamiento de una torre de viento. Efectivamente, las torres de viento son una técnica pasiva de climatización, usada para enfriar el interior de los edificios, aprovechando el viento exterior para crear una ventilación natural, gracias a un intercambio de aire entre el exterior e interior.

Es un sistema muy básico que se constituye por una torre elevada con una o varias aberturas orientadas a la dirección del viento que se conecta con el interior. El viento al exterior entra por la abertura y pasa por la torre que es conectado con el interior

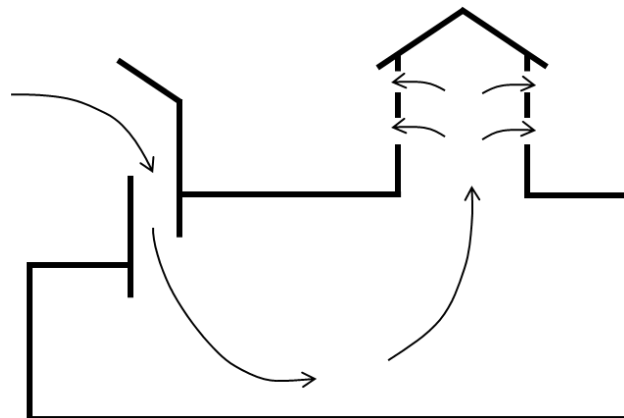


de la vivienda. El aire más fresco circula al interior de la casa y empuja el aire caliente para la salida de la torre. En consecuencia, tenemos una circulación permanente del aire para refrigerar las habitaciones de la vivienda. Además, con las propiedades del aire fresco y caliente, tenemos una diferencia de presión en el interior de la casa (parte superior y inferior de la torre). Por eso, el aire fresco que es más denso produce un movimiento natural de corriente.



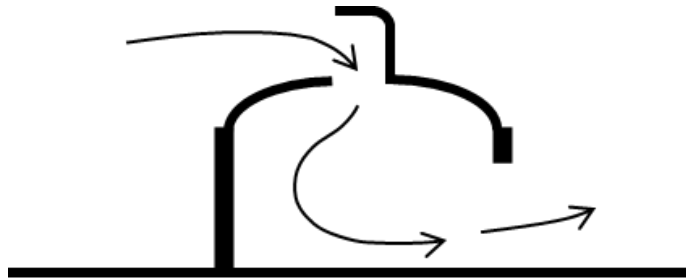
*Ilustración 10: Esquema de funcionamiento*

Para elaborar este estudio en las mejores condiciones, se han elaborado y comparado dos modelos 2D. El primer modelo es una torre de viento unidireccional (con una entrada separada de la salida). Este tipo de modelo permite de entender los corrientes con la entrada que es una abertura de 1m. La salida es una torre con cuatro ventanas.



*Ilustración 11: Modelo 1 de Torre de Viento*

En el segundo modelo, que es un poco más particular y con una forma redonda, el flujo de aire entra por una abertura arriba de la vivienda y sale por la puerta principal.



*Ilustración 12: Modelo 2 Cúpula apta para el viento*

### Generación de malla

Una vez que se ha obtenido el modelo de vivienda, la etapa siguiente es encontrar el dominio computacional adecuado, y generar la malla correspondiente. Así, un dominio de simulación demasiado grande requiere tiempos de cálculo y recursos computacionales enormes. Mientras que una región computacional demasiado pequeña, no permite soluciones de velocidad y temperatura fidedignas. Por lo cual, para conseguir un equilibrio entre los dos, basándonos en experiencias anteriores, encontramos como dimensiones de la región de estudio, una longitud total de 126m y una altura de 40m para la torre de viento (Anexo). El dominio de la simulación de la cúpula es de 105m de longitud y la altura de 40m (Anexo).

## C. Simulación

### a. Programa

Para efectuar las simulaciones, los tres programas que se utilizan más frecuente son GID, Ensa, Paraview y Adapns3d. Todos iniciados con el terminal de Linux, los tres programas son necesarios para ejecutar las simulaciones:

- GID es el programa que nos permite de construir la malla a parte del dibujo del modelo de las torres de viento. Gracias a este programa, es posible imponer las

condiciones de contorno del modelo de acuerdo con los parámetros de simulación.

- Ensa: explicado en la parte anterior (página 5).
- Paraview es el programa que permite de ver el resultado y analizar las simulaciones. Gracias a Linux, podría ser modificado para nuestro tema. Las modificaciones aportadas son para ver la temperatura, la velocidad del flujo, la presión y la densidad. Con este programa también, hay una herramienta que permite ver la solución en cada punto de la malla. Entonces, con esta herramienta, también se pueden verificar las condiciones de contorno impuestas con GID.
- Adapns3d es un programa que estima a posterior el error asociado a soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes basadas en métodos estabilizados, a partir del cual se pueden generar mallas adaptadas que controlan el error de la solución numérica y un reparto uniforme de la distribución del error.

#### b. Simulación Ensa

La realización de la simulación Ensa no fue sencilla. Para obtener resultados correctos, es necesario conseguir los parámetros correctos. Gracias a los estudios de la Cavidad y del código de elementos finitos, es posible darse cuenta que el mejor resultado de simulación sería con el modelo de Full Navier-Stokes con un  $\epsilon$  bajo. Pero se necesita adaptar los parámetros de Navier-Stokes a la geometría y obtener durante los cálculos de simulación, una reducción del residuo de unos cuatro órdenes de magnitud. También, a veces, las condiciones de contorno no estaban correctas porque, se utilizan condiciones “Esenciales Línea” y el punto que está conectado con dos líneas no puede tener las condiciones correctas. Es por ello que es necesario controlar las condiciones de contorno en todos los puntos y así, obtener una buena ejecución de los cálculos.

Finalmente, cuanto más fina es la malla, se necesita más tiempo para los cálculos. Entonces, debemos tener en cuenta el tiempo de simulación, y hacer pruebas antes de la simulación definitiva.

### c. Simulaciones efectuadas

Muchas simulaciones con muchos parámetros diferentes se han realizado para lograr resultados significativos y comparar los dos modelos de torres de viento.

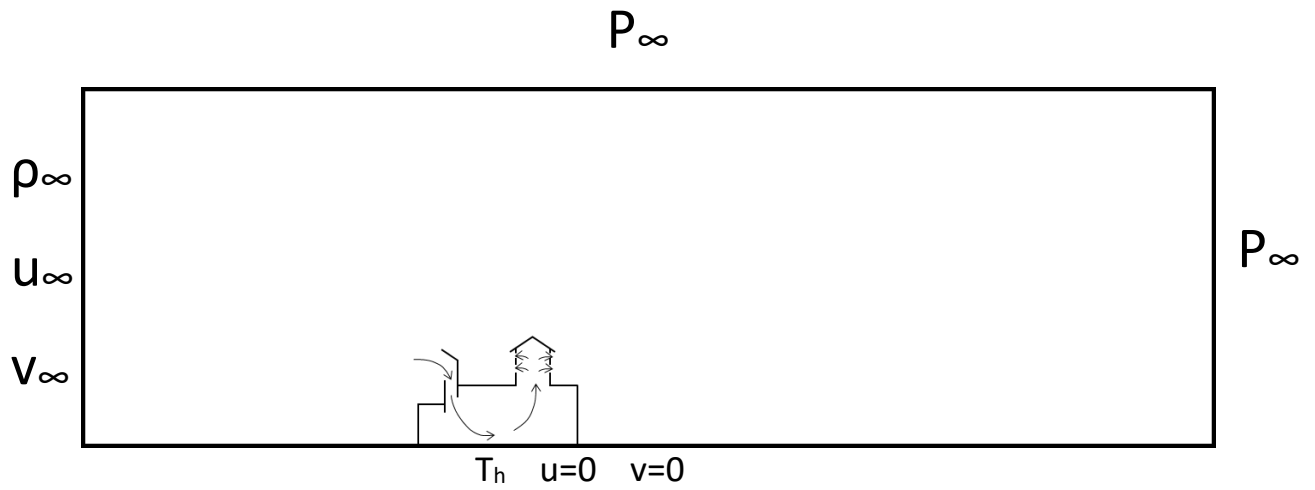
En primer lugar, fueron analizados los dos modelos que son las ecuaciones Full Navier-Stokes y Boussinesq. En estos dos modelos, el siguiente parámetro relevante que debe ser estudiado es la velocidad del viento exterior (5m/s y 15m/s son las dos velocidades analizadas). También se han realizado simulaciones con dos tipos de condiciones de contorno de temperatura en el suelo y paredes: condiciones de contorno esenciales y adiabáticas. Finalmente, a partir de los resultados computacionales se ha analizado la temperatura aparente o sensación térmica a la reacción del cuerpo humano en el interior de la vivienda. La fórmula que proviene de *US National Weather Service* es:

$$T_{ST} = 13.12 + 0.6215 \cdot (T - 273) - (11.37 + 0.3965 \cdot (T - 273)) \cdot 1.23 \cdot \text{mag}(V)^{0.16}$$

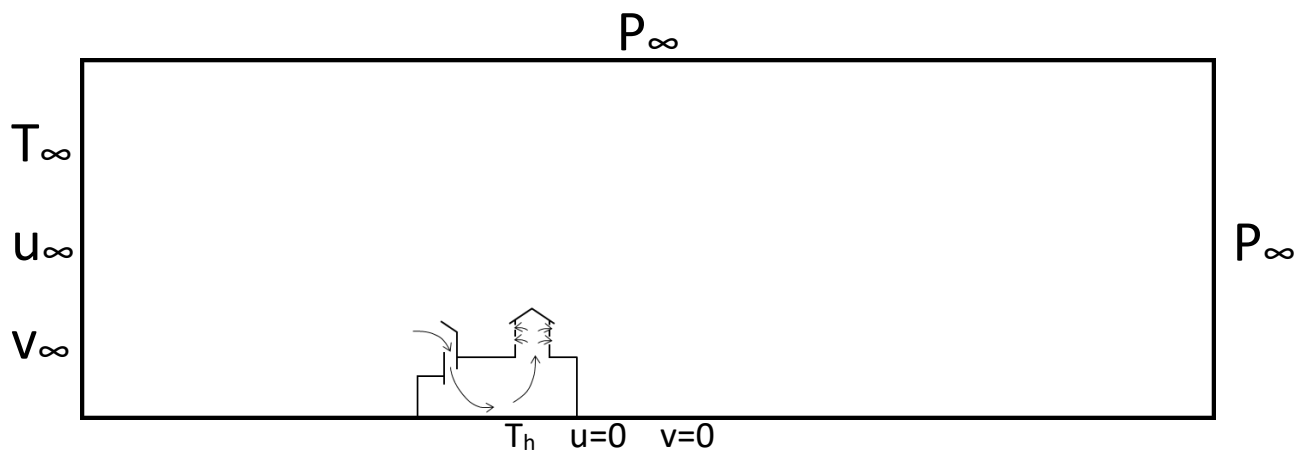
Al tener T en K y V en m/s. Luego, para obtener simulaciones más finas, se ha utilizado el programa Linux para generar mallas adaptadas para soluciones generadas por métodos estabilizados. Adaptns3D (programa para adaptar la malla) genera una malla de fondo (*background mesh*) que se utiliza en GID. Con este programa, es posible también mejorar la precisión específica de cada variable y elegimos la Temperatura. Entonces utilizamos este programa dos veces para obtener una malla muy fina en los sitios que nos interesan (interior de la vivienda) y concentrar más las simulaciones en la temperatura.

### d. Condiciones de contorno

Para realizar las simulaciones, se debe respetar las condiciones de contorno siguientes;



*Ilustración 13: Condiciones de contorno. Full Navier-Stokes*

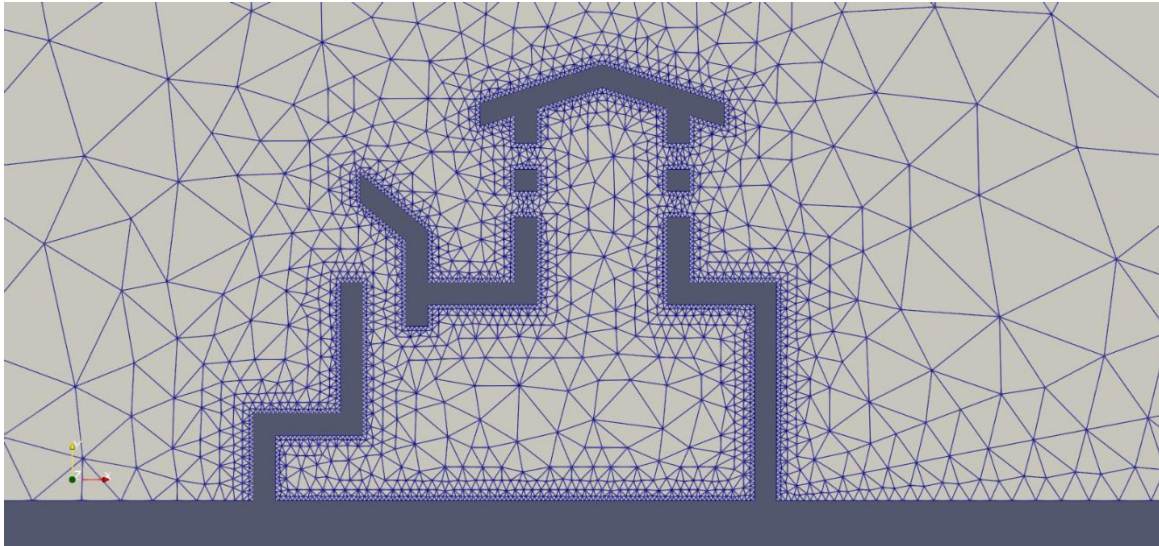


*Ilustración 14: Condiciones de contorno. Boussinesq*

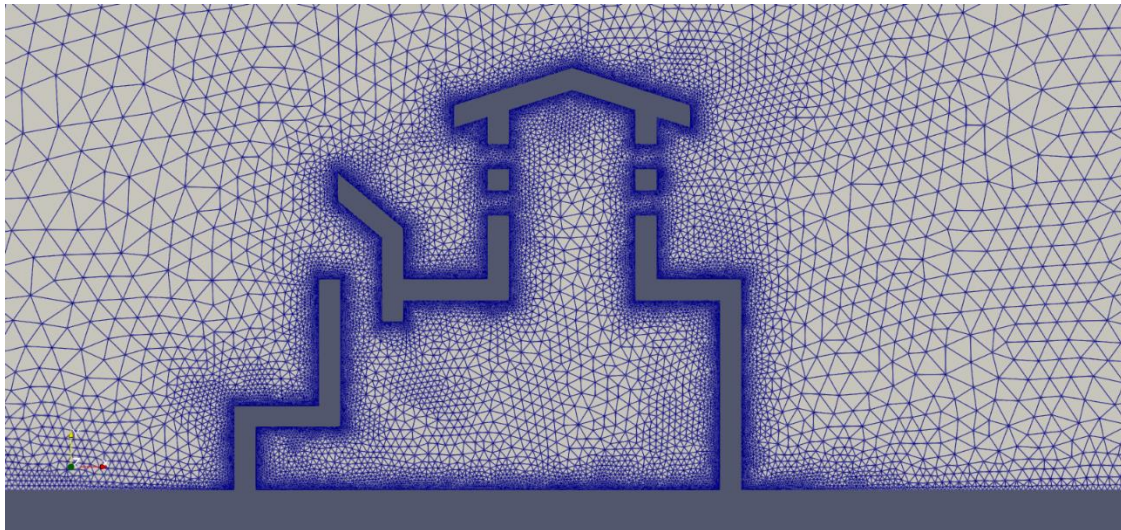
Se tiene como valores:  $\rho=1.151\text{kg/m}^3$ ,  $u=5\text{m/s} - 15\text{m/s}$ ,  $v=0$ ,  $P_\infty=100570\text{Pa}$ ,  $T_\infty=303\text{K}$  (temperatura del exterior),  $T_h=323\text{K}$  (temperatura de las paredes de la vivienda y suelo).

## D. Resultado obtenido

Para los resultados obtenidos de las simulaciones, vamos a comparar los resultados de Full Navier-Stokes y Boussinesq con la malla 2 más fina y la velocidad de  $15\text{m/s}$ .

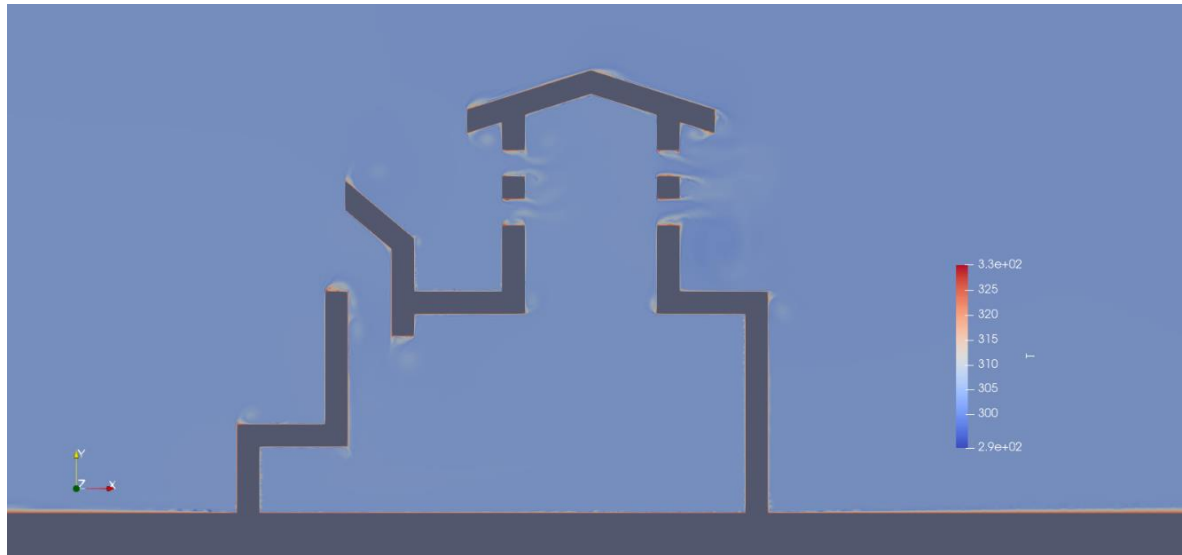


*Ilustración 15: Malla 1 Torre de Viento*

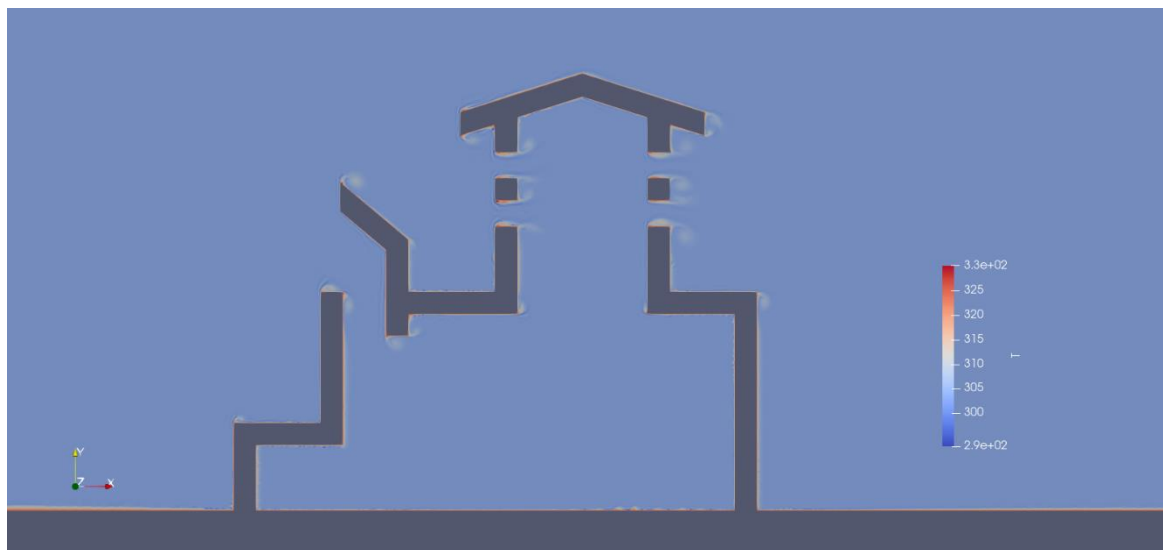


*Ilustración 16: Malla 2 Torre de Viento*

Comparando las mallas, se puede observar en primer lugar que, en el interior de la vivienda, la malla 2 tiene muchos más detalles y entonces promueve mejores resultados.

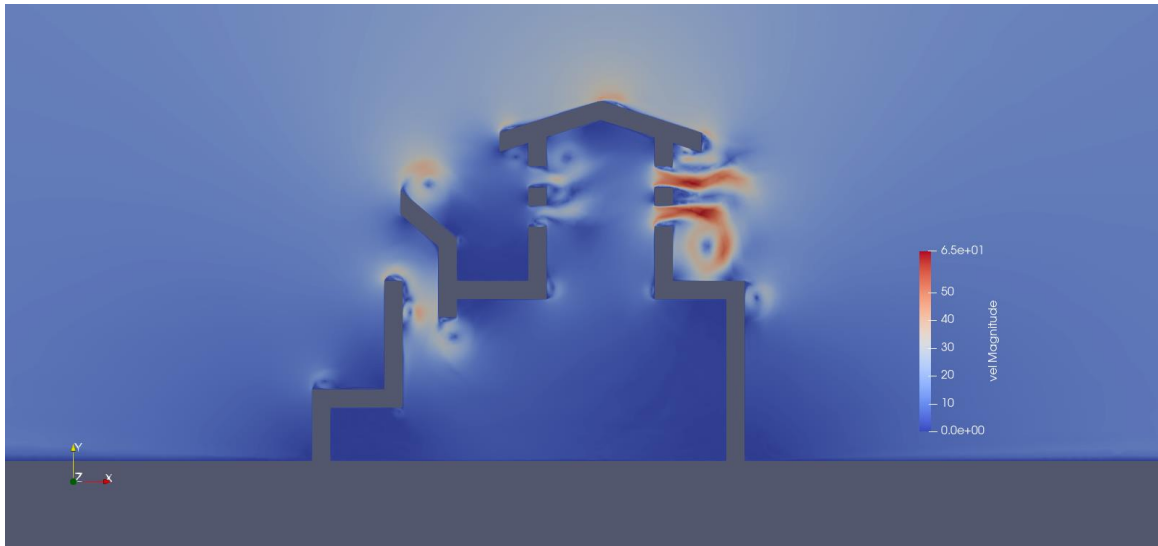


*Ilustración 17: Malla 2 Simulación FullNS Torre de Viento. Temperatura*

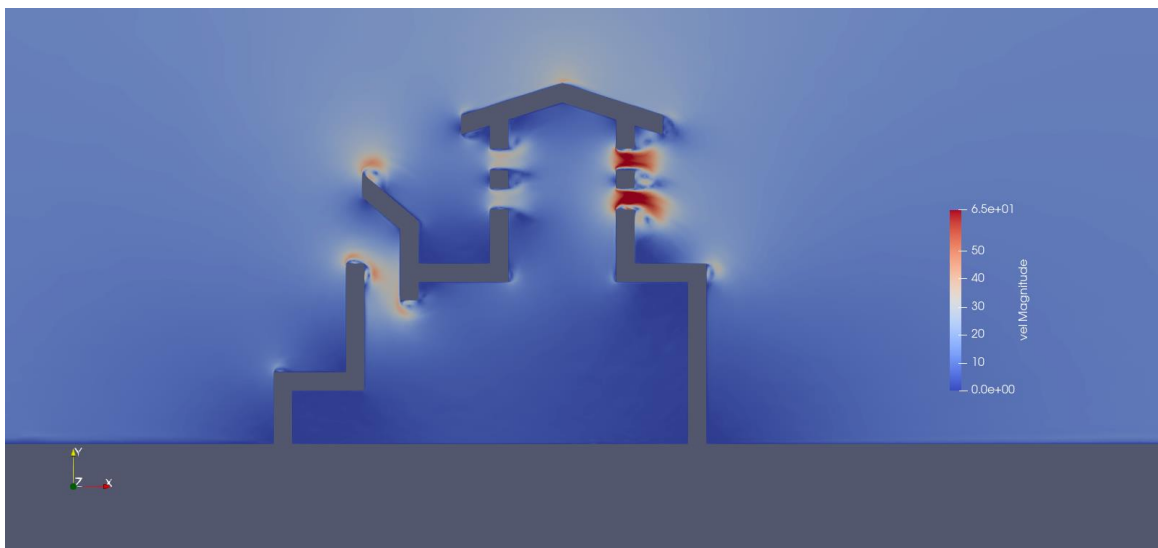


*Ilustración 18: Malla 2 Simulación Boussinesq Torre de Viento. Temperatura*

Se puede observar en ambas ilustraciones que la simulación de Full Navier-Stokes obtiene un poco más de información en el sitio de las ventanas. El flujo de calor es aproximadamente el mismo entre los dos con una temperatura  $T$  de 303.5K en el interior de la vivienda.



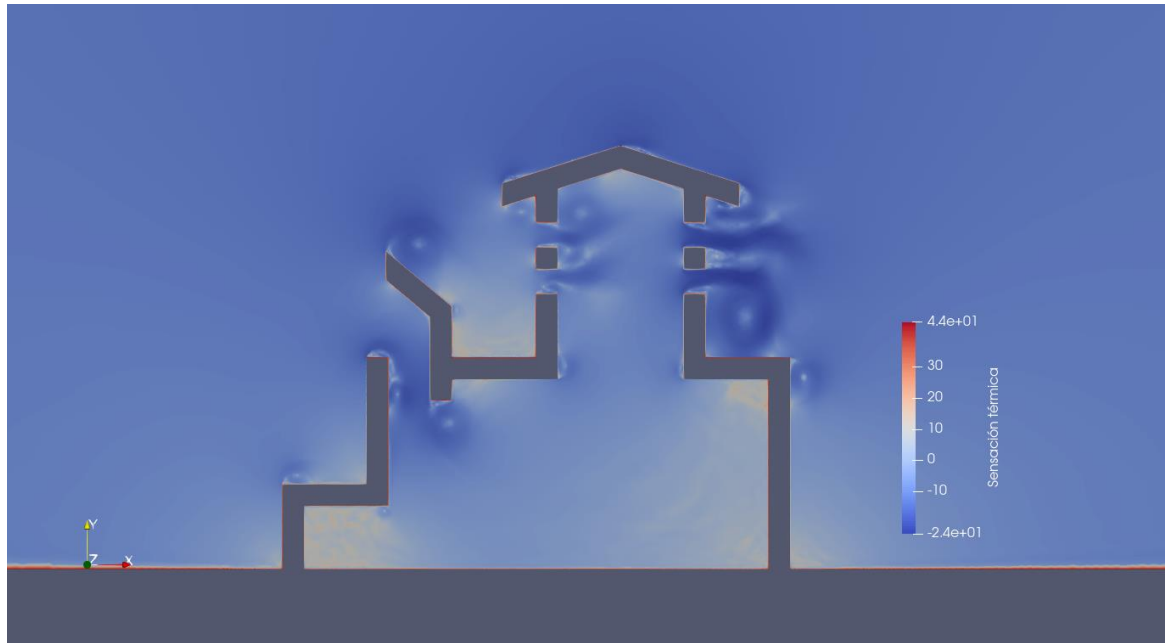
*Ilustración 19: Malla 2 Simulación FullNS Torre de Viento. Velocidad*



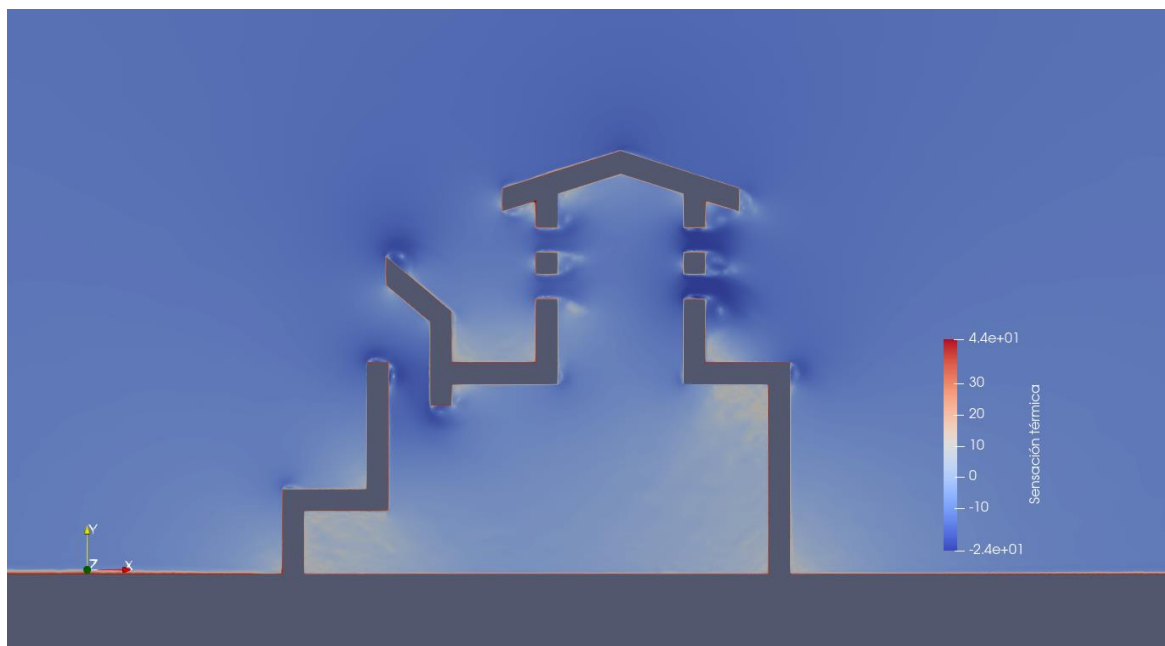
*Ilustración 20: Malla 2 Simulación Boussinesq Torre de Viento. Velocidad*

Si se analiza la velocidad en las simulaciones, la misma llega a la misma idea que para la temperatura. En el sitio de las ventanas, tenemos una concentración de velocidad gracias al efecto de Venturi, pero tenemos más detalles en la simulación de Full Navier-Stokes, para el mismo residuo (aproximadamente 40db).





*Ilustración 21: Malla 2 Simulación FullINS Torre de Viento. Sensación térmica*



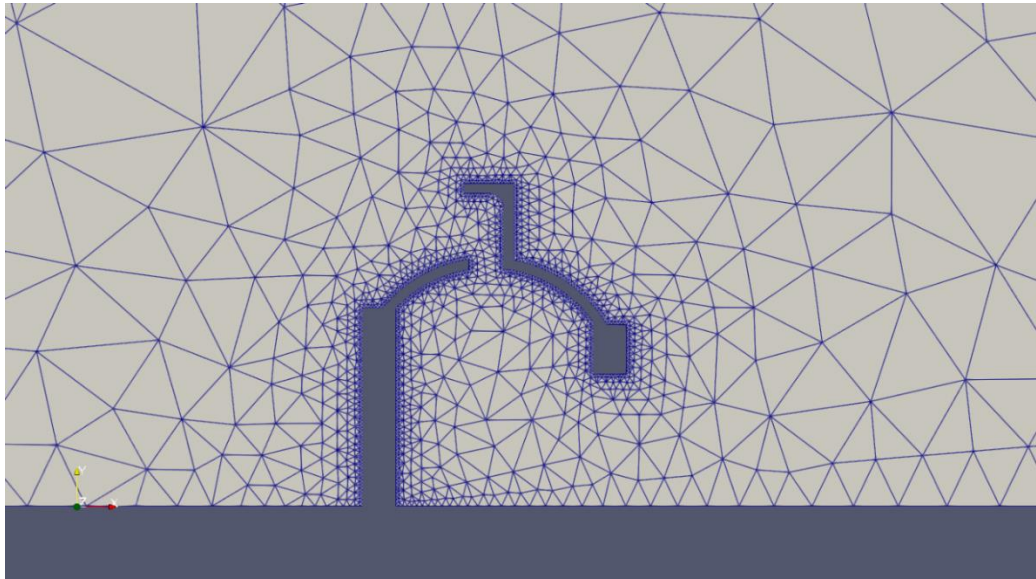
*Ilustración 22: Malla 2 Simulación Boussinesq Torre de Viento. Sensación térmica*

Finalmente, para la simulación de la sensación térmica, que reúne la temperatura y la velocidad, es normal de obtener menos información con el modelo de Boussinesq que con Full Navier-Stokes.

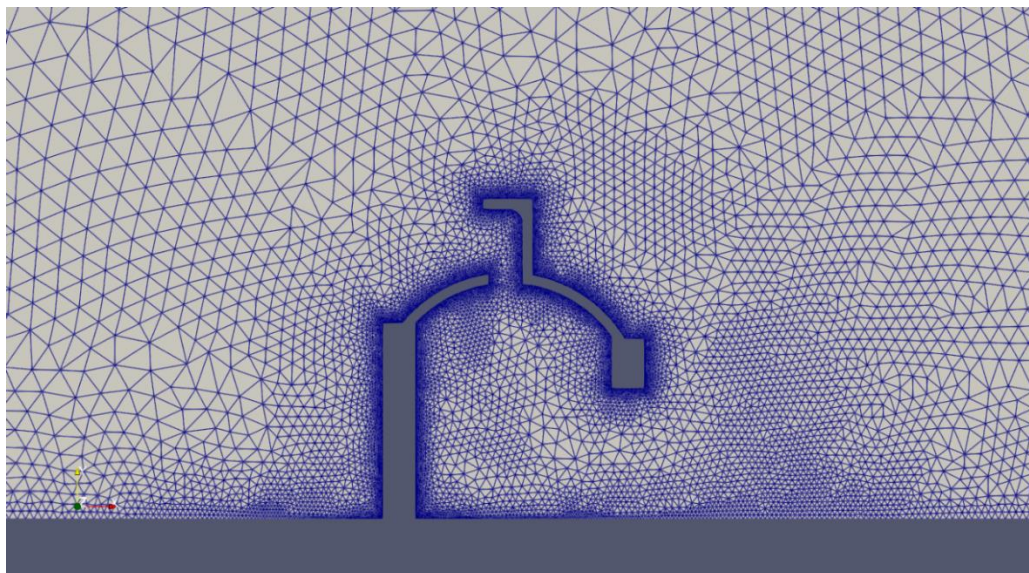
La metodología de Boussinesq es menos precisa, lo que confirma el análisis efectuado. Con este primer modelo de torres de viento, es posible observar que la

temperatura es más fría en el interior de la vivienda y que el aire caliente, sale por las ventanas de arriba. Este modelo es válido para un buen funcionamiento.

Al igual que para las simulaciones para las torres de viento, el análisis Full Navier-Stokes se ha realizado sobre la Cúpula apta para el viento, y también se van a comparar los resultados de Full Navier-Stokes y Boussinesq con la malla 2 más fina y la velocidad de 15m/s.



*Ilustración 23: Malla 1 Cúpula apta para el viento*



*Ilustración 24: Malla 2 Cúpula apta para el viento*

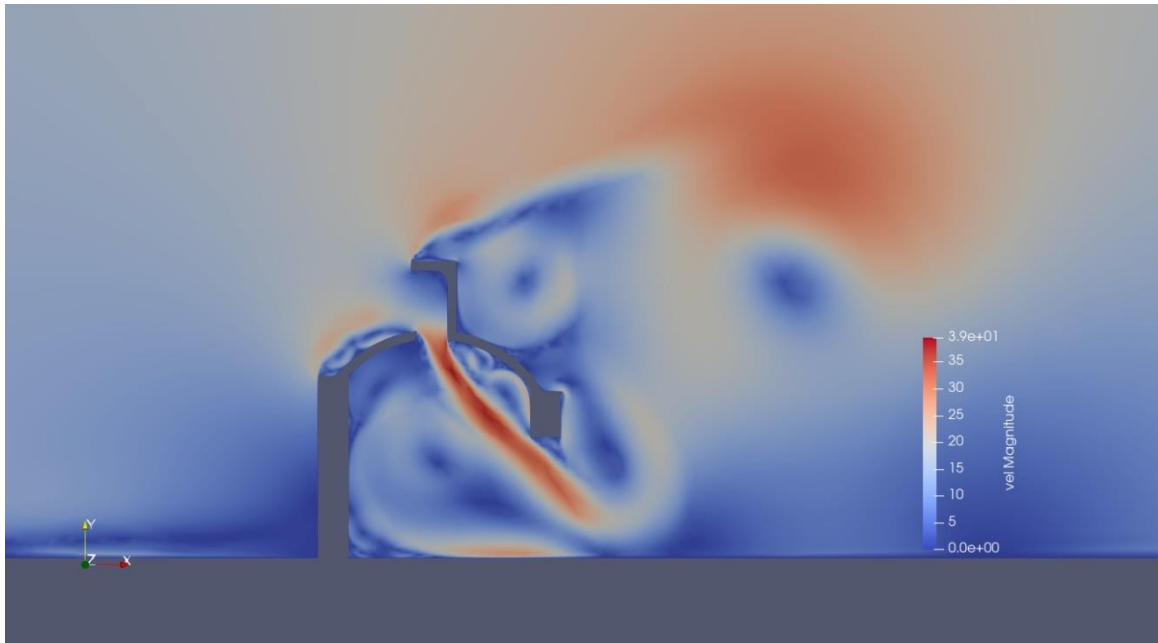


*Ilustración 25: Malla 2 Simulación FullNS. Cúpula Temperatura*

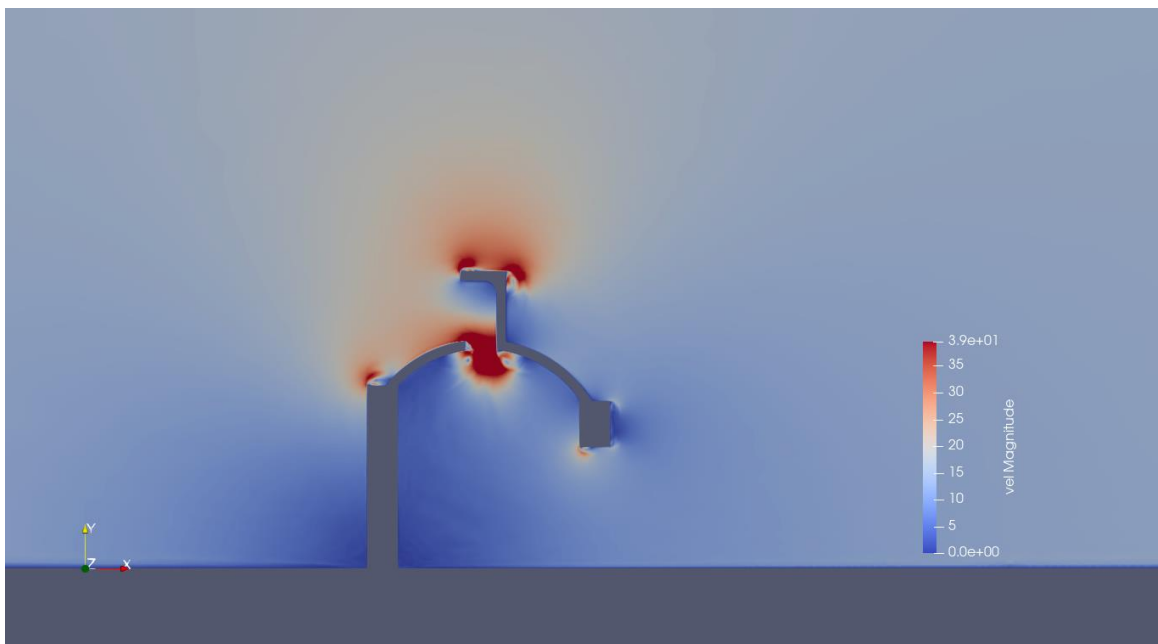


*Ilustración 26: Malla 2 Simulación Boussinesq. Cúpula Temperatura*

Entonces, con los mismos parámetros de cálculo y un residuo óptimo para los dos modelos, se encuentran muchas variaciones. Con la misma escala en las ilustraciones, el flujo de calor es más intensivo con el modelo de Full Navier-Stokes.



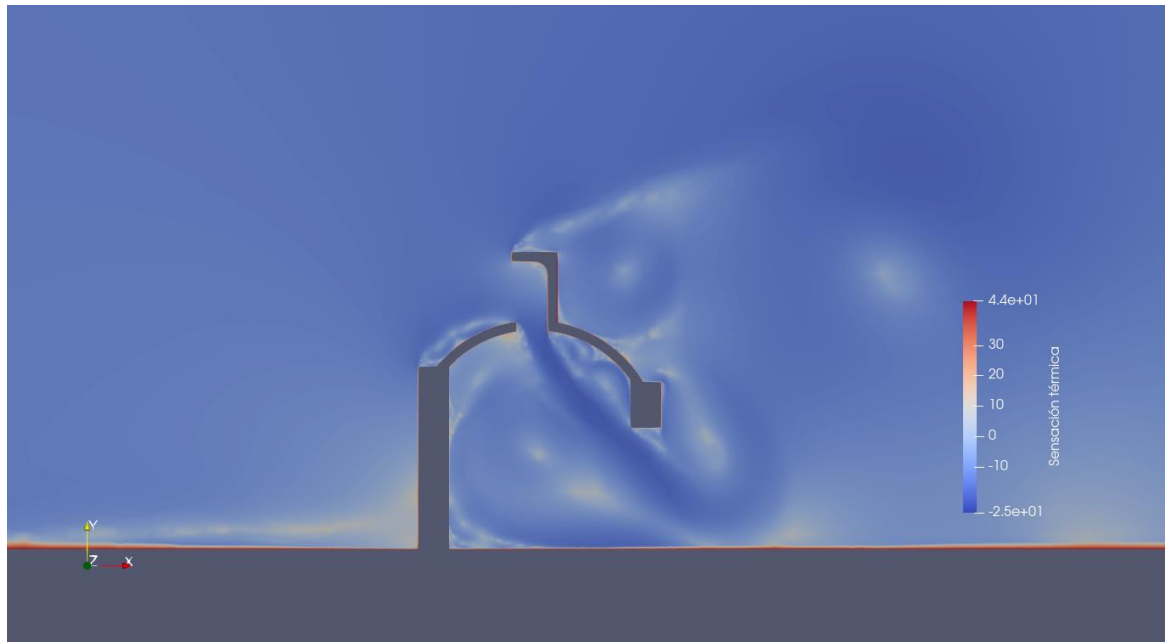
*Ilustración 27: Malla 2 Simulación FullNS. Cúpula Velocidad*



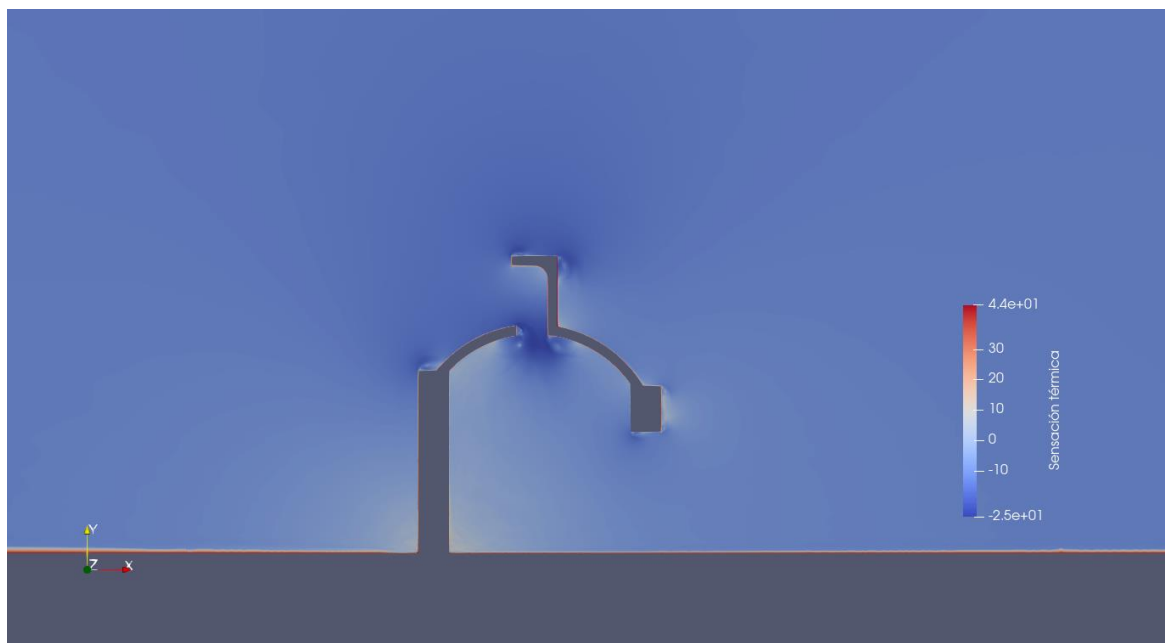
*Ilustración 28: Malla 2 Simulación Boussinesq. Cúpula Velocidad*

Se observan, en estas simulaciones de velocidad, un resultado muy parecido al de las torres de Viento. Con la metodología de Full Navier-Stokes, se obtiene un resultado coherente. El aire pasa por la abertura superior y sale por la puerta principal. Sin embargo, se analiza que el flujo en el interior de la vivienda se mueve de una manera especial que no permite al aire frío

llenar todo el espacio. Se analiza también que, para el modelo de Boussinesq, hay una concentración de velocidad.



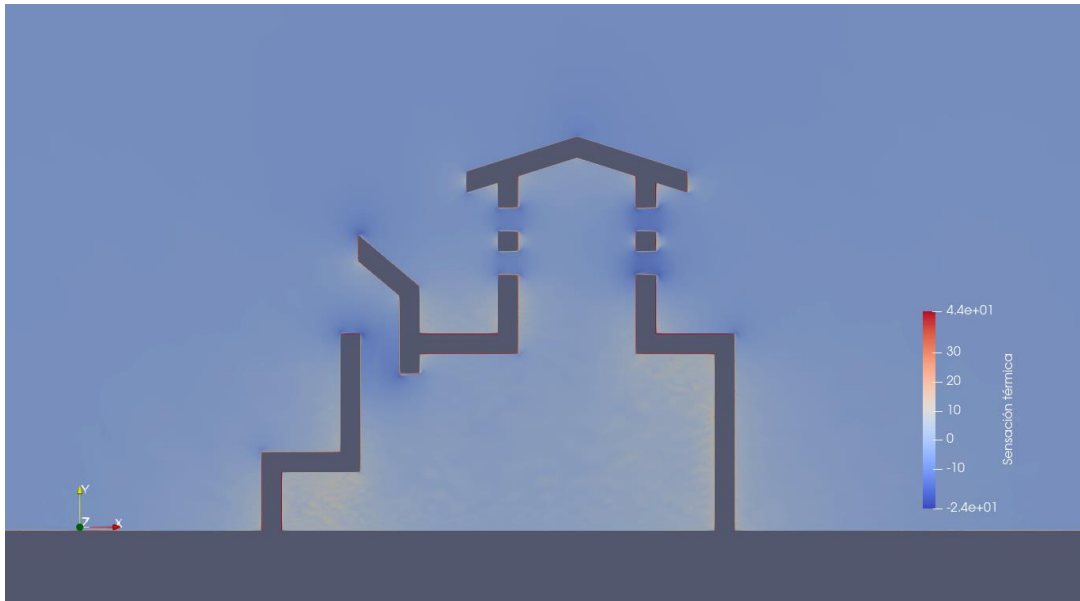
*Ilustración 29: Malla 2 Simulación FullINS Cúpula. Sensación térmica*



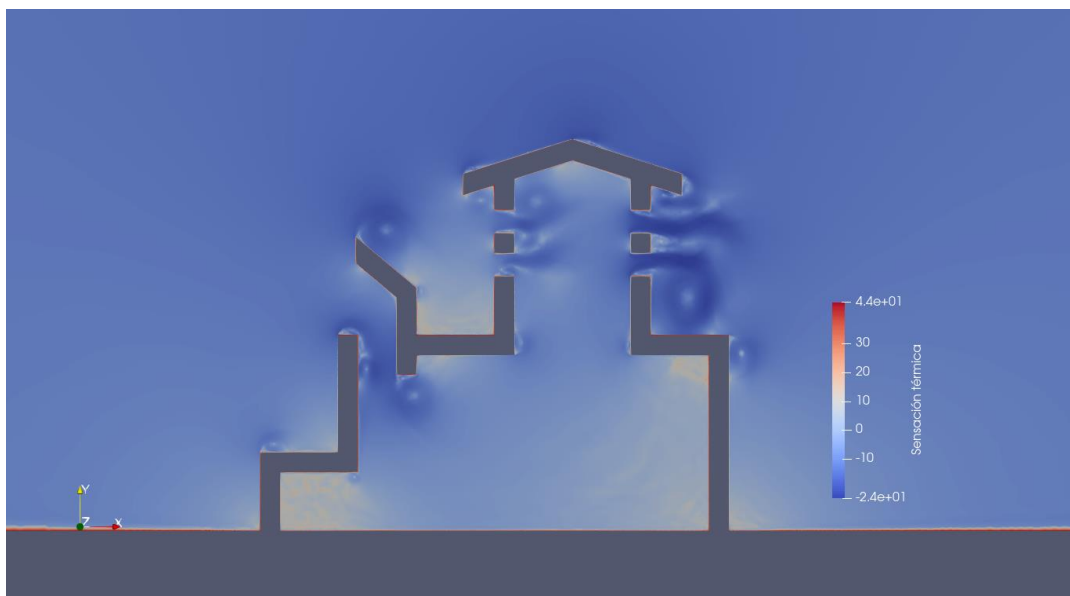
*Ilustración 30: Malla 2 Simulación Boussinesq Cúpula. Sensación térmica*

Como se ha expuesto, el flujo de aire de esta geometría no permite llenar todo el espacio. Y se ve también en la representación de la sensación térmica que el flujo frío pasa directamente por la abertura a la salida de la puerta principal, empero sin tener en cuenta las paredes calientes de la izquierda. Por lo consiguiente, es posible afirmar que, con temperaturas más altas en verano, esta geometría no permitirá climatizar todo el espacio de la vivienda. Los habitantes serán expuestos y convivirán entre dos temperaturas muy diferentes (una al fondo de la vivienda y otra al lado de la puerta). Se puede entonces concluir ese segundo modelo no es tan eficaz para su buen funcionamiento con un viento exterior de 15m/s.

Para terminar la simulación efectuada, las siguientes ilustraciones presentan la simulación de sensación térmica para el modelo de Full Navier-Stokes y la geometría de la torre de viento, con un viento exterior de 5m/s y de 15m/s.



*Ilustración 31: Malla 2 Simulación Full NS Torre de Viento - Viento 5m/s – Sensación termina*



*Ilustración 32: Malla 2 Simulación Full NS Torre de Viento - Viento 15m/s – Sensación termina*

Se observa en las dos imágenes que la sensación térmica es una variable extremadamente relevante. La una sensación de frio más importante con el viento exterior de 15m/s, para el cual, en el interior de la vivienda, las temperaturas aparentes (sensación térmica) están frías: alrededor de 10°C. Mientras que, con un viento exterior de 5m/s obtenemos una sensación térmica de 20°C.



## E. Mejoras posibles para un uso cotidiano

Después de haber realizado estos estudios, se puede concluir que la torre de viento es más eficiente que la cúpula apta para el viento. Para mejorar la geometría, es posible pensar que la velocidad de los vientos es diferente según la altitud. Entonces, para adaptar la torre de viento a los diferentes sitios de una región, es mejor de tener en cuenta la mejor altitud de la torre para obtener la eficiencia más optima.

Por un otro lado, hemos visto que con un viento exterior de 5m/s la temperatura de sensación térmica es de 20°C comparado con 10°C para el viento de 15m/s. Entonces, para los periodos con mucho viento, se puede instalar un panel de ocultación adaptada para el viento y la apertura de entrada de la vivienda que resista al aire. Así, gracias a este panel de ocultación, se obtiene una velocidad del aire menos importante dentro de la vivienda y al final una sensación térmica adecuada para vivir.

También, otro aspecto que puede mejorar el uso cotidiano, es pintar las paredes de un color claro para reflejar la luz solar. De esta manera, con las paredes más frías, se puede aumentar la eficiencia de la torre de viento.

Finalmente, si se desea lograr una optimización real de los flujos de una vivienda (aire fresco en las salas y habitaciones) puede ser posible añadir más entradas de flujos y conectar cada una a una sala especial. Por ejemplo, si se debe cocinar (una tarea que representa la existencia de una fuente caliente), solamente una apertura no va a ser suficiente y sería interesante añadir una entrada y salida específicas.

## F. Conclusión

Para terminar este análisis sobre las posibilidades de utilización del sistema de torres de viento y obtener una refrigeración natural, se puede afirmar que, con las simulaciones y las mejoras propuestas, es posible utilizar este sistema de enfriamiento en las ciudades de Europa. Es un sistema muy básico que no necesita electricidad para funcionar, y entonces puede reducir los efectos de calentamiento global producido por el aire acondicionado instalado en la mayor parte de las viviendas.



## CONCLUSIÓN

Para concluir esta investigación, se ha realizado el análisis del código de elementos finitos en una cavidad cuadrada. Gracias a las curvas de simulación, se compara la convergencia de cada método y se ha elegido el modelo de Full Navier-Stokes como el más eficaz. Además, se analiza que, para cada curva la matriz de estabilización más polivalente es la Clásica o Polner, para todos los métodos numéricos, porque la convergencia es más rápida con la curva de Clásica y Polner.

También, con las múltiples simulaciones de los modelos de torres de viento, se han comparado los dos modelos Full Navier-Stokes y Boussinesq en dos geometrías muy diferentes. Finalmente, se obtiene la misma respuesta que en la parte anterior: el modelo de Full Navier-Stokes es más eficiente. Igualmente, gracias a las simulaciones, se ha estudiado la importancia y el potencial de cada geometría. Por lo cual, en la segunda parte del estudio, se ha concluido que la geometría 2D de la torre de viento es mejor y más eficiente que la cúpula debido a que los flujos de aire en el interior de la vivienda reparten el aire frío de forma más uniforme y se consiguen así mejores sensaciones térmicas.

# BIBLIOGRAFIA

FERNÁNDEZ, I. O. TORRES DE VIENTO. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. *Universidad Politécnica de Madrid*

Girault, V., & Raviart, P. A. (1979). Finite element approximation of the Navier-Stokes equations. *Lecture Notes in Mathematics, Berlin Springer Verlag*, 749.

Hauke, G., Doweidar, M. H., & Fuentes, S. (2012). Mesh adaptivity for the transport equation led by variational multiscale error estimators. *International journal for numerical methods in fluids*, 69(12), 1835-1850.

Hauke, G., Lanzarote J., Simulation of low-speed buoyant flows with a stabilized compressible/incompressible formulation: The full Navier-Stokes approach versus de Boussinesq model. *LIFTEC (CSIC) – Universidad de Zaragoza, Area de Mecánica de Fluidos, Escuela de Ingeniería y Arquitectura/María de Luna 3, 50018 Zaragoza, Spain*

Hauke, G., Lanzarote J., Simulation of low-speed buoyant flows with a stabilized compressible/incompressible formulation. *LIFTEC (CSIC) – Universidad de Zaragoza, Area de Mecánica de Fluidos, Escuela de Ingeniería y Arquitectura/María de Luna 3, 50018 Zaragoza, Spain*

Irisarri, D., & Hauke, G. (2021). A posteriori error estimation and adaptivity based on VMS for the incompressible Navier–Stokes equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 373, 113508.

Le Quéré, P., Weisman, C., Paillère, H., Vierendeels, J., Dick, E., Becker, R., & Locke, J. (2005). Modelling of natural convection flows with large temperature differences: a benchmark problem for low Mach number solvers. Part 1. Reference solutions. *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, 39(3), 609-616.

Le Quéré, P., Weisman, C., Paillère, H., Vierendeels, J., Dick, E., Becker, R., ... & Locke, J. (2005). Modelling of natural convection flows with large temperature differences: a benchmark problem for low Mach number solvers. Part 1. Reference solutions. *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, 39(3), 609-616.

Martinez, M. J., & Gartling, D. K. (2004). A finite element method for low-speed compressible flows. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 193(21-22), 1959-1979.

Paillère, H., Le Quéré, P., Weisman, C., Vierendeels, J., Dick, E., Braack, M., ... & Hosseinizadeh, S. F. (2005). Modelling of natural convection flows with large temperature differences: a benchmark problem for low Mach number solvers. Part 2. Contributions to the June 2004 conference. *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, 39(3), 617-621.

Shakib, F., Hughes, T. J., & Johan, Z. (1989). A multi-element group preconditioned GMRES algorithm for nonsymmetric systems arising in finite element analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 75(1-3), 415-456.

Weiss, J. M., & Smith, W. A. (1995). Preconditioning applied to variable and constant density flows. *AIAA journal*, 33(11), 2050-2057.