

ANÁLISIS MULTIDIMENSIONAL DE LA INFLUENCIA DEL TECHO EN EL  
COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL INTERIOR DE RECINTOS

KAREN ALEXANDRA RUIZ BERNAL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2015

ANÁLISIS MULTIDIMENSIONAL DE LA INFLUENCIA DEL TECHO EN EL  
COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL INTERIOR DE RECINTOS

Presentado por:

KAREN ALEXANDRA RUIZ BERNAL

Trabajo de grado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Mecánico

Director:

PhD. JULIÁN ERNESTO JARAMILLO IBARRA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2015

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi madre, mi abuela, mi tío y mi hermana, por sus enseñanzas y por todos los momentos compartidos.

Mi tesoro más grande es poder contar con ellos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su formación académica.

Al profesor Julián Jaramillo por la asesoría brindada, por el tiempo dedicado y por su acompañamiento en el desarrollo del proyecto.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	20
OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO .....	22
OBJETIVO GENERAL .....	22
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
1. TECHOS VERDES .....	24
1.1. ESTUDIOS RELACIONADOS.....	24
1.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS TECHOS VERDES .....	26
1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS TECHOS VERDES SEGÚN SU ESTRUCTURA .....	29
2. MECANISMOS DE TRANFERENCIA DE CALOR .....	30
2.1. CONDUCCIÓN.....	30
2.2. CONVECCIÓN .....	31
3. RADIACIÓN SOLAR .....	33
3.1. RADIACIÓN SOLAR DIRECTA.....	33
3.2. RADIACIÓN SOLAR DIFUSA .....	33
3.3. RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUERFICIE EN LA TIERRA.....	34
3.3.1. Declinación .....	34
3.3.2. Ángulo horario .....	35
3.3.3. Latitud .....	36
3.3.4. Elevación o altura solar.....	36
3.3.5. Azimut solar .....	36
3.3.6. Azimut de la pared .....	37
4. MODELAMIENTO MATEMÁTICO .....	38
4.1. ECUACIONES GOBERNANTES .....	38

4.2. APROXIMACIÓN BOUSSINESQ.....	41
4.3. FENÓMENOS TURBULENTOS.....	41
4.4. TEOREMA DE STOKES.....	42
4.5. AROXIMACIONES NUMÉRICAS PARA EL TRATAMIENTO DE LA TURBULENCIA.....	45
4.6. ECUACIONES DE NAVIER-STOKES PROMEDIADAS TEMPORALMENTE.....	45
4.7. MODELOS TURBULENTOS.....	47
4.7.1. Modelo Spalart-Allmaras.....	47
4.7.2. Modelo k-épsilon.....	47
4.7.3. Modelo k-omega.....	48
4.7.4. Modelo k-omega SST.....	50
4.7.5. Modelos RNG k Épsilon.....	50
4.6. COMPORTAMINETO CERCA A LAS PAREDES.....	50
4.6.1. Funciones de pared.....	51
4.6.2. Bajo número de Reynolds.....	52
5. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	53
5.1. ORIGEN DEL CFD.....	53
5.2. SECUENCIA Y ESTRUCTURA DE CÓDIGOS CFD.....	54
5.2.1. PREPROCESO.....	55
5.2.2. SOLUCIONADOR.....	55
5.2.3. POSTPROCESO.....	56
5.3. DISCRETIZACIÓN ESPACIAL.....	57
5.3.1. Método de volúmenes finitos.....	57
5.3.2. Discretización del término fuente.....	60
5.3.3. Discretización del término difusivo.....	61
5.3.4. Discretización del término convectivo.....	62
5.4. DISCRETIZACIÓN TEMPORAL.....	64

6. OPENFOAM .....	68
6.1. CARACTERISTICAS DEL DISEÑO DE OPENFOAM.....	70
6.2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE EL CÓDIGO .....	70
6.3. ESTRUCTURA DE LOS CASOS .....	72
6.4. REALIZACIÓN DE UNA SIMULACIÓN.....	75
6.4.1. Mallas y volúmenes de control.....	75
6.4.2. Condiciones de contorno .....	77
6.4.3. Selección de la aplicación de OpenFOAM.....	81
6.4.4. Ejecución y post procesado .....	95
7. CONOCIENDO OPENFOAM.....	97
7.1. LID DRIVEN CAVITY .....	97
7.1.1. Definición del caso físico .....	97
7.1.2. Geometría y malla.....	98
7.1.3. Condiciones de contorno .....	101
7.1.4. Propiedades físicas.....	101
7.1.5. Parámetros de control de la simulación .....	102
7.1.6. Ajustes de discretización y linealización del solucionador .....	102
7.1.7. Resultados numéricos .....	102
7.2. CAVIDAD DIFERENCIALMENTE CALENTADA.....	106
7.2.1. Descripción del caso.....	106
7.2.2. Resultados numéricos .....	107
8. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL INTERIOR DE RECINTOS .....	121
8.1. PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN .....	121
8.1.1. Método de cálculo.....	121
8.1.2. Estructura del caso .....	123
8.1.3. Propiedades termo físicas .....	124
8.1.4. Condiciones iniciales y de contorno.....	125
8.1.5. Esquemas numéricos, solucionador y algoritmo de control.....	131

8.2. GEOMETRÍA SIMPLIFICADA .....	133
8.2.1. Techo de concreto .....	133
8.2.2. Techos verdes .....	137
8.2. COMPARACIÓN PLACA DE CONCRETO CON TECHOS VERDES.....	145
9. CONCLUSIONES .....	155
10. RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES.....	157
REFERENCIAS .....	158
BIBLIOGRAFÍA.....	161
ANEXOS.....	162

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Términos de la ecuación general de conservación. ....	40
Tabla 2. Coeficientes de cierre para el modelo k- $\epsilon$ . ....	48
Tabla 3. Coeficientes de cierre modelo de turbulencia k- $\omega$ . ....	49
Tabla 4. Definición de variables y coeficientes en la ecuación general de conservación para obtener distintas ecuaciones de gobierno. ....	60
Tabla 5. Tipos de condiciones de contorno básicos .....	79
Tabla 6. Tipos de condiciones de contorno. ....	80
Tabla 7. Subdirectorios que conforman controlDict .....	82
Tabla 8. Principales palabras clave usadas en fvSchemes .....	86
Tabla 9. Esquemas de interpolación.....	87
Tabla 10. Esquemas del gradiente normal la superficie. ....	87
Tabla 11. Esquemas disponibles para la discretización en gradSchemes.....	88
Tabla 12. Comportamiento de los esquemas normales a la superficie utilizados en laplacianSchemes.....	89
Tabla 13. Comportamiento de los esquemas de interpolación utilizados en divSchemes .....	90
Tabla 14. Esquemas disponibles para la discretización en ddtSchemes. ....	91
Tabla 15. Solucionadores lineales. ....	92
Tabla 16. Opciones de preconditionador. ....	94
Tabla 17. Opciones de smoother .....	94
Tabla 18. Palabras clave usadas en el archivo blockMeshDict.....	99
Tabla 19. Condiciones de contorno para las variables utilizadas en la simulación. . .....	108

Tabla 20. Propiedades del fluido dentro de la cavidad $Ra 10^5$ .....	109
Tabla 21. Parámetros de las malla computacionales.....	112
Tabla 22. Errores relativos asociados a las mallas empleadas comparando con valores presentados por D.C. Wan. ....	112
Tabla 23. Condiciones iniciales de contorno para las variables usadas en buoyant Simple Foam.....	116
Tabla 24. Propiedades del fluido para una cavidad con propiedades físicas variables. ....	116
Tabla 25. Propiedades Termo físicas para los diferentes materiales usados en las simulaciones .....	124
Tabla 26. Condiciones de contorno impuestas para la región Air.....	127
Tabla 27. Condiciones de contorno impuestas en system/Roof/changeDictionaryDict para la simulación de los recintos. ....	128
Tabla 28. Condiciones de contorno impuestas en system/Walls/changeDictionaryDict para la simulación de los recintos. ....	128
Tabla 29. Ángulos de incidencia de la radiación solar respecto a una superficie. . .....	129
Tabla 30. Radiación solar según la posición de la superficie.....	130
Tabla 31. Regresiones cuadráticas de las condiciones climáticas.....	130
Tabla 32. Esquemas numéricos usados en la simulación de los recintos .....	132
Tabla 33. Solucionadores y algoritmos de control usados en la simulación de los recintos. ....	132
Tabla 34. Contornos de temperatura para el aire al interior de un recinto con techo de concreto a través del tiempo en $X=2.6$ y $Z=2.6$ .....	134
Tabla 35. Contornos de temperatura para el aire al interior de un recinto con techo verde a través del tiempo.....	137

Tabla 36. Distribución de velocidad para los diferentes tipos de techos simulados (vista normal al plano z) .....	140
Tabla 37. Distribución de temperaturas para los recintos en los planos centrales... ..	146
Tabla 38. Comparación de la distribución de la velocidad entre un recinto con techo de concreto y otro con techo verde. ....	148
Tabla 39. Comparación de la distribución de la velocidad para un aparta-estudio con diferentes tipos de techos. ....	150
Tabla 40. Comparación de la energía cinética turbulenta $k$ , entre un recinto con techo de concreto y uno con techo verde. ....	151

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diseños actuales de edificaciones usando techos verdes .....	26
Figura 2. Techos verdes extensivos muy desarrollados en Europa. ....	27
Figura 3. Estructura común de un techo verde. ....	28
Figura 4. a) Techo de tipo extensivo. b) Techo tipo intensivo. ....	29
Figura 5. Ángulo de declinación. ....	34
Figura 6. Variación del ángulo horario. ....	35
Figura 7. Posición del sol respecto a una superficie ubicada en el planeta tierra. ....	37
Figura 8. Descripción del proceso de la turbulencia. ....	42
Figura 9. Diagrama de flujo de una aplicación CFD típica. ....	56
Figura 10. Discretización unidimensional por volúmenes finitos. ....	58
Figura 11. Estructura de OpenFOAM según las herramientas de cada paso de una simulación completa. ....	68
Figura 12. Posibilidades interacción con OpenFOAM. ....	69
Figura 13. Ecuación en lenguaje de programación C++, OpenFOAM. ....	72
Figura 14. Estructura de un caso de estudio. ....	74
Figura 15. Tipos de malla. a) Malla estructurada ortogonal. b) Malla estructurada ajustada al cuerpo. c) Malla estructurada en bloque. d) Malla no estructurada. e) Malla híbrida. ....	76
Figura 16. Atributos de los parches. ....	78
Figura 17. Estructura de un archivo FvSchemes. ....	85
Figura 18. Geometría del caso Driven cavity. ....	97

Figura 19. Encabezado de los archivos de un caso en OpenFOAM.....	98
Figura 20. Definición de la razón de expansión. ....	100
Figura 21. Líneas de corriente para diferentes números de Reynolds. ....	103
Figura 22. Velocidad vertical a lo largo de la línea horizontal central para driven cavity, flujos de $Re= 100, 400, 1000$ y $3200$ . ....	105
Figura 23. Resultados obtenidos para la velocidad vertical o lo largo de la horizontal, con $Re = 100, 400, 1000$ y $3200$ . ....	105
Figura 24. Vista esquemática de la cavidad. ....	106
Figura 25. Definición de las diferentes condiciones de contorno para la cavidad. . .....	108
Figura 26. Orden de asignación de puntos para la creación de mallas en OpenFOAM. ....	110
Figura 27. Mallado refinado a ) $20 \times 20$ , b) $40 \times 40$ , c) $80 \times 80$ y d) $160 \times 160$ .....	111
Figura 28. Velocidades en dirección vertical a lo largo del eje x para las diferentes mallas simuladas. ....	112
Figura 29. Parámetros de convergencia para la simulación de $Ra 1010$ con el modelo de turbulencia RNG k $\epsilon$ . ....	114
Figura 30. Velocidad vertical a la mitad del plano horizontal. ....	115
Figura 31. Comparación de la velocidad vertical en dirección horizontal obtenida con la aproximación Buossinesq malla $80 \times 80$ y la encontrada con propiedades físicas variables. ....	117
Figura 32. Residuos del método Pimple en cada iteración de calculo para las velocidades y la presión $rg_h$ durante la simulación. ....	119
Figura 33. Velocidad vertical a lo largo del eje horizontal hasta $L/2$ para un $Ra$ de $1 \times 10^{10}$ .....	120
Figura 34. Estructura para un caso chtMultiRegionFoam. ....	123

Figura 35. Flujos de calor incidentes sobre los recintos. ....	125
Figura 36. Condiciones de contorno y dimensiones definidos en la creación de la malla. ....	127
Figura 37. Condiciones de contorno generadas por la definición de las regiones. . .....	133
Figura 38. Planos para los cuales se muestran los contornos de temperatura generados en el recinto con techo de concreto. ....	134
Figura 39. Variación de la temperatura a través del tiempo en el centro de los recintos para diferentes alturas en el eje Y. ....	144
Figura 40. Plano aparta-estudio. ....	145
Figura 41. Dimensiones del aparta-estudio a simular. ....	146
Figura 42. Distribución de la temperatura en paredes del recinto con techo de concreto a los 21600 de simulación.....	149
Figura 43. Temperatura en el centro de los recintos con placa de concreto y techo verde para diferentes alturas. ....	154

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. DATOS CLIMATOLÓGICOS. ....	162
ANEXO B. REGRESIONES.....	163
ANEXO C. PARÁMETROS FVSCHEMES UTILIZADOS EN TODAS LAS SIMULACIONES. ....	167
ANEXO D. PARÁMETROS FVSOLUTION UTILIZADOS EN TODAS LAS SIMULACIONES. ....	168
ANEXO E. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LAS PAREDES SEGÚN SU POSICIÓN A TRAVÉZ DEL TIEMPO. ....	169

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS MULTIDIMENSIONAL DE LA INFLUENCIA DEL TECHO EN EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL INTERIOR DE RECINTOS.\*

**AUTOR:** KAREN ALEXANDRA RUIZ BERNAL\*\*

**PALABRAS CLAVE:** VIVIENDA BIOCLIMÁTICA, TRANSFERENCIA DE CALOR, HERRAMIENTAS CFD, OPENFOAM, BUCARAMANGA.

Este proyecto presenta las ventajas térmicas que se obtienen con el uso de techos verdes en diseños de arquitectura bioclimática. El análisis se construyó usando la técnica de dinámica de fluidos computacional, pues esta permite desenvolver simulaciones numéricas eficaces basadas en la obtención de soluciones numéricas de leyes físicas usadas para modelar flujos de fluidos como lo son la ley de conservación de la masa, ley cantidad de movimiento, ley de conservación de energía y ecuaciones de Navier-Stokes usadas para describir el movimiento de un fluido.

Las simulaciones fueron desarrolladas usando el código numérico Open source Field Operation And Manipulation (OpenFOAM), un software libre escrito en el lenguaje de programación C++. OpenFOAM permite la solución de problemas numéricos de medios continuos usando el método de volúmenes finitos que discretiza las ecuaciones gobernantes, malla colocada y el método PIMPLE para resolver el acoplamiento presión velocidad.

Inicialmente se realizó un análisis con una geometría simplificada para validar los resultados con los existentes en la literatura. En el segundo análisis se modelo usando una geometría más real, se calcula la carga térmica por convección calculada mediante la temperatura ambiente y el coeficiente térmico de convección del lugar además el calor generado por la radiación solar incidente. Se consideraron flujos de calor a través de paredes de un material de construcción estándar. Los resultados de las simulaciones demostraron que la temperatura dentro de un recinto es menor usando techos verdes.

---

\*Trabajo de grado.

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.  
Director: PhD Julián Ernesto Jaramillo Ibarra.

## ABSTRACT

**TITLE:** MULTIDIMENSIONAL ANALYSIS OF THE ROOF INFLUENCE IN THE THERMAL PERFORMANCE OF INTERIOR OF ENCLOSURES \*.

**AUTHOR:** KAREN ALEXANDRA RUIZ BERNAL \*\*

**KEYWORDS:** BIOCLIMATIC HOUSING, HEAT TRANSFER, TOOLS CFD, OpenFOAM, BUCARAMANGA.

This project describes the thermal advantages obtained by using green roofs in the designs of bioclimatic architecture. The analysis was done by means of computational fluid dynamics technique, since they allow to develop efficient numeric simulations based on solving numerically the Navier-Stokes equations, which describe the dynamics of flows where the physical laws of mass, momentum and energy conservation are involved in.

The simulations were developed using the numerical code called Open source Field Operation And Manipulation (OpenFOAM), which was written in the C++ programming language. It allows to solve the numerical problems of continuum medium by using finite volume method, that discretizes the governing equations, where the scalar fields are in a placed mesh, and the PIMPLE method solve the pressure-velocity coupling.

Initially, we did an analysis using a simplified geometry in order to validate the results with the existed literature. The second part consisted of analyzing a more real geometry, calculating the thermal load by convection obtained from the environment temperature and thermic coefficient of convection of the place and considering also the generated warm that comes from the incident solar radiation. Warm fluxes through the walls of a standard material were considered. Results of the simulations showed that the temperature inside of the precinct is lower when green roofs are used.

---

\*Thesis.

\*\* Physical – Mechanic Engineering Faculty. Mechanical Engineering School.  
Director: PhD Julian Ernesto Jaramillo Ibarra.

## INTRODUCCIÓN

El comportamiento térmico del aire al interior de un recinto es de gran interés en el campo ingenieril ya que el conocimiento de la forma en la que varía la temperatura y la distribución que tiene el aire en el espacio, permite plantear alternativas más efectivas para generar lugares con confort térmico. Debido a esto, actualmente se realizan estudios numéricos y experimentales, en los que se analiza la influencia de las diferentes variables que intervienen. Una de estas variables son los materiales usados para la construcción de los techos que influyen de manera considerable en la climatización de un recinto. Actualmente en todo el mundo se están utilizando los techos verdes, los cuales son compuestos por material vivo integrado con el hábitat natural del lugar en el que se ubique. Este tipo de techo presenta varias ventajas sobre los techos convencionales que se encuentran en el mercado, por ejemplo, las placas de concreto o las tejas de fibrocemento.

El costo de un estudio experimental de las ventajas térmicas que tiene este tipo de techos es elevado, puesto que es necesario construir estructuras de prueba además de implementar en ellas sistemas de censado de las variables necesarias para realizar los estudios y obtener los resultados requeridos. Por esta razón, una excelente opción para obtener dichos resultados de una manera económica y además confiable, es realizar simulaciones basadas en la Dinámica de fluidos computacional, en la que se establecen los parámetros adecuados para realizar el análisis planteado.

OpenFOAM es un software libre que permite ver su funcionamiento interno por medio de códigos modificables, lo cual lo hace atractivo para establecer cada parámetro según las necesidades del problema, además de permitir escoger el tipo de malla a utilizar, el modelo de turbulencia y el esquema numérico con el que se desea trabajar.

Para este proyecto inicialmente se realiza el aprendizaje del manejo del software, realizando tutoriales con fenómenos frecuentemente desarrollados como Driven cavity y Differentially heated cavity, con el fin de validar los métodos usados. Luego se desarrolla la simulación de un recinto con aire en su interior teniendo en cuenta la transferencia de calor por las paredes y el techo, para finalmente presentar los resultados numéricos obtenidos. La importancia de un proyecto de investigación de este tipo radica en la necesidad de cuidar el planeta con tecnologías amigables con el ambiente, además de impulsar el estudio de fenómenos naturales por medio de herramientas computacionales.

## **OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO**

### **OBJETIVO GENERAL**

Cumplir con la misión de la Universidad Industrial de Santander en la formación de Ingenieros Mecánicos que fortalezcan y aporten a una de las líneas de investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica a través del análisis térmico del comportamiento del aire al interior de recintos con diferentes tipos de techos, mediante la simulación multidimensional en OpenFOAM un código libre de Dinámica de Fluidos Computacional, CFD, bajo condiciones climáticas en Bucaramanga.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Comprender la metodología CFD que soluciona los modelos matemáticos que expresan las leyes gobernantes que rigen los fluidos por medio de recopilación de información.
2. Conocer y el adquirir dominio del software OpenFOAM, mediante la realización de tutoriales, cursos y simulaciones de casos típicos encontrados en la literatura.
3. Simular el comportamiento del aire dentro de un recinto con geometría simplificada y un techo corriente (concreto), diseñado con materiales cotidianos para construcciones, teniendo en cuenta condiciones ambientales reales.
4. Realizar la simulación para techo verde partiendo de la primera simulación, para la misma geometría y las condiciones de contorno anteriores.
5. Modificar la geometría del recinto de manera que podamos realizar un análisis en condiciones más reales de los benéficos obtenidos según el tipo de techo, mediante la simulación 3D en OpenFOAM

6. Establecer las ventajas de los techos verdes sobre los diferentes tipos de techos mencionados anteriormente en un recinto en términos de temperatura y distribución del aire para la situación estudiada.

## 1. TECHOS VERDES

### 1.1. ESTUDIOS RELACIONADOS

Los siguientes son estudios en los que se pueden apreciar diferentes modelos físico - matemáticos para el análisis térmico de los techos. Además en otros de ellos se pueden apreciar algunas ventajas de implementar este tipo de tecnología en la ciudad.

En Bucaramanga en el 2013 se realizó un análisis por Romualdo de Jesús REYES GALVIS y Julián Alberto SÁNCHEZ AGUIRRE denominado ESTUDIO DE LAS VENTAJAS TÉRMICAS DE LOS TECHOS VERDES EN BUCARAMANGA en el que se construyeron 3 modelos en madera con las mismas dimensiones, pero variando los techos, el modelo analítico se implementó en una plataforma de Matlab y se pudo comprobar que tanto la carga térmica como las temperaturas al interior son menores donde es utilizado un techo verde.

Anteriormente, en el año 2012 se realizó una investigación en Santa Marta llamada TECHOS VERDES: ¿Una herramienta viable para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa Marta? realizada por Seweryn Zielinski un estudiante de maestría en Manejo Integrado Costero, Universidad del Magdalena en conjunto con Mario Alberto García Collante y Juan Carlos Vega Paternina, estudiantes de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la misma Universidad donde analizan los problemas de la implementación a gran escala basados en los resultados de proyectos realizados en todo el mundo sobre el uso de este tipo de techos en la arquitectura y se demuestra por medio de encuestas realizadas a 18 hoteles en Santa Marta que existe desconfianza para muchos de los empresarios que trabajan en el sector hotelero de esta ciudad.

En la revista PLANTING GREEN ROOFS AND LIVING WALLS por Noel Kingsbury y Nigel Dunnett, los autores describen e ilustran las técnicas y prácticas

necesarias para diseñar, implementar y mantener un techo verde o la pared en los más altos estándares profesionales, de manera que nos permiten informarnos sobre las características usadas en la actualidad, para llegar a un análisis más real.

Se encontró en *Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit* realizado por H.F. Castletona, V. Stovinb, S.B.M. Beckc y J.B. Davison en el año 2010 que los techos verdes son una técnica de enfriamiento pasivo que evita que la radiación solar que incide sobre un recinto llegue a la estructura interna de los mismos. Este artículo revisa la literatura actual además hace referencia a las situaciones en las que se puede obtener el mayor ahorro de energía. Dicho análisis se realiza en el Reino Unido y se determinó que es viable para edificios antiguos que no tienen el aislamiento que se implementa a las construcciones actuales de manera que el gasto energético para compensar esto es considerable.

En *A green roof model for building energy simulation programs* realizado por D. J. Sailor se plantea un balance energético de un techo verde que ha sido desarrollado e integrado en el programa de simulación de energía, EnergyPlus. En este, el módulo llamado techo verde permite al modelador de energía, explorar las opciones de diseño de techo verde, incluyendo los medios de cultivo y propiedades térmicas, profundidad y características de la vegetación, tales como el tipo de planta, la altura y el índice de área foliar. El modelo ha sido probado con éxito utilizando las observaciones de un techo verde monitoreado en Florida. Un conjunto preliminar de pruebas paramétricas se ha realizado sobre prototipos edificios de oficinas en Chicago IL y Houston TX. Estas pruebas se centran en la evaluación del papel de los medios de comunicación cada vez mayor profundidad, el riego, y la densidad de la vegetación (índice de área foliar) en el gas natural y el consumo de electricidad. El consumo de energía del edificio se encontró a variar significativamente en respuesta a las variaciones en estos parámetros. Además, esta respuesta depende en gran medida de la ubicación del edificio (el clima). Por lo tanto, es evidente que la herramienta de simulación techo verde que aquí se

presenta puede servir un papel valioso para informar las decisiones de diseño del techo verde [1].

## 1.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS TECHOS VERDES

Los techos verdes se han venido reconociendo como una herramienta eficaz para el diseño sostenible, estos son una excelente opción al momento de considerar la construcción de edificaciones en zonas urbanas, debido a que mitigan el efecto de calor generado por las mismas y controlan el ingreso de la radiación solar; según estudios previos se han identificado sus efectos refrigerantes y de conservación de energía.

Figura 1. Diseños actuales de edificaciones usando techos verdes.



Fuente: [http://www.circuloverde.com.mx/es/cont/materiales/En\\_Detalle\\_Techos\\_Verdes.shtml#.U\\_p7KsV5N1Y](http://www.circuloverde.com.mx/es/cont/materiales/En_Detalle_Techos_Verdes.shtml#.U_p7KsV5N1Y)

Esta arquitectura bioclimática incorpora el uso de vegetación sobre los techos o terraza de las edificaciones, con lo que se pretende construir edificios más eficientes en los que se consideran los ecosistemas como parte vital para el desarrollo de la comunidad generando beneficios económicos, ambientales y a la sociedad.

Su implementación inicia en Europa desde 1800, pero en Alemania se presentó de manera masiva en los años 60 y desde entonces es una tecnología que ha tomado impulso en varios lugares del mundo, principalmente usada en colegios, edificios y oficinas. Estos techos tienen un comportamiento bastante eficiente, aunque la magnitud de su rendimiento varía dependiendo de las condiciones

climáticas durante el año, en general siempre provee mejoras en el control de la temperatura interna de los edificios. Dichas ventajas pueden ser más notorias en el momento en el cual en un futuro estas alternativas pasivas de climatización sean masificadas y utilizadas en mayor proporción.

Figura 2. Techos verdes extensivos muy desarrollados en Europa.



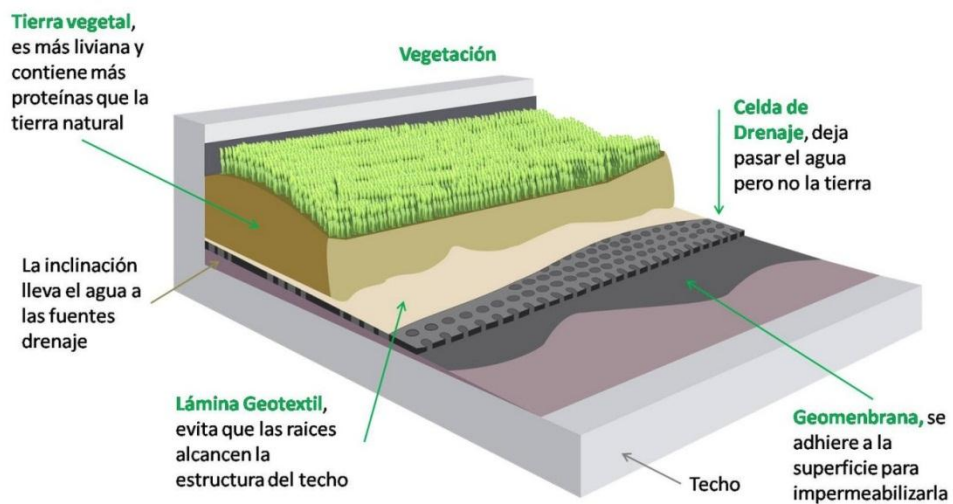
Fuente: <http://www.dforceblog.com/2008/04/23/una-introduccion-a-los-techos-verdes/>

Un techo verde está compuesto por mínimo tres capas: una para aislación, otra para el crecimiento de las plantas y otra para la irrigación. Se pueden mencionar las siguientes ventajas [2]:

- ✓ La devolución a la Naturaleza de una parte del espacio que se le ha "robado", dotando a las ciudades de nuevos espacios verdes implementados en las superficies superiores de los edificios.
- ✓ Proveen de oxígeno y funcionan como renovadores de la atmósfera, consumiendo CO<sub>2</sub> y favoreciendo el filtrado de contaminantes y de polvo.
- ✓ Ayudan a disminuir el efecto de isla térmica en las ciudades dando frescura allí donde el hormigón y el asfalto provocan un aumento de las temperaturas medias.
- ✓ Favorecen la aparición de fauna asociada, creando hábitats donde se pueden desarrollar pájaros o insectos beneficiosos, aumentando la biodiversidad en el interior de las ciudades.
- ✓ Crean un entorno agradable, relajante y próximo a la naturaleza en espacios antes destinados sólo al hormigón.

- ✓ Ayudan a disminuir los efectos producidos por las precipitaciones elevadas ya que las plantas y el sustrato reducen la velocidad del agua minimizando los daños ocasionados.
- ✓ Aíslan acústicamente el edificio de los ruidos que vienen del exterior.
- ✓ Aumentan la inercia térmica del edificio evitando el impacto directo de las heladas y los rayos solares; ocasiona así un ahorro energético tanto en verano como en invierno.
- ✓ Si se instalan correctamente, disminuyen los gastos ocasionados por el mantenimiento del techo ya que protegen los elementos impermeabilizantes de la acción de los rayos ultravioletas, de las temperaturas extremas, vientos, gases contaminantes.
- ✓ Pueden ser utilizados para cultivar hortalizas y vegetales o como elementos de esparcimiento y recreación.
- ✓ Pueden ayudar al reciclado de residuos si se utilizan aguas residuales y desechos orgánicos en su manejo.
- ✓ Efectos psicológicos: un techo verde, al aportar elementos de la naturaleza (plantas, flores, aromas, insectos) tiene un efecto positivo sobre el estado de ánimo humano en contraposición a un techo monótono y gris de grava o de negro bituminosas.

Figura 3. Estructura común de un techo verde.



Disponible en: [www.elinmoblog.com/2013/10/desde-arriba-techos-verdes/](http://www.elinmoblog.com/2013/10/desde-arriba-techos-verdes/)

### 1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS TECHOS VERDES SEGÚN SU ESTRUCTURA

**Extensivos:** generalmente bajos en peso, costo y con poco mantenimiento para las plantas; con unos cuantos centímetros de tierra, este tipo de techos soportan plantas tolerantes a altas temperaturas, vientos y sequias. Pueden ser pastos, musgos y flores silvestres, se usan en áreas sin transito regular.

**Intensivos:** su estructura es mucho más resistente, debido a que la profundidad de la tierra es mayor y se maneja más peso, estos pueden acomodar árboles, arbustos y jardines vegetales; es muy común ver este tipo de techos usados para fines recreativos.

Figura 4. a) Techo de tipo extensivo. b) Techo tipo intensivo.



The Plaza at PPL Center - Allentown, PA



Intensive: Sherman Plaza - Evanston, IL

Fuente: [www.openingenieria.com/ArchivosCursosOnline/125008316.pdf](http://www.openingenieria.com/ArchivosCursosOnline/125008316.pdf)

## 2. MECANISMOS DE TRANFERENCIA DE CALOR

En la transferencia de calor se estudia la naturaleza y la rapidez en la que un sistema pasa de un estado de equilibrio térmico a otro, dicha transferencia de energía como calor siempre se produce del medio con mayor temperatura hacia el de menor temperatura y se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura. Este calor se define como la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura. Existen tres modos en los que se transfiere: la conducción, la convección y la radiación.

### 2.1. CONDUCCIÓN

La conducción se debe a la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a la interacción entre las mismas [3].

Este mecanismo de transferencia de calor puede darse en gases y líquidos (cuando no se tiene movimiento del fluido) y sólidos. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas y en los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una red y al transporte de energía por parte de los electrones libres [4].

Para cuantificar el flujo de calor por conducción transferido a través de un cuerpo existe la ley de Fourier, que representa de forma diferencial la influencia del gradiente de temperatura, la geometría del sistema y el tipo de material sobre la cantidad de energía que se transmite.

Para un flujo de calor dado en una sola dirección en el sistema de coordenadas cartesianas se tiene que:

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Siendo  $A$  el área de la superficie,  $k$  la constante de conductividad térmica del material y  $dT/dx$  la variación de la temperatura respecto al espesor.

## 2.2. CONVECCIÓN

Para que la transferencia de calor se de por medio de la convección es necesario que el fluido este en movimiento, existen dos tipos de convección, la convección natural y la convección forzada. En el caso de la convección natural el movimiento del fluido se da debido a los cambios de temperatura que provocan una variación en la densidad del mismo permitiendo, en el caso de los gases, que el fluido más caliente ascienda por la reducción de su densidad y que de la misma forma el fluido al enfriarse aumente su densidad y descienda debido a este incremento. Cuando el movimiento del fluido se da por medio de elementos externos que le aporten velocidad al mismo como bombas, ventiladores o incluso el viento, existe convección forzada, la cual puede ser interna cuando el flujo se da a través de tuberías o ductos o externa cuando el fluido está en contacto con placas o la superficie externa de cualquier elemento.

La rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se puede expresar por la ley de enfriamiento de Newton de la siguiente manera:

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde  $h$  representa el coeficiente convectivo de transferencia de calor,  $A_s$  el área superficial y  $(T_s - T_\infty)$  la diferencia entre la temperatura del fluido y la del medio.

Según el tipo de flujo, la geometría o el tipo de convección que se este analizando, podemos encontrar diferentes correlaciones que relacionan diversas variables y propiedades para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección.

### 2.3. RADIACIÓN

Es el único mecanismo de transferencia de calor que no necesita de un medio de propagación para realizar el traspaso de energía, puede darse en el vacío sin ningún inconveniente ya que es emitido a través de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz, por lo que se considera como el tipo de transferencia de calor más rápido.

La radiación es el mecanismo por el cual la energía proveniente del sol llega a nuestro planeta. Para conocer la radiación que emiten las superficies, es necesario conocer su emisividad, la cual es una medida de qué tan cerca está una superficie real de emitir radiación como lo hace un cuerpo negro, el valor de la emisividad ( $\varepsilon$ ) está siempre en un rango de 0 a 1. Partiendo de la Ley de Stefan-Boltzmann para cuerpos negros se tiene que la radiación emitida por las superficies reales se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Todos los cuerpos son radiantes debido a esto es posible determinar la tasa neta de transferencia de calor, ya que al mismo tiempo que una superficie emite radiación puede recibir de otra superficie. En nuestro caso de interés, es importante cuantificar la tasa neta de transferencia de calor existente entre una superficie y el medio que la rodea, que llamaremos, los alrededores, tenemos que el intercambio de calor por radiación está dado por:

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_{alred}^4) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

### 3. RADIACIÓN SOLAR

El sol es la principal fuente de energía para nuestro planeta y los seres que habitamos en él, una parte de la radiación solar que llega a la tierra se absorbe por la atmosfera, de forma que se atenúan los rayos provenientes de sol.

#### 3.1. RADIACIÓN SOLAR DIRECTA

La radiación solar directa se caracteriza principalmente por no presentar cambios durante su recorrido desde el sol hasta el planeta tierra, tanto en su longitud de onda como en su dirección. Este tipo de radiación es la que provoca la aparición de sombras de los objetos que se interponen en su paso.

La radiación directa se puede expresar en términos de la radiación solar incidente  $I_b$  el cual solo depende de la distancia del sol a la tierra y el ángulo cenit  $\theta_z$ , de esta forma la relación que permite cuantificar la radiación directa es expresada como:

$$H_b = I_b \cos(\theta_z) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

#### 3.2. RADIACIÓN SOLAR DIFUSA

La radiación solar difusa ( $H_d$ ) sufre cambios de dirección durante el recorrido hacia la superficie terrestre. Además, en su recorrido por la atmósfera se dispersa y la intensidad con la que irradia las superficies se reduce. Por esta razón, este tipo de radiación es considerada en el cálculo de la energía total radiante que incide sobre una superficie.

El piranómetro es el instrumento más utilizado para la medición de la radiación, permite medir el valor de la radiación total incidente y la radiación difusa. Conociendo estos valores de la radiación es posible obtener también a radiación directa, de la siguiente forma:

$$H = H_b + H_d \quad (\text{Ec. 3.2})$$

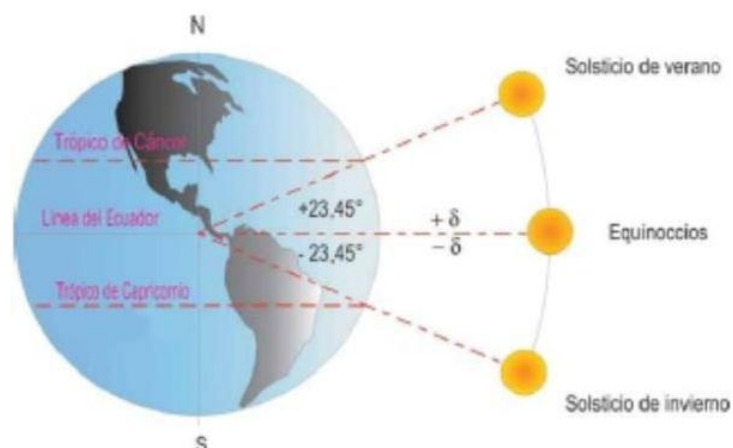
### 3.3. RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE EN LA TIERRA

La incidencia de los rayos sobre una superficie puede ser cuantificada teniendo en cuenta la dirección y la magnitud de éstos. Algunos factores dependen de los movimientos a los cuales está sometida la tierra, los principales están referenciados al sol, como lo son la rotación, translación, precesión y nutación, con los dos primeros se define el ángulo de la declinación y el ángulo horario, necesarios para el cálculo de factores que determinan el posicionamiento solar como lo es el ángulo de elevación del sol y el azimut.

#### 3.3.1. Declinación

Es el ángulo formado entre la tierra y el sol con respecto a la línea del ecuador proyectada en el espacio y está relacionado con el movimiento de traslación de la tierra, éste presenta una variación de  $47^\circ$  pasando desde  $23.5^\circ$  el 21 de Junio hasta  $-23.5^\circ$  el 21 de diciembre.

Figura 5. Ángulo de declinación.



Disponible en: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358026/358026/leccin\\_5\\_radiacin\\_solar.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358026/358026/leccin_5_radiacin_solar.html)

Debido a la variación que se presenta en el ángulo de declinación  $\delta$  durante el correr de todo el año, es importante tener una correlación que permita establecer el valor de esta inclinación en días específicos, esta relación está dada por la siguiente ecuación.

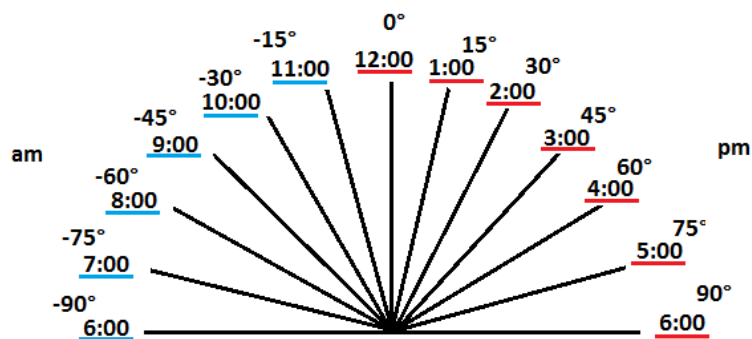
$$\delta = 23.45 * \text{sen}\left(\frac{360*284+n}{365}\right) \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde n representa el día del año para el cual se desea calcular el ángulo de declinación teniendo como n=1 el primero de enero.

### 3.3.2. Ángulo horario

Está definido por el movimiento de rotación de la tierra, la variación de este ángulo corresponde también a la variación de la hora del día y mide la desviación del sol con respecto a un punto de referencia que es tomado en el momento en el que el sol alcanza su altura máxima, este punto de máxima altura donde el ángulo horario es de 0° se da a las 12 del mediodía, por lo tanto el ángulo horario toma valores negativos en las horas de la mañana y positivos en las horas de la tarde.

Figura 6. Variación del ángulo horario.



Para determinar el ángulo de inclinación horaria se puede usar la siguiente ecuación que nos da el ángulo en grados [°]:

$$\omega = (\text{horamilitar} - 12) * 15^\circ \quad (\text{Ec. 3.4})$$

### 3.3.3. Latitud

La latitud  $\varphi$  es el ángulo entre la línea ecuatorial y un punto determinado en la tierra medido a lo largo del meridiano en el que se encuentre este punto. Está puede orientarse hacia el sur o el norte según si esta por encima del paralelo del ecuador o por debajo. Se mide en grados, entre  $-90^\circ$  y  $90^\circ$ , donde el signo negativo representa latitud sur y el signo positivo latitud norte.

### 3.3.4. Elevación o altura solar

El ángulo de elevación solar  $\alpha_s$  es el formado entre la línea que une el punto de referencia al sol en un plano horizontal en la tierra y dicho plano, también se conoce como ángulo del cenit  $\theta_z$ , el cual se forma entre la misma línea que une al sol con el punto de referencia y la normal al plano de referencia, de manera que:

$$\alpha_s + \theta_z = 90^\circ \quad (\text{Ec.3.5})$$

Para determinar el ángulo del cenit en función de la declinación, la latitud y el ángulo horario se utiliza la siguiente expresión:

$$\cos\theta_z = \sin\delta * \sin\varphi + \cos\delta * \cos\varphi * \cos\omega \quad (\text{Ec. 3.6})$$

### 3.3.5. Azimut solar

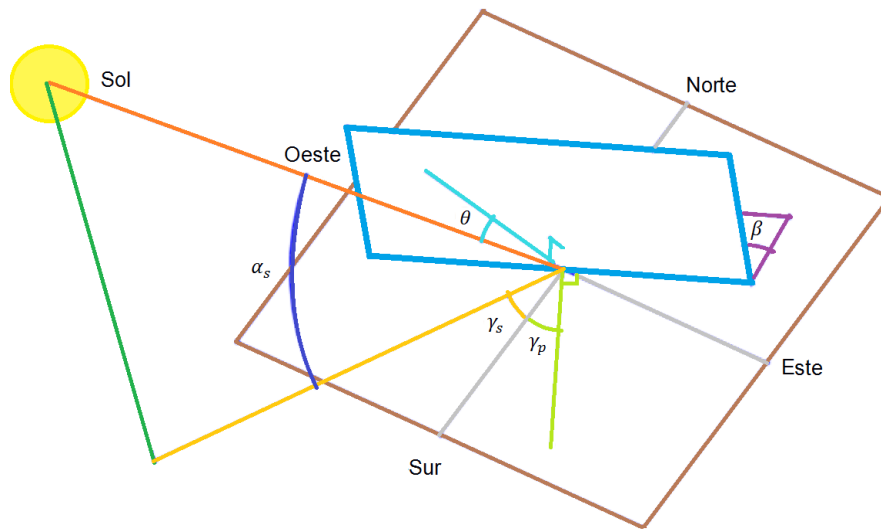
Es el ángulo  $\gamma_s$  formado entre la línea Norte-Sur y la proyección horizontal de la dirección de la radiación solar, éste toma valores positivos en la dirección sur-este y negativos en la dirección sur-oeste. Es posible calcularlo conociendo la declinación, el ángulo horario y el ángulo de la elevación solar de la siguiente forma:

$$\sin\gamma_s = \frac{\cos\delta \cdot \sin\omega}{\cos\alpha_s} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

### 3.3.6. Azimut de la pared

Es el ángulo  $\gamma_p$  formado entre la línea Norte-Sur y la proyección horizontal de la normal de la superficie colectora. Se toma como positivo desde el sur hacia el oeste y negativo desde el sur hacia el este.

Figura 7. Posición del sol respecto a una superficie ubicada en el planeta tierra.



En la figura 7 se puede observar tanto el azimut de la pared como el azimut solar, también aparece el ángulo  $\beta$  que hace referencia a la inclinación de la superficie colectora respecto a la horizontal.

## 4. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

Es necesario describir en términos matemáticos cualquier fenómeno físico que se quiera simular ya sea el flujo de un fluido, la transferencia de calor u otro fenómeno. En el caso de las ecuaciones de la mecánica de fluidos se obtienen del comportamiento dinámico del mismo, que es gobernado por la ecuación de continuidad, la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento y la ecuación de conservación de la energía.

### 4.1. ECUACIONES GOBERNANTES

Para plantear estas ecuaciones se asume que el fluido es newtoniano, incompresible, tridimensional además variante en el tiempo.

Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \rho \vec{f} + \nabla \cdot \sigma_{ij} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde  $\vec{f}$  es un campo de fuerzas (magnéticas, gravitacionales, entre otras).

Ecuación de la conservación de la energía:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{c_p} \nabla h \right) + S_h \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Teniendo que el tensor de esfuerzos es:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{\rho u'_i u'_i} & \overline{\rho u'_i u'_j} & \overline{\rho u'_i u'_k} \\ \overline{\rho u'_j u'_i} & \overline{\rho u'_j u'_j} & \overline{\rho u'_j u'_k} \\ \overline{\rho u'_k u'_i} & \overline{\rho u'_k u'_j} & \overline{\rho u'_k u'_k} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Podemos sustituirlo en la ecuación 4.2, de manera que la ecuación de transporte de un escalar se puede escribir como:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \rho \vec{f} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Al escribirla de forma explícita para cada dirección coordenada, considerando coordenadas rectangulares y  $\vec{V} = (u, v, w)$ , se conocen como las Ecuaciones de Navier-Stokes. Para un caso específico donde  $\varphi$  es un escalar y el flujo es incompresible la ecuación de conservación de momento queda de la siguiente forma:

$$\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \varphi) = -\nabla \vec{p} + \mu \nabla^2 \varphi + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \varphi) + \rho g \quad (\text{Ec. 4.6})$$

La conservación de una magnitud fluida implica el estudio de ésta sobre un volumen de control definido, teniendo en cuenta las variaciones a través del contorno, el incremento de dicha magnitud debida a fuentes y fuerzas externas, y el efecto de estas mismas actuando sobre el volumen considerado. En el caso de las ecuaciones de Navier-Stokes, solucionarlas numéricamente no es una tarea sencilla, por esta razón se debe discretizar del volumen de control para resolver todas las escalas cuando existe un caso turbulento.

La ecuación 4.6 está representada de forma vectorial y se compone de cuatro términos principalmente, el término temporal, el término convectivo, el término difusivo y el término fuente, los cuales pueden ser despreciados dependiendo del caso de estudio que se esté realizando y pueden describirse de la siguiente manera:

Tabla 1. Términos de la ecuación general de conservación.

<b>Término temporal</b>	Representa la variación local con el tiempo en el interior del volumen de control; es decir, la acumulación o disminución de $\varphi$ .
<b>Término convectivo</b>	Representa el transporte de la variable de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad del flujo.
<b>Término difusivo</b>	Corresponde alguno de los fenómenos de transporte que ocurren a nivel molecular: la ley de Fourier para la difusión de calor; la ley de Fick para la difusión de masa o la ley de Newton para la difusión de cantidad de movimiento por efectos viscosos.
<b>Término fuente</b>	Para tener en cuenta fuentes de generación o destrucción de la variable transportada.

En el caso más general, las ecuaciones completas de Navier-Stokes presentan características como dependencia del tiempo, tridimensionales, inclusión de esfuerzos viscosos, consideración de la compresibilidad del fluido, además son ecuaciones en derivadas, elípticas y altamente no lineales, acopladas entre sí; sin embargo, es posible reducir el análisis simplificando las ecuaciones mediante: la reducción de dimensiones, el uso de aproximaciones del comportamiento del fluido, la simplificación de las fuerzas que actúan sobre el fluido o usando aproximaciones basadas en valores medios, muchas de las cuales se tienen en cuenta en la realización del proyecto.

## 4.2. APROXIMACIÓN BOUSSINESQ

Además de definir el tipo de aproximación numérica, que en este caso son usados los modelos de turbulencia en RANS es posible tener en cuenta otras aproximaciones para los cálculos en CFD, como el manejo de la flotabilidad, la fuerza experimentada en el fluido cuando ocurren cambios de densidad. Hay dos formas de incluir la flotabilidad en nuestros cálculos:

Con la aproximación Boussinesq que nos dice que en un fluido en donde los cambios de temperatura no son tan grandes (2°C para el agua), la densidad puede ser tratada como una constante en cada término de la ecuación de momento, exceptuando el término gravitacional donde se trata como variable. Por el contrario cuando las diferencias de temperatura son más grandes, el uso de la aproximación de Boussinesq puede llevar a grandes errores. La modificación del término gravedad sería:

$$\rho g_i = \rho_0 g_i [1 - \beta(T - T_0)] \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Donde  $T_0$  es una temperatura de referencia,  $\rho_0$  la densidad a  $T_0$  y  $\beta$  el coeficiente de expansión térmica.

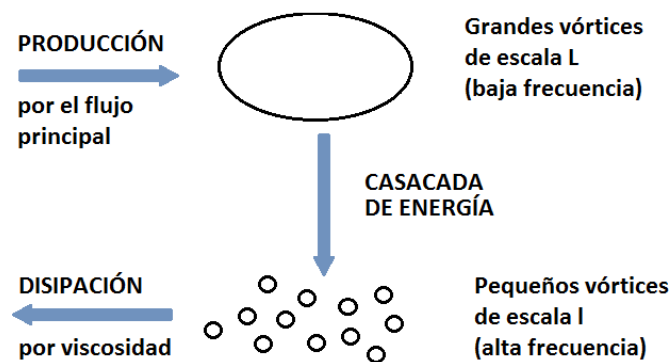
## 4.3. FENÓMENOS TURBULENTOS.

La turbulencia es un fenómeno susceptible de ser definido como un movimiento tridimensional y caótico de torbellinos de distintos tamaños, superpuestos a un movimiento o flujo principal del fluido, además también es un disipador importante de energía y el último gran problema sin resolver de la dinámica de fluidos [6].

Ésta se inicia por inestabilidades en el flujo causadas por los gradientes de velocidades. Estos torbellinos en movimiento, generan inestabilidades dando lugar a torbellinos más pequeños. El proceso continúa hasta que los torbellinos se hacen lo suficientemente pequeños para que el efecto de la viscosidad adquiera

importancia y se disipa la energía turbulenta en forma de calor. Este proceso, la creación continuada de energía turbulenta en las grandes escalas, la transferencia de la misma hacia torbellinos más y más pequeños para acabar disipándose a través de la viscosidad, se denomina cascada de la energía turbulenta, se puede representar esquemáticamente en la siguiente figura:

Figura 8. Descripción del proceso de la turbulencia.



Fuente: VÁSQUEZ Jesús y GONZÁLEZ José. Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujo con capa límite desprendida. Universidad de Sevilla. Sevilla. 2004

#### 4.4. TEOREMA DE STOKES

En la mecánica de fluidos clásica se establece que existe una relación lineal entre el tensor de tensiones viscosas y el tensor de deformaciones en el seno del fluido. Esta evidencia, encontrada por Navier y Poisson para casi todos los líquidos y gases, permite generalizar la ley de Newton que relaciona los esfuerzos cortantes con los gradientes de velocidad (deformación) mediante la viscosidad molecular del fluido.

$$\tau_{ij}^{visc} = 2\mu e_{ij} = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Basándose en esta idea, Boussinesq propuso en 1877 que debía existir alguna analogía entre la iteración de las tensiones viscosas y de las tensiones de Reynolds con el flujo promedio. Teniendo en cuenta que las tensiones turbulentas aumentan las componentes del tensor promedio de deformaciones, ideó que las tensiones de Reynolds debían estar ligadas con el tensor  $S_{ij}$  por medio del coeficiente de viscosidad artificial o turbulenta (Eddy viscosity):

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{Ec. 4.9})$$

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{v'_i v'_j} \approx \mu_t \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) = 2\mu_t \overline{S_{ij}} \quad (\text{Ec. 4.10})$$

Siendo  $\mu_t$  un factor de proporcionalidad que puede ser un valor contante o una función (o modelo) que cambie a lo largo del dominio. Lógicamente, también se puede expresar como una viscosidad cinemática turbulenta según  $\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho}$ . Por analogía, el transporte turbulento de calor, masa u otra variable escalar se define de manera similar, suponiendo que el transporte turbulento del escalar es proporcional a los gradientes del valor medio de la variable transportada a través de una difusividad turbulenta  $\Gamma_t$ , es decir:

$$-\rho \overline{v'_i \Phi'} \approx \Gamma_t \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x_i} \quad (\text{Ec. 4.11})$$

La implicación física de esta hipótesis es que el efecto de las tensiones adicionales de Reynolds se sustituye por la contribución de una viscosidad turbulenta adicional que se suma a la viscosidad molecular  $\mu$ . De esta forma, es como si el fluido, al estar en régimen turbulento, tuviera de forma efectiva una mayor viscosidad. Esto corresponde con la idea perfectamente contrastada de que la turbulencia favorece la mezcla y la difusión del flujo. Aunque válida en un buen

número de situaciones, esta hipótesis pierde validez en situaciones de flujos tridimensionales, con mucha separación y gradientes de presión adversos.

Se han desarrollado toda una serie de modelos de una o dos ecuaciones que asignan a la viscosidad turbulenta  $\mu_t$ , una expresión que depende de algún tipo de ecuación de transporte adicional. La idea de fondo es generalizar la ecuación 4.9, introduciendo un sumando adicional  $\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij}$  en dicha relación lineal constitutiva, para preservar el álgebra tensorial en la ecuación de transporte para  $k$  de esta manera, se fija ahora que:

$$\tau_{ij} = -\rho\overline{v'_i v'_j} \approx \mu_t \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \quad (\text{Ec. 4.12})$$

Donde  $k$  es la energía cinética turbulenta, expresada como la semisuma de la diagonal principal del tensor de Reynolds:

$$k = \frac{1}{2}\rho\overline{v'_k v'_k} = \frac{1}{2}(\rho\overline{u'^2} + \rho\overline{v'^2} + \rho\overline{w'^2}) \quad (\text{Ec. 4.13})$$

Nótese la importancia del término adicional en la definición de las tensiones de Reynolds cuando se hace la suma de la ecuación 4.12 a lo largo de la diagonal principal:

$$\tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz} = (\rho\overline{u'^2} + \rho\overline{v'^2} + \rho\overline{w'^2}) = 2\mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) - 3 \left( \frac{2}{3}\rho k \right) \quad (\text{Ec. 4.14})$$

Si no se hubiera introducido esa corrección, la energía cinética turbulenta sería nula. Además, ese sumando garantiza que se cumpla estrictamente la analogía de las tensiones de Reynolds con las tensiones viscosas en la diagonal principal: basta comprobar por ejemplo que para la tensión  $\tau_{xx}$  se cumple exactamente:

$$\tau_{xx} = -\rho\overline{u'^2} \approx \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \quad (\text{Ec. 4.15})$$

Como la hipótesis de Boussinesq considera que la turbulencia es totalmente isotrópica, las fluctuaciones en todas las direcciones espacio tiempo serán iguales:

$$\overline{u'^2} = \overline{v'^2} = \overline{w'^2} \quad (\text{Ec. 4.16})$$

Por esta razón se puede estimar un valor de fluctuación turbulenta característico.

$$k = \frac{3}{2\rho\overline{u'^2}} \rightarrow u' \sqrt{\frac{2k}{3\rho}} \quad (\text{Ec. 4.17})$$

#### **4.5. AROXIMACIONES NUMÉRICAS PARA EL TRATAMIENTO DE LA TURBULENCIA**

La solución de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido en estado laminar o no viscosos, no representa una dificultad a comparación de las simulaciones de flujos turbulentos. En busca de resolver dicho comportamiento se distinguen tres aproximaciones diferentes: la simulación numérica directa o DNS, en la que se usa una malla extremadamente fina para poder resolver todas las escalas de la turbulencia (desde las integrales hasta las disipativas); la simulación de vórtices grandes, LES (Large Eddy Simulation), con mallas menos densas que permiten resolver sólo los torbellinos grandes que transportan entre el 50 y el 80% de toda la energía cinética turbulenta; y finalmente la simulación de ecuaciones de Navier-Stokes promediadas temporalmente por Reynolds o RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) en las que todas las escalas se modelizan mediante el modelo de turbulencia [7].

#### **4.6. ECUACIONES DE NAVIER-STOKES PROMEDIADAS TEMPORALMENTE.**

La turbulencia se caracteriza por las fluctuaciones aleatorias que superponen al valor promedio estadístico. En las aproximaciones RANS explicadas en el

capítulo 5, se introduce un promedio temporal a las variables con el objeto de separar el valor medio de la parte fluctuante. Para que esta operación tenga sentido físico y estadístico, el tiempo de promedio tiene que ser mucho más grande que el período característico de las fluctuaciones turbulentas de la escala integral.

Es importante el flujo medio, ya que lo que interesa en las aplicaciones ingenieriles son los efectos del flujo medio. Con éste se hace referencia a la parte de la variable sin fluctuaciones turbulentas, cuyo valor no tiene por qué ser necesariamente estacionario. De hecho, las ecuaciones de gobierno promediadas mantienen la derivada temporal, por lo que de forma genérica, el valor promedio puede ser perfectamente no estacionario. Entonces las ecuaciones de flujo turbulento se resuelven por medio de ecuaciones promediadas en el tiempo. Al aplicar este concepto sobre las ecuaciones de flujo, como la de flujo incompresible:

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}\vec{v}) = \nabla(\mu\nabla\vec{v}) - \nabla p + \rho\vec{g} \quad (\text{Ec. 4.18})$$

Se obtiene un nuevo conjunto de ecuaciones que describen las variables promediadas, pero que además contienen promedios de los productos de las componentes fluctuantes de la velocidad. Estos productos son las tensiones de Reynolds a modelar, que se relacionan con las incógnitas ya existentes; es decir, con la parte promediada de las variables. Finalmente, conviene también recordar que cualquier otra variable escalar turbulenta (temperatura, presión, concentración, etc.) incorpora un término adicional con producto de fluctuaciones en la ecuación de transporte:

$$\frac{\partial\rho\bar{\phi}}{\partial t} + \nabla(\rho\bar{\phi}\vec{v}_j) = \nabla(\Gamma_\phi\nabla\phi) - \nabla \underbrace{(\rho\phi'v'_j)}_{\substack{\text{tensiones} \\ \text{adicionales}}} + S_\phi \quad (\text{Ec. 4.19})$$

Donde

$$\nabla(\overline{\phi'v'_j}) = \frac{\partial(\overline{\rho u'\phi'})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho v'\phi'})}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{\rho w'\phi'})}{\partial z} \quad (\text{Ec. 4.20})$$

#### 4.7. MODELOS TURBULENTOS.

Los principales modelos que se han construido a partir de la formulación lineal e isotrópica utilizan distintas definiciones de la viscosidad turbulenta  $\mu_t$  para la ecuación 4.8. En particular, los más importantes y extendidos son:

##### 4.7.1. Modelo Spalart-Allmaras

Resuelve una única ecuación de transporte para una turbulencia viscosa modificada  $\hat{\nu}$  que se relaciona con  $\mu_t$  según una función:

$$\mu_t = f(\hat{\nu})$$

##### 4.7.2. Modelo k-épsilon

Este modelo es utilizado para 2D y flujos de cortadura libres, pero los resultados son inexactos cuando se trata de flujos 3D que implican chorros incidentes o gradientes de presión adversos en la capa límite. Resuelve ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta  $k$  y para la tasa de disipación viscosa  $\varepsilon$  que se relaciona con  $\mu_t$  según una función:

$$\mu_t = f\left(\frac{\rho k^2}{\varepsilon}\right)$$

El desarrollo de la ecuación  $k$  sigue un proceso complicado que se puede leer en Wilcox (2010) en la sección 2.4 [8]. En esencia, se presenta la

relación de la ecuación de tensiones de Reynolds:

$$\tau_{ii}^R = -\overline{u_i' u_i'} = -2k \quad (\text{Ec. 4.21})$$

De manera que tenemos:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ii}^R \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \frac{\partial k}{\partial t} - \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i' u_j'} - \frac{1}{\rho} \overline{p' u_j'} \right] \quad (\text{Ec. 4.22})$$

Siendo épsilon:

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \quad (\text{Ec. 4.23})$$

La idea de este modelo es derivar la ecuación exacta. Utilizando la anterior definición y después de simplificar se llegó a:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ii}^R \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (\text{Ec. 4.24})$$

Donde la viscosidad cinética turbulenta es:

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (\text{Ec. 4.25})$$

Tabla 2. Coeficientes de cierre para el modelo k-ε.

$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
1.44	1.92	0.09	1	1.3

**4.7.  
3.  
Mo**

### delo k-omega

Resuelve ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta  $k$  y para la tasa específica de disipación viscosa  $\omega = \varepsilon/k$  que se relaciona con

$\mu_t$  según una función:

$$\mu_t = f\left(\frac{\rho k}{\omega}\right)$$

Este modelo se postuló por primera vez en 1942. Al principio, se deriva la ecuación para  $\omega$ . Después de algunas mejoras el modelo se convirtió en en siguiente (Wilcox, sección 4.3.1 [8]):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ii}^R \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{Ec. 4.26})$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = -\alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ii}^R \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta k \omega + \frac{\sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu_t + \sigma \frac{k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (\text{Ec. 4.27})$$

La viscosidad turbulenta se calcula como:

$$\nu_t = \frac{k}{\tilde{\omega}}, \quad \tilde{\omega} = \max \left\{ \omega, \frac{7}{8} \sqrt{\frac{2S_{ij}S_{ij}}{\beta^*}} \right\} \quad (\text{Ec. 4.28})$$

Los coeficientes de cierre son:

Tabla 3. Coeficientes de cierre modelo de turbulencia k- $\omega$ .

$\alpha$	$\beta$	$\beta^*$	$\sigma$	$\sigma^*$	$\sigma_{d0}$	$\sigma_d$
13/25	Función	9/100	1/2	3/5	1/8	Función

El modelo k-Omega se puede utilizar directamente para el tratamiento de la capa límite. También proporciona una buena precisión para corte libre y flujos separados. Sin embargo, no funciona bien en condiciones de flujo libre y es muy sensible a un cambio en el valor  $\omega$  de entrada.

#### 4.7.4. Modelo k-omega SST

Desarrollado en 1994. Este modelo combina los anteriores modelos.

Funciona como k Omega en la zona cerca a la pared y como k-  $\epsilon$  en la zona de flujo potencial. La ecuación para  $k$  es la misma que se usa en el modelo k- $\epsilon$  y  $\omega$  se define como:

$$U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \gamma \frac{1}{v_T} P_k - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (\text{Ec. 4.29})$$

Donde la viscosidad turbulenta es:

$$v_t = \frac{k}{\omega}$$

$F_1$  es una función de mezcla que cambia de un modelo a otro. Este modelo es usado en simulaciones que necesitan precisión en la solución de la capa límite.

#### 4.7.5. Modelos RNG k Épsilon

Se basa en el análisis de la renormalización de las ecuaciones de Navier-Stokes. Las ecuaciones de transporte para la generación de la turbulencia y la disipación son las mismas que el modelo estándar pero las constantes difieren de cada modelo donde la constante  $C_{\epsilon 1}$  se sustituye por la función  $C_{\epsilon 1RNG}$ .

### 4.6. COMPORTAMIENTO CERCA A LAS PAREDES

Los anteriores modelos turbulentos se denominan como modelos de High Reynolds (excepto en los modelos k-omega), que utilizan ecuaciones que sólo se puede aplicar en condiciones completamente turbulentas. Al usarlos no se toman

en cuenta efectos de bajo número de Reynolds, como la capa límite de la energía cinética turbulenta cerca de la pared.

A continuación se explican dos maneras de abordar este problema.

#### 4.6.1. Funciones de pared.

En este caso los efectos de bajo número de Reynolds no se calculan. Una celda en el límite de la pared se toma lo suficientemente gruesa como para asegurar que pueda asumir plenamente desarrolladas las condiciones de la capa límite turbulenta ( $30 < y^+ < 200$  para el primer nodo). Este primer nodo de la malla se conoce como "punto de coincidencia" y utiliza la ley de la pared con un valor adecuado de  $C$  para relacionar el campo de velocidad a la tensión de cizallamiento y la superficie para lograr una correspondencia adecuada entre la viscosidad y los perfiles de velocidad logarítmicas [7].

$$U^+ = y^+ \quad (\text{Ec. 4.30})$$

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln(y^+) + C \quad (\text{Ec. 4.31})$$

Los parámetros adimensionales  $U^+$  y  $y^+$  se definen como  $\frac{U}{u_T}$  y  $\frac{u_T y}{\nu}$  respectivamente. Una vez que se calcula la velocidad de fricción  $u_T$  se utilizan las funciones de pared para calcular los valores de  $k$  o  $\omega$ .

$$k = \frac{u_T^2}{\sqrt{\beta^*}}, \omega = \frac{k^{\frac{1}{2}}}{\beta^{\frac{1}{4}} k y}, \epsilon = \beta^{*3/4} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{k y} \quad (\text{Ec. 4.32})$$

Donde  $\beta^*$  es una constante y  $k$  la constante Von Karman.

Este procedimiento sólo se aplica a la primera celda cerca de la pared. Los valores calculados de  $\epsilon$  u  $\omega$  se utilizan como condiciones de contorno.

Las funciones de pared son una aproximación, las cuales funcionan bastante bien simulando flujos internos pero los resultados pierden precisión si se aplican a flujos externos o cálculos de transferencia de calor. Además, son muy sensibles a la ubicación del primer nodo de la malla cerca de la pared como se puede ver en la dependencia inversa en la coordenada y en las ecuaciones anteriores.

#### **4.6.2. Bajo número de Reynolds**

Con el uso de estos modelos se resuelven los efectos de bajo número de Reynolds. Este enfoque se basa en la inserción un número suficiente de líneas de la malla cerca de la pared ( $y^+ < 1$  para el primer nodo) de modo que la capa límite puede ser resuelta adecuadamente. Para ello, se realizan algunas modificaciones en las ecuaciones. En este caso no se usará por el mayor coste computación.

## **5. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

CFD o Computational Fluid Dynamics, es la rama de la mecánica de fluidos que nos permite resolver modelos matemáticos que expresen las leyes gobernantes que rigen los fluidos por medio de herramientas computacionales; su objetivo es la creación de programas numéricos que calculen una solución aproximada a un problema dado.

Para encontrar dicha solución se encuentran varios métodos de discretización como el método de diferencias finitas, el método de elementos finitos y el método de volúmenes finitos.

El método de volúmenes finitos, se basa en la integración de las ecuaciones de conservación; se divide el dominio y se aplican los balances de los flujos de las variables a cada uno de sus elementos, al final se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas que podrán ser resueltas por métodos directos o iterativos.

### **5.1. ORIGEN DEL CFD**

Las ecuaciones que gobiernan la mecánica de fluidos surgen básicamente de establecer la cantidad de movimiento y la conservación de la masa en un volumen de control que corresponde con una región de interés para el fenómeno de estudio. Si se trata de los fluidos es complicado seguir una porción de masa que pasa rápidamente por la región de interés. Analizando el volumen de control aparecen las ecuaciones de Navier-Stokes, conocidas ya desde hace casi un siglo. Desde su inicio, su utilidad ha estado limitada a la solución de un reducido número de tipos de flujo. Las soluciones que se obtenían servían para entender los fundamentos de la mecánica de fluidos, pero rara vez encontraban una aplicación directa de análisis o diseño ingenieril, lo que hacía necesario el uso de datos empíricos en la mayoría de ocasiones. Representa una dificultad, llevar a cabo ensayos experimentales con resultados válidos es una tarea prácticamente

imposibles por que se debe reproducir condiciones reales en modelos a escala, además los aparatos de medida influyen demasiado en el flujo, dificultad añadida por geometrías complejas entre otras cosas, de manera que se observó que los ensayos empíricos eran prácticos para obtener aspectos globales como por ejemplo caídas de presión, resistencia, o sustentaciones. Para analizar situaciones complejas se requiere mayor coste e implicar una cantidad de tiempo inaceptable.

Con la tecnología actual han venido apareciendo mejores alternativas. Por ejemplo, los conocimientos necesarios para la solución de las ecuaciones son métodos numéricos que existen desde hace muchos años, pero no fueron muy útiles hasta que la capacidad de cálculo y el espacio de almacenamiento de los computadores aumentó. aunque aun tienen mucho por avanzar, este hecho ha motivado el interés por los métodos numéricos con los que se logra estudiar la mecánica de fluidos de una manera mas fácil y efectiva, que se convirtió hoy en día en una rama conocida como la dinámica de fluidos computacional - Computational Fluid Dynamics [7].

## **5.2. SECUENCIA Y ESTRUCTURA DE CÓDIGOS CFD.**

La mayoría de programas utiliza el método de volúmenes finitos para resolver numéricamente las ecuaciones de gobernantes de la mecánica de fluidos. De manera general lo que se plantea es lo siguiente:

- El dominio espacial se discretiza en un número finito de volúmenes de control. Celdas volumétricas en simulaciones tridimensionales y planas en casos bidimensionales.
- En cada celda se plantean las ecuaciones generales de conservación (o transporte) de la masa, la cantidad de movimiento, la energía, etc.
- Las ecuaciones se discretizan y linealizan para obtener un sistema algebraico de ecuaciones.

- Finalmente, se resuelve numéricamente, de forma iterativa, el sistema algebraico para obtener la solución final del campo fluido-dinámico y térmico.

Todos los códigos presentan la siguiente estructura: un módulo de pre proceso, otro módulo solucionador y un módulo final de post proceso. Los cuales se comentan a continuación:

### **5.2.1. PREPROCESO**

Es una utilidad, que permite introducir los datos de entrada al programa de resolución, convirtiéndolos luego a un formato compatible para el solver. Esta fase comprende: La definición de la geometría a modelizar, la generación de la malla ó división del dominio en número suficiente de celdas o elementos que no se superpongan y que cubran toda la geometría, la identificación de los fenómenos físicos que pretenden modelarse, la definición de las propiedades del fluido y la especificación de las condiciones iniciales y de contorno del problema.

La generación de la malla es muy importante porque condicionará definitivamente la calidad de los resultados. En principio, cuanto más fina sea la malla, más próxima a la solución real será la simulación. Sin embargo mallas muy finas extienden el tiempo de cálculo excesivamente, por lo que es necesario realizar una decisión de compromiso. Además, un mallado eficiente ha de ser más fino en aquellas zonas donde se prevé un mayor gradiente en las variables.

### **5.2.2. SOLUCIONADOR**

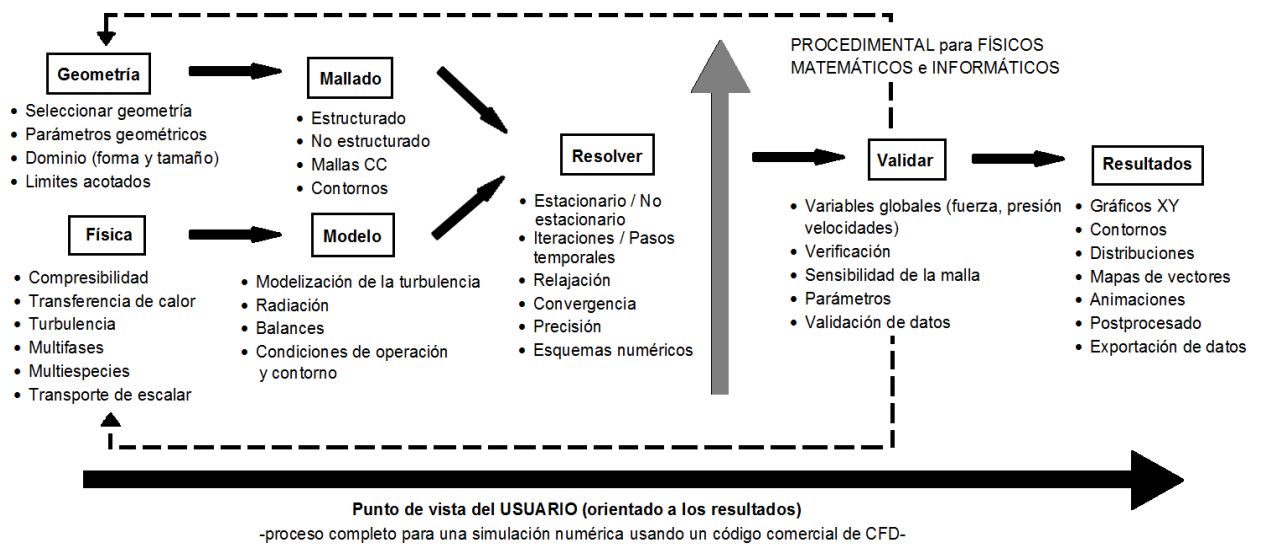
Constituye la parte central del programa de resolución y es el encargado de resolver de forma iterativa las ecuaciones que se han activado previamente en el pre proceso (los modelos). El usuario del código lanza la ejecución y espera que los recursos computacionales de los que se dispone resuelvan el caso.

### 5.2.3. POSTPROCESO

En este módulo se incluye una serie de herramientas gráficas que permiten analizar los resultados. Es una parte fundamental pues permite gestionar la gran cantidad de información que el código es capaz de generar. No solo es una interfaz gráfica, sino una herramienta que permite proporcionar variables integradas y promediadas para ofrecer resultados globales. Incluye: cálculo de parámetros globales ( $Nu$ ,  $C_f$ ), representación gráfica del dominio y la malla, mapas de contornos de variables y ploteado de vectores y líneas de corriente, gráficas y distribuciones, gráficos de superficies, bidimensionales y tridimensionales, animación y exportación de resultados a otros formatos [7].

En la figura 9 se puede observar con más detalle los factores a tener en cuenta en el momento de implementar esta herramienta en la solución de un problema.

Figura 9. Diagrama de flujo de una aplicación CFD típica.



Fuente: Adaptado de FERNÁNDEZ, Jesús. Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica computacional de fluidos (CFD) por medio del método de volúmenes finitos, Barcelona: Reverté, 2012.

### 5.3. DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

La idea de partida es realizar una discretización espacial del dominio físico. Lógicamente, también será necesario realizar una discretización temporal en caso de que las ecuaciones de gobierno muestren un comportamiento dependiente del tiempo. Por el momento, se considerará un régimen estacionario, con el objeto de centrarse en las características de la variación espacial de las ecuaciones.

Existen diversas metodologías para realizar este tipo de discretizaciones, siendo las más habituales el método de diferencias finitas (FDM), el método de elementos finitos (FEM) y el método de volúmenes finitos (MVF; o FVM en inglés). A continuación se muestra el método de volúmenes finitos que es el utilizado en este proyecto.

#### 5.3.1. Método de volúmenes finitos.

También conocido como método de volumen de control, divide el dominio en un número finito de celdas no superpuestas sobre las que se impone la conservación de la variable  $\varphi$  de manera directa. Para ilustrar el concepto se considera la siguiente ecuación unidimensional en derivadas parciales.

$$\frac{d\varphi}{dx} + \varphi = 0; \quad 0 \leq x \leq 1; \quad \varphi(0) = 1 \quad (\text{Ec. 5.1})$$

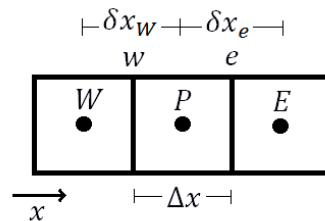
Si integramos sobre el volumen de control unidimensional P de la figura -- se plantea que:

$$\int_w^e \left( \frac{d\varphi}{dx} \right) dx + \int_w^e \varphi dx = 0 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Suponiendo una variación lineal entre los centroides de las celdas en los cuales está definida la variable  $\varphi$ , y tomando el valor medio de la variación de  $\varphi$  en cada celda como  $\bar{\varphi}$ , es directo establecer que:

$$\frac{\varphi_E - \varphi_P}{\delta X_e} - \frac{\varphi_P - \varphi_W}{\delta X_w} + \bar{\varphi} \Delta x = 0 \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Figura 10. Discretización unidimensional por volúmenes finitos.



Donde la notación adoptada es P para el nodo actual y E, W para los nodos a la derecha (este) e izquierda (oeste) respectivamente. Nótese que la aproximación

anterior deja de ser exacta al haber supuesto que la variable  $\varphi$  varía de forma lineal entre los nodos de la malla. Reordenando la ecuación, se llega a:

$$a_P \varphi_P = a_E \varphi_E + a_W \varphi_W + b \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Donde  $a_P$ ,  $a_E$  y  $a_W$  son los coeficientes de las variables en cada nodo implicado. Ecuaciones similares a la ecuación anterior se puede obtener para cada una de las celdas de la discretización, resultando de nuevo un conjunto de ecuaciones algebraicas que se deben resolver de manera acoplada.

En este método se garantiza la conservación de la variable sobre cada celda. Es decir: los flujos entrantes a la celda deben ser iguales a los flujos salientes. Esta propiedad, debido a la formulación, se cumple sea cual sea el tamaño de las celdas. Sin embargo, que se asegure la conservación no significa que se obtenga precisión: la solución obtenida para  $\varphi$  puede ser conservativa y a la vez imprecisa (si la discretización tiene pocas celdas).

Para implementar el método de volúmenes finitos satisfactoriamente, se estudia por separado cada uno de los términos que configuran la ecuación de transporte en su forma integral para lo que se supone que se trabaja con un mallado cartesiano regular, empleando tipología básica para simplificar al máximo los cálculos de los flujos.

Como convención para la nomenclatura, en el método de volúmenes finitos se práctica habitualmente el uso de letras para definir la celda actual y sus vecinas. Por lo tanto se utiliza el subíndice P par identificar el centroide del volumen de control y de manera análoga, la celda situada a la izquierda se identificar con la letra W (west), mientras que la situada a la derecha se identifica con la letra E (east), nombradas empleando los puntos cardinales en inglés.

En la tabla 4 se muestra la particularización de coeficientes y variables de la ecuación general Ec. 4.6. En este caso, se obtiene una ecuación escalar con la densidad como variable intensiva, es decir  $\varphi = 1$ , y en la que el término difusivo y los términos fuentes se anulan.

Tabla 4. Definición de variables y coeficientes en la ecuación general de conservación para obtener distintas ecuaciones de gobierno.

Variable Coeficiente	Masa	Momento	Energía	Especies
$\varphi$	1	$(u, v, w)$	$h$	M
$\Gamma$	0	$(\mu, \mu, \mu)$	$\frac{k}{C_p}$	
S	0	$(-\frac{\partial P}{\partial x} + S_x; -\frac{\partial P}{\partial y} + S_y; -\frac{\partial P}{\partial z} + S_z)$	$Sh$	

### 5.3.2. Discretización del término fuente

En el caso del término fuente se debe discretizar

$$F_P = \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} \int_V S_\varphi dV dt \quad (\text{Ec. 5.7})$$

Donde además se supondrá que dicho término viene expresado como  $S_\varphi = S_C + S_P\varphi$ , siendo  $S_P \leq 0$ . Con esta definición se está planteando indirectamente que  $S_\varphi$  se ha linealizado. Integrando ahora esta expresión para el volumen de control asociado al punto P se tiene que:

$$F_P = V_P(S_C + S_P\varphi_P) \quad (\text{Ec. 5.8})$$

Donde  $S_c$  y  $S_p$  son coeficientes. Ha de tenerse en cuenta que la formulación lineal del término fuente parece falsamente restrictiva. Además, en la integración se ha supuesto nuevamente que  $\varphi_p$  es uniforme en la celda y de valor constante en todo  $\Delta t$  e igual al valor final del intervalo.

### 5.3.3. Discretización del término difusivo

En el caso del término difusivo se obvia nuevamente la integración temporal y se supone que el valor se mantiene constante durante todo  $\Delta t$ . Es una idea similar a lo hecho con el término fuente, tratando de agrupar el efecto no estacionario de todos los términos únicamente en término temporal. Esto permitirá elegir en qué instante evaluar los flujos y términos difusivos en la ecuación discretizada.

Aplicando el teorema de Gauss de la divergencia es inmediato establecer para el flujo difusivo que:

$$D_P = - \int_{V_P} \nabla \cdot (\Gamma \nabla \varphi) dV = - \int_{S_P} \Gamma \nabla \varphi d\vec{S} \quad (\text{Ec. 5.9})$$

Donde  $\Gamma$  es un coeficiente de transporte que informa de la facilidad o dificultad del gradiente para establecer el flujo; equivalentemente, de forma discreta:

$$D_P = - \sum_{caras} \Gamma \nabla \varphi \vec{n} A|_{cara} \quad (\text{Ec. 5.10})$$

Donde  $\vec{n}$  representa la normal externa a la cara que se está evaluando. Para completar la discretización se supone que la variable  $\varphi$  varía linealmente entre los centros de las celdas que comparten la cara que se está evaluando. De esta forma el gradiente se sustituye, por ejemplo en la cara a la derecha.

$$D_P = -\Gamma_e \frac{\varphi_E - \varphi_P}{|PE|} A_e \quad (\text{Ec. 5.11})$$

El valor de  $\Gamma_e$  en la cara no está disponible, ya que el coeficiente de difusión, al ser un escalar, se almacena en el centro de las celdas. Si dicho coeficiente fuese una constante (por ejemplo la viscosidad en la ecuación de momento para un fluido newtoniano isotrópico) no sería ninguna discusión adicional. En un caso general, se obtiene por interpolación (aritmética o armónica) de los valores en los nodos adyacentes, por ejemplo:

$$\Gamma_e = \frac{\Gamma_P |eE| - \Gamma_E |Pe|}{|PE|} \quad (\text{Ec. 5.12})$$

Expresiones similares del término difusivo se obtendría para los flujos en el resto de las direcciones espaciales.

#### 5.3.4. Discretización del término convectivo

Nuevamente se omite en la discretización la derivada temporal. Aplicando una vez más el teorema de Gauss de la divergencia:

$$C_P = \int_{V_P} \nabla \cdot (\rho \vec{V} \varphi) dV = \int_{S_P} \rho \vec{V} \varphi d\vec{S} \quad (\text{Ec. 5.13})$$

Y de forma discreta:

$$C_P = \sum_{caras} \rho \vec{V} \varphi \vec{n} A|_{cara} \quad (\text{Ec. 5.14})$$

Donde  $\vec{n}$  representa la normal externa a la cara que se está evaluando. Retomando el nuevo ejemplo de la cara de la derecha, se obtiene:

$$C_e = \rho_e \varphi_e u_e A_e \quad (\text{Ec. 5.15})$$

Siendo los valores de  $A_e$  y  $u_e$  son conocidos, gracias a la ventaja del staggering, pues el valor de la velocidad está disponible (almacenada) en la cara. Sin embargo, en este caso no se dispone del valor de la densidad en esa cara que se de la variable (se tiene en los centros de las celdas que comparten la cara que se está evaluando). Por tanto, es necesario establecer de nuevo una interpolación entre los valores disponibles para estimar un valor de la variable en la cara. Por ejemplo, se puede emplear un esquema de discretización por diferencias centradas:

$$\rho_e \varphi_e = \frac{\rho_P \varphi_P |eE| - \rho_E \varphi_E |Pe|}{|PE|} \quad (\text{Ec. 5.16})$$

Desafortunadamente, los esquemas relacionados con el término convectivo son bastante restrictivos debido a la influencia de la velocidad en el transporte de las variables. Así, en el caso de las diferencias centradas empleadas anteriormente, se demuestra que sólo son válidas si se cumple que:

$$Pe = \frac{\rho_e u_e |eE|}{\Gamma_e} < 2 \quad (\text{Ec. 5.17})$$

Este parámetro limitador se denomina número de Peclet ( $Pe$ ) y relaciona el transporte convectivo (en el denominador) con el transporte difusivo (en el denominador).

Cuando  $Pe > 2$ , y especialmente cuando la convección es mucho mayor que la difusión, se utiliza un esquema alternativo, denominado upwinding. En este esquema se evalúa el valor de  $\rho_e \varphi_e$  en el mismo nodo que aguas arriba. Es decir:

$$\rho_e \varphi_e = \rho_P \varphi_P \text{ si } u_e > 0 \quad (\text{Ec. 5.18})$$

$$\rho_e \varphi_e = \rho_E \varphi_E \text{ si } u_e < 0 \quad (\text{Ec. 5.19})$$

Obsérvese el claro sentido físico de esta aproximación, al asignar el valor en la cara el que le proporciona la corriente incidente. Es evidente que este esquema dará mejores resultados cuanto más significativa sea la influencia de la convección en el fenómeno físico que se pretende resolver.

#### 5.4. DISCRETIZACIÓN TEMPORAL

Para discretizar el término temporal,  $T_P$ , se supone que el valor de la variable en el interior de la celda es constante por lo que se puede intercambiar el orden de los operadores. Por tanto, se puede establecer que:

$$\begin{aligned} T_P &= \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} \int_{V_P} \frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} dV dt = \frac{1}{\Delta t} \int_{V_P} \int_{\Delta t} \frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} dt dV = \\ &= \frac{1}{\Delta t} \int_{V_P} \left[ \frac{\rho_P \varphi_P|^n - \rho_P \varphi_P|^{n-1}}{\Delta t} \right] dV \end{aligned} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

Y así:

$$T_P = \frac{V_P}{\Delta t} (\rho_P \varphi_P|^n - \rho_P \varphi_P|^{n-1}) \quad (\text{Ec. 5.6})$$

Donde  $V_P$  representa el volumen de la celda,  $(n-1)$  se refiere al valor de la variable al principio del paso temporal, y  $n$  representa el valor al final del paso temporal.

Una vez se han visto las posibilidades para completar la discretización espacial, es el momento de abordar los métodos de integración temporal.

El término temporal discretizado es función de la variable  $\varphi$  en  $P$  tanto al principio ( $n - 1$ ) como al final del intervalo ( $n$ ).

De forma general se puede establecer que los flujos se pueden interpolar en función del instante en que son evaluados a partir de un factor  $f$  que varía entre 0 y 1. Por tanto:

$$\int_{\Delta t} \vec{J} \cdot \vec{A} dt = (fJ^n + (1 - f)J^{n-1})A\Delta t \quad (\text{Ec. 5.12})$$

- Si se fija que  $f = 0$ , se obtiene el esquema **explícito**, en el que los flujos y los términos fuente se evalúan usando exclusivamente los valores al inicio del intervalo (es decir, los valores del paso temporal anterior). Esto implica las siguientes consideraciones:

En el mejor de los casos son estables de forma condicional y presentan una limitación importante con respecto al tamaño máximo de paso temporal que se puede emplear ( $\Delta t_{max}$ ).

Normalmente, dicho paso temporal es bastante pequeño, especialmente en el caso de flujos con fenómenos de convección dominantes, en los que se establece un  $\Delta t_{max} < CFD (\Delta x/c)$ , siendo  $CFD$  en número de Courant y  $c$  del orden de la velocidad del sonido.

El gasto computacional es reducido porque se puede evaluar en cada instante el valor de la variable  $\varphi$  en cada celda en función de los valores en el instante anterior: no se necesita, por tanto, resolver un sistema de ecuaciones acopladas ni es preciso realizar la inversión matricial.

Por el contrario, el exigente límite de estabilidad requerirá un gran número de iteraciones.

- Si se fija que  $f = 1$ , se obtiene el esquema **implícito**, en el que los flujos y los términos fuente se evalúan en el mismo instante en que se pretenden conocer las variables. Ha de tenerse en cuenta que:

A primera vista es evidente la complejidad que supone evaluar los flujos en función de los valores en las celdas contiguas, que pueden no estar aún disponibles en función del orden en que se vaya recorriendo el dominio a resolver.

Son generalmente estables de forma incondicional, por lo que se puede emplear pasos temporales muy grandes.

En la práctica, debido a las no linealidades de las ecuaciones de flujo, siempre aparecen restricciones sobre el tamaño del paso temporal. Además la naturaleza no estacionaria (física) de un flujo puede incluso restringir aún más esta limitación (matemática).

De todas formas, el paso temporal resultante siempre será significativamente mayor que el necesario para el esquema explícito.

Consecuentemente, el gasto computacional por iteración será mucho mayor que en el esquema explícito, por cuanto es imprescindible efectuar la inversión matricial.

En resumen, la elección entre emplear un esquema implícito o uno explícito se debe tomar en función del valor del producto “coste computacional por paso

temporal” por “número de pasos temporales”. Por tanto se ha de equilibrar el paso temporal máximo admisible frente al mayor número de iteraciones necesarias para resolver el sistema implícito de ecuaciones algebraicas.

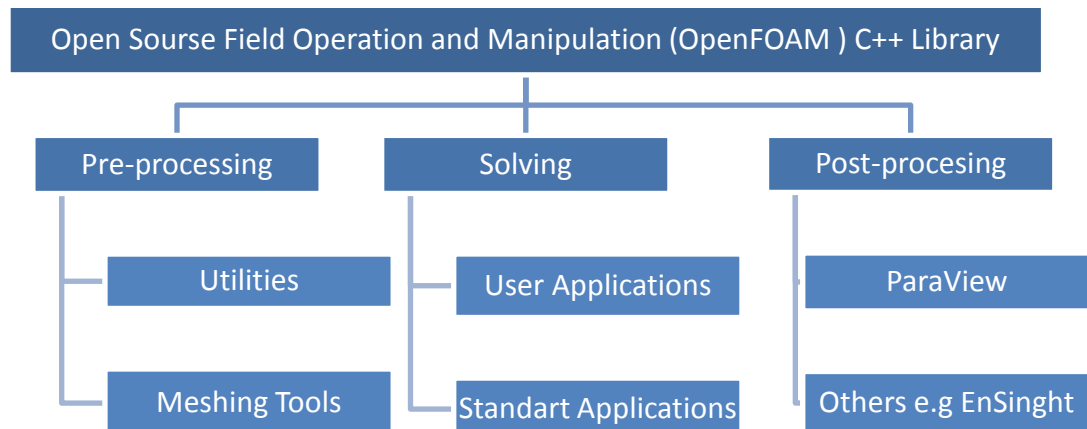
## 6. OPENFOAM

Es un paquete de software libre que utiliza diferentes métodos de discretización para resolver ecuaciones en derivadas parciales. En él es posible solucionar diferentes problemas de diversos campos como la dinámica de fluidos, las finanzas, el electromagnetismo o el análisis tensional de sólidos. Se trata de una librería C++ a partir de la cual se crean ejecutables, conocidos como aplicaciones [10].

Existen dos tipos de aplicaciones: solvers y utilidades. Los solvers se ocupan de resolver las ecuaciones que gobiernan un fenómeno físico. Las utilidades son aplicaciones que se utilizan antes, o bien después de haber empleado el solver. Se utilizan para manipular datos con el objetivo de preparar el problema para ser tratado por el solver y permitir un fácil y buen análisis de los resultados.

Un esquema de la organización global de OpenFOAM se muestra en la figura 11.

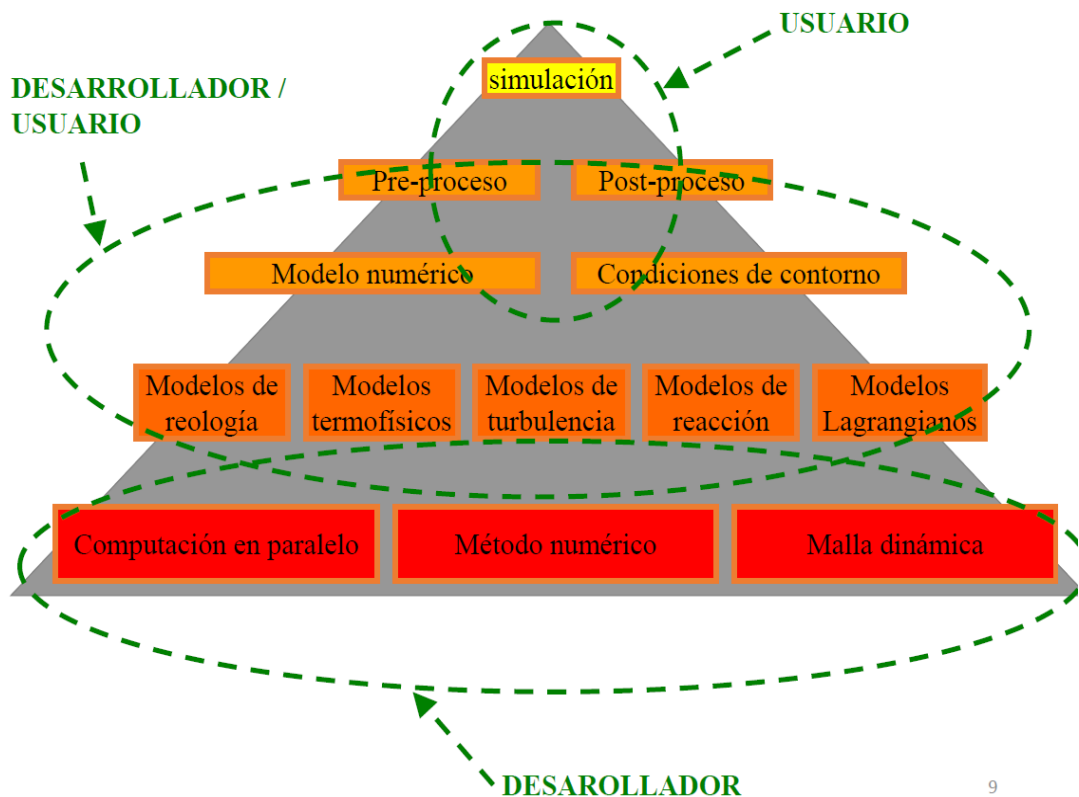
Figura 11. Estructura de OpenFOAM según las herramientas de cada paso de una simulación completa.



Fuente: PARRA VIOL José Plácido, Estudio e implementación de nuevas funcionalidades de deformación de malla en un software de mecánica de fluidos computacional, Universitat de València, Escola Técnica Superior d'Enginyeries, 2011.

La figura 12 muestra la manera general de operar con OpenFOAM a nivel de usuario consiste en realizar tareas de pre-proceso mediante utilidades. Según el tipo de problema que se desee analizar, se escogerán el tipo de utilidades y *solvers* que sean coherentes y adecuados para el fenómeno a estudiar desde el punto de vista práctico. Puede que no exista ningún solver que permita solucionar el problema planteado, en este caso, OpenFOAM permite la libre ampliación y modificación por parte de sus usuarios de cualquier tipo de aplicación, solo es necesario un cierto conocimiento de programación en C++ y de la forma en la que el software está organizado.

Figura 12. Posibilidades interacción con OpenFOAM.



Fuente: MAS DE LES VALLS Elizabet. Curso de introducción a OpenFOAM. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 2014

## **6.1. CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO DE OPENFOAM**

- Tiene una sintaxis expresiva y versátil, que permite una fácil implementación de complejos modelos físicos;
- Posee amplias capacidades, incluyendo la riqueza de modelado físico, precisión, discretización robusta y manejo de geometría compleja, a nivel actual en CFD comercial;
- Arquitectura abierta y el desarrollo de código abierto, donde el código fuente completo está disponible para todos los usuarios para la personalización y extensión sin costo [11].

## **6.2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE EL CÓDIGO**

OpenFOAM tiene una estructura de programación en C++ orientada a los objetos. Mediante esta forma de estructurar el código se crean ciertos elementos que contienen variables y las correspondientes funciones que permiten acceder a ellas. Dichos elementos reciben el nombre de clases, y se pueden entender como si fueran tipos de variables personalizadas en las que se puede imponer cuantas y que tipo de variables posee y de que forma se van a manipular.

Las clases son el parámetro clave de OpenFOAM desde el punto de vista de la programación. Todo el código está basado en relaciones entre clases mediante lo que se conoce como amistad y herencia. Una clase amiga de otra puede acceder a su dominio privado. Por otro lado, una clase heredera posee en su dominio privado algún aspecto que es común a la clase de la cual hereda. Gracias a estas características el código de OpenFOAM evita duplicaciones y con la relación entre clases aparece una jerarquía que ayuda a entender mejor su estructura.

Además, para organizar mejor la estructura del programa OpenFOAM utiliza lo que se conoce como namespaces. Son como unos contenedores, o espacios, que agrupan funciones y clases bajo un mismo nombre que permite categorizar los elementos del programa. Hay decenas de namespaces y cada uno se nombra de forma que proporciona una idea del tipo de elementos que se encuentran en su interior. El namespace global que incluye al resto recibe el nombre de Foam, y para acceder a otro espacio a partir de este se utiliza el operador ::. Por ejemplo, para acceder al espacio meshTools, que agrupa funciones y variables utilizadas para hacer modificaciones simples en la malla, el código sería Foam::meshTools.

Mediante el uso de namespaces se pueden utilizar en una misma función variables con el mismo nombre siempre que provengan de diferentes espacios. De esta manera se evitan errores de redefinición y permite manejar los elementos de forma más conceptual gracias a que el nombre del espacio del que provienen ayuda a entender que se está manipulando exactamente.

Los archivos fuentes están codificados de forma, que no es necesario tener avanzados conocimiento en programación y sin hacer referencia a la orientación de objetos o C++ para poder entenderlos. Un ejemplo de ello es la correspondencia mostrada en la Figura 13 y la ecuación 6.1:

Modelo de las ecuaciones de Navier-Stokes promediado (RANS)

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (uk) - \nabla \cdot [(v + v_t)\nabla k] = v_t \left[ \frac{1}{2} (\nabla u + \nabla u^t) \right]^2 - \frac{\epsilon_0}{k_0} k \quad (\text{Ec. 6.1})$$

Siguiendo el patrón de esta versión codificada en OpenFOAM.

Figura 13. Ecuación en lenguaje de programación C++, OpenFOAM.

```
solve
(
  fvm::ddt(k)
  + fvm::div(phi, k)
  - fvm::laplacian(nu() + nut, k)
  ==nut*magSqr(symm(fvc::grad(U)))
  - fvm::Sp(epsilon/k, k)
);
```

Disponible en: Archivos fuente OpenFOAM

OpenFOAM es un paquete de software con amplias capacidades; analizar en detalle las facilidades y utilidades de este software está más allá del alcance de este estudio.

### 6.3. ESTRUCTURA DE LOS CASOS

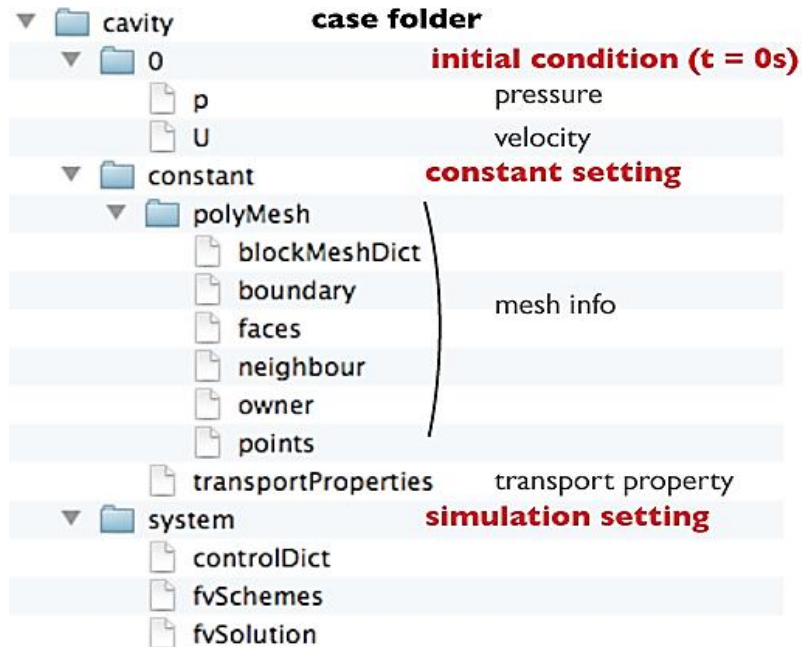
Al conjunto conformado por carpetas y archivos que definen un problema ingenieril específico y a los parámetros ingresados a la aplicación que se va a utilizar, se le denomina caso. Se deben crear como base tres carpetas: *constant*, *system* y una carpeta temporal inicial, para poder solucionar un fenómeno. Esta última no necesariamente tiene que ser de un tiempo cero, puede ser una parte de un proceso que haya simulado cierto tiempo previo.

En la carpeta *constant* se encuentra una carpeta llamada *polyMesh*, donde se encuentra toda la información acerca de la malla, y archivos que son necesarios para la aplicación proporcionándole información, por ejemplo propiedades físicas del fluido o según el caso el tipo de modelo. Dependiendo del tipo de la aplicación y del tipo de problema a tratar se necesitará una mayor o menor cantidad de archivos auxiliares.

En *system* se incluyen archivos relacionados con el proceso de resolución. Como mínimo hay tres: *controlDict*, *fvSchemes*, y *fvSolution*; en caso de tener varios materiales allí se define en un archivo llamado *topoSetDict*. El primero establece parámetros relacionados con la ejecución. Por ejemplo, el tiempo de comienzo, el incremento de tiempo o cada cuantas iteraciones se desea guardar resultados. El segundo se ocupa de elegir cuales van a ser los esquemas numéricos utilizados para resolver las ecuaciones que aparecen en la aplicación. Por ejemplo, si hay que realizar una interpolación, se puede elegir si se desea que sea lineal, cubica, centrada. El archivo *fvSolution* determina que esquema de solucionador de ecuaciones va a utilizar para cada una de las variables a calcular. Entre las opciones aparecen algoritmos de resolución de esquemas numéricos.

Como se mencionó antes para realizar la simulación, es necesario en la carpeta del caso tener una carpeta temporal inicial en la que se establezcan las condiciones iniciales de las variables de interés. Dentro de ella debe haber tantos archivos como variables vayan a ser calculadas durante la simulación. Por ejemplo, en el caso de un flujo incompresible, las variables serían la velocidad y la presión, por lo que la primera carpeta temporal contendrá dos archivos fijando los valores de éstas variables en el instante inicial. De todos modos, en el caso de que la variable sea un vector como en el caso de la velocidad, se puede definir su estado mediante un archivo para cada una de sus componentes, definidas como valores escalares. En definitiva se trata de definir las condiciones iniciales y de contorno del problema en cuestión.

Figura 14. Estructura de un caso de estudio.



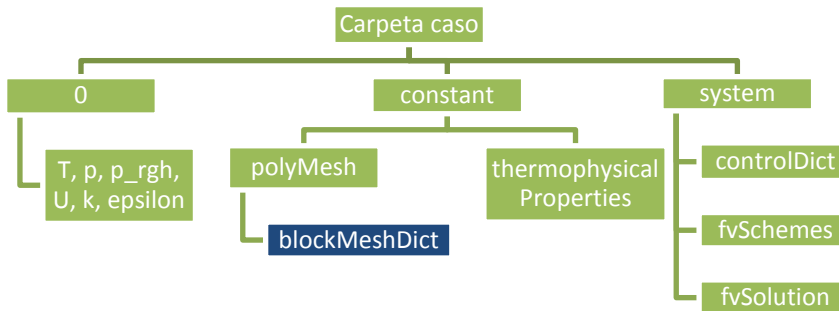
Disponible en: [www.optimulation.com/2011/11/07/openfoam-tutorial-1-lid-driven-cavity-flow/](http://www.optimulation.com/2011/11/07/openfoam-tutorial-1-lid-driven-cavity-flow/)

Al iniciar el proceso de cálculo, según el incremento temporal establecido se crean nuevos valores iniciales, los cuales se empezarán a guardar en carpetas temporales que se denominan de acuerdo al instante temporal al que pertenecen. Dependiendo del tipo de problema y la aplicación que se esté utilizando el contenido de estas carpetas puede variar. Generalmente contendrá archivos con nuevos valores de las variables y una carpeta llamada *uniform* que contiene un archivo que indica el instante al que pertenecen los valores. En un caso particular, si la malla se desplaza, aparecerá una carpeta llamada *polyMesh* que contendrá los nuevos puntos de la malla, de manera que el contenido de las carpetas temporales depende del tipo de simulación.

## 6.4. REALIZACIÓN DE UNA SIMULACIÓN

Partiendo de una carpeta caso con una estructura como la descrita anteriormente es decir, con: una carpeta temporal inicial, constant y system, debemos verificar que la malla y los archivos llamados por el solver o las aplicaciones a usar, estén de manera correcta.

### 6.4.1. Mallas y volúmenes de control



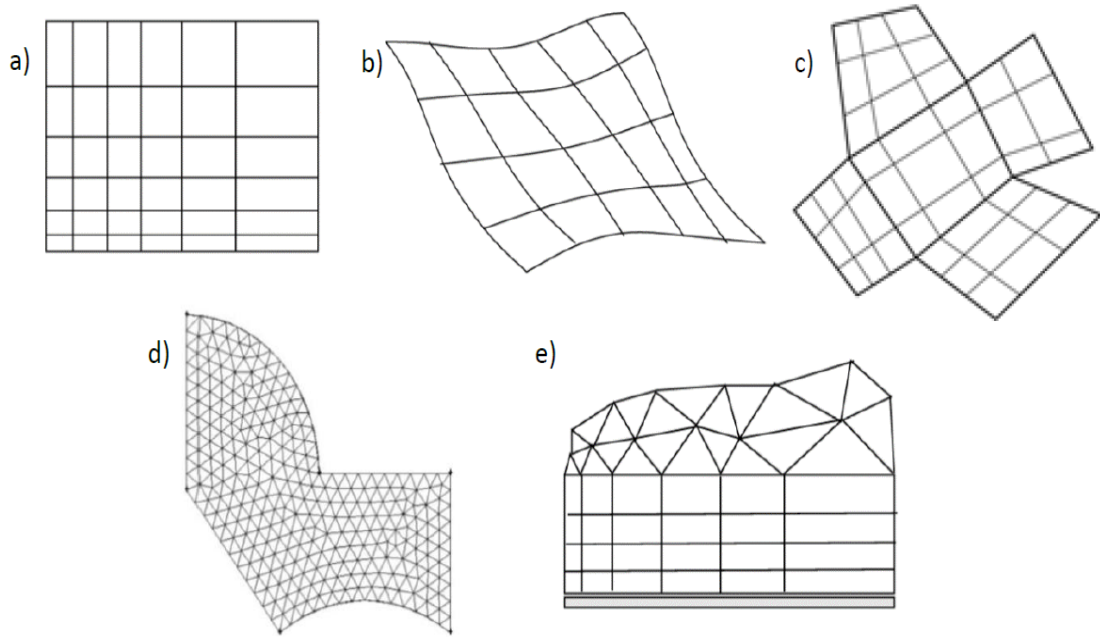
En cuanto a las mallas que puede manipular el método de los volúmenes finitos este cuenta con la misma flexibilidad que el método de los elementos finitos pero restringidos a elementos con lados rectos o caras planas.

Entre las mallas posibles podemos hacer una división entre:

**Mallas estructuradas**, son aquellas en las cuales cualquier nodo puede ser ubicable en término de dos índices (i, j) en 2D o tres índices (i, j, k) en 3D. Estas mallas son muy comúnmente denominadas mallas de diferencias finitas. (Ver figuras 15)

**Mallas no estructuradas**, son aquellas comúnmente empleadas por el método de los elementos finitos y donde no es posible encontrar una expresión de 2 o 3 índices que permita ubicar un nodo [12]. (Ver figuras 15).

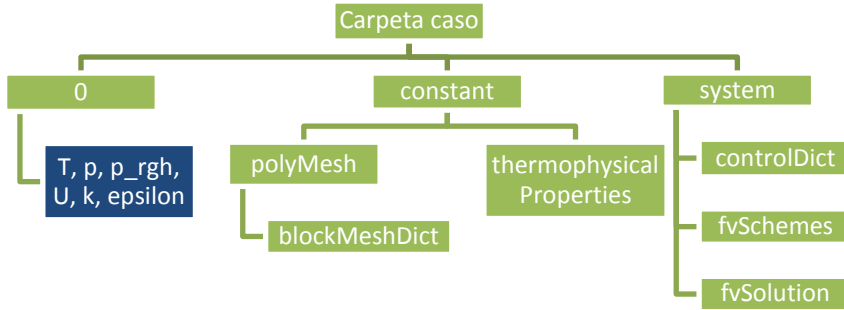
Figura 15. Tipos de malla. a) Malla estructurada ortogonal. b) Malla estructurada ajustada al cuerpo. c) Malla estructurada en bloque. d) Malla no estructurada. e) Malla híbrida.



Fuente: MURTHY, J. Y. Numerical Methods in Heat, Mass, and Momentum Transfer.

En el caso de OpenFOAM existe una herramienta llamada BlockMesh, está crea una malla a partir de un archivo llamado *blockMeshDict*. Como indica el nombre, la malla se creara a partir de bloques que pueden tener diferentes formas geométricas (hexaedros, prismas, tetraedros, pirámides...). Se trata de una utilidad que deja de ser práctica en cuanto la geometría que se desea mallas es compleja.

## 6.4.2. Condiciones de contorno



El tema de las fronteras está involucrado porque es necesario para el modelado, no es simplemente una entidad geométrica, sino que es una parte integral de la solución numérica a través de condiciones de contorno o "conexiones" entre los límites.

Primero se considera qué efectos se deben aplicar en las condiciones de frontera, un límite general se divide en un conjunto de condiciones de contorno. Una condición de contorno puede incluir una o más áreas existentes en la superficie límite que no necesitan necesariamente estar conectadas físicamente.

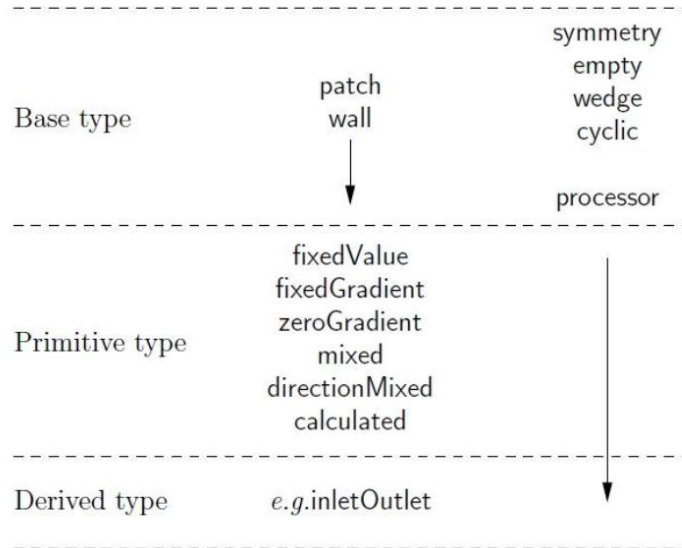
Hay tres atributos asociados a una condición de contorno que se describen a continuación en su jerarquía natural. La Figura 16 muestra los nombres de los diferentes tipos de condiciones de contorno introducidas en cada nivel de la jerarquía. La jerarquía que se describe a continuación es muy similar, pero no idéntica a la jerarquía de clases utilizada en la biblioteca OpenFOAM.

**Tipo de Base:** El tipo de parche descrito únicamente en términos de geometría o un "enlace de comunicación" de datos.

**Tipo Primitivo:** La condición parche numérico asigna una variable de campo al parche.

**Tipo Derivado:** Una condición parche, derivada de tipo primitivo, asigna una variable de campo en el parche.

Figura 16. Atributos de los parches.



Fuente: [www.openfoam.com](http://www.openfoam.com)

### Especificación de los tipos de condiciones de contorno en OpenFOAM

Los tipos de parche se especifican en los archivos de mallas y en cada una de las variables que maneja el caso OpenFOAM. Más precisamente: El tipo de base se especifica bajo la palabra clave `type` para cada parche en el archivo *blockMeshDict*, que se encuentra en el directorio *constant / Polymesh*; y el tipo de parche numérico, ya sea un tipo primitivo o derivados, se especifica bajo la palabra clave `tipo` para cada parche en un archivo de campo.

#### Los tipos base

A continuación se describen los tipos de base y geométricos; las palabras clave utilizadas para especificar estos tipos en OpenFOAM se resumen en la Tabla 3.

Tabla 5. Tipos de condiciones de contorno básicos.

<b>PALABRAS CLAVE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
patch	Parche genérico
symmetryPlane	Plano de simetría
empty	planos frontal y posterior de una geometría 2D
wedge	Cuña frontal y posterior para una geometría axi-simétrica
cyclic	Plano cíclico
wall	Utilizada para funciones de pared en flujos turbulentos
processor	Entre procesadores límite

Para la modelización del proyecto se utilizan:

- **Parch:** El tipo de parche básico para una condición parche que no contiene ninguna información geométrica o topológica sobre la malla (con la excepción de la pared), por ejemplo, una entrada o una salida.
- **Wall:** Hay casos en que un parche que coincide con una pared necesita para ser identificables como tales, en particular cuando se aplica el modelado especialista en los límites de la pared. Un buen ejemplo es el modelado turbulencia pared donde una pared se debe especificar con un tipo de parche de la pared, de modo que la distancia de la pared a los centros de las celdas al lado de la pared se almacenan como parte de la revisión.
- **Empty:** Mientras OpenFOAM siempre genera geometrías en 3 dimensiones, puede ser instruido para resolver en 2 (o 1) dimensiones especificando una condición especial vacía en cada parche cuyo plano es perpendicular a la dimensión tercera (y segundo) para los que no se requiere ninguna solución.

## Los tipos primitivos

Los tipos primitivos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 6. Tipos de condiciones de contorno.

Tipo	Descripción de la condición para el campo parche $\phi$	Datos para especificar
fixedValue	Se especifica el valor de $\phi$	valor
fixedGradient	Se especifica gradiente normal de $\phi$	gradiente
zeroGradient	Gradiente normal de $\phi$ es cero	--
calculated	$\phi$ se deriva de otros campos	--
mixed	Una mezcla entre fixedValue / fixedGradient condición en función del valor en valueFraction	refValue refGradient valueFraction valor
directionMixed	Una condición mezclado con valueFraction tensorial	refValue refGradient valueFraction valor

Existen numerosos tipos derivados de las condiciones de contorno en OpenFOAM, demasiados para enumerarlos aquí. Para obtener una lista de todos los modelos disponibles, deben consultar el código fuente OpenFOAM.

## GroovyBC

Existe una biblioteca que introduce una condición límite denominada groovyBC. Esta condición de frontera es básicamente una condición de contorno mixta donde se especifica un valor, la pendiente y el valueFraccion, que definen el

comportamiento del campo. Se pueden utilizar para establecer condiciones de contorno no uniformes sin modificar el código fuente.

Parámetros de la condición de contorno:

- ✓ **ValueExpression:** Cadena con el valor que se utilizará si es necesario un Dirichlet-condición. Por defecto es cero.
- ✓ **value:** Se utiliza si no se da "ValueExpression". También se utiliza para asignar el valor para el primer paso de tiempo si se especifica.
- ✓ **gradientExpression:** Cadena con el gradiente que se utilizará si se necesita una condición general Neumann. Por defecto es cero.
- ✓ **fractionExpression:** Determina si la cara es Dirichlet (1) o Neumann (0). El valor predeterminado es 1.
- ✓ **variables:** Lista con las variables temporales separados por un punto y coma. Puede hacer que la escritura de expresiones sea más cortas.

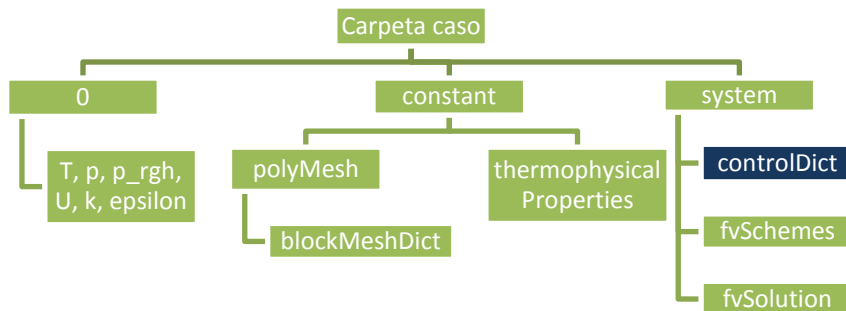
### 6.4.3. Selección de la aplicación de OpenFOAM

La aplicación a utilizar depende del tipo de problema físico que se pretenda resolver y sus características: incompresible o compresible, estacionario o transitorio, laminar o turbulento... La elección la aplicación no representa una dificultad porque OpenFOAM facilita información sobre las características de cada uno de ellos.

Algo con más dificultad es incluir en el caso todos los archivos que la aplicación necesita consultar para funcionar correctamente, es posible saberlo a través de un

análisis del código pero la manera más eficaz es fijarse en los tutoriales. Los archivos que normalmente se añaden se refieren a propiedades físicas del fluido; para adaptar un tutorial al caso específico algunas veces solo basta con cambiar los correspondientes valores.

#### 6.4.3.1. Control del tiempo



En el caso de la preparación de la carpeta *system* se debe modificar el *controlDict* para elegir el incremento del tiempo, el tiempo final, descripción de como se guardarán los resultados entre otras cosas referentes a la ejecución temporal de la simulación.

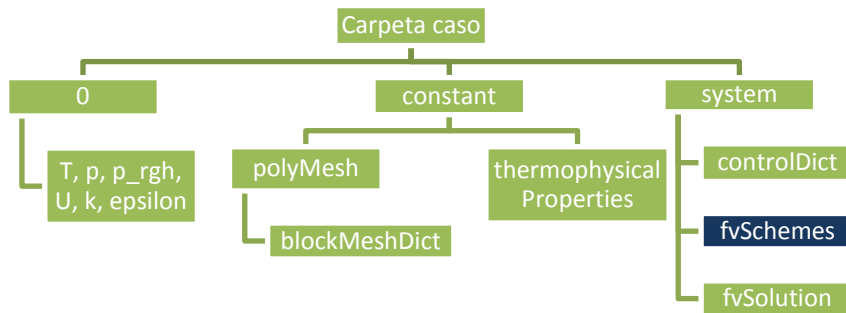
Tabla 7. Subdirectorios que conforman controlDict.

CONTROL DEL TIEMPO DE SIMULACIÓN	
<b>startFrom</b>	Se controla el comienzo de la simulación.
<b>startTime</b>	Tiempo especificado en la entrada "startTime".
<b>startTime</b>	Tiempo de inicio de la simulación con "startFrom" "startTime".
<b>stopAt</b>	Controla el fin de la simulación.
<b>endTime</b>	Tiempo especificado en la "keyword" "endTime".
<b>endTime</b>	Tiempo de finalización de la simulación.
<b>deltaT</b>	"Time step" para la simulación.

<b>ESCRITURA DE DATOS</b>	
<b>writeControl</b>	Controla cada cuanto escribir resultados en los archivos "database".
<b>timeStep</b>	Escribir los datos cada "writeIntervals" en intervalos de tiempo.
<b>writeInterval</b>	Es un escalar usado en conjunto con el "writeControl" descrito anteriormente.
<b>purgeWrite</b>	Es un entero que representa un límite en el número de "time directories" que son guardados al sobre-escribir "time directories" de manera cíclica, e.g. si se analiza un tiempo inicial de 5 segundos, y se quiere analizar cada 1 segundo, al escribir un "purgeWrite" de 2, se van a escribir los resultados de 8 y 9 en las carpetas creadas para 6 y 7 respectivamente. Este factor se deshabilita escribiendo un "purgeWrite" de cero.
<b>writeFormat</b>	Especifica el formato de los datos escritos (formato "ascii").
<b>Write Precision</b>	Es un entero usado en conjunto con el "writeFormat" descrito anteriormente. Se establece como 6 que es un valor predefinido.
<b>Write Compression</b>	Especifica la compresión del fichero de datos. Se desactivó esta opción.
<b>timeFormat</b>	Se especifica el formato de nombrado de los "time directories". Se especificó "general" el cual especifica un formato científico si el exponente es menor que -4 o mayor o igual a especificado en el "timePrecision".
<b>timePrecision</b>	Es un entero usado en conjunto con el "timeFormat" descrito anteriormente, se establece como 6 de manera predeterminada.
<b>LECTURA DE DATOS</b>	
<b>RunTime Modifiable</b>	Yes/no intercambia entre los directorios, por ejemplo, que el "controldict" sea leído por OpenFOAM al inicio de cada paso de tiempo.

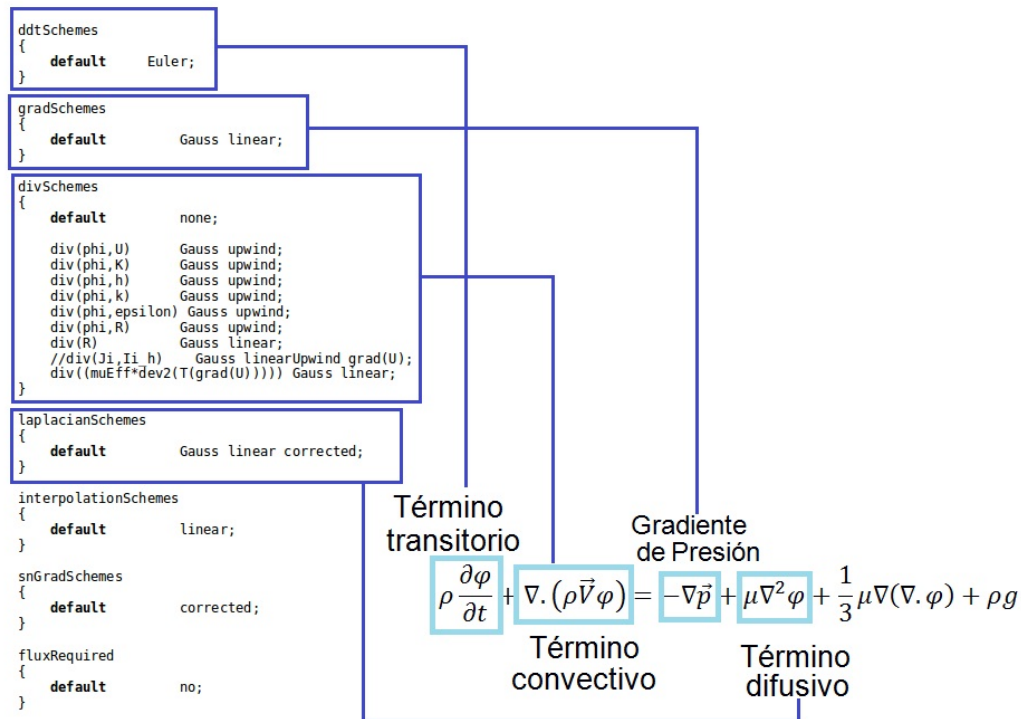
Luego se verifican que en *fvSchemes* están incluidos y definidos los esquemas numéricos de todas las operaciones que realice el solver y que en *fvSolution* se incluya el tipo de solucionador de ecuaciones para cada una de las variables que pretendemos calcular durante la simulación.

#### 6.4.3.2. Esquemas numéricos



El archivo *fvSchemes* establece los esquemas numéricos, como los derivados de las ecuaciones, que aparecen en las aplicaciones que se ejecutan. Los términos que habitualmente se les debe asignar un esquema numérico en *fvSchemes* van desde derivados, por ejemplo, gradiente  $\nabla$ , y las interpolaciones de los valores de un conjunto de puntos a otro.

Figura 17. Estructura de un archivo FvSchemes.



En la figura se observa la ecuación de transporte para un flujo incompresible. Los términos derivados ejemplifican esta libertad de elección. El usuario tiene como primera opción practicar discretización donde la integración para volúmenes finitos es de Gauss estándar es la opción común. La integración de Gauss se basa en la suma de los valores en las caras de celdas, que deben ser interpolados a partir de los centros de las celdas. El usuario tiene de nuevo una elección totalmente libre de esquema de interpolación, con determinados regímenes que están diseñados específicamente para los términos derivados particulares, especialmente los términos de la divergencia del término convectivo  $\nabla \cdot$ .

El conjunto de términos, para los que se especifican esquemas numéricos, se subdividen en el diccionario `fvSchemes` en las categorías que se muestran en la

Tabla 6. Cada palabra clave en el tabla 6 es el nombre de un sub-diccionario que contiene los términos de un tipo en particular, por ejemplo, gradSchemes contiene todos los términos de gradiente tales como grad (p) (que representa  $\nabla p$ ).

Tabla 8. Principales palabras clave usadas en fvSchemes.

Palabra clave	Categoría de términos matemáticos
interpolationSchemes	Interpolaciones punto a punto de los valores
snGradSchemes	Componente de gradiente normal a una cara de la celda
gradSchemes	Gradiente $\nabla$
divSchemes	Divergencia $\nabla \cdot$
laplacianSchemes	Laplaciano $\nabla^2$
timeScheme	Primera y segunda derivada $\partial/\partial t, \partial^2/\partial t^2$
fluxRequired	Campos que requieren la generación de un flujo

Las siguientes secciones describen la elección de esquemas para unas de las categorías de términos en la Tabla 6.

✓ **interpolationSchemes:** Esquemas de interpolación.

El sub-diccionario *interpolationSchemes* contiene términos que son interpolaciones de los valores típicos de los centros de las celdas a los centros de las caras. Una selección de métodos de interpolación en OpenFOAM se enumeran en la Tabla 7, que se divide en dos categorías: una categoría de esquemas generales y una categoría de esquemas utilizados principalmente en conjunto con discretización de Gauss de convección (divergencia) en términos de flujo de fluido.

Un esquema general se especifica simplemente citando la palabra clave y la entrada, por ejemplo, un esquema lineal se especifica como predeterminado por:

default linear;

Tabla 9. Esquemas de interpolación.

<b>Esquemas centrado</b>	
linear	interpolación lineal (diferenciación central)
cubicCorrection	Esquema cubico
midPoint	Interpolación lineal con ponderación simétrica

<b>Esquemas de convección acotados</b>	
upwind	Diferenciación upwind
linearUpwind	Diferenciación lineal upwind
skewLinear	Lineal con corrección de asimetría
filteredLinear2	Lineal con filtrado de timbre de alta frecuencia

✓ **snGradSchemes:** Esquemas para el gradiente normal a la superficie.

El sub-diccionario *snGradSchemes* contiene los términos para el gradiente normal a la superficie. Éste se evalúa en cada cara de la celda; es el componente, normal a la cara del gradiente de los valores del centro de la cara que conecta dos celdas. Un gradiente normal a la superficie puede ser especificado en su propio derecho y también es necesario para evaluar un plazo de Laplace mediante la integración de Gauss.

Los esquemas disponibles se enumeran en la Tabla 8 y se especifican por citar simplemente la palabra clave y la entrada.

Tabla 10. Esquemas del gradiente normal la superficie.

<b>ESQUEMAS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Corrected	Explícito no-ortogonal corregido
Uncorrected	Sin corrección no-ortogonal
Limited $\psi$	Corrección acotada no-ortogonal
Bounded	Corrección acotada por escalares positivos
Fourth	Cuarto orden

✓ **gradSchemes:** Esquemas de gradiente

El sub-diccionario *gradSchemes* contiene términos de gradientes. El esquema de discretización para cada término se puede seleccionar de los que se enumeran en la Tabla 9.

Tabla 11. Esquemas disponibles para la discretización en gradSchemes.

ESQUEMA DE DISCRETIZACIÓN	DESCRIPCIÓN
Gauss <interpolationScheme>	Segundo orden, la integración de Gauss
leastSquares	Segundo orden, mínimos cuadrados
fourth	cuarto orden, mínimos cuadrados
cellLimited <gradScheme>	Versión celda acotada de uno de los esquemas anteriores
faceLimited <gradScheme>	Versión cara acotada de uno de los esquemas anteriores

La palabra clave Gauss especifica la discretización estándar de integración volumen finito. Por lo tanto, la entrada de Gauss debe estar seguida por la elección del esquema de interpolación de la Tabla 7. En la mayoría de los casos el esquema lineal es una opción eficaz.

✓ **laplacianSchemes:** Esquemas para la laplaciana.

El sub-diccionario *laplacianSchemes* contiene términos laplacianos. Vamos a discutir la sintaxis de la entrada en referencia a un término Laplaciano típico que se encuentra en la dinámica de fluidos,  $\nabla \cdot (\nu \nabla U)$ , dado el laplaciano identificador palabra (un, U). El esquema de Gauss es la única opción de discretización y requiere una selección tanto de un esquema de interpolación para el coeficiente

de difusión, es decir  $v$  en nuestro ejemplo, y un esquema de gradiente normal a la superficie, es decir,  $\nabla U$ . En resumen, las entradas necesarias son:

Gauss <interpolationScheme> <snGradScheme>;

El esquema de interpolación se selecciona de la tabla 7, las opciones típicas son de los regímenes general y, en la mayoría de los casos, linear. El esquema de gradiente normal a la superficie se selecciona de la tabla 8; La elección del esquema determina el comportamiento numérico como se describe en la Tabla 10.

Tabla 12. Comportamiento de los esquemas normales a la superficie utilizados en laplacianSchemes.

ESQUEMA	COMPORTAMIENTO NUMÉRICO
corrected	Sin acotar, de segundo orden, conservador
uncorrected	Acotado, de primer orden, no conservador
limited $\psi$	Mezcla ente corrected y uncorrected
bounded	Primer orden para escalares acotados
fourth	Sin acotar, cuarto orden, conservador

✓ **divSchemes:** Esquemas para la divergencia.

El sub-diccionario *divSchemes* contiene los posibles esquemas de evaluación del operador divergencia. Vamos a discutir la sintaxis de la entrada en referencia a un término típico de convección que se encuentra en la dinámica de fluidos  $\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V})$ , que en aplicaciones OpenFOAM se da comúnmente el div identificador (phi, U), donde  $\varphi$  se refiere al flujo  $\varphi = \rho \vec{V}$ .

El esquema de Gauss es la única opción de discretización y requiere una selección del esquema de interpolación para el campo dependiente, es decir U en nuestro ejemplo. En resumen, las entradas necesarias son:

Gauss <interpolationScheme>;

El esquema de interpolación se selecciona de entre toda la gama de esquemas en la Tabla 7, tanto general como específica convección. La elección determina críticamente el comportamiento numérico como se describe en la Tabla 11. La sintaxis aquí para especificar esquemas de interpolación convección específico no incluye el flujo como ya es conocido por el término en particular, es decir, para div (phi, U), sabemos que el flujo es phi así especificarlo en el esquema de interpolación que sólo invitar una inconsistencia. Especificación de la interpolación en contra del viento en nuestro ejemplo sería por tanto:

div (phi, U) Gauss upwind;

Tabla 13. Comportamiento de los esquemas de interpolación utilizados en divSchemes.

ESQUEMA	COMPORTAMIENTO NUMÉRICO
linear	Segundo orden, sin límites
skewLinear	segundo orden, sin límites, con corrección de la asimetría
cubicCorrected	Cuarto orden, sin acotar
upwind	Primer orden, acotado
linearUpwind	Primer / segundo orden, acotado
QUICK	Primer / segundo orden, acotado
Esquemas TVD	Primer / segundo orden, acotado
SFCD	Segundo orden, acotado
Esquemas NVD	Primer / segundo orden, acotado

✓ **ddtSchemes:** Esquemas para el tiempo.

Las condiciones para el primer término ( $\partial / \partial t$ ) se especifican en el sub-diccionario

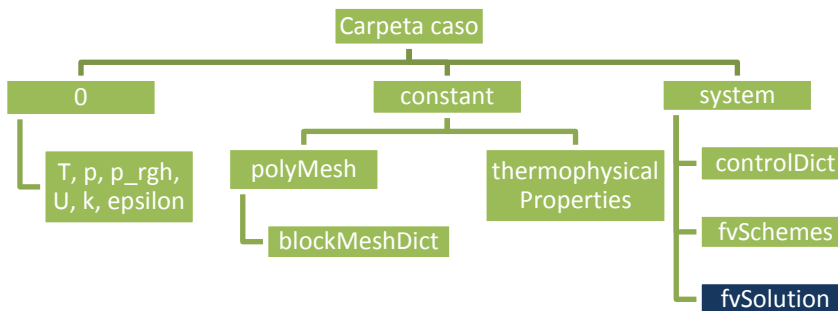
ddtSchemes. El esquema de discretización para cada término se puede seleccionar de los que se enumeran en la Tabla 12.

Tabla 14. Esquemas disponibles para la discretización en ddtSchemes.

ESQUEMA	DESCRIPCIÓN
Euler	Primer orden, acotado, implícito
localEuler	Paso temporal local, de primer orden, acotado, implícito
CrankNicolson $\psi$	Segundo orden, acotado, implícito
backward	Segundo orden, implícito
SteadyState	No resuelve por derivados del tiempo

Al especificar un esquema de tiempo, debe tenerse en cuenta que una aplicación diseñada para los problemas transitorios no se ejecutará necesariamente para estado estacionario y viceversa.

#### 6.4.3.3. Solver y algoritmo de control



Los solucionadores, tolerancias y algoritmos se controlan desde el diccionario *fvSolution* en *system*. *fvSolution* contiene un conjunto de subdiccionarios que son específicos para el solucionador que se ejecuta. Sin embargo, existe un pequeño conjunto de subdiccionarios estándar que cubren la mayor parte de los utilizados por los solucionadores estándar.

### ✓ Control solver lineal

El primer sub-diccionario en nuestro ejemplo, y que aparece en todas las aplicaciones del solver, son los solucionadores. Se especifica cada solver lineal que se utiliza para cada ecuación discretizada; el término solver lineal se refiere al método de procesamiento de datos numéricos para resolver el conjunto de ecuaciones lineales, a diferencia del solucionador o aplicación que describe el conjunto de ecuaciones y algoritmos para resolver un problema particular. El término “solver lineal” se abrevia como “solucionador” en gran parte de la discusión que sigue; esperamos que el contexto del término evite cualquier ambigüedad.

La sintaxis para cada entrada dentro de fvSolution utiliza una palabra clave que es la palabra en relación con la variable que se resuelve en la ecuación particular. Por ejemplo, icoFoam resuelve ecuaciones de velocidad  $T$  y presión  $p$ , por lo tanto, las entradas para  $T$  y  $p$ . La palabra clave es seguida por un diccionario que contiene el tipo de solver y los parámetros que utiliza el solucionador. El solucionador se selecciona a través de la palabra clave solucionador de la elección en OpenFOAM, enumerados en la Tabla 13. Los parámetros, incluyendo la tolerancia, RELTOL, preconditionador, etc. se describen a continuación.

Tabla 15. Solucionadores lineales.

<b>SOLVER</b>	<b>PALABRA CLAVE</b>
Precondicionados (bi-) gradiente conjugado	PCG / PBiCG †
Solver que utiliza un smoother	smoothSolver
Generalizado geométrico-algebraica multi-grid	GAMG
Solucionador para sistemas explícitos diagonales	Diagonal
† PCG para matrices simétricas, PBiCG para asimétricas	

Los solucionadores distinguen entre matrices simétricas y matrices asimétricas. La simetría de la matriz depende de la estructura de la ecuación a ser resuelta y,

mientras que el usuario puede ser capaz de determinar esto, no es esencial, ya que OpenFOAM producirá un mensaje de error para informar al usuario si un solucionador no apropiado ha sido seleccionado.

✓ **Tolerancias de la solución.**

Los solucionadores de matrices dispersas son iterativos, es decir, que se basan en la reducción de la ecuación residual a través de una sucesión de soluciones. El residuo es una medida del error en la solución de modo que entre más pequeño es, más precisa será la solución. El residuo se evalúa mediante la sustitución de la solución actual en la ecuación y teniendo la magnitud de la diferencia entre los lados izquierdo y derecho; también se normaliza para que sea independiente de la magnitud del problema que se analiza.

Antes de resolver una ecuación para un campo en particular, el residual inicial se evalúa en función de los valores actuales del campo. Después de cada iteración del solucionador residual es re-evaluado. El solucionador detiene si alguna de las siguientes condiciones se alcanza:

Los residuos están por debajo de la tolerancia escogida para el solver;

La relación de la corriente de residuos iniciales cae por debajo de la tolerancia relativa solucionador, RELTOL;

La tolerancia del solucionador debe representar el nivel en el que el residuo es suficientemente pequeño para que la solución se pueda considerar suficientemente precisa. La tolerancia relativa del solucionador limita la mejora relativa de la solución inicial a la final. En las simulaciones transitorias, es habitual establecer la tolerancia relativa del solucionador de 0 para forzar la solución a converger según la tolerancia del solucionador en cada paso de tiempo. La

tolerancia, la tolerancia relativa, RELTOL deben especificarse en los diccionarios de todos los solucionadores;

✓ **Solucionadores preconditionados para el gradiente conjugado.**

Hay una serie de opciones para preconditionamiento de matrices en los solucionadores de gradiente conjugado, representada por la palabra clave preconditionador en el diccionario solver. Los preconditionadores se enumeran en la Tabla 14.

Tabla 16. Opciones de preconditionador.

<b>PRECONDICIONADOR</b>	<b>PALABRA CLAVE</b>
Diagonal incompleta-Cholesky (simétrica)	DIC
Más rápido diagonal incompleta-Cholesky (CID con el almacenamiento en caché)	FDIC
Diagonal incompleta-LU (asimétrica)	DILU
Diagonal	diagonal
Geométrico-algebraica multi-grid	GAMG
Sin ningún preconditionador	none

✓ **Solucionadores con Smooth**

Los solucionadores que utilizan un smooth requieren que se especifique un smother. Las opciones se enumeran en la Tabla 15. Generalmente GaussSeidel es la opción más segura, pero DIC puede ofrecer una mejor convergencia.

Tabla 17. Opciones de smoother.

<b>SMOOTHER</b>	<b>PALABRA CLAVE</b>
Gauss-Seidel	GaussSeidel
Diagonal incompleta-Cholesky (simétrica)	DIC
Diagonal incompleta-Cholesky con Gauss-Seidel (simétrica)	DICGaussSeidel

### ✓ Factores de relajación

Un segundo sub-diccionario de *fvSolution* que se utiliza a menudo en OpenFOAM es *relaxationFactors* que controla los factores de relajación, una técnica utilizada para mejorar la estabilidad de un cálculo, en particular en la resolución de problemas de estado estacionario. Funciona limitando la cantidad de una variable cuando cambia de una iteración a la siguiente, ya sea modificando la matriz de la solución antes de resolver un campo o modificando el campo directamente. Una elección óptima de  $\alpha$  es un valor lo suficientemente pequeño para asegurar un cálculo estable pero lo suficientemente grande para mover el proceso iterativo hacia adelante; valores de  $\alpha$  tan alto como 0.9 pueden garantizar la estabilidad en algunos casos, pero por debajo de 0,2 se puede frenar el proceso iterativo.

### ✓ Algoritmos PISO y SIMPLE

Aplicaciones dinámicas solucionador mayoría de fluidos en OpenFOAM usan el algoritmo Pressure Implicit with Splitting of Operators (PISO) o el Semi- Implicit Method for pressure Linked Equations (SIMPLE). Estos algoritmos son procedimientos iterativos para resolver ecuaciones para la velocidad y la presión, PISO siendo utilizado para los problemas de transitorios y simple para el estado de equilibrio [8].

Ambos algoritmos se basan en la evaluación de algunas soluciones iniciales y luego corregirlos. SIMPLE sólo hace una corrección mientras PISO requiere más de una, pero por lo general no más de 4. El usuario, por tanto, debe especificar el número de correctores en el diccionario PISO por la palabra clave *nCorrectors*.

#### 6.4.4. Ejecución y post procesado

Para ejecutar la simulación en OpenFOAM se utiliza el terminal de comandos.

Mediante él se debe acceder a la carpeta que contenga el caso y, mediante ciertos comandos, ejecutar las utilidades y solvers adecuados. Un ejemplo, es la generación del mallado que se realiza ubicado desde la carpeta caso escribiendo `blockMesh`. Una vez la malla ya está preparada el siguiente paso es solucionar el caso con el solver, realizado de la misma manera mediante un comando en el terminal que coincide con el nombre del solver. Aunque en ocasiones el proceso no es tan directo porque antes se deben ejecutar utilidades que acaban de preparar las variables o realizan interpolaciones de otras simulaciones.

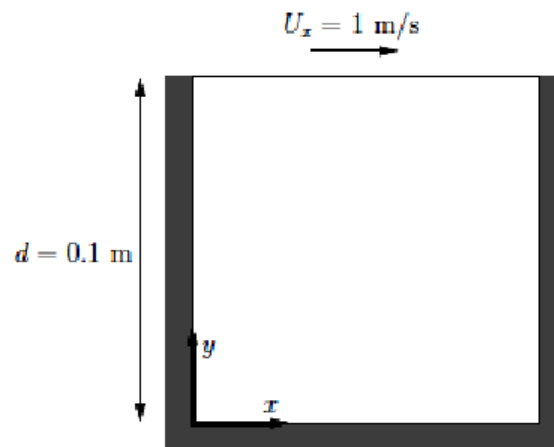
Realizada la simulación, dentro de la carpeta del caso habrán aparecido nuevas carpetas temporales con los valores calculados de las variables. Para visualizar los resultados OpenFOAM incluye una utilidad llamada `paraFoam` que utiliza el software `paraView`, aunque también se puede postprocesar mediante otros software. De las numerosas opciones que ofrece `paraView` para observar los resultados las más prácticas y destacadas son tres principalmente: visualizar la malla, visualizar resultados en código de colores o la opción anterior con flechas que indican la dirección.

## 7. CONOCIENDO OPENFOAM

### 7.1. LID DRIVEN CAVITY

Es un problema que se utiliza comúnmente para validar nuevos métodos o códigos de solución debido a que se ha resuelto para flujo laminar y turbulento en repetidas ocasiones y existe gran cantidad de datos para comparar, además su geometría y condiciones de contorno son simples y compatibles con la mayoría de enfoques numéricos.

Figura 18. Geometría del caso Driven cavity.



Fuente: User Guide de OpenFOAM.

#### 7.1.1. Definición del caso físico

Aunque se ha demostrado que este caso tiene un desarrollo 3D, en esta ocasión se considera 2D, con 3 paredes fijas y con su parte superior móvil que va a una velocidad conocida y constante (ver Figura 18).

Para definir el modelo a considerar se supone que dentro de la cavidad hay un fluido newtoniano e incompresible, con un número de  $R = \frac{U_x d}{\nu} = 10$  inicialmente,

que lo hace un caso laminar, además se establece que es un caso isotérmico.

Y se define para su resolución el uso del algoritmo PISO, el cual es basado en la ecuación de presiones.

De acuerdo con las especificaciones que se tienen en cuenta, el solver definido en OpenFOAM que concuerda con esto es **icoFoam**, por esta razón la carpeta caso se ubica en `tutorials/incompressible/icoFoam/cavity` y debe contener definidos los parámetros descritos a continuación.

### 7.1.2. Geometría y malla

Cada script en OpenFOAM tiene el mismo encabezado en el que se especifica la versión de OpenFOAM que se está utilizando y en ocasiones la ubicación en la que se encuentra (ver Figura 19). A continuación se presenta el contenido del archivo `blockMeshDict`, que se ubica en la carpeta `constant/polyMesh`, en el que se especifican las características del mallado a usar en la simulación.

Figura 19. Encabezado de los archivos de un caso en OpenFOAM.

```
*-----* C++ *-----*\
|=====|
| \\ / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration  | Version: 2.3.0                       |
|  \\ / A nd       | Web:   www.OpenFOAM.org              |
|  \\ M anipulation|                                     |
|*-----*/
FoamFile
{
  version    2.0;
  format     ascii;
  class      dictionary;
  object     blockMeshDict;
}
// ***** //
```

Para cada una de las variables, OpenFOAM nos presenta diferentes opciones que se eligen dependiendo del caso a simular. En el libro guía del usuario de

OpenFOAM (User Guide, versión 2.3.0) podemos encontrar en la sección 5.3, los parámetros para la generación de la malla utilizando la aplicación blockMesh, en ella se declaran las variables necesarias como: la unidad de medida, los puntos necesarios para formar la geometría del caso, los bloques a los que se les definirá una característica particular, entre otros, en la tabla 16 podemos observar estos parámetros y la manera correcta de establecerlos.

Tabla 18. Palabras clave usadas en el archivo blockMeshDict.

Palabra clave	Descripción	Ejemplo
convertMeters	Factor de escala para las coordenadas de los vértices	0.001 escala en mm
Vertices	Lista de las coordenadas de los vértices	(0 0 0)
Edges	Usado para describir arcos o bordes ranura	arc 1 4 (0.939 0.342 -0.5)
Block	Lista ordenada de los bloques definido por los vértices y malla	hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (10 10 1)
Patches	Lista de caras	symmetryPlane base ((0 1 2 3))
mergePatchPairs	Lista de caras unidas	---

En el caso de Lid Driven cavity tenemos definida la malla de la siguiente manera:

```

convertToMeters 0.1; // Factor de escala para las coordenadas (0.001 escala es
mm)
vertices // Definimos los vértices
(
    (0 0 0) // Punto 0
    (1 0 0) // Punto 1
    (1 1 0) // Se ordenan en sentido anti horario de abajo hacia arriba
    (0 1 0)
    (0 0 0.1)
    (1 0 0.1)
    (1 1 0.1)
    (0 1 0.1)
);
Blocks // Definimos los bloques y el número de volúmenes de control

```

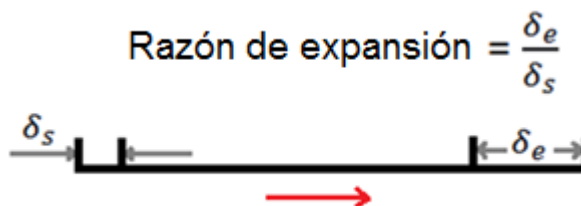
```

(      hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (80 80 1) simpleGrading (1 1 1)
          Vértices   N° de nodo   Razón de expansión (ver Figura 21)
);
Edges
(      );
Boundary // Definimos las condiciones contorno
(      movingWall // Definimos el nombre de la pared
      {      type wall; // Define el tipo de pared
              faces
              (      (3 7 6 2) // Las paredes que corresponden a este tipo
                );
            }
      fixedWalls
      {      type wall;
              faces
              (      (0 4 7 3)
                    (2 6 5 1)
                    (1 5 4 0)
                );
            }
      frontAndBack
      {      type empty; // Este tipo de patch se utiliza debido a que es un caso
              2D
              faces
              (      (0 3 2 1)
                    (4 5 6 7)
                );
            }
    );
mergePatchPairs // Fusionar las paredes
(      );

// ***** //

```

Figura 20. Definición de la razón de expansión.



### 7.1.3. Condiciones de contorno

Una vez se genera la malla, se pueden establecer las condiciones iniciales de los campos del caso. Debido a que la aplicación es *icoFoam*, se definen la velocidad (U) y la presión (P) en el tiempo inicial, creando un archivo para cada una de estas variables en la carpeta temporal inicial nombrada 0, en dicho archivo se determina la condición de contorno y el valor que tomara, como se muestra a continuación para la U.

```
dimensions [0 1 -1 0 0 0 0]; // Definen las unidades [Kg m s K mol A cd] m/s
internalField uniform (0 0 0); // Condición inicial para todo el volumen
boundaryField // Condiciones de contorno
{
    movingWall // Parte superior del caso que tiene movimiento
    {
        type    fixedValue; // Asigno un valor fijo inicial a la pared
        value    uniform (1 0 0); // Defino el valor de la velocidad
    }
    fixedWalls // Son todas las paredes estáticas
    {
        type    fixedValue;
        value    uniform (0 0 0);
    }

    frontAndBack // Representa la cara frontal y posterior
    {
        type    empty; // Vacío debido a que el caso es 2D
    }
}
```

Todas las posibilidades de condiciones y datos de las condiciones de contorno se están descritos en el capítulo 4 del User Guide.

### 7.1.4. Propiedades físicas

Las propiedades físicas para un caso *icoFoam* se describen en *transportProperties* archivo ubicado en la carpeta *constant* del caso, en esta ocasión solo es necesario establecer la viscosidad cinemática cuya palabra clave que determina esta propiedad es *nu*.

```
nu    nu [0 2 -1 0 0 0 0] 0.01; // Se describen las unidades y luego el valor.
```

### 7.1.5. Parámetros de control de la simulación

Los datos para el control del tiempo y la lectura de datos de la solución se leen desde `controlDict` ubicado en `system`,

```
application icoFoam; // Selecciona el solver que se usará.
startFrom startTime;
startTime 0; // Se define el tiempo en el que inicial la simulación
stopAt endTime;
endTime 0.5;
deltaT 0.005; // Se determina el incremento del tiempo en la simulación.
writeControl timeStep; // Es el momento en el que los resultados se escriben
writeInterval 20; // Se imprimen carpetas cada 20*deltaT
purgeWrite 0;
writeFormat ascii;
writePrecision 6;
writeCompression off; // Genera un archivo .zip, o .rar.
timeFormat general;
timePrecision 6;
runTimeModifiable true; // En cada iteración se leerán los Dict
```

### 7.1.6. Ajustes de discretización y linealización del solucionador

Se deben especificar los esquemas de discretización que mejor comportamiento tengan para resolver el método de volúmenes finitos según el caso de estudio en el archivo `fvSchemes`, ubicado en `system`; Los solucionadores y tolerancias de las ecuaciones lineales y otros controles de algoritmos se fijan en `fvSolution` ubicado allí mismo. Si algún parámetro no concuerda, el código nos avisa y nos da una lista de posibles solucionadores y preconditionadores.

### 7.1.7. Resultados numéricos

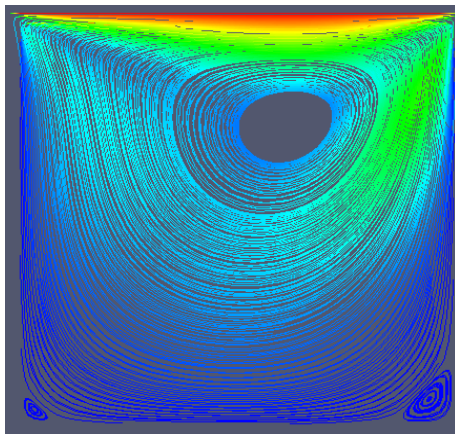
Modificando el valor de la viscosidad, con la velocidad y las demás propiedades físicas estables podemos obtener resultados para diferentes números de

Reynolds tenemos (ver Figura 21).

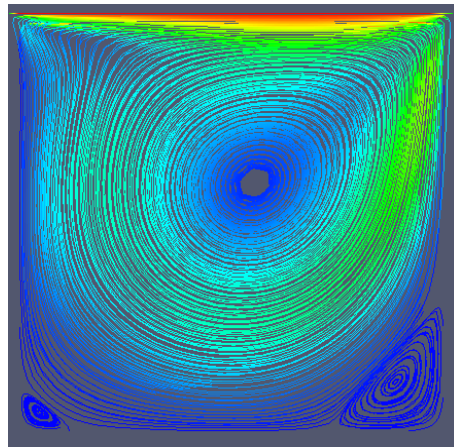
Driven cavity es un problema de flujo en estado estacionario, de manera que es posible considerar que la solución temporal se alcanza cuando la simulación se muestra invariante en el tiempo. Se observa que al aumentar el número de Reynolds hay que densificar el mallado para obtener resultados con un error menor al ser comparados con la solución de referencia, lo que sucede es que con el aumento del número Reynolds las fuerzas convectivas ejercen mayor dominio sobre las fuerzas viscosas, la velocidad será mayor, y por lo tanto los gradientes en las zonas cercanas a las paredes serán más altos también debido a la condición de no deslizamiento.

Figura 21. Líneas de corriente para diferentes números de Reynolds.

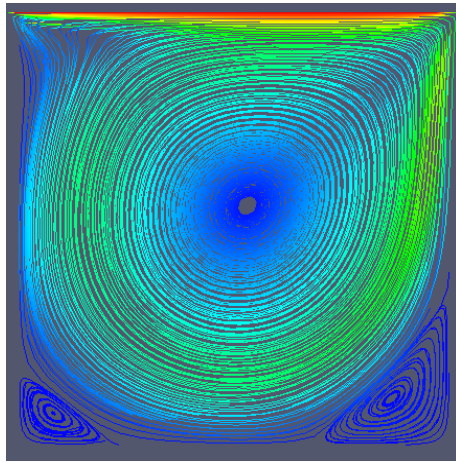
a) Re 100



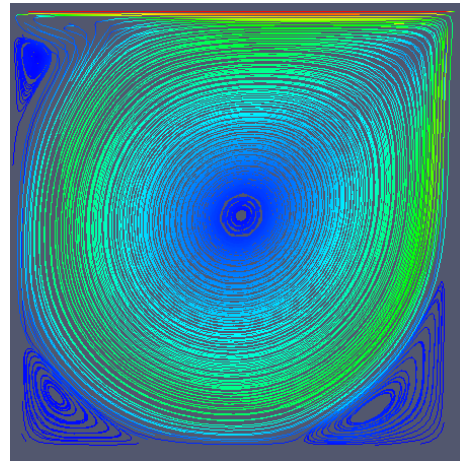
b) Re 400



c) Re1000

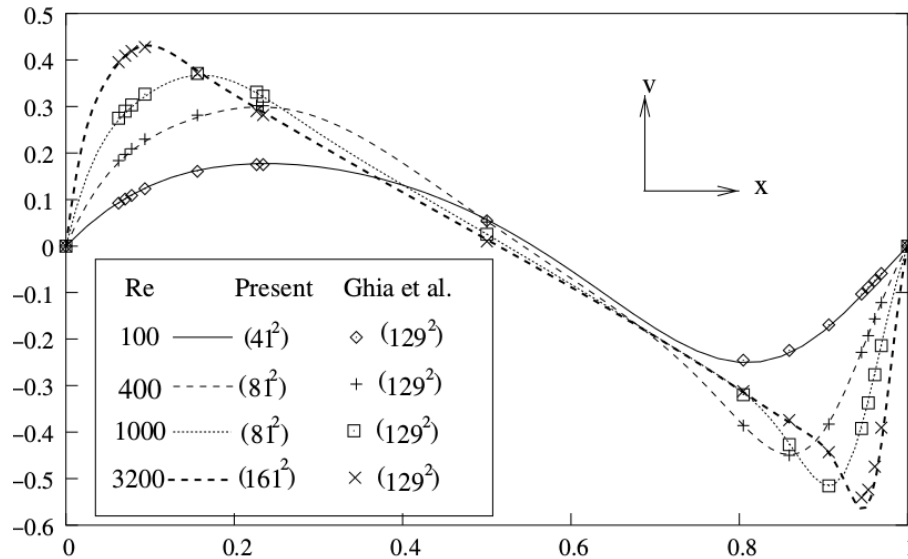


d) Re3200



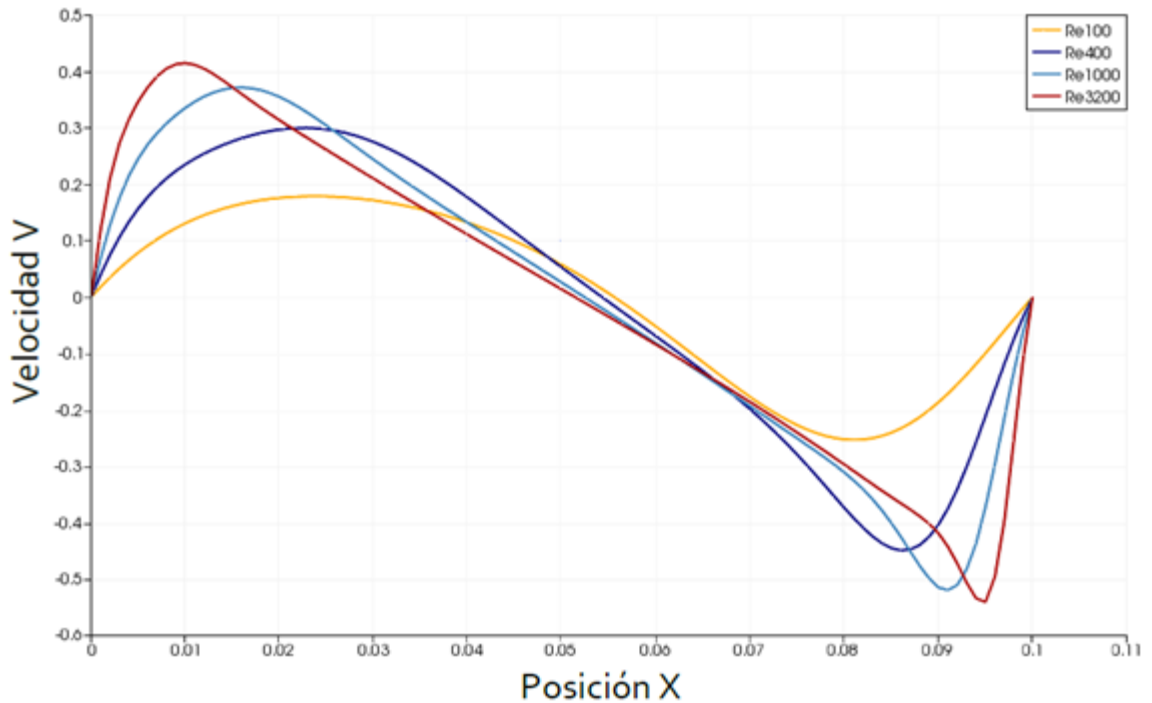
En la figura 24 se pueden apreciar los resultados obtenidos para la velocidad vertical en dirección horizontal ( $x$ ) de la simulación de cuatro números de Reynolds: 100, 400, 1000 y 3200, los cuales resultan ser muy similares a los de la figura 22, que son resultados presentados en 'A new paradigm for solving Navier-Stokes equations: streamfunction-velocity formulation', por M.M. Gupta and J. Kalita en el 2005, con ello se puede comprobar el correcto funcionamiento de OpenFoam y del acierto que se tuvo al seleccionar los diferentes parámetros en la simulación.

Figura 22. Velocidad vertical a lo largo de la línea horizontal central para driven cavity, flujos de  $Re= 100, 400, 1000$  y  $3200$ .



Fuente: M.M. Gupta and J. Kalita, 'A new paradigm for solving Navier-Stokes equations: streamfunction-velocity formulation', J. of Computational Physics, 2005

Figura 23. Resultados obtenidos para la velocidad vertical o lo largo de la horizontal, con  $Re = 100, 400, 1000$  y  $3200$ .



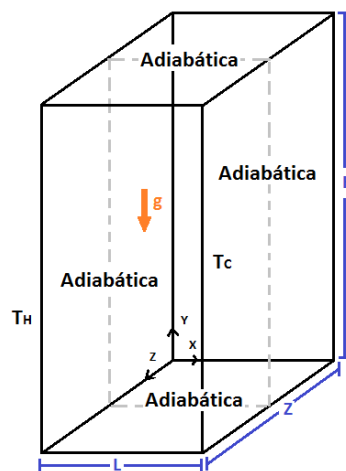
## 7.2. CAVIDAD DIFERENCIALMENTE CALENTADA

El estudio del flujo por convección natural dentro de recintos rectangulares resultante de calefacción lateral en presencia de la gravedad, es relevante para gran variedad de aplicaciones industriales, como el aislamiento térmico de los edificios, debido a que nos permite ganar comprensión en los mecanismos de transición y de la turbulencia de convección natural.

### 7.2.1. Descripción del caso

Se considera una cavidad rectangular climatizada en presencia de la gravedad, inicialmente en reposo, con una pared a una temperatura mayor que su opuesta, con un fluido en su interior el cual se supone newtoniano que garantiza una relación lineal entre la tensión de cizallamiento y el gradiente de velocidad, incomprensible y viscoso, que se encuentra a una temperatura  $T = \frac{T_h + T_c}{2}$ , la pared izquierda y derecha de la cavidad se mantienen a temperatura constante  $T_h$  y  $T_c$  respectivamente donde  $T_h - T_c > 0$ , las paredes superior e inferior son adiabáticas es decir se consideran aisladas de tal forma que no hay transferencia de calor, como se observa en la siguiente figura.

Figura 24. Vista esquemática de la cavidad.



Para este estudio se tiene en cuenta el número adimensional de Rayleigh (Ra) que caracteriza el punto crítico del sistema a partir del cual cualquier perturbación inicial el movimiento convectivo en el fluido. Este número depende de las propiedades físicas relevantes del fluido, del incremento de temperaturas y de la distancia entre paredes caliente y fría, indica la importancia relativa de las fuerzas de flotación respecto a las fuerzas viscosas en el seno del fluido, además con el podemos discriminar cuándo la transferencia de calor se produce por conducción o cuándo se produce principalmente por convección [13].

$$Ra = Gr * Pr \frac{g\beta\Delta Th^3}{\nu^2} Pr \quad (\text{Ec. 7.1})$$

Donde  $g$  representa la gravedad,  $\beta$  el coeficiente de expansión térmica,  $\Delta T$  la diferencia entre la temperatura de la pared caliente y la temperatura de la pared fría,  $h$  longitud característica y  $\nu$  la viscosidad cinemática del fluido.

Para números de Rayleigh por debajo de  $10^8$ , el flujo inducido por la convección natural es laminar, mientras que por encima de  $10^{10}$  se produce la turbulencia [8].

## 7.2.2. Resultados numéricos

Para lograr un comprender el funcionamiento del mayor número de aplicaciones y de utilidades de OpenFOAM se realizó un proceso evolutiv.

### 7.2.2.1. Caso laminar con aproximación Buossinesq.

Como se describió anteriormente se trata de un flujo de convección natural en una cavidad diferencialmente calentada. Pero en este caso el énfasis está puesto principalmente en trabajar con la hipótesis de Boussinesq, a un flujo laminar ( $Ra = 10^5$ ), en estado estable. Recordemos que ésta aproximación significa que las diferencias de densidad se limitan al término de flotabilidad, sin desobedecer la

incompresibilidad. Es bueno aclarar que no es un término más de acoplamiento en las ecuaciones de momento, de hecho dicta el movimiento dentro de la cavidad.

De acuerdo a las características del caso se determinó que se usaría la aplicación buoyantBoussinesqSimpleFoam, ubicada en heatTransfer uno de los tutoriales que incluye OpenFOAM y se definieron valores de temperatura, propiedades del fluido, características de la cavidad y tipo de condición de contorno (ver figura 25), los cuales se muestran en la tabla 17 y 18, con los que se obtiene un  $Ra = 1 \times 10^5$ .

Figura 25. Definición de las diferentes condiciones de contorno para la cavidad.

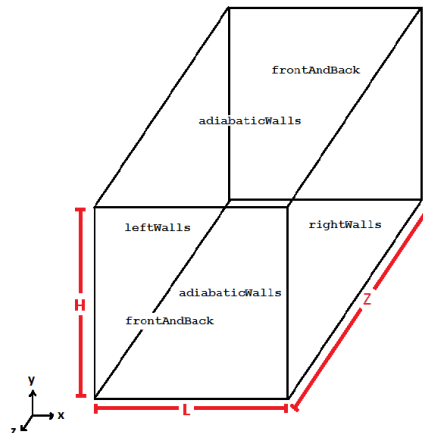


Tabla 19. Condiciones de contorno para las variables utilizadas en la simulación.

<b>WALLS</b>	<b>VELOCIDAD</b>	<b>TEMPERATURA</b>	<b>P_rgh (<math>P_{rgh} = P - \rho \cdot g \cdot h</math>)</b>
leftWalls	fixedValue uniform 0 (m/s)	fixedValue $T_h = 307$ (K)	fixedFluxPressure rhoK uniform 0
rightWalls	fixedValue uniform 0 (m/s)	fixedValue $T_c = 289$ (K)	fixedFluxPressure rhoK uniform 0
adiabaticWalls	fixedValue uniform 0 (m/s)	zeroGradient $T = 298$ (K)	fixedFluxPressure rhoK uniform 0
frontAndBack	Empty	Empty	Empty

Tabla 20. Propiedades del fluido dentro de la cavidad Ra  $10^5$ .

PROPIEDADES DEL FLUIDO		Condición de operación
DENSIDAD	VISCOSIDAD	Presión de operación 100 000 (Pa)
1.19 (KG/M3) CONSTANTE (APROX BUOSSINESQ)	1.56E-05 (Pa/s)	

Otras condiciones de contorno se definen para todas las paredes de la misma manera como lo es el caso de nut (viscosidad turbulenta) que se utilizó como condición de contorno una tipo `nutkWallFunction` cuyo valor uniforme es de 0, y el caso de la variable `alphat` a la que se le asignó como condición una tipo `alphatJayatilekeWallFunction`, de igual manera con un valor uniforme de 0 y con `prandtl` turbulento de 0.85, a excepción de las paredes denominadas `frontAndBack` que al igual que con las demás variables para estas también son de tipo `empty` o vacío que hace referencia a la condición 2D que se tiene en cuenta para esta simulación.

De manera que:

$$\Delta T = 307 - 289 = 18 \quad (\text{Ec. 7.2})$$

$$h = H = 0.038m \quad (\text{Ec. 7.3})$$

Usando la Ec. 7.1:

$$Ra = \frac{9.81 * 3 \times 10^{-3} * 18 * 0.038^3}{(1.56 \times 10^{-5})^2} * 0.85 = 101527 \approx 1 \times 10^5$$

Se calcula además una velocidad de referencia  $V$ , que representa la velocidad adimensional de la obtenida en la simulación.

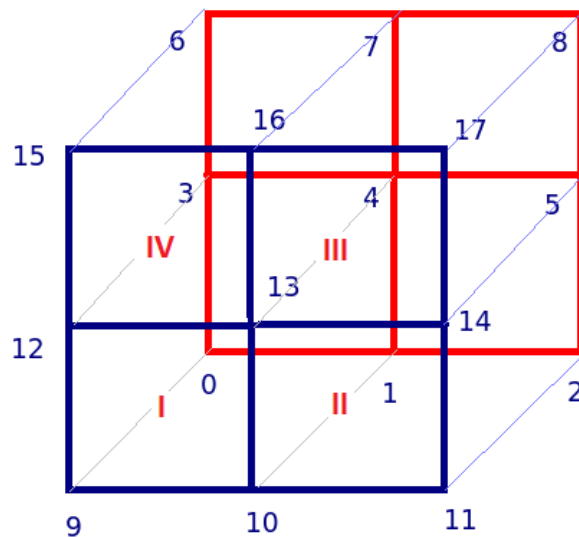
$$\alpha = \frac{v}{Pr} = \frac{1.56 \times 10^{-5}}{0.85} = 1.835 \times 10^{-5} \quad (\text{Ec. 7.4})$$

$$V = \frac{\dot{v}L_{ref}}{\alpha} \quad (\text{Ec. 7.5})$$

$$V = \frac{\dot{v} * 0.038}{1.835 \times 10^{-5}} = \dot{v} * 2070.51 \quad (\text{Ec. 7.6})$$

Uno de los pasos críticos al momento de realizar una simulación es la selección del mallado, de manera que se detallará el proceso que se sigue comúnmente. Se utilizó un mallado refinado hacia las paredes para poder resolver la capa límite debido a la naturaleza del problema, por lo que se dividió el dominio en cuatro partes iguales como se observa en la figura 27, debido a que la expansión de radio solo se da en una dirección.

Figura 26. Orden de asignación de puntos para la creación de mallas en OpenFOAM.



Después de establecer los parámetros del archivo blockMeshDict, la forma de crear la malla es accediendo mediante el terminal desde la carpeta del caso y ejecutar el comando blockMesh. Entonces aparecerán dentro de la carpeta constant/polyMesh cuatro archivos adicionales con datos como por ejemplo la lista de todos los puntos de la malla y sus coordenadas.

Cabe mencionar que todas las mallas de OpenFOAM son tridimensionales, por eso los vértices se definen como coordenadas en X, Y y Z. De todos modos se puede tratar un caso como si fuera bidimensional o unidimensional, e incluso axisimétrico, mediante las condiciones de frontera de las paredes del dominio. Para la simulación de la cavidad, se trabajaron cuatro sistemas de mallas (20x20, 40x40, 80x80 y 160x160) refinadas cerca de las paredes, los cuales se pueden observar en la figura 28, con el fin de llegar a una solución independiente del mallado. En la tabla 21 podemos ver parámetros de cada una de las mallas usadas teniendo en cuenta que en la dirección normal a z solo se tiene un volumen de control debido a su condición bidimensional.

Figura 27. Mallado refinado a ) 20x20, b) 40x40, c) 80x80 y d) 160x160

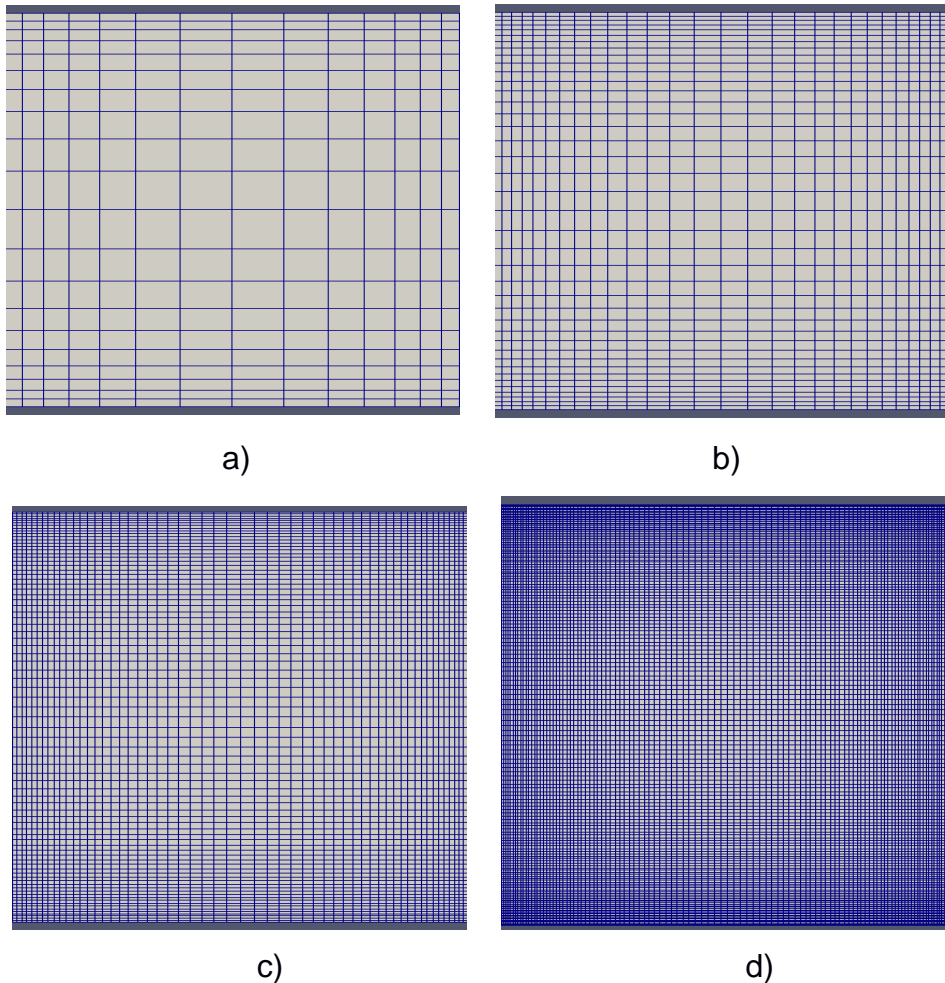


Tabla 21. Parámetros de las malla computacionales.

DENSIDAD	20X20	40X40	80X80	160X160
N° de nodos	400	1600	6400	25600
Y	0.0019	0.00095	0.000475	0.0002375

Figura 28. Velocidades en dirección vertical a lo largo del eje x para las diferentes mallas simuladas.

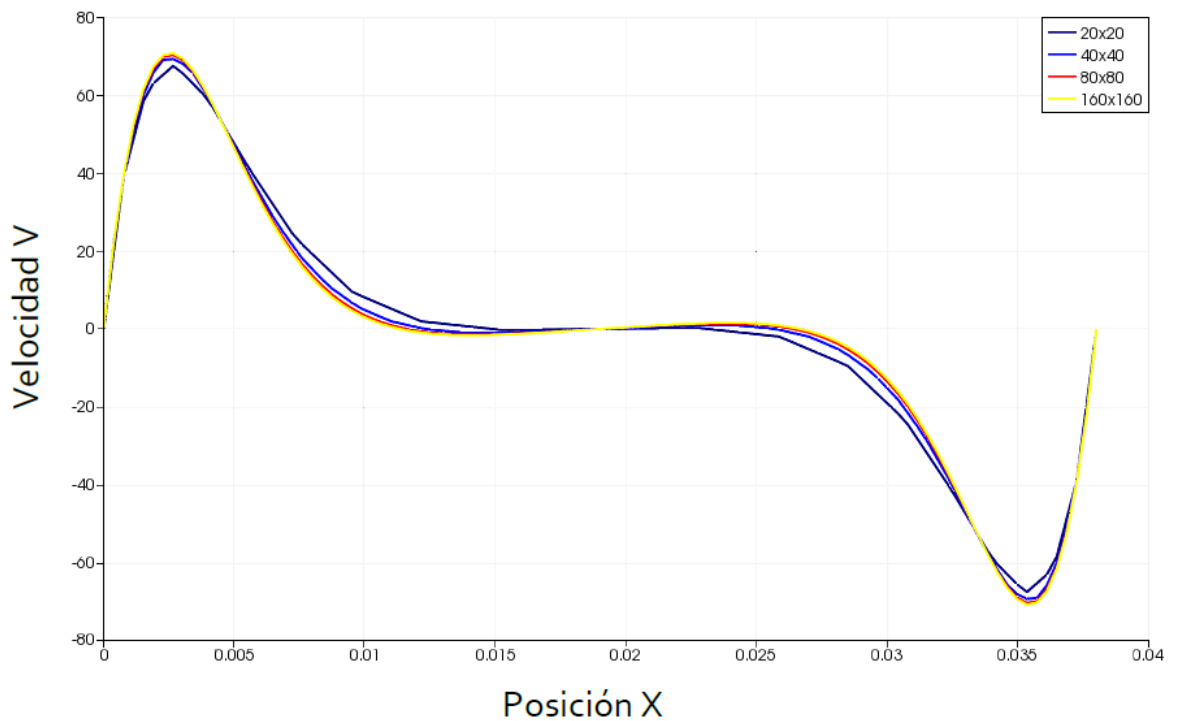


Tabla 22. Errores relativos asociados a las mallas empleadas comparando con valores presentados por D.C. Wan.

MALLA	20X20	40X40	80X80	160X160
Error % de la V <sub>máx</sub>	4.43	1.49	0.311	0.184

El comportamiento de la velocidad es como se esperaba debido a que el aire cercano a la pared caliente se acelera bajo el efecto de flotabilidad hasta que alcanza su valor máximo y a medida que pasa por la pared fría toma un comportamiento de desaceleración hasta que alcanza su valor más bajo, además se evidencio que es suficiente con el uso de un mallado de 80x80 volúmenes de control para obtener un resultado con un pequeño porcentaje de error y con un gasto computacional aceptable.

En la tabla 20 se presentan los errores relativos a las mallas empleadas para la velocidad vertical máxima en dirección del eje horizontal comparados con el estudio de D. C. Wan, B. S. V. Patnaik, and G. W [14], valor representativo de la solución al problema, los cuales nos muestran claramente la efectividad de OpenFOAM para simular este tipo de problemas.

#### **7.2.2.2. Caso turbulento con aproximación Boussinesq.**

Como en el caso anterior, la simulación resuelve el flujo de aire, con las características mencionadas, usando la aproximación Boussinesq y conservando las condiciones de contorno de la tabla 17 y las propiedades del fluido de la tabla 18, a diferencia de la longitud característica, que es aumentada para lograr obtener un flujo en estado turbulento (En este caso para un  $Ra = 1 \times 10^{10}$ ). Tenemos:

$$h = H = 1.846m \quad (\text{Ec. 7.7})$$

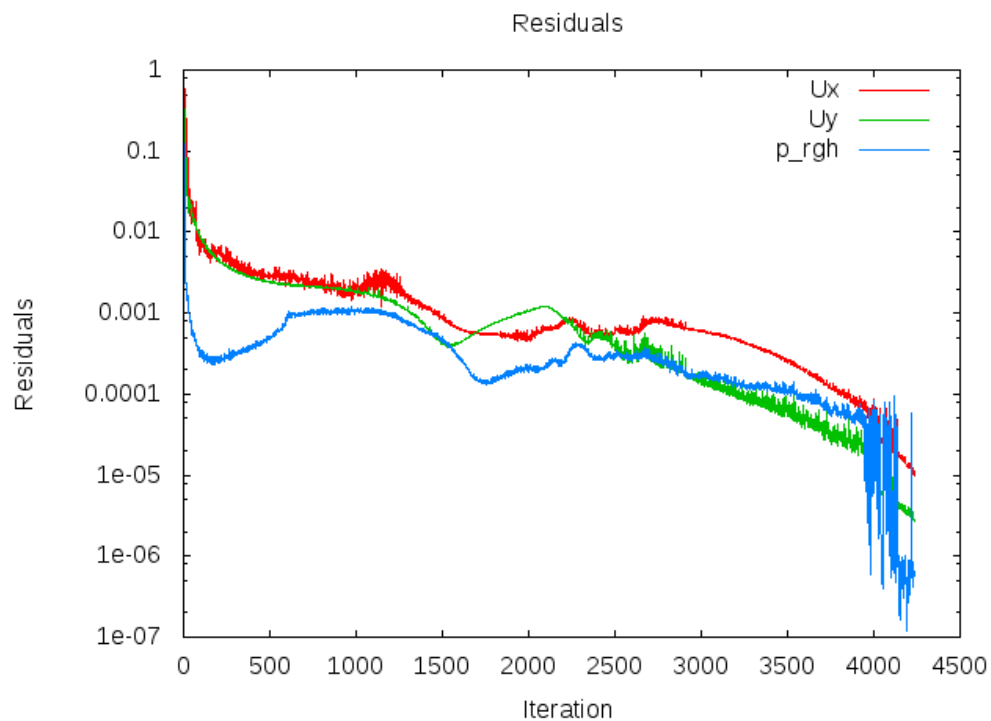
Con la ecuación 7.1, 7.2 y 7.7 obtenemos:

$$Ra = \frac{9.81 * 3 \times 10^{-3} * 18 * 1.846^3}{(1.56 \times 10^{-5})^2} * 0.71 = 1.000944 \times 10^{10} \approx 1 \times 10^{10}$$

Para encontrar solución a este caso se trabajó de igual manera con la aplicación `buoyantBuossinesqSimpleFoam` y se usaron tres modelos de turbulencia: el modelo  $k$   $\epsilon$ ,  $k$   $\omega$  SST y RNG  $k$   $\epsilon$  que se encuentran incluidos como modelos RANS en OpenFOAM, para determinar cuál de ellos tiene un mejor comportamiento para la solución del caso.

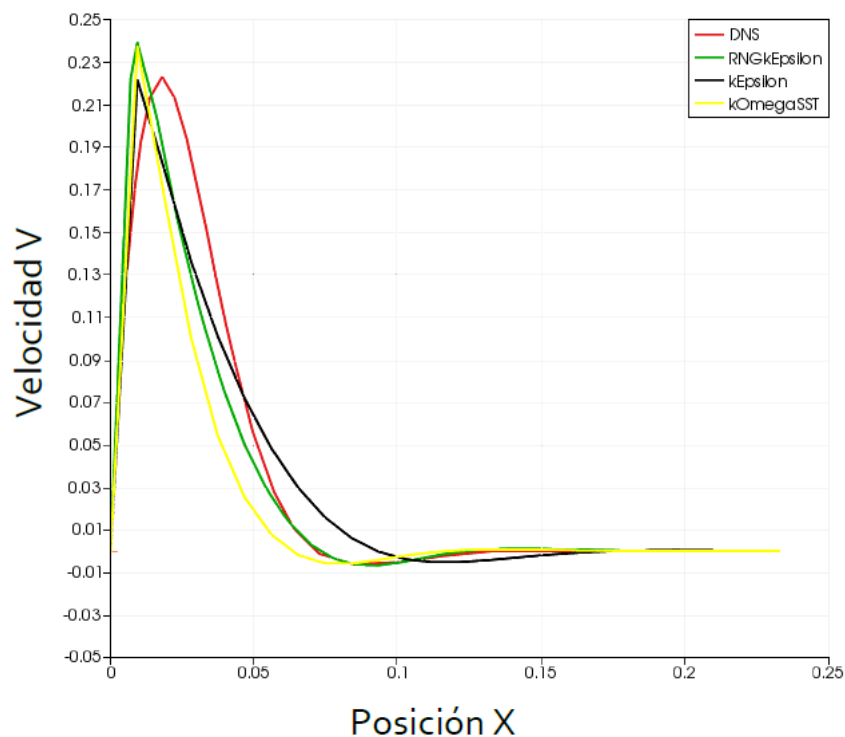
Para cada uno de estos modelos de turbulencia se utilizó una malla diferente buscando que los resultados tuvieran independencia del mallado, además se monitorearon los residuos obtenidos en las iteraciones que realiza el solver para las dos componentes de la velocidad y la presión en OpenFOAM como un parámetro importante de convergencia.

Figura 29. Parámetros de convergencia para la simulación de Ra 1010 con el modelo de turbulencia RNG  $k$   $\epsilon$ .



Al comparar los resultados obtenidos con los resultados de una simulación DNS [14], podemos observar la clara diferencia, debida a que son simulaciones RANS, y como se mencionó anteriormente nos proporcionan resultados promedios con un gasto computacional promedio, además por el uso de condiciones de contorno definidas con funciones de pared (Wall Functions, WF) [8], las cuales manejan un mallado basto. Como se puede observar en la figura 30 los resultados con el modelo RNG k  $\epsilon$ , tiene un buen comportamiento de acuerdo con las aproximaciones que representa el uso de métodos RANS.

Figura 30. Velocidad vertical a la mitad del plano horizontal.



DNS obtenido de Parameter- free symmetry- preserving regularization modeling of a turbulent differentially heated cavity. F.X. Trias, R.W.C.P Verstappen, A Gorobets, M Soria, A Oliva, 2010

### 7.2.2.3. Propiedades físicas variables vs aproximación Boussinesq.

Para la simulación del caso cavidad diferencialmente calentada laminar con propiedades físicas variables se utilizó la aplicación buoyantSimpleFoam ubicada en los tutoriales en la carpeta heatTransfer, en este caso se necesitan diferentes datos de las propiedades del fluido a simular debido a que se tiene en cuenta la variación de la densidad en el transcurso de la simulación.

Las condiciones de contorno iniciales para la temperatura, la presión y la velocidad se conservan, pero se hacen necesarias nuevas variables (ver tabla 21).

Tabla 23. Condiciones iniciales de contorno para las variables usadas en buoyant Simple Foam.

<b>WALLS</b>	<b><i>k</i></b>	<b><math>\epsilon</math></b>	<b>mut</b>	<b>alphat</b>
leftWalls rightWalls adiabaticWalls frontAndBack	compressible:: kqRWallFuntion  uniform 3.75e-4	compressible:: épsilon WallFuntion  uniform 4e-6	mutWallFuntion  uniform 0	compressible:: alphatWallFuntion  uniform 0  Prt 0.85

Tabla 24. Propiedades del fluido para una cavidad con propiedades físicas variables.

<b>PROPIEDADES DEL FLUIDO</b>	DENSIDAD VISCOSIDAD	MIN 1.2109 MAX 1.14082 (KG/M3) 1.8485E-5 (Pa/s)
<b>Condición de operación</b>	Presión de operación	100 000 (Pa)

Con las propiedades mencionadas anteriormente:

$$Ra = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot h^3}{(\mu)^2} Pr \quad (\text{Ec. 7.8})$$

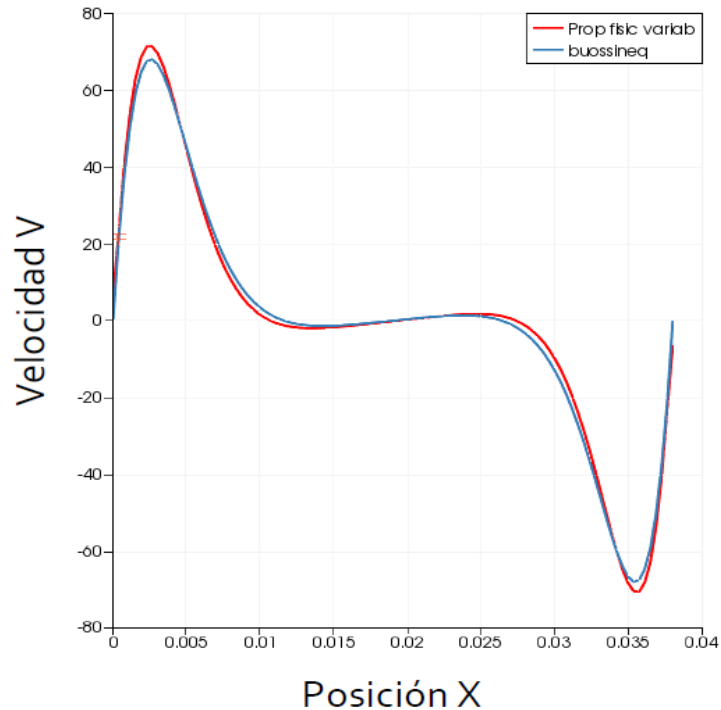
$$Ra = \frac{9.81 \cdot 1.176^2 \cdot 3 \times 10^{-3} \cdot 18 \cdot 0.038^3}{(1.8485 \times 10^{-5})^2} \cdot 0.85 = 10001.89 \approx 1 \times 10^5$$

La velocidad de referencia V es calculada con las Ec 7.4 y 7.5 tenemos:G

$$V = \frac{\dot{\nu} \cdot 0.038}{2.175 \times 10^{-5}} = \dot{\nu} \cdot 1747.36 \quad (\text{Ec. 7.9})$$

Se validan los resultados para el caso resuelto con propiedades físicas variables con el estudio realizado por F.X. Trias en el año 2007 [15]. El mismo usado para la verificación del primer caso (ver Figura 31).

Figura 31. Comparación de la velocidad vertical en dirección horizontal obtenida con la aproximación Buossinesq malla 80x80 y la encontrada con propiedades físicas variables.



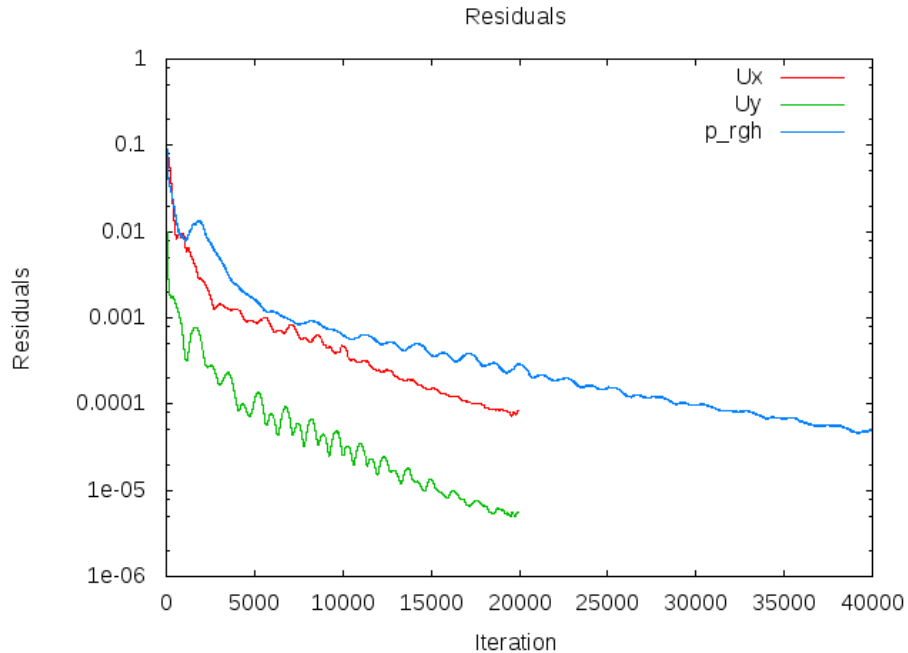
Los resultados de las velocidades máximas obtenidas al tener en cuenta la variación de la densidad en la cavidad con los resultados numéricos obtenidos en el estudio por F.X. Trias, [15] se evidencia que de igual forma se llega a obtener resultados aceptables, lo que nos indica que trabajar con propiedades físicas variables es posible y representa más detalles a la hora de simular nuestro recinto.

#### **7.2.2.4. Caso turbulento con Propiedades físicas variables.**

Usando la aplicación `buoyantPimpleFoam` incluida en OpenFoam, la cual nos permite encontrar una solución transitoria para flujo turbulento, en que se tiene en cuenta la compresión del fluido, la fuerza de flotabilidad y la transferencia de calor, se simuló nuestro cuarto caso en que se busca una solución para el comportamiento del aire dentro de una cavidad cerrada con las condiciones de contorno establecidas en la tabla 13 y las dimensiones el caso turbulento resuelto con la aproximación Buossinesq, es decir con un número de Ra de  $1 \times 10^{10}$ , pero teniendo en cuenta los cambios de la densidad del aire y usando el modelo de turbulencia con que se obtuvieron los mejores resultados al trabajar con flujo turbulento, en este caso fue RNGkEpsilon.

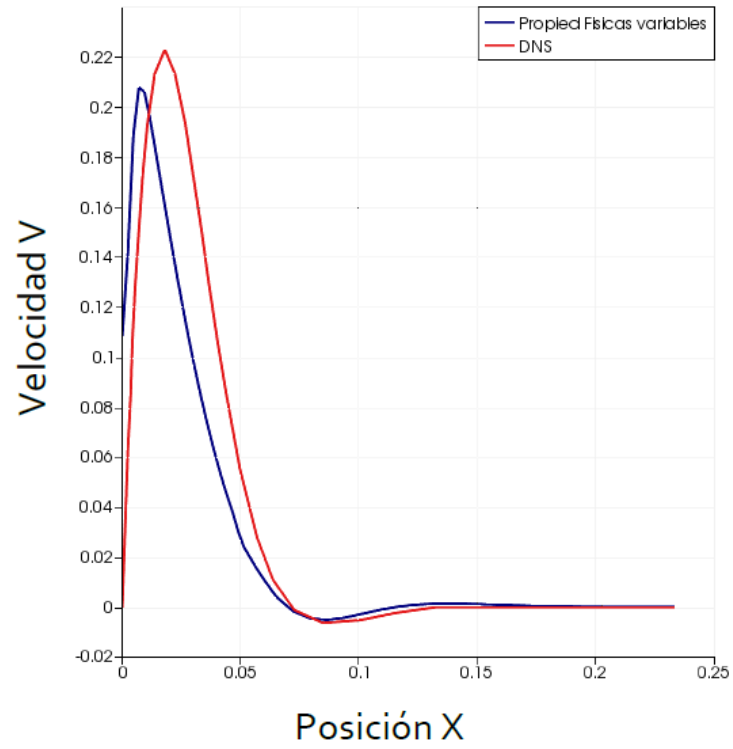
Se considera que para este caso una tolerancia de 0.0001 en los residuos de las iteraciones nos proporciona resultados óptimos (ver Figura 33), teniendo en cuenta las aproximaciones que se tuvieron en la descripción del caso como en los parámetros de la simulación.

Figura 32. Residuos del método Pimple en cada iteración de cálculo para las velocidades y la presión rgh durante la simulación.



En la figura 34 se observa que a pesar de tener una condición de contorno inicial para la velocidad con un valor de cero en la pared, el primer valor en esta gráfica no lo es, esto se presenta debido al uso de las Walls functions como tipos de boundary conditions, como se mencionó anteriormente este tipo de condiciones se usan cuando el mallado utilizado es basto, lo que representa un gasto computacional menor, aunque en este caso no nos permitan ver con claridad el desarrollo de la capa limite, se puede considerar como un resultado aceptable al ser comparado con el DNS obtenido de F.X. Trias [15]. Como se observa el comportamiento de la velocidad del aire dentro del recinto es el esperado, aumento de velocidad cerca a la pared caliente y disminución al acercarse a la pared fría.

Figura 33. Velocidad vertical a lo largo del eje horizontal hasta  $L/2$  para un Ra de  $1 \times 10^{10}$



## 8. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL INTERIOR DE RECINTOS

Se realizará la simulación de una cavidad con techo de concreto y otra con techo verde, para poder evaluar los parámetros escogidos en Open FOAM. Además se modificará la geometría para poder apreciar influencia de las paredes en un recinto.

### 8.1. PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN

La única aplicación disponible para simular un problema de transferencia de calor de múltiples regiones (sólidos o fluidos) es chtMultiRegionFoam. Este solucionador puede ejecutar cálculos de estado transitorio usando el bucle PIMPLE. Éste utiliza diferentes archivos para resolver las ecuaciones de la siguiente orden:

chtMultiRegionFoam.c

1. SolveFluid.H
  - 1.1 Ueqn.H > Ec de momentos
  - 1.2 Eeqn.H > Ec de Energía
  - 1.3 pEqn.H > Ec de Presión
2. SolveSolid.h > Ec de conducción

#### 8.1.1. Método de cálculo

No hay ecuación independiente de la presión en Navier-Stokes, esto significa que es difícil encontrar un campo de presión que satisfice la ecuación de continuidad. Para superar este problema, OpenFOAM y la mayoría de los solucionadores de CFD tomar estos pasos para calcular U y p [16].

1. Resolver la ecuación de momento para calcular un campo de velocidad intermedia U \*:

Esta ecuación no toma en cuenta la presión.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U \frac{\partial U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ v_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + g_i \quad (\text{Ec. 8.1})$$

2. Calcular los flujos máximos en las caras de las celdas: Necesario para la discretización de los volúmenes finitos.

3. Resolver la ecuación de la presión: El uso de los términos previamente no utilizadas del ecuación de momento.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{Ec. 8.2})$$

Tomando la divergencia de la ecuación 9.2:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x_j} \right] = 0 \quad (\text{Ec. 8.3})$$

La ecuación de continuidad que establece que  $\frac{\partial U_i^{t+\Delta t}}{\partial x_i} = 0 \rightarrow \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\partial U_i^{t+\Delta t}}{\Delta t} \right] = 0$ :

$U_i^{t+\Delta t}$  es simplificado y p se convierte en la única variable desconocida en la ecuación de Laplace 8.3.

4. Corregir los flujos de masa en las caras de las celdas.

5. Usar P y U \* para resolver la ecuación 8.2 y calcular el campo velocidad real

$U_i^{t+\Delta t}$ .

6. Actualización de las condiciones de contorno.

7. Repite el proceso desde el paso 2 tantas veces como el usuario especifique en el nOuterCoor parámetro para el bucle PISO.

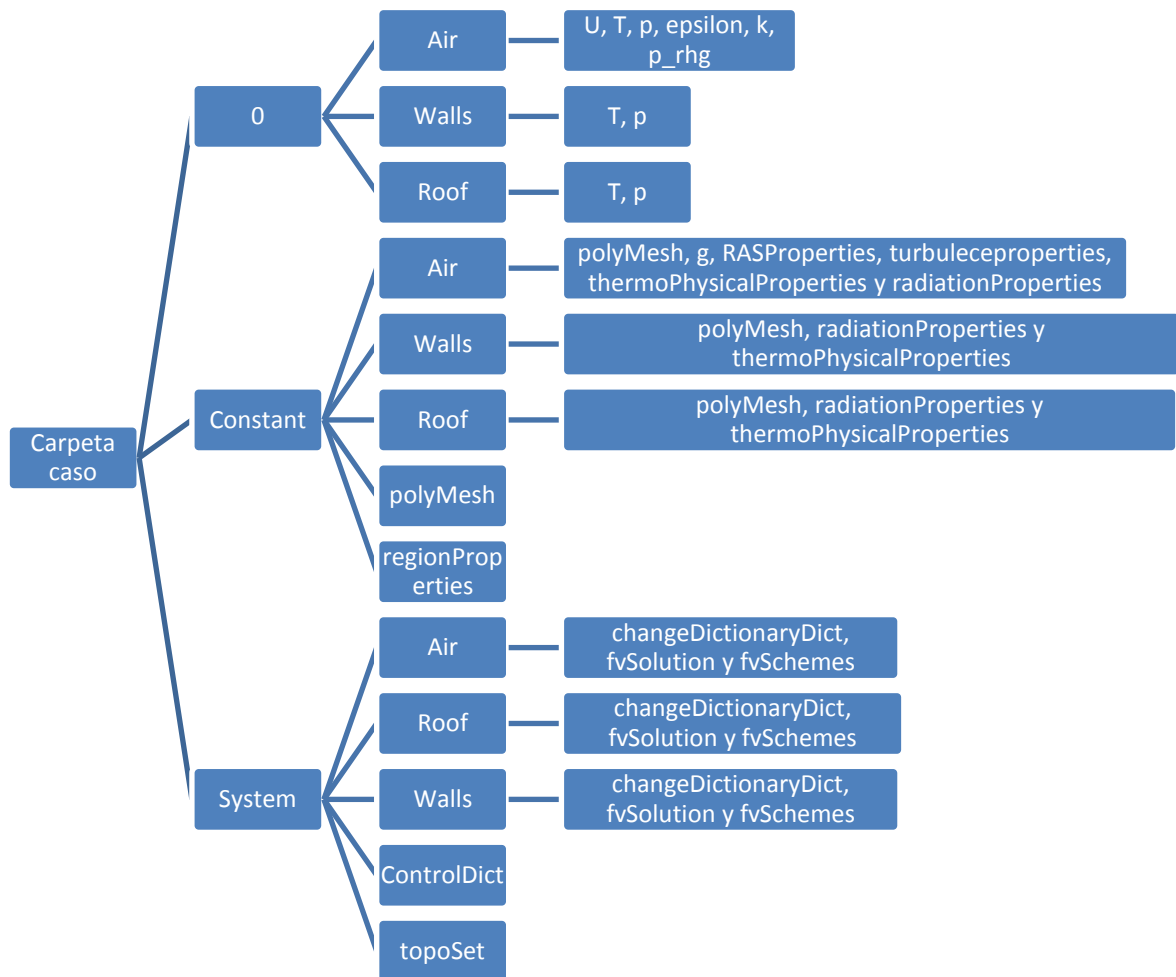
La aplicación chtMultiRegionFoam no utiliza la presión p para hacer los cálculos, pero usa una presión modificada denominada  $p_{rgh} = p - \rho gh$ . Esto se hace para incluir el término de flotabilidad  $\rho gh$  en el momento de corregir la presión (paso 2).

Como se dijo anteriormente, la presión es difícil de converger y necesita más iteraciones que la velocidad o energía.

### 8.1.2. Estructura del caso

La estructura necesaria para un caso que utiliza varias regiones varía un poco a comparación de la estructura general utilizada en OpenFOAM, la estructura utilizada en el modelamiento de los recintos se muestra a continuación:

Figura 34. Estructura para un caso chtMultiRegionFoam.



Las condiciones de contorno iniciales no fueron especificados directamente en la carpeta temporal inicial, en lugar de ello, se crea un archivo denominado `changeDictionaryDict` en la carpeta `system/$region` el cual reescribe los archivos en la carpeta `0/$region` antes de ejecutar la simulación. Además se utiliza `topoSet`, una herramienta de OpenFOAM que nos permite definir la ubicación de cada material dentro de nuestro volumen de control.

Para realizar los cálculos de los diferentes campos utilizados en la simulación se deben definir valores característicos de los materiales y las condiciones ambientales a la que expone un recinto cotidianamente.

### 8.1.3. Propiedades termo físicas

En la tabla 23 se pueden observar las propiedades termo físicas características de los techos verdes [17], y de los demás materiales utilizados en las simulaciones [18] y [19], estos se determinan en el archivo `thermoPhysicalProperties` de cada región (`constant/$region`).

Tabla 25. Propiedades Termo físicas para los diferentes materiales usados en las simulaciones.

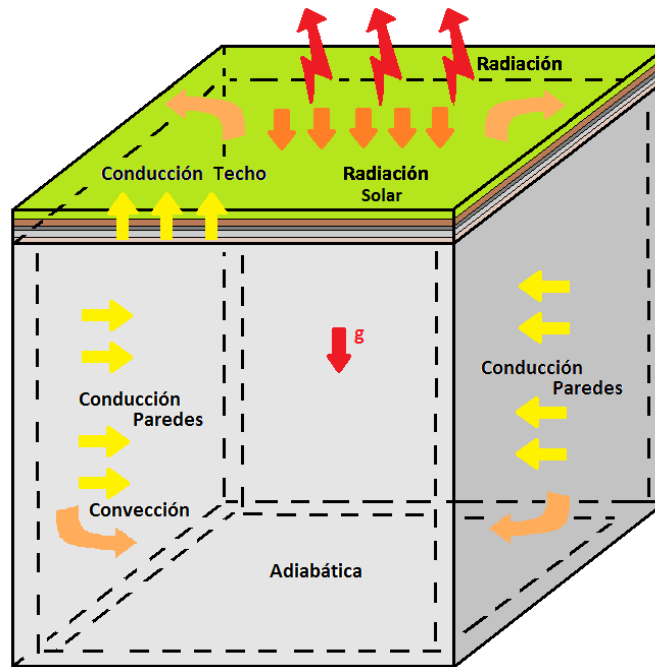
<b>MATERIAL</b>	<b>k [W/m°K]</b>	<b>Cp [J/kg °K]</b>	<b>Rho [kg/m3]</b>	<b>Absortancia</b>	<b>Emisividad</b>
Paredes Ladrillo común	0.8	840	1800	0.70	0.9
Placa de concreto	1.047	880	1800	0.5	0.9
Techo verde	0.12	870	476	0.8	0.96

	<b>molweight</b>	<b>Cp [J/kg°K]</b>	<b>Hf</b>	<b>mu</b>	<b>Pr</b>
Aire	28.97	1007	0	1.825e-5	0.7

### 8.1.4. Condiciones iniciales y de contorno

Para establecer las condiciones de contorno se tiene en cuenta el balance de energía en cada pared y en el techo; Los flujos de calor que se tienen en cuenta para simular los recintos se observará de manera simplificada en la siguiente figura:

Figura 35. Flujos de calor incidentes sobre los recintos.



De manera que existirá un balance energético a través del techo y las paredes, en este estudio se realizará un análisis igual en ambos casos, teniendo en cuenta la posición del recinto a la hora de calcular la radiación solar incidente en cada una de las paredes y el techo utilizando los conceptos y las ecuaciones del capítulo 3.

$$Q_{cond} - Q_{conv} + Q_{rad\ solar} - Q_{rad} = 0 \quad (\text{Ec. 8.4})$$

$$-\frac{k(T_C - T_{int})}{\Delta x} - h_{ext}(T_C - T_a) + \alpha \cdot q_{s,B} - \epsilon\sigma(T_C^4 - T_{alred}^4) = 0 \quad (\text{Ec. 8.5})$$

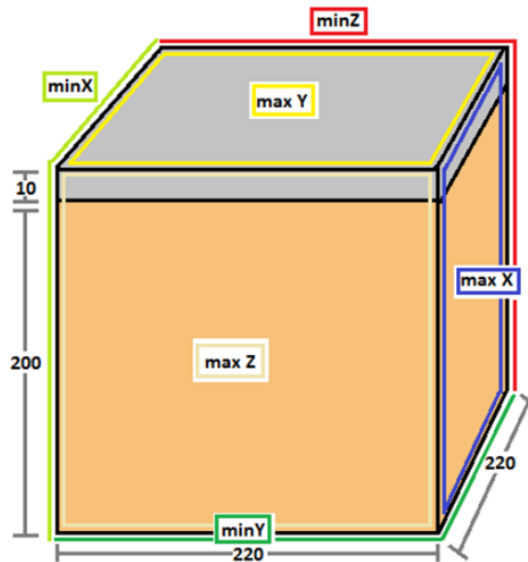
### ✓ Cálculo del coeficiente de convección

Se tiene en cuenta la transferencia de calor por convección como se define en la ecuación 8.5 y como muestra en la figura 35, lo que hace necesario calcular un coeficiente convectivo externo, para ello se recolectan datos de la velocidad del viento correspondientes al día escogido para simular (Ver Anexo A), medidos por la estación meteorológica de la escuela de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander [20] y se utiliza la correlación representada en la ecuación 8.6, analizada para el cálculo de coeficientes convectivo en el exterior de edificios en el estudio realizado por Thijs Defraeye: “Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modeling” [16] que solo depende de la magnitud de la velocidad del viento.

$$h_{ext} = 5.01 * U^{0.85} \quad (\text{Ec. 8.6})$$

Como se mencionó anteriormente se crea un archivo denominado ChangeDictionaryDict, en él se establecen los tipos de condición de contorno para todas las variables a resolver según en número de condiciones de contorno definidas en blockMeshDict (ver Figura 36) que fueron denominadas según su posición en el plano cartesiano es decir el plano normal al eje Y con mayor altura se llama “maxY” y el de menor altura “minY” de la misma manera se nombra las demás condiciones externas (minX, maxX, minZ y maxZ), además se establecen las de las interfaces que se crean cuando definimos las diferentes regiones, en este caso se nombran de acuerdo a las regiones conectadas, un ejemplo de ellos es: “Air\_to\_Walls” y “Walls\_to\_Air” ubicadas en Air/changeDictionaryDict y Walls/ChangeDictionaryDict respectivamente compuesta por todas las caras en las que el aire hace contacto con las paredes en las que se debe usar la misma condición de contorno.

Figura 36. Condiciones de contorno y dimensiones definidas en la creación de la malla.



En las tablas 26, 27 y 28 se muestran los tipos de condición de contorno y valores usados para los campos usados en las simulaciones según la región.

Tabla 26. Condiciones de contorno impuestas para la región Air.

	minY	Air_to_Walls	Air_to_Roof
<b>Boundary</b>	wall	mappedWall	mappedWall
<b>T</b>	zeroGradient	compressible::turbulent TemperatureCoupled BaffleMixed	compressible::turbulent TemperatureCoupled BaffleMixed
<b>U</b>	FixedValue uniform (0 0 0)		
<b>p</b>	calculated		
<b>p-rgh</b>	fixedFluxPressure		
<b>epsilon</b>	compressible::epsilonWallFunction		
<b>k</b>	compressible::kqRWallFunction		

En el caso de los sólidos se resuelven menos variables debido a que éstos no experimentan cambios de presión, ni movimiento. No sobra aclarar que es necesario establecer las condiciones de contorno de manera que coincidan con el comportamiento definido en cada una de las regiones, es decir como lo vemos en las tablas 27 y 28 que muestran las condiciones usadas en el techo y las paredes de los recintos simulados, las condiciones de contorno que comparten se define de la misma manera.

Tabla 27. Condiciones de contorno impuestas en system/Room/changeDictionaryDict para la simulación de los recintos.

	<b>T</b>	<b>p</b>
<b>maxY</b>	zeroGradient	calculated
<b>minZ</b>	GroovyBC	
<b>maxZ</b>		
<b>minX</b>		
<b>maxX</b>		
<b>Roof_to_Air</b>		
<b>Roof_to_Walls</b>		

Tabla 28. Condiciones de contorno impuestas en system/Walls/changeDictionaryDict para la simulación de los recintos.

	<b>T</b>	<b>p</b>
<b>minY</b>	zeroGradient	calculated
<b>minZ</b>	GroovyBC	
<b>maxZ</b>		
<b>minX</b>		
<b>maxX</b>		
<b>Walls_to_Air</b>		
<b>Walls_to_Roof</b>		

Groovy BC es una condición de contorno que permite definir cualquier campo, en este caso la temperatura de manera no uniforme y variante con el tiempo, para asignar este tipo de condición partimos del balance de energía descrito con la ecuación 8.4 y datos ambientales (ver Anexos A).

Primero despejamos la temperatura superficial del balance de energía que será la variable que asignaremos para definir la condición de contorno de manera que:

$$T_C = \frac{h_{ext}T_a + \frac{k}{\delta}T_{int} + \alpha \cdot q_{s,B} - Q_{rad}}{\frac{k}{\delta} + h_{ext}} \quad (\text{Ec. 8.5})$$

Luego se calcularán los ángulos de incidencia de la radiación respecto a la posición en la que se encuentran las diferentes superficies a simular (paredes y techo) de esta manera con las ecuaciones del capítulo 3 se puede conocer el calor generado por la radiación solar incidente (ver tabla 27 y 28) que reciben dichas superficies.

Tabla 29. Ángulos de incidencia de la radiación solar respecto a una superficie.

$\varphi$	7,11
$\delta$	-2,42

Hora del día	$\omega$ [°]	as [°]	$\Theta_z$ [°]	ys [°]	$\Theta$ [rad] $\beta=0$	$\Theta$ [rad] $\beta=90$ $Y_p=180^\circ$	$\Theta$ [rad] $\beta=90$ $Y_p=0^\circ$	$\Theta$ [rad] $\beta=90$ $Y_p=90^\circ$	$\Theta$ [rad] $\beta=90$ $Y_p=270^\circ$
9	-45	44,0924	45,91	-79,63	0,80	1,70	1,44	2,36	0,79
10	-30	58,5805	31,42	-73,39	0,55	1,72	1,42	2,09	1,05
11	-15	72,2540	17,75	-58,04	0,31	1,73	1,41	1,83	1,31
12	0	80,4700	9,53	0,00	0,17	1,74	1,40	1,57	1,57
13	15	72,2540	17,75	58,04	0,31	1,73	1,41	1,31	1,83
14	30	58,5805	31,42	73,39	0,55	1,72	1,42	1,05	2,09

15	45	44,0924	45,91	79,63	0,80	1,70	1,44	0,79	2,36
----	----	---------	-------	-------	------	------	------	------	------

Tabla 30. Radiación solar según la posición de la superficie.

Hora del día	Tiempo de simulación [s]	Qsb $\beta=0$ [W/m <sup>2</sup> ]	Qsb $\beta=90$ $Y_p=180^\circ$	Qsb $\beta=90$ $Y_p=0^\circ$	Qsb $\beta=90$ $Y_p=90^\circ$	Qsb $\beta=90$ $Y_p=270^\circ$
			Max Z	Min Z	Max X	Min X
9 am	0	313,00	81,16	147,44	18,23	295,33
10 am	3600	728,00	277,90	379,00	158,98	497,92
11 am	7200	819,00	314,86	424,94	281,69	458,11
12 m	10800	946,00	411,53	513,77	462,65	462,65
1 pm	14400	1048,00	352,12	518,68	568,87	301,93
2 pm	18000	784,00	355,72	435,38	529,08	262,02
3 pm	21600	717,00	330,59	404,01	567,83	166,77

Tabla 31. Regresiones cuadráticas de las condiciones climáticas.

VARIABLE	REGRESIONES
Temperatura ambiente [K]	$T_a = 0,00000002 * time^2 + 0,0007 * time + 296,06$
Qsb $\beta=0$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_t = -0,000004 * time^2 + 0,0994 * time + 346,52$
Qsb $\beta=90$ $Y_p=180^\circ$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{minz} = -0,000002 * time^2 + 0,0519 * time + 172,02$
Qsb $\beta=90$ $Y_p=0^\circ$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{maxx} = -0,000001 * time^2 + 0,0581 * time - 18,623$
Qsb $\beta=90$ $Y_p=90^\circ$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{minx} = -0,000002 * time^2 + 0,0261 * time + 349,51$
Qsb $\beta=90$ $Y_p=270^\circ$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{maxz} = -0,000001 * time^2 + 0,0409 * time + 108,03$
Coeficiente de	$h_{ext} = -0,000000072 * time^2 + 0,002 * time + 3,118$

Con la cálculo de regresiones cuadráticas se define el comportamiento climatológico las cuales se presentan en la tabla 29, con ellas se establece la temperatura de contorno del recinto que define la condición de contorno. Como se mencionó en el capítulo 6, GroovyBC se asigna por medio de parámetros, en el caso de la temperatura se define de la siguiente forma:

$$T_c = (valueFraction * refValue) + (1 - valueFraction) * \left( T_{int} + \frac{refGrad}{delta} \right) \quad (\text{Ec. 8.6})$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones 8.5 y 8.6 se puede definir que:

$$refValue = \frac{h_{ext}T_a + \alpha \cdot q_{s,B} - Q_{rad}}{h_{ext}} \quad (\text{Ec. 8.7})$$

$$valueFraction = \frac{h_{ext}}{h_{ext} + \frac{k}{delta}} \quad (\text{Ec. 8.8})$$

Reemplazando en las ecuaciones 8.7 y 8.8 las ecuaciones obtenidas para el comportamiento de las condiciones ambientales y a su vez estás en la ecuación 8.6, encontramos la ecuación característica que define la carga térmica para cada pared y para los diferentes tipos de techos.

### 8.1.5. Esquemas numéricos, solucionador y algoritmo de control

Para definir los esquemas numéricos, el solucionador y los algoritmos de control usados en la simulación hay que tener en cuenta si la región contiene un fluido o un sólido, pero si existen varias regiones que tengan el mismo tipo de material (fluido o sólido) es posible asignarles los mismos parámetros, por esta razón solo se definieron para estos dos casos como se muestra en las tablas a continuación

Tabla 32. Esquemas numéricos usados en la simulación de los recintos.

caso	ddt Schemes	grad Schemes	div Schemes	Laplacia n Schemes	Interpolatio n Schemes	snGrad Schemes	fluxr equir ed
<b>Fluido Air</b>	Euler	Gauss linear	Gauss upwind Gass Linear Gauss linear Upwind	Gauss linear corrected	linear	corrected	No
<b>Solidos</b>	Euler	Gauss linear	none	Gauss linear corrected	linear	corrected	No

Tabla 33. Solucionadores y algoritmos de control usados en la simulación de los recintos.

CASO	SOLVER			
	P_rhg	U T k épsilon R	Rho	
<b>Fluido Air</b>	Solver GAMG Tolerance 1e-7 relTol 0.01  smoother DICGaussSeidel	Solver PBiCG Preconditioner DILU Tolerance 1e-5 relTol 0	Solver PCG Preconditioner DIC Tolerance 1e-7 relTol 0.01	Pimple

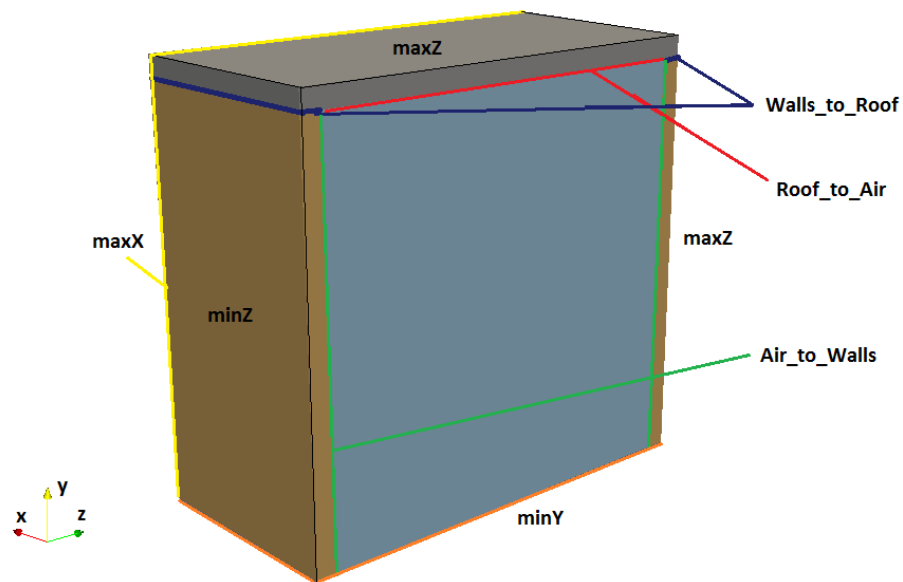
CASO	SOLVER	
	h	
<b>Solidos</b>	solver PCG preconditioner DIC tolerance 1e-06 relTol 0.1	Pimple

## 8.2. GEOMETRÍA SIMPLIFICADA

### 8.2.1. Techo de concreto

Teniendo en cuenta la descripción general que se hizo, se presentarán los resultados obtenidos para un recinto con techo de concreto y aire en su interior (ver Figura 37). La solución a este problema se realizó utilizando una malla estructurada ortogonal con 81312 volúmenes de control además se utilizó como modelo de turbulencia usado fue RNG k Épsilon.

Figura 37. Condiciones de contorno generadas por la definición de las regiones.



Para poder realizar un análisis del comportamiento térmico del recinto, se utilizaron dos vistas, una normal al plano X y otra normal al plano Z como se puede ver en la siguiente figura 38, que además muestra la distribución de temperaturas para el aire al finalizar la simulación.

Figura 38. Planos para los cuales se muestran los contornos de temperatura generados en el recinto con techo de concreto.

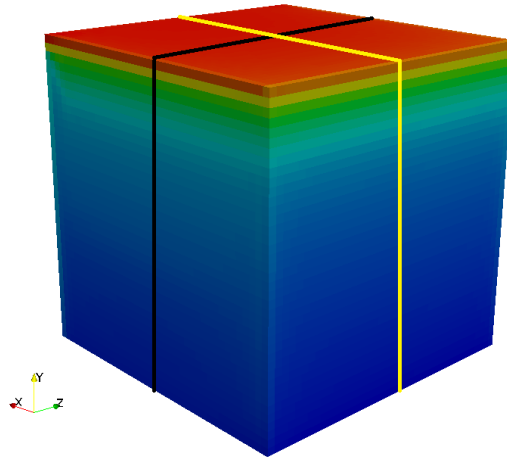
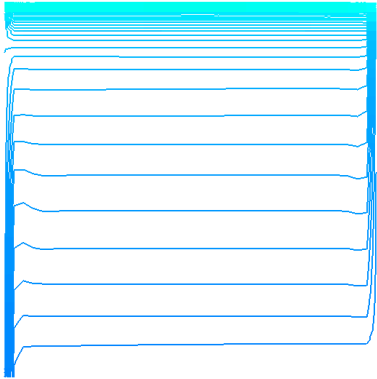
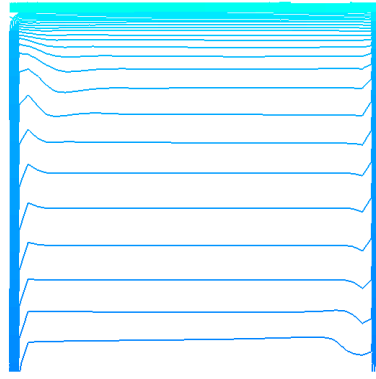
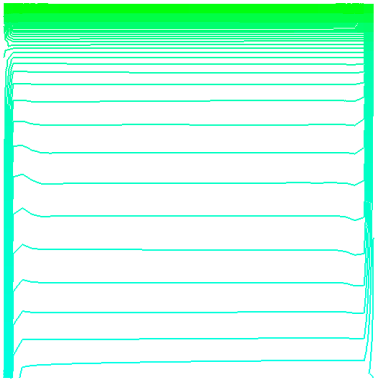
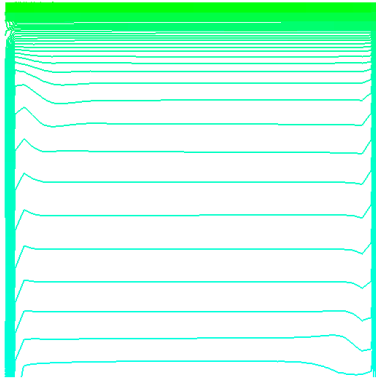

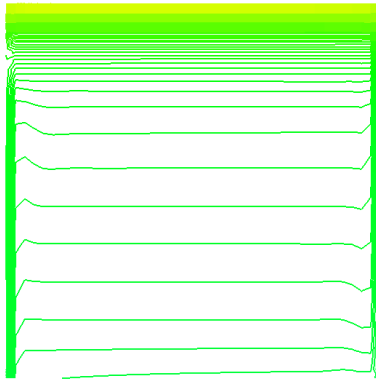
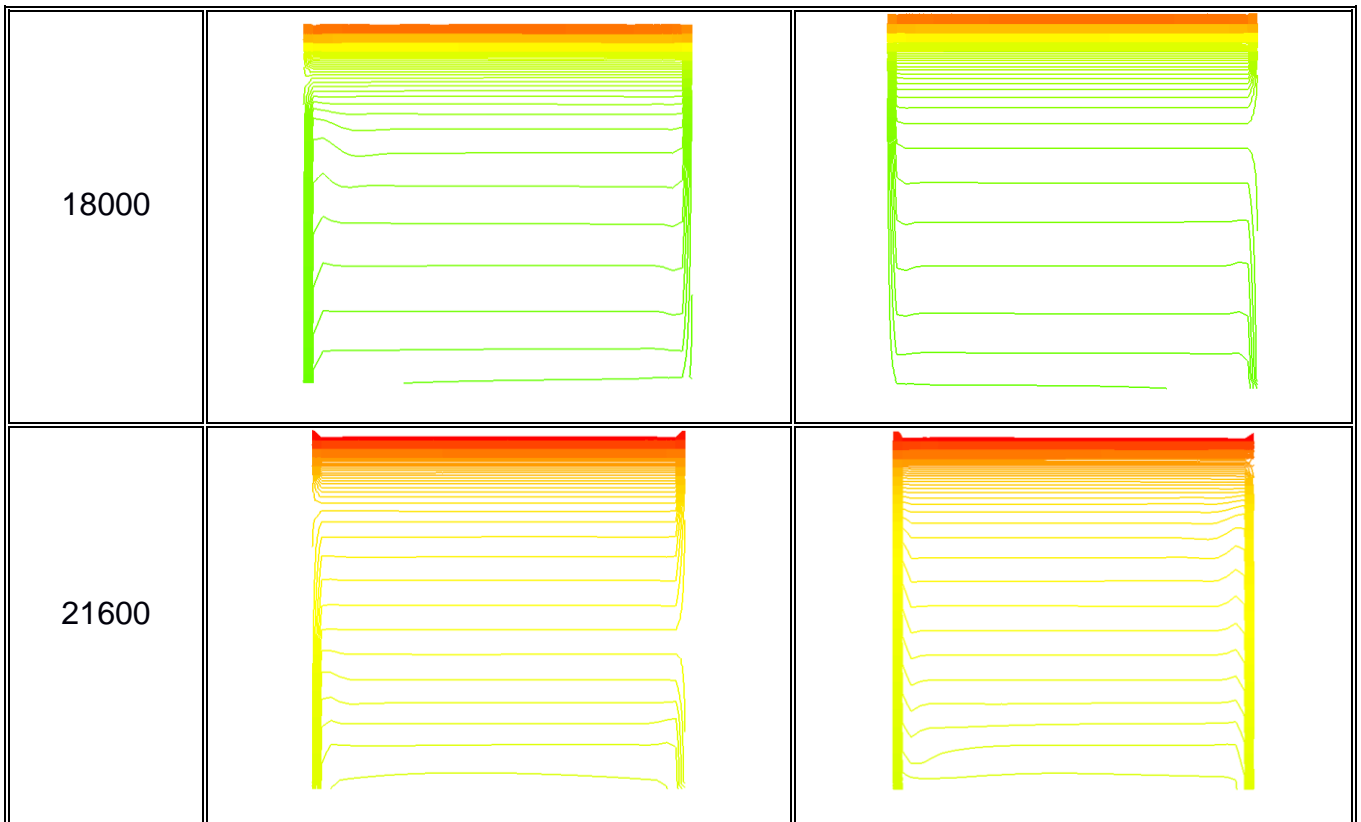


Tabla 34. Contornos de temperatura para el aire al interior de un recinto con techo de concreto a través del tiempo en  $X=2.6$  y  $Z=2.6$ .

Tiempo de simulación [s]	TEMPERATURA [K] Placa de concreto	
3600		

7200	 A line plot with a cyan shaded area at the top. The plot shows a series of horizontal lines with small downward-pointing spikes. The lines are blue, and the shaded area is a light cyan color.	 A line plot with a cyan shaded area at the top. The plot shows a series of horizontal lines with small downward-pointing spikes. The lines are blue, and the shaded area is a light cyan color.
10800	 A line plot with a yellow-green shaded area at the top. The plot shows a series of horizontal lines with small downward-pointing spikes. The lines are cyan, and the shaded area is a light yellow-green color.	 A line plot with a yellow-green shaded area at the top. The plot shows a series of horizontal lines with small downward-pointing spikes. The lines are cyan, and the shaded area is a light yellow-green color.
14400	 A line plot with a yellow-green shaded area at the top. The plot shows a series of horizontal lines with small downward-pointing spikes. The lines are green, and the shaded area is a light yellow-green color.	 A line plot with a yellow-green shaded area at the top. The plot shows a series of horizontal lines with small downward-pointing spikes. The lines are green, and the shaded area is a light yellow-green color.

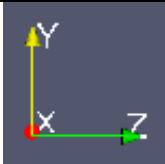
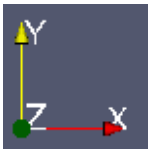
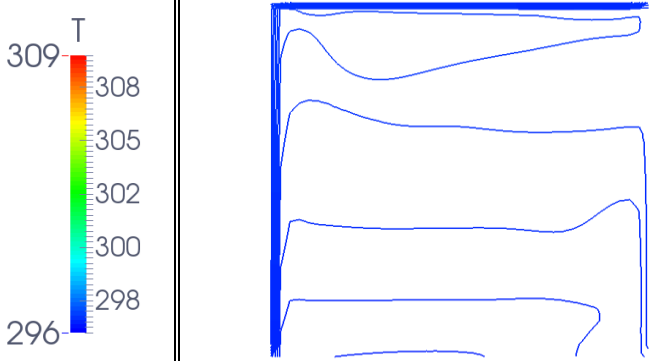
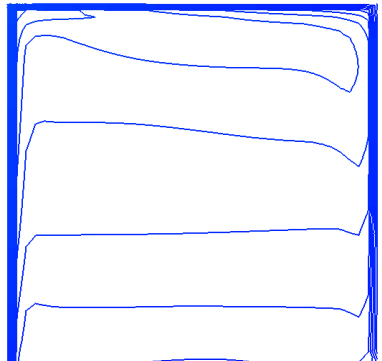


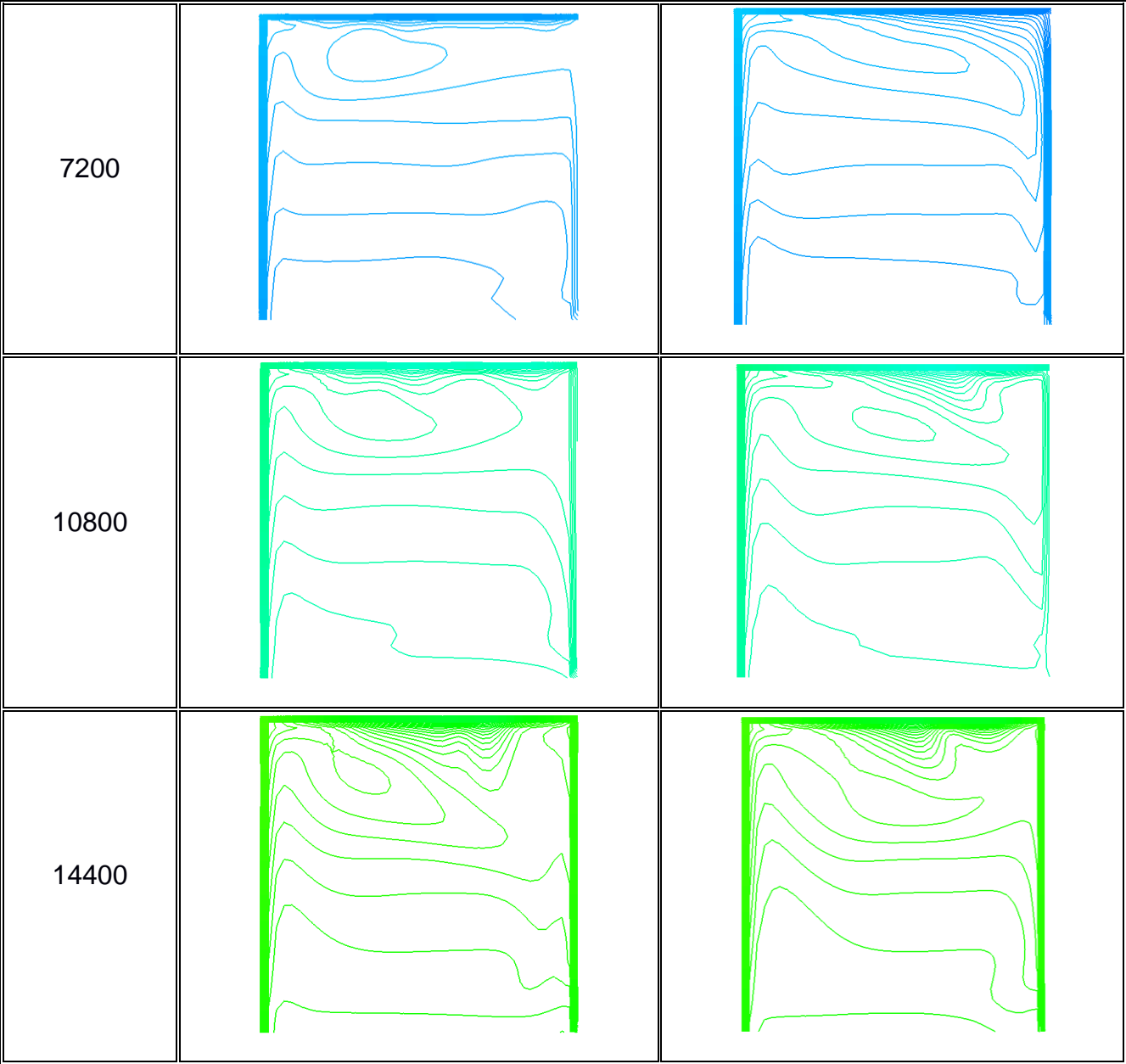
En la tabla 34 se puede observar como la carga térmica asignada por medio de las condiciones de contorno dependientes de las propiedades de cada material y las condiciones climáticas, es mayor en el techo, de manera que la temperatura aumenta gradualmente de arriba hacia abajo. Durante la simulación se generan picos cerca a las paredes, en el caso de la vista normal a Z para 3600 segundos de simulación (10 am) se observa que la temperatura tiene un aumento en la parte izquierda debido a que la pared recibe más radiación solar que las demás paredes en ese instante de tiempo, a su vez en la parte derecha se presenta menor temperatura. Este comportamiento se presenta hasta los 14400 segundos (1 pm) de ahí en adelante es al contrario, la pared derecha tiene los picos de aumento y la izquierda los de disminución, ocasionado por la posición solar.

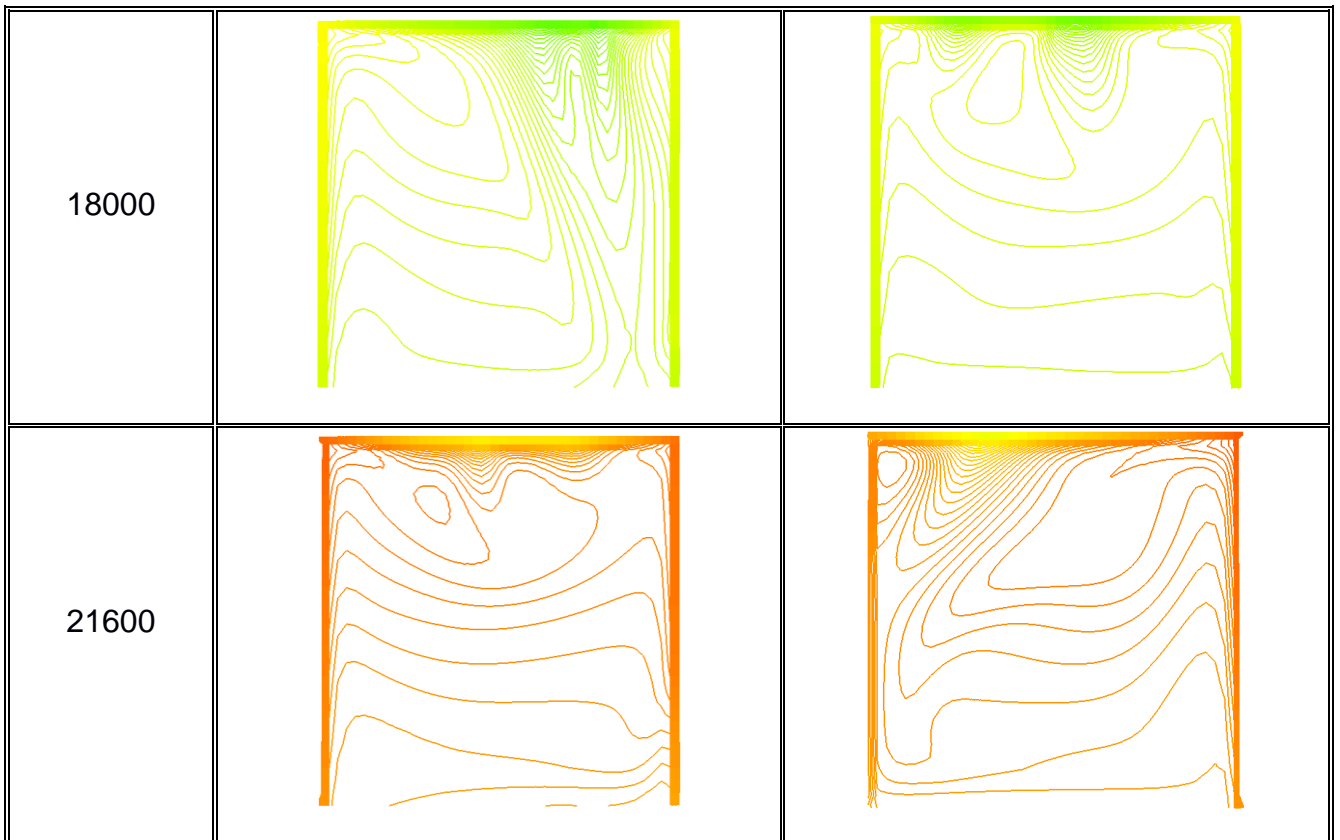
### 8.2.2. Techos verdes

Para poder iniciar el análisis de un recinto con techo verde, se parte de la anterior simulación, usando los mismos parámetros de simulación: malla, esquemas numéricos, solucionadores, algoritmos de control y tiempos de simulación. En el caso de las condiciones de contorno de denomina de la misma manera pero se tienen en cuenta el cambio de materiales debido a la influencia de las propiedades termo físicas en el momento de definir la ecuación 8.6 que representa la temperatura de contorno de cada superficie.

Tabla 35. Contornos de temperatura para el aire al interior de un recinto con techo verde a través del tiempo.

Tiempo de simulación [s]	TEMPERATURA [K] Techo verde	
		
3600		

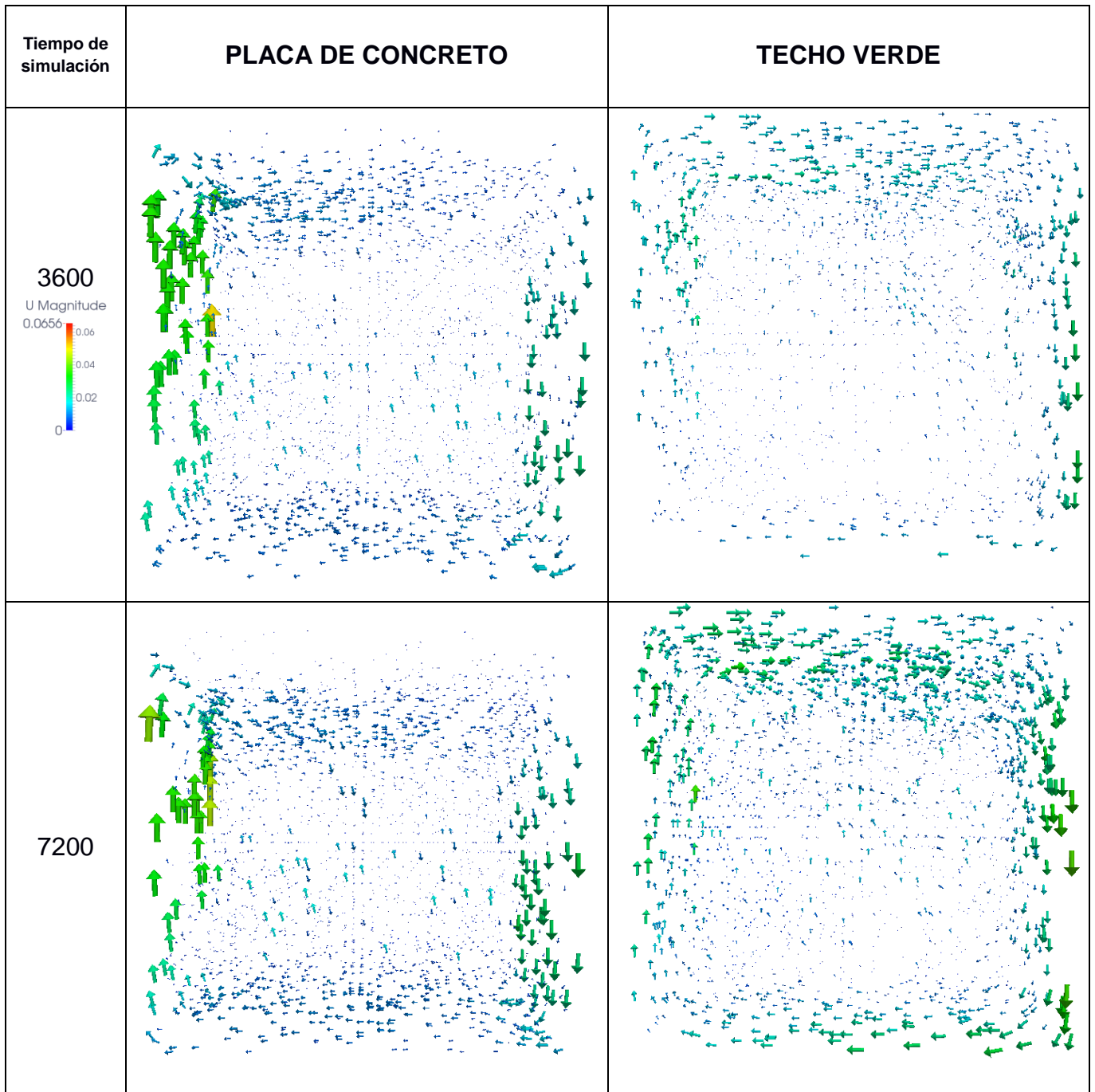


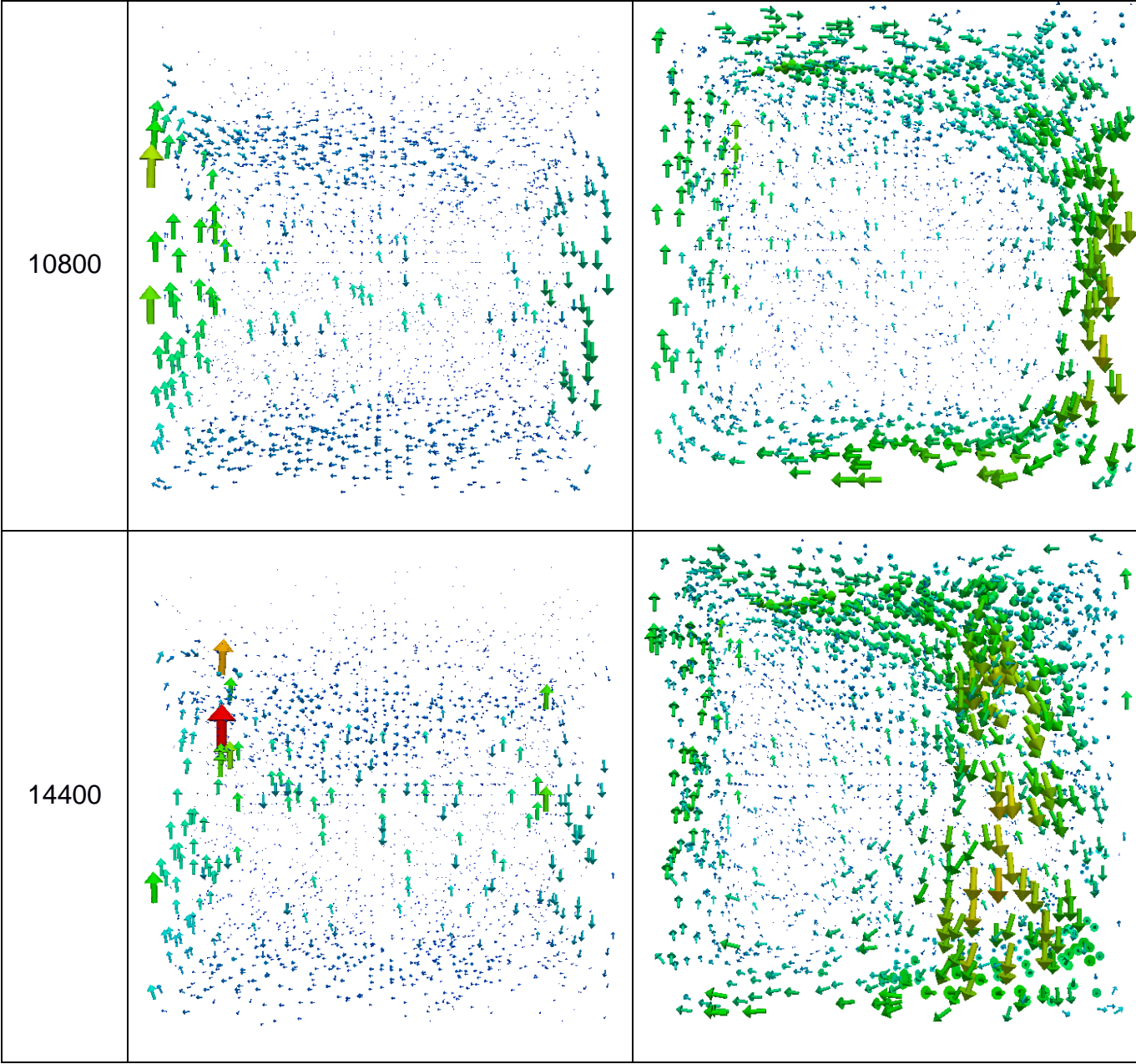


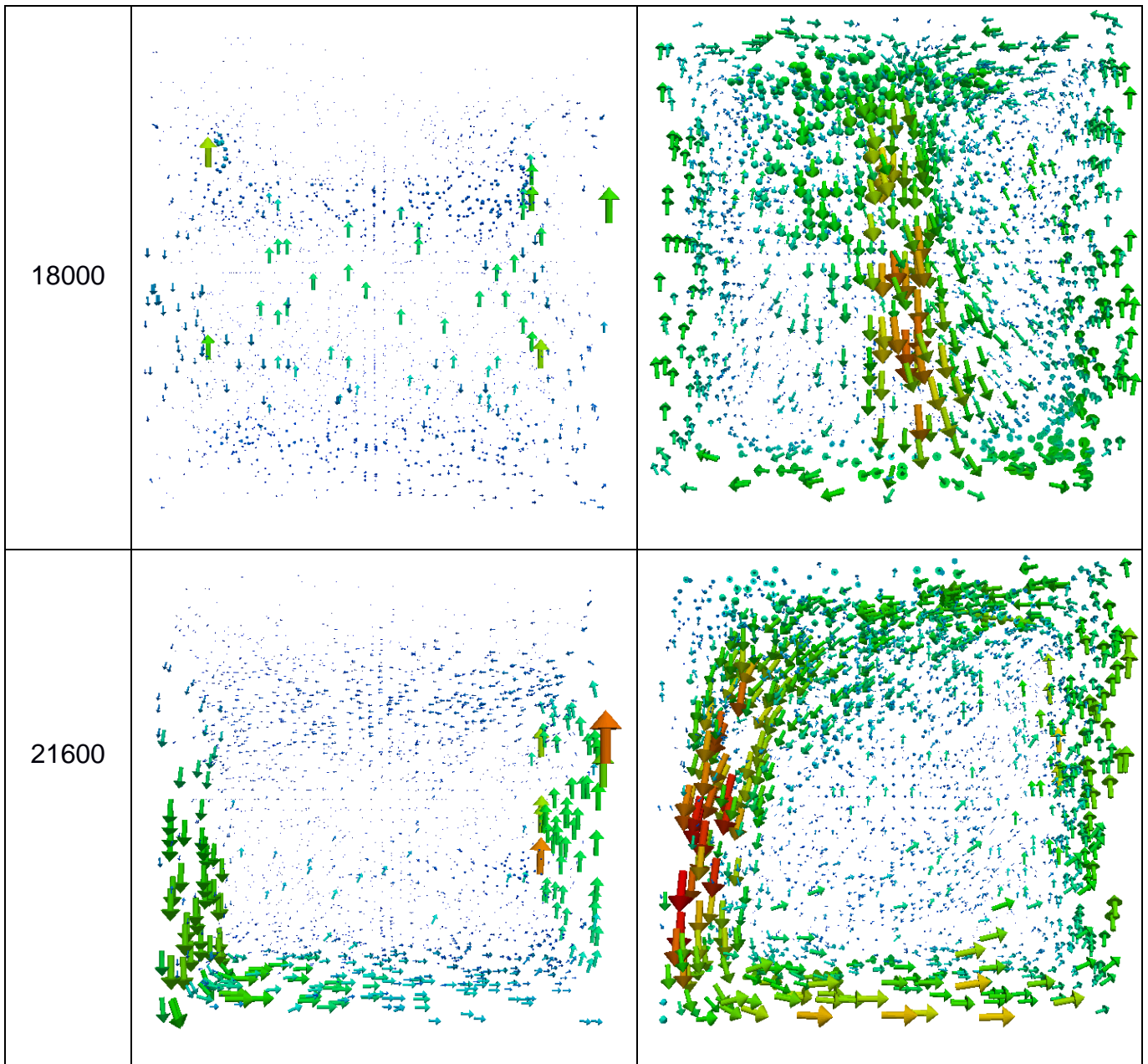
Al inicio de la simulación en los primeros 3600 segundos de simulación se observa que el comportamiento término es similar al presentado en un recinto con techos de concreto, pero a medida que el tiempo avanza se puede apreciar una conducta no uniforme de la temperatura debido a que la carga térmica transferida por las paredes es mayor que la del techo lo que genera el mismo comportamiento presentado en el caso de la cavidad diferencialmente calentada donde las diferencias de temperatura de las paredes hace que el aire se acelere cuando se aumenta su densidad y desacelera al disminuir la densidad. Es importante aclarar que las escalas utilizadas son diferentes para cada caso, un solo rango no permite ver el comportamiento de los dos recintos debido a que el recinto con techo verde tiene una temperatura mucho menor en su interior.

Este comportamiento se puede apreciar en la siguiente tabla donde se presenta la comparación de la distribución de la velocidad para los recintos simulados: con techo de concreto y techo verde.

Tabla 36. Distribución de velocidad para los diferentes tipos de techos simulados (vista normal al plano z).





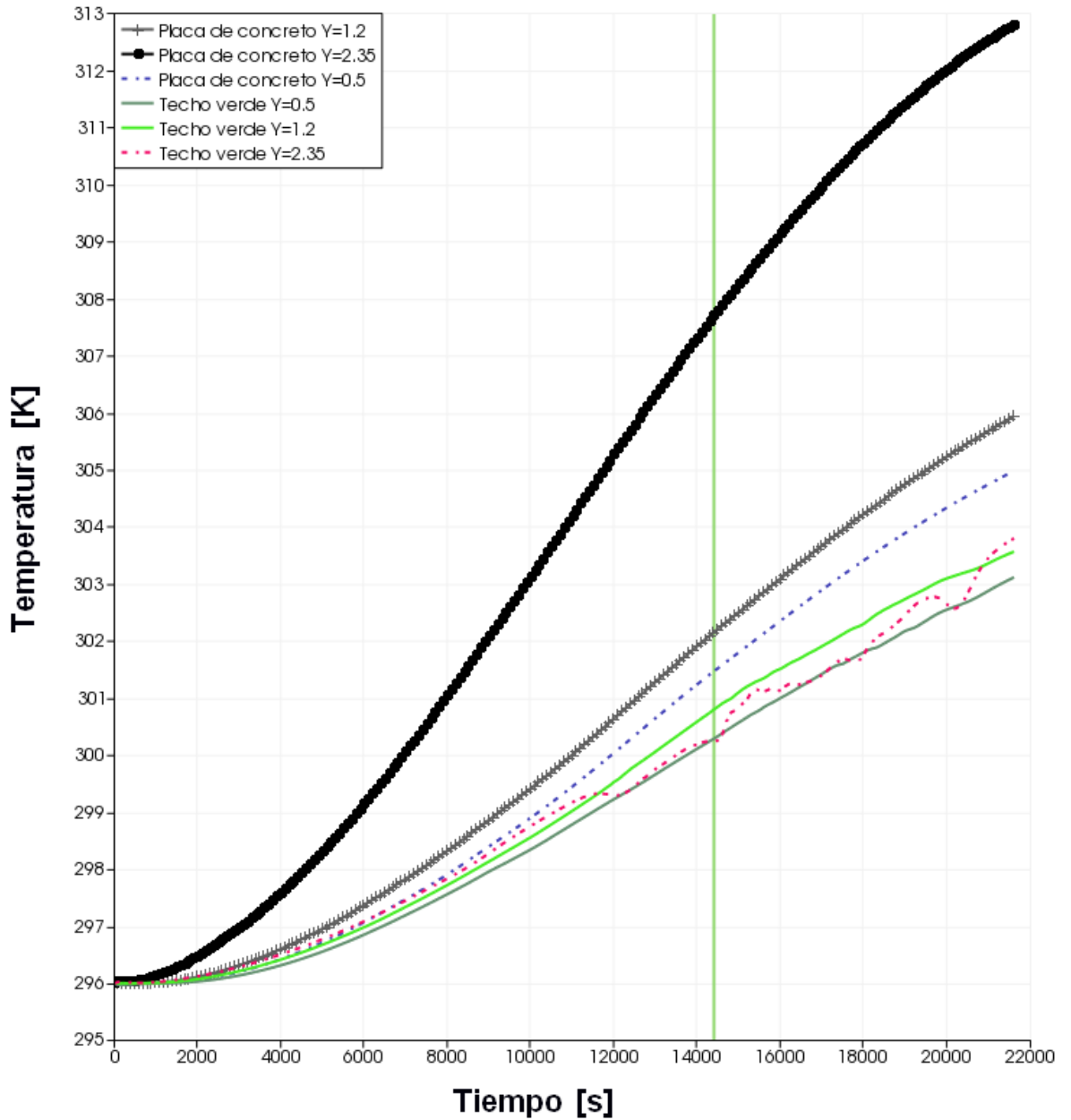


Se puede apreciar que aunque la magnitud de la velocidad del aire es baja se presenta mayor variación de la está en el recinto con techos verdes. Debido a que en con este tipo de techo las paredes conducen más calor que el techo y la

diferencia de las temperaturas de una pared respecto a las demás es evidente, genera cambios de densidad generando movimiento al interior del recinto.

Para poder apreciar las ventajas térmicas de una manera simplificada se presenta la figura 39 en la que se muestra la variación de la temperatura para tres puntos del aire contenido al interior de los recintos, demostrando que la carga térmica que transfiere el techo verde hacia el interior es mucho menor al que transfiere un techo de concreto, al punto de ser mayor la temperatura en del centro del recinto comparándola con la temperatura cerca al techo verde. Es una ventaja de las simulaciones es poder comparar cualquier punto en el dominio. El comportamiento parabólico que sigue la gráfica se debe a las variables climatológicas utilizadas para la caracterización de del caso.

Figura 39. Variación de la temperatura a través del tiempo en el centro de los recintos para diferentes alturas en el eje Y.



## 8.2. COMPARACIÓN PLACA DE CONCRETO CON TECHOS VERDES

Se modifica la geometría para poder evaluar la influencia de las paredes internas en los recintos, de manera que se simula un aparta-estudio (ver figura 40) con techo de concreto y con techo verde, teniendo en cuenta las dimensiones existentes en las construcciones actuales, las cuales se muestran en la Figura 41.

Figura 40. Plano aparta-estudio.



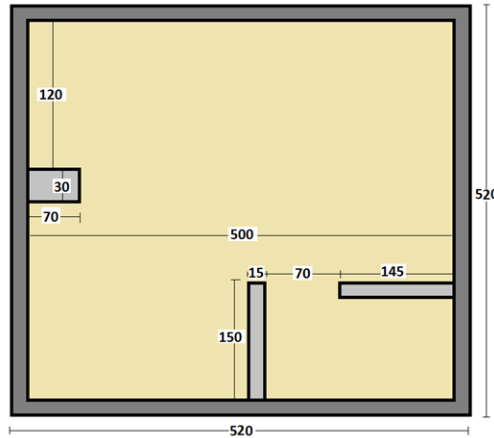
Fuente: [mimansion.com/proyectos-bucaramanga-21.html](http://mimansion.com/proyectos-bucaramanga-21.html)

Los parámetros necesarios para la simulación son los mismos que se utilizaron en las últimas simulaciones: recinto simplificado con techo de concreto y recinto simplificado con techo verde. Solo se modifican el dominio por el que corresponde a las dimensiones definidas, de manera que se necesita un mayor número de volúmenes de control, definiendo así una malla estructuralmente ortogonal con 540800 volúmenes de control.

La definición de las propiedades termo-físicas, las condiciones de contorno, los esquemas de resolución, los algoritmos de control y los parámetros temporales se describen al inicio del capítulo, que son los mismos con el fin de facilitar el análisis de los resultados, presentando una comparación más acertada y puntual, en el caso de los recintos simples, se compara el uso de los diferentes techos y con la

geometría real se pretende comparar la influencia de las paredes interiores en este mismo tipo de recintos.

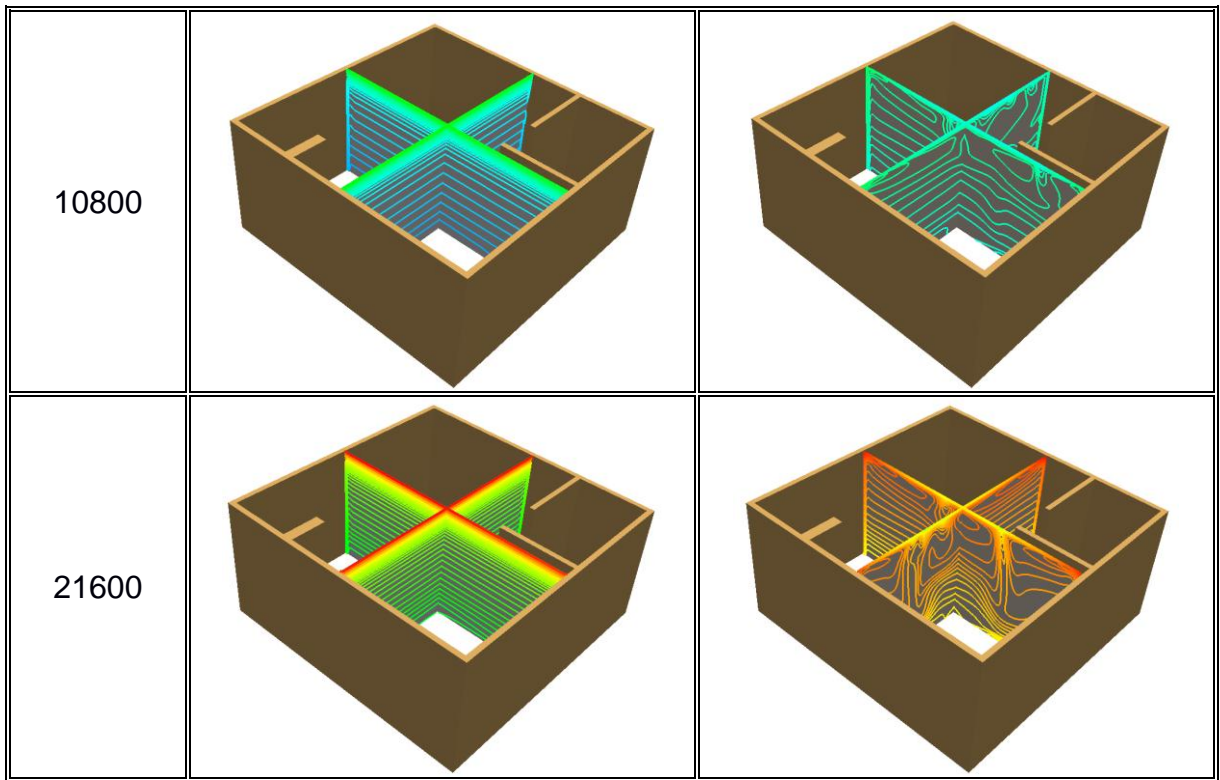
Figura 41. Dimensiones del aparta-estudio a simular (cotas en mm).



En la siguiente tabla se observan los contornos de temperatura para dos planos contenidos en el aire simulado, tanto para el recinto con techo de concreto como para el recinto con techos verdes. Idealmente las escalas de referencia deberían ser iguales para facilitar el análisis, pero en este caso no es posible debido a que las diferencias de temperatura son grandes y no se podría apreciar la variación de temperatura en el recinto con techo verde.

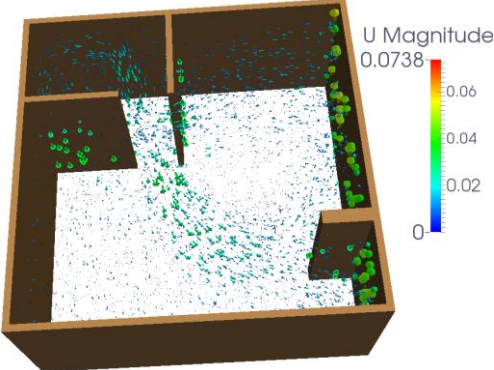
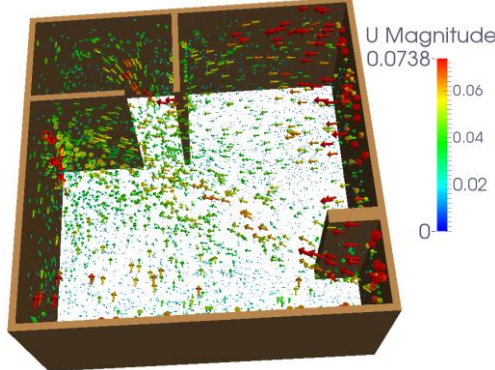
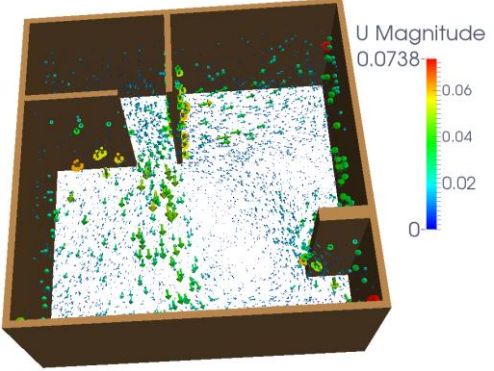
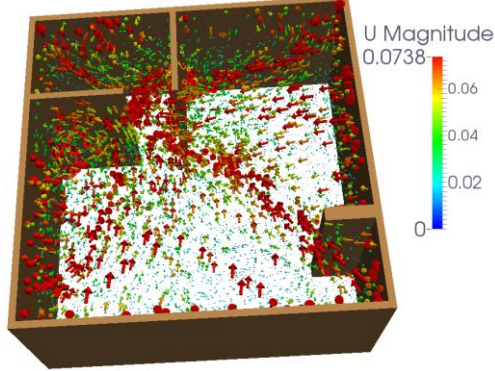
Tabla 37. Distribución de temperaturas para los recintos en los planos centrales.

Tiempo de simulación	PLACA CONCRETO		TECHOS VERDES	
3600				



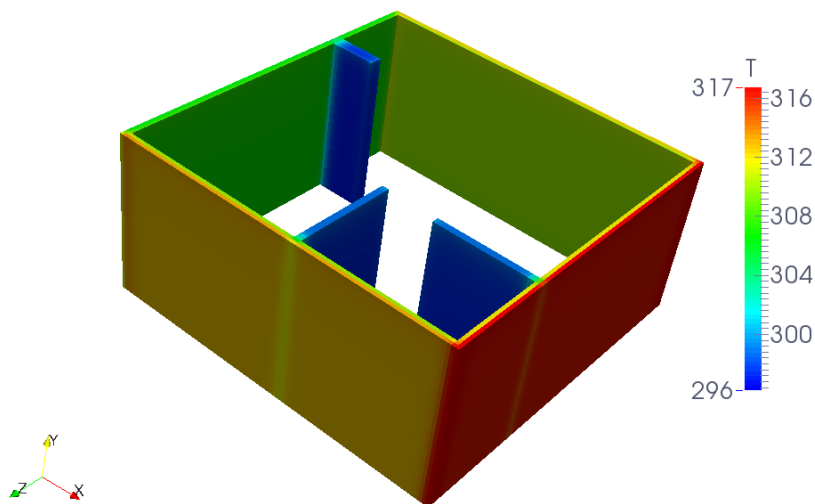
Como se presenta en la tabla 37 mayor variación de temperatura al interior del recinto con techos verdes, debido a que el calor transmitido por las paredes es mayor que por el techo, a diferencia del recinto con la placa de concreto el cual recibe más calor por la parte superior del recinto generando un comportamiento más homogéneo. En los primeros 3600 segundos de simulación este comportamiento no es muy notorio debido a que el cambio de las temperatura en todo el recinto es mínimo, pero a medida que la simulación transcurre se hace más notorio como se observa en la tabla 35 para los tiempos 10800 y 21600, el recinto con techo de concreto tiene su máxima temperatura en la parte superior y descende a medida que bajamos en el eje vertical (eje Y), en el caso del recinto con techos verdes esta variación no tiene un patrón homogéneo, el aire caliente sube al techo que se encuentra a una temperatura media creado esas variaciones.

Tabla 38. Comparación de la distribución de la velocidad entre un recinto con techo de concreto y otro con techo verde.

Tiempo de simulación	PLACA DE CONCRETO	TECHO VERDE
7200		
14400		

Es posible observar el mismo comportamiento de la velocidad en las paredes que se obtuvo para las anteriores simulaciones, es decir para ambos casos el aire empieza a acelerarse y asciende por la pared con mayor temperatura y desciende por las paredes más frías, en éste caso por las paredes internas las cuales no se incrementa su temperatura de la misma forma que lo hace el aire interior, y las paredes externas como se puede observar en la figura 42.

Figura 42. Distribución de la temperatura en paredes del recinto con techo de concreto a los 21600 de simulación.

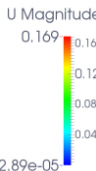
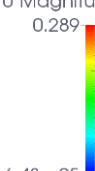
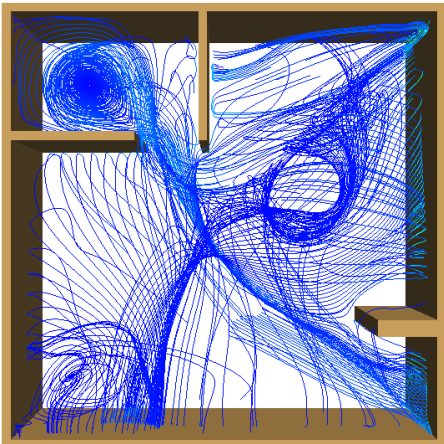
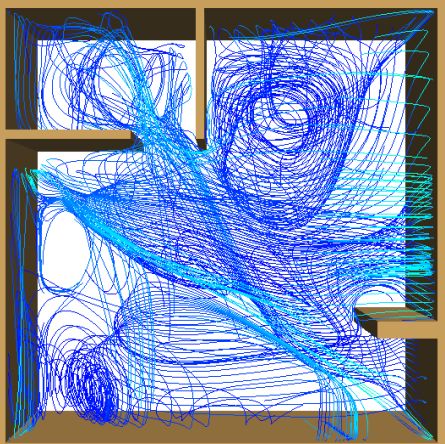
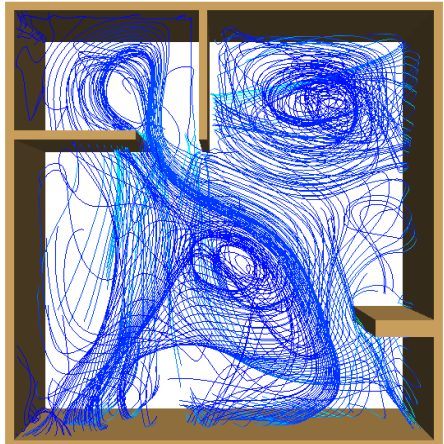
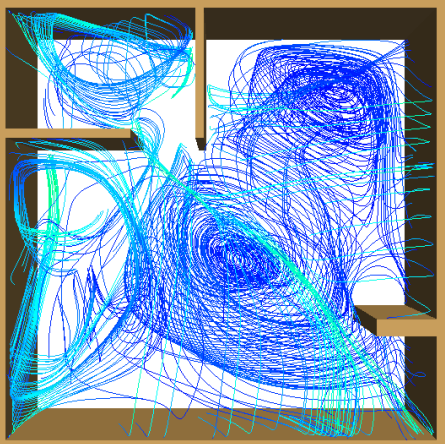


La distribución de la velocidad expuesta en la tabla 30 nos permite ver la magnitud de la velocidad, mostrada a través del tamaño y el color del vector, y su dirección que es la que presenta el vector, pero por su tridimensionalidad no se ve con claridad la trayectoria que sigue el aire a través del tiempo, por esta razón se presenta la tabla 37, la cual muestra las líneas de corriente, permitiéndonos apreciar los remolinos que se generan por las diferencias de temperaturas cerca a cada superficie.

En la imagen de la trayectoria de la velocidad para los 7200 segundos simulados (representan las 11 de la mañana) partiendo que en este momento la pared más caliente es la izquierda viéndolo desde esa vista, podemos ver el remolino que se presenta en la parte superior izquierda (baño) debido a las diferentes temperaturas que se presentan en las paredes y el poco espacio entre ellas, hace que el aire se mueva de un extremo al otro. Como era de esperar lo mismo ocurre a los 21600 pero en la parte contraria donde se encuentra la división para el closet del aparta-

estudio. Pero al hacer la comparación del recinto con techo de concreto y el recinto con techo verde se observa que este tiene menos movimiento.

Tabla 39. Comparación de la distribución de la velocidad para un aparta-estudio con diferentes tipos de techos.

Tiempo de simulación	Placa de concreto		techo verde	
7200				
14400				

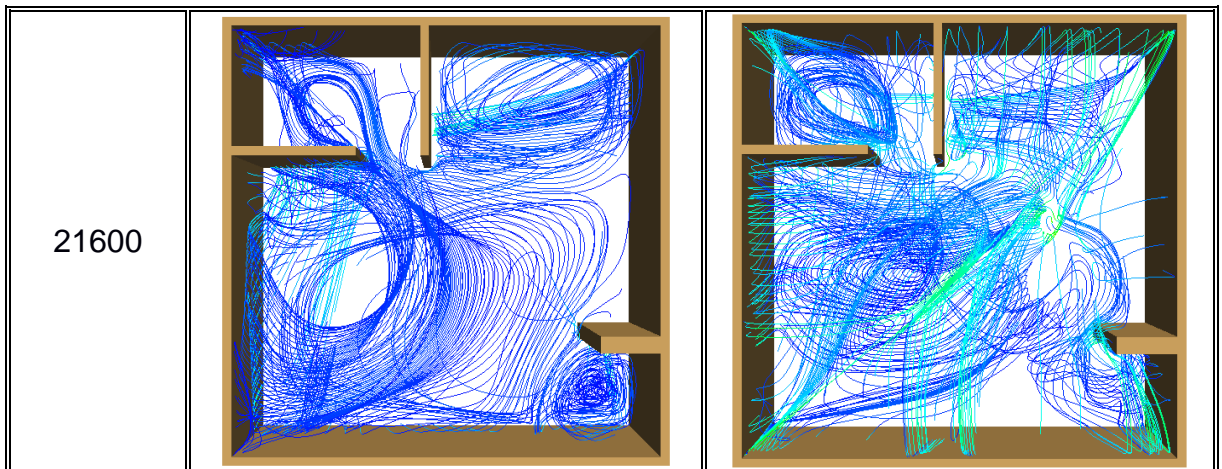
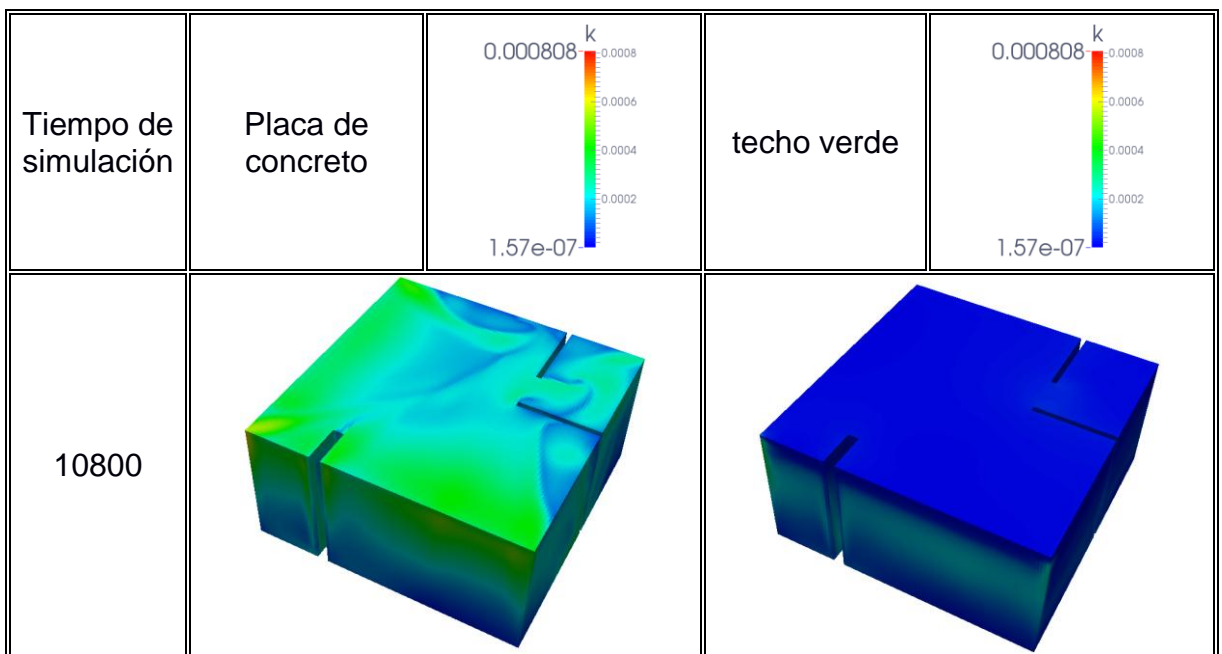
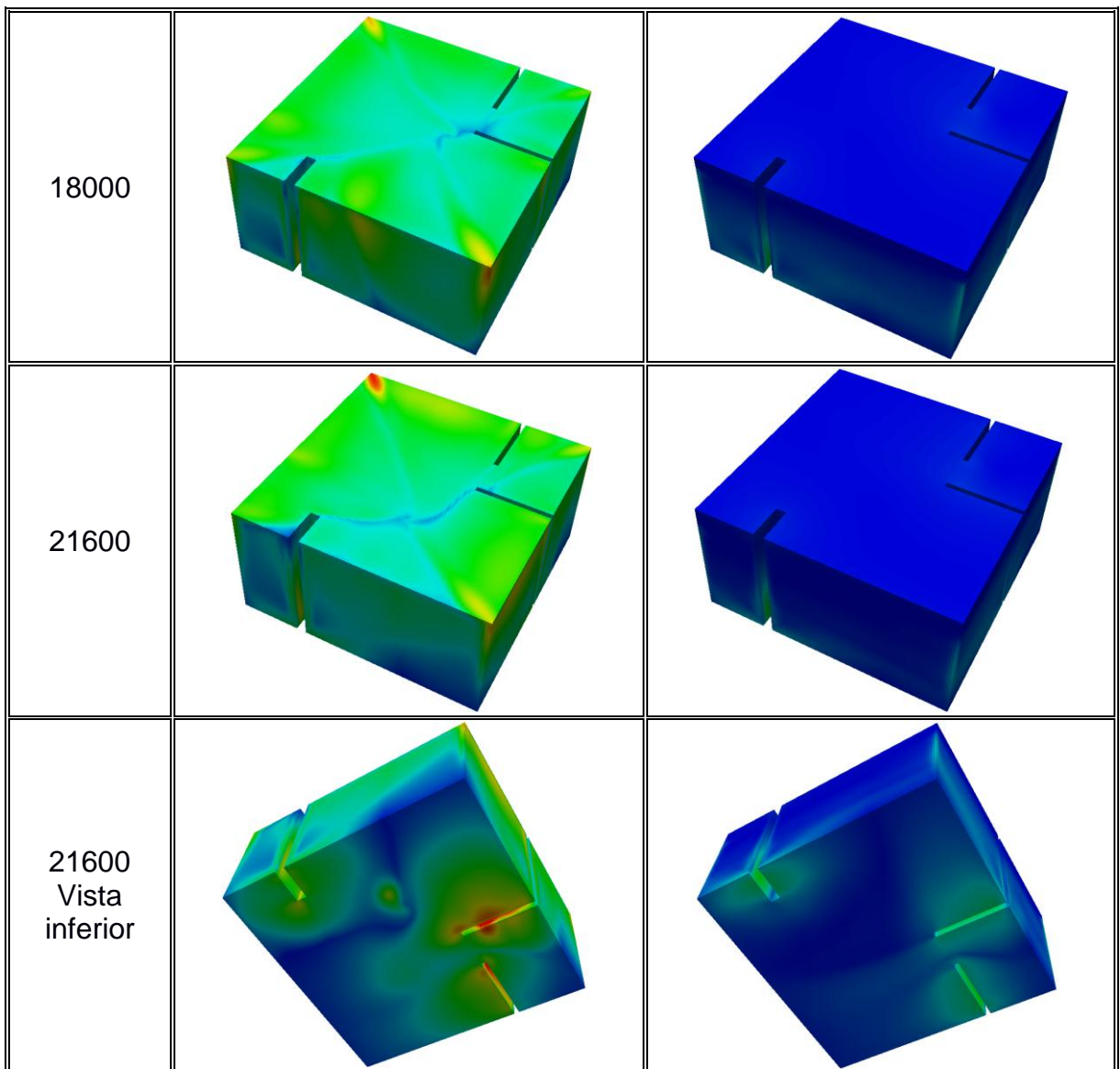


Tabla 40. Comparación de la energía cinética turbulenta  $k$ , entre un recinto con techo de concreto y uno con techo verde.





Se ve que durante toda la simulación la energía cinética turbulenta presenta valores más altos en el recinto con techo de concreto lo que nos indica que se genera mayor turbulencia en dicho recinto.

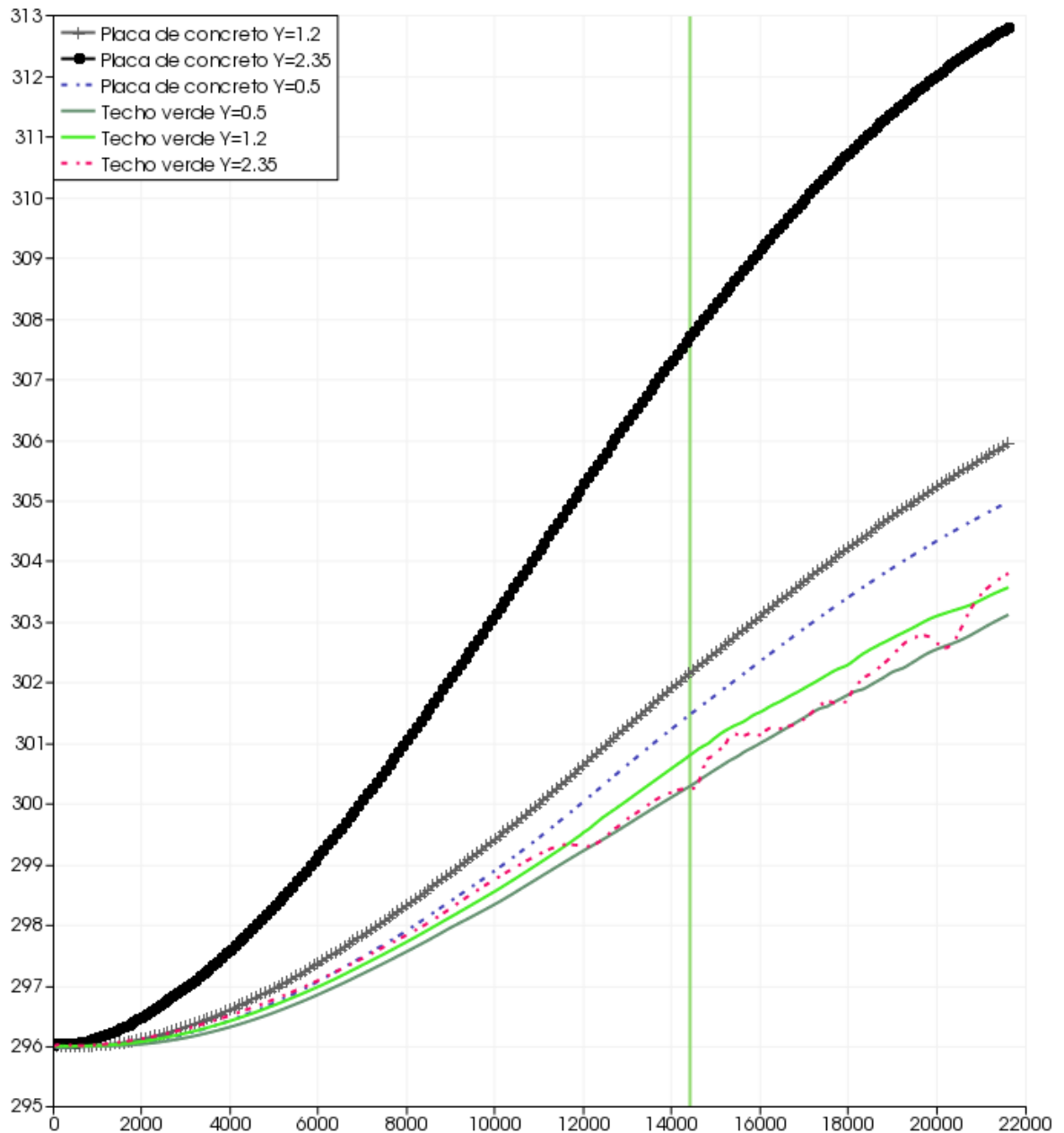
Como se puede observar la energía cinética turbulenta empieza a crecer por la pared que mayor radiación recibe y va aumentando a medida que los recintos elevan su temperatura. Además presenta sus valores más altos cerca de la parte inferior

de las paredes internas que se encuentran a una temperatura menor que el aire contenido en el recinto y las paredes externas.

En la siguiente figura se representa la variación de la temperatura en el centro de los recintos para diferentes alturas: cerca al techo, en el centro de recinto y cerca al piso, la línea vertical que se observa en los 14400 segundos representa el momento en el que estaba la simulación cuando se generó la gráfica.

Hay que tener en cuenta que las temperaturas son un poco más altas que las que se generarían en la realidad, debido a que para la simulación de estos recintos no se tuvieron en cuenta filtraciones de ningún tipo, ni flujos de aire entrantes como los que se generan al tener ventanas o rendijas de ventilación, siendo éste un factor irrelevante ya que sin él es posible conocer las ventajas que se obtienen al utilizar arquitectura bioclimática en este caso techos verdes.

Figura 43. Temperatura en el centro de los recintos con placa de concreto y techo verde para diferentes alturas.



Se observa claramente como el uso de techos verdes en los recintos, disminuye la temperatura del aire contenido en su interior, hasta el punto de tener menos temperatura cerca al techo que en el centro del recinto.

## 9. CONCLUSIONES

- ✓ Se realizaron varias simulaciones por medio del software OpenFOAM, que permitieron adquirir el conocimiento necesario a nivel usuario para realizar casos que tengan que ver con análisis térmicos.
- ✓ Se simuló un recinto cerrado, con paredes de ladrillo común y una placa de concreto como techo, con aire en su interior, expuesto a condiciones climáticas reales de la ciudad de Bucaramanga.
- ✓ Se comprobó que el modelo de turbulencia RNG képsilon utilizado para las simulaciones de una cavidad diferencialmente climatizada tiene mejor comportamiento que los modelos más convencionales como el képsilon y k Omega SST.
- ✓ Se realizó una simulación para un recinto con las mismas dimensiones, expuesto a las mismas condiciones ambientales presentes en Bucaramanga, pero con techos verdes en el que se puede ver que es un excelente aislador térmico.
- ✓ Se realizaron las simulaciones en paralelo utilizando un ordenador con ocho procesadores, el cual tardo siete días en calcular cada caso en el que se simularon seis horas, obteniendo resultados de hasta 50 GB.
- ✓ El uso de paredes al interior de los recintos, hace que los cambios en la densidad presentes por la variación de temperatura, generen movimiento del aire y de esta manera contribuyen a la aclimatación de los recintos.
- ✓ La implementación de techos verdes en las construcciones de recintos, reducen los costos para el acondicionamiento térmico además de contribuir con el medio ambiente.

- ✓ OpenFOAM puede ser catalogado como una excelente herramienta ingenieril, debido a que no solo es libre y de fácil acceso, sino que presenta gran variedad de modelos y esquemas que nos permiten simular casi cualquier problema de dinámica de fluidos.
  
- ✓ A partir de las simulaciones realizadas es posible concluir que con OpenFOAM se pueden obtener resultados óptimos en comparación con el comportamiento real de los problemas planteados, pero es de vital importancia conocer el modelo matemático y su discretización.

## 10. RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES

- Con el mallado usado para las simulaciones se obtuvieron resultados óptimos, pero existe una utilidad del software OpenFOAM la cual permite obtener una malla con más detalles, como refinación en zonas específicas llamado SnappyHexMesh, que al igual que otros programas como Salome que permite importar las mallas, pueden ser implementados para casos con geometrías mas complejas.
- Es posible adicionar más detalles a éstas simulaciones, como contemplar la dirección de las corrientes de aire en el exterior del recinto, otro de ellos que acerca a la realidad es la adición de ventanas y hasta elementos interiores ya sea que emitan calor o no.
- En OpenFOAM se encuentra gran variedad de modelos de turbulencia para aproximaciones RANS, es posible plantear el caso simulado con el uso de estos modelos y así poder obtener más exactitud en los resultados.
- Debido a la gran variedad de opciones para la solución de problemas físicos que presenta la herramienta computacional OpenFOAM se debería iniciar el uso masivo para nuevos proyectos ingenieriles que se desarrollen por medio de simulaciones.

## REFERENCIAS

- [1] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03787788080003395>.
- [2] <http://jardineriaonline.blogspot.com/2011/12/los-techos-verdes-i.html>.
- [3] INCROPERA, F. Fundamentos de transferencia de calor y masa. 6 ed. USA.: J. Wiley & Sons, 1994. 997 p.
- [4] CENGEL, Yunus. Transferencia de calor y masa. 2 ed. Mexico.: Mc Graw-Hill, 2004. 852 p.
- [5] [www.iim.unam.mx/zenit/fluidos1/](http://www.iim.unam.mx/zenit/fluidos1/)
- [6] PARRA VIOL José Plácido, Estudio e implementación de nuevas funcionalidades de deformación de malla en un software de mecánica de fluidos computacional, Escola Técnica Superior d'Enginyeries, 2011.
- [7] VÁSQUEZ Jesús y GONZÁLEZ José. Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujo con capa límite desprendida. Universidad de Sevilla. Sevilla. 2004
- [8] FERNÁNDEZ, Jesús. Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica computacional de fluidos (CFD) por medio del método de volúmenes finitos, Barcelona: Reverté, 2012.
- [9] WILCOX, R. R. Fundamentals of modern statistical methods: Substantially improving power and accuracy. 2nd edition. New York. 2010.

[10] <http://www.openfoam.org/>

[11] Hrvoje Jasak, Aleksandar Jemcov, Zeljko Tukovic, (2007), OpenFOAM: A C++ Library for Complex Physics simulations, International workshop on Coupled methods in numerical dynamics IUC, Dubrovnik, Croatia.

[12] NIGRO Norberto y STORTI Mario. Métodos numéricos en fenómenos de transporte. Centro internacional de métodos computacionales en ingeniería, 2007.

[13] VALENCIA MERIZALDE Leonardo, 2005, Estudio numérico y experimental de flujo Rayleigh-Bénard en cavidades cúbicas para régimen transitorio y turbulento. Universitat Rovira i virgili, 2006.

[14] D. C. Wan, B. S. V. Patnaik, and G. W. Wei “A new benchmark quality solution for the buoyancy-driven cavity by discrete singular convolution.” Department of Computational Science, National University of Singapore, Republic of Singapore. 2001

[15] F.X. Trias, M. Soria, A. Oliva and C.D Pérez Segarra. Direct numerical simulations of two- and three- dimensional turbulent natural convection Flows in a differentially heated cavity of aspect ratio 4. J. Fluid Mech. (2007), vol. 586, pp. 259–293.

[16] GALLEGO-MARCOS Ignacio. Thermal Mixing CHT Simulations with OpenFOAM URANS and LES. KTH vetenskap och konst. 2013.

[17] REYES Romualdo y SÁNCHEZ Julián. Estudio de las ventajas térmicas de los techos verdes en Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2013.

[18] <http://www.sol-arq.com/index.php/caracteristicas-materiales/caracteristicas-superficiales>

[19] [www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp](http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp)

[20] <http://albatros.uis.edu.co/eisi/eisi.jsp?IdServicio=S6>

[21] Thijs Defraeye, Bert Blocken and Jan Carmeliet. Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modeling. 2010.

## BIBLIOGRAFÍA

CENGEL Yunus. Transferencia de calor y masa. Editorial Mc Graw Hill. Tercera edición. 2007

FERNÁNDEZ, Jesús. Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica computacional de fluidos (CFD) por medio del método de volúmenes finitos, Barcelona: Reverté, 2012

F.X. Trias, M. Soria, A. Oliva and C.D Pérez Segarra. Direct numerical simulations of two-and three- dimensional turbulent natural convection Flows in a differentially heated cavity of aspect ratio 4. J. Fluid Mech. (2007), vol. 586, pp. 259–293.

REYES Romualdo y SÁNCHEZ Julián. Estudio de las ventajas térmicas de los techos verdes en Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2013

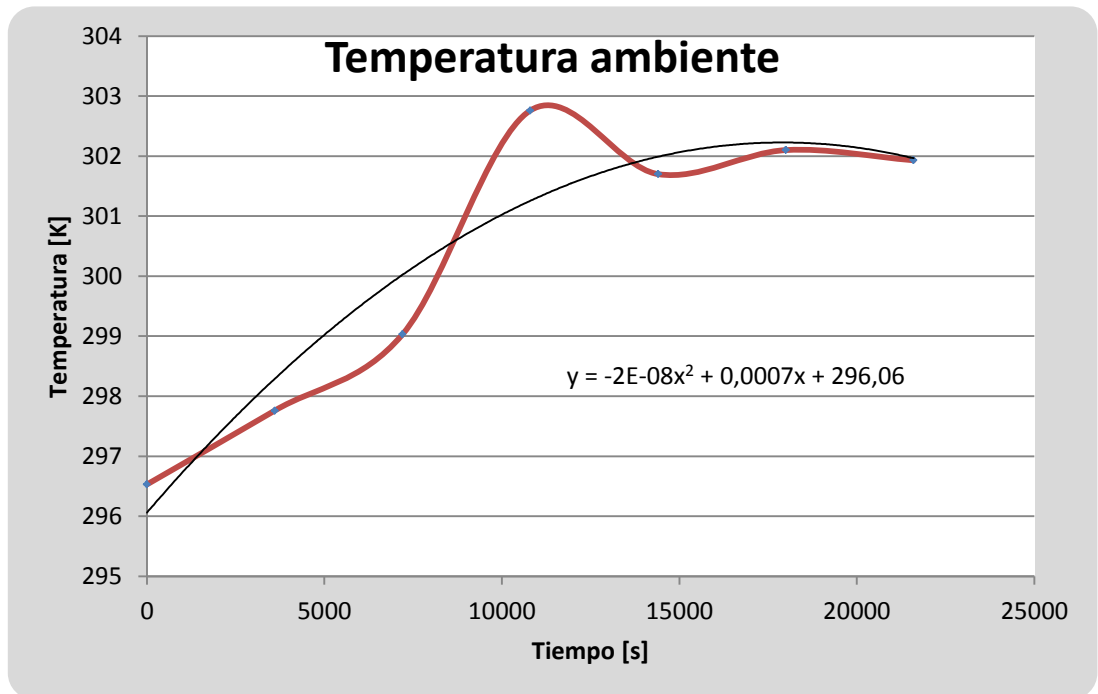
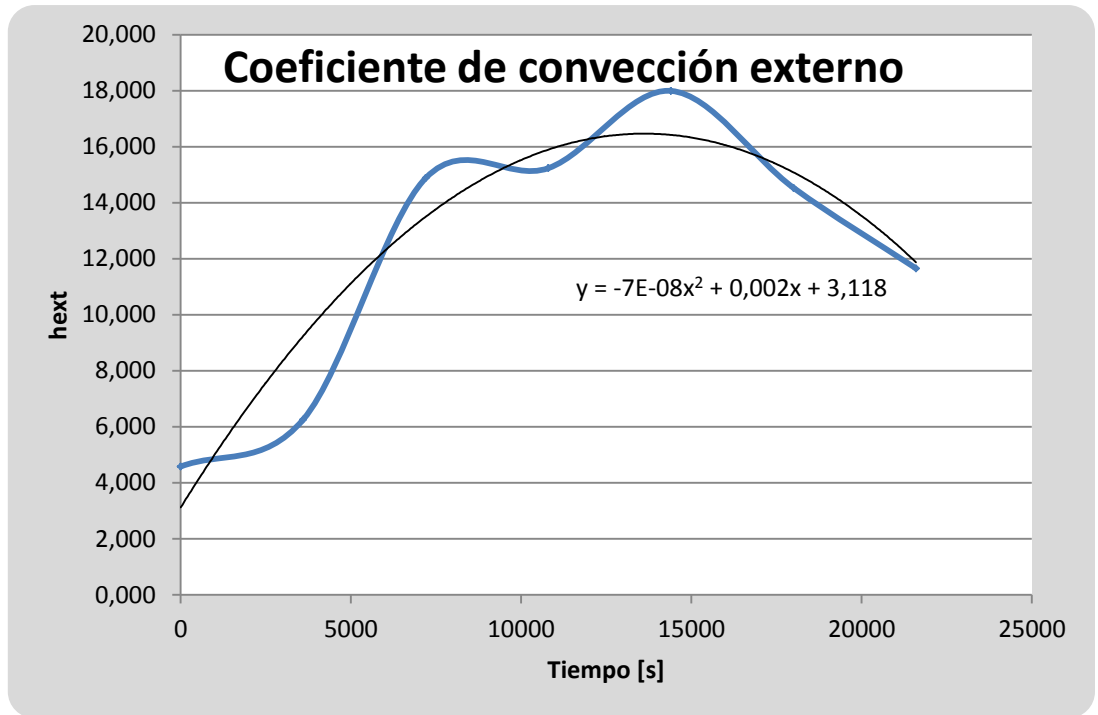
SANSOVAL Diana. Comparación termo-económica entre diferentes tipos de tejas usadas como cubierta protectora contra la radiación solar. Universidad Industrial de Santander. 2015

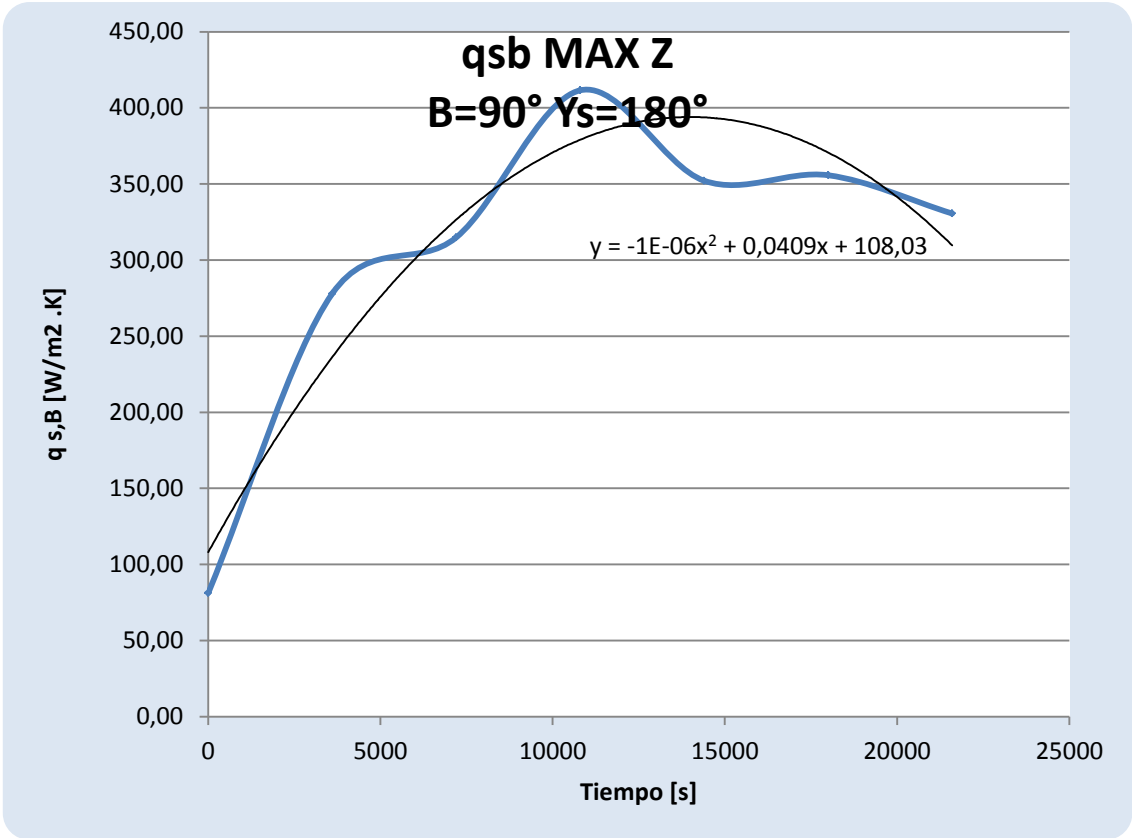
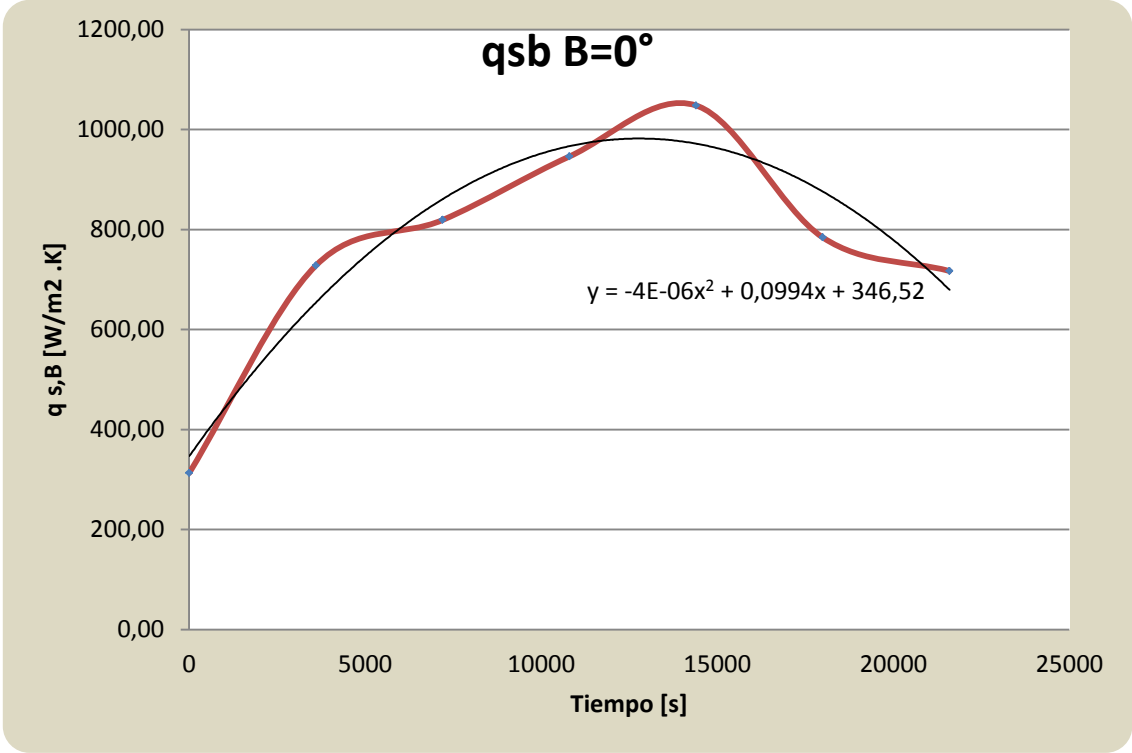
## ANEXOS

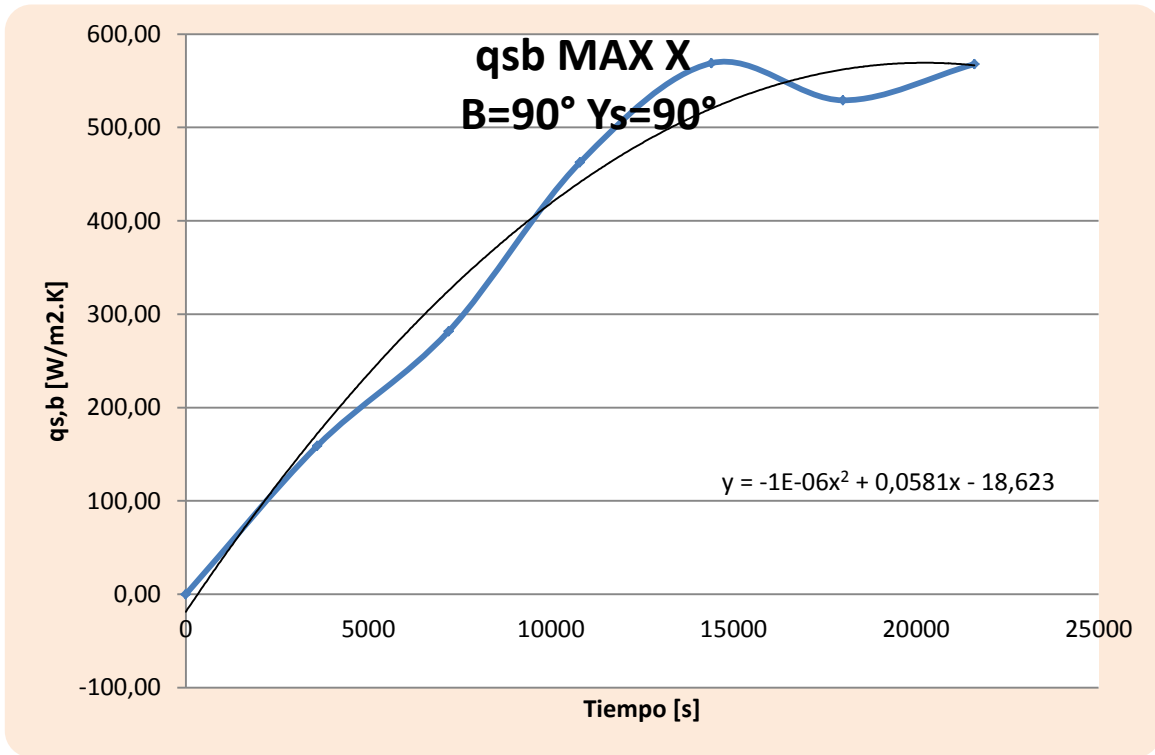
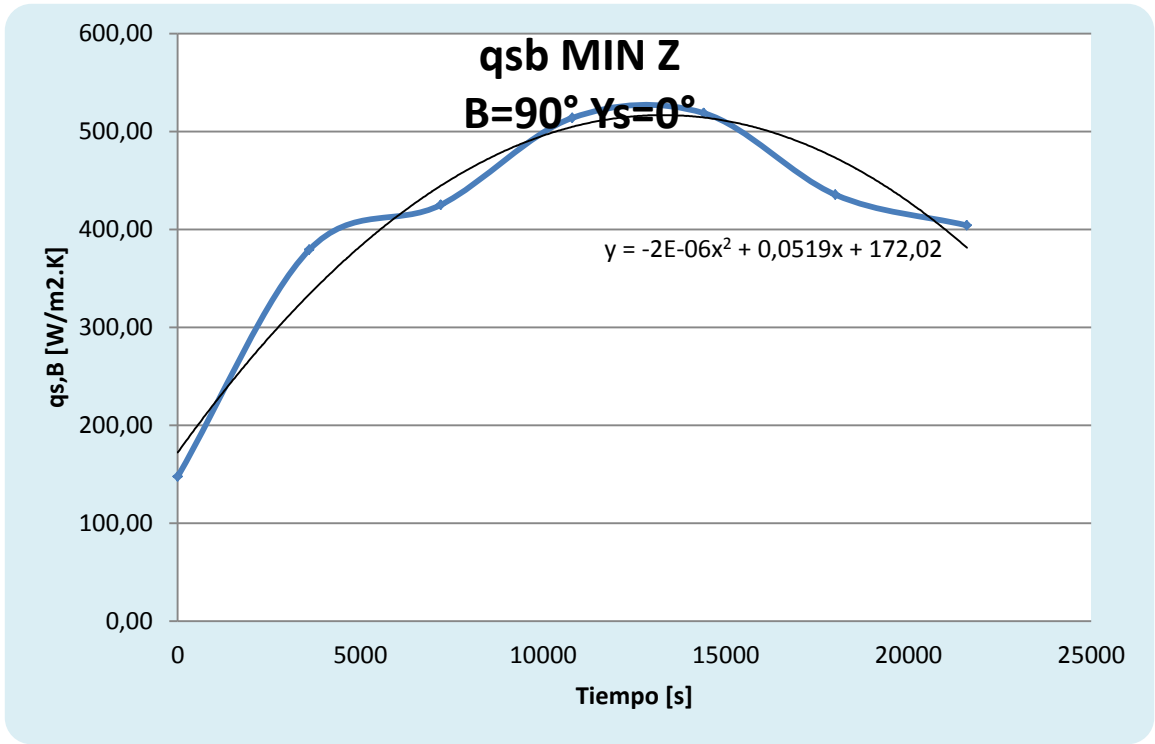
### ANEXO A. DATOS CLIMATOLÓGICOS.

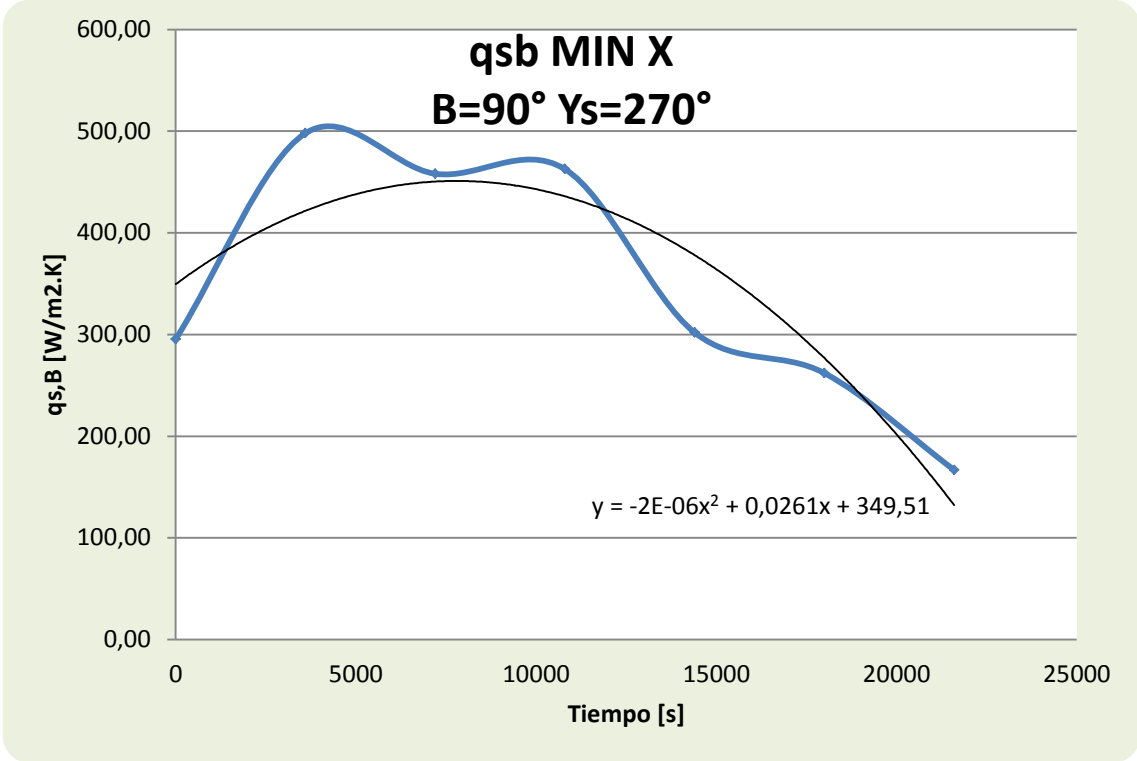
DATOS RADIACION SOLAR					
FECHA	HORA	RADIACION TOTAL [W/m <sup>2</sup> ]	RADICCIÓN DIFUSA [W/m <sup>2</sup> ]	VELOCIDAD DEL VIENTO [m/S]	TEMPERATURA AMBIENTE [K]
16-mar-15	0:00	0	0	0	297,1
	1:00	0	0	0	297,2
	2:00	0	0	0	296,66
	3:00	0	0	0	296,6
	4:00	0	0	0	296,33
	5:00	0	0	0	295,9
	6:00	0	0	0	296,13
	7:00	0	0	0	296,03
	8:00	123	27	0	295,83
	9:00	313	134,7	0	296,53
	10:00	728	438,5	0,2963	297,76
	11:00	819	494,1	0,1481	299,03
	12:00	946	641,5	0,5925	302,76
	13:00	1048	556,4	0,7405	301,7
	14:00	784	555,9	0,7405	302,1
	15:00	717	519,5	0,2961	301,93
	16:00	283	75,7	1,0361	299,19
	17:00	348	261,2	0,4444	299,36
	18:00	81	86	0	298,29
	19:00	0	0	0	297,46
	20:00	0	0	0	296,9
	21:00	0	0	0	296,66
	22:00	0	0	0	296,36
	23:00	0	0	0	296,4

## ANEXO B. REGRESIONES









**ANEXO C. PARÁMETROS FVSCHEMES UTILIZADOS EN TODAS LAS SIMULACIONES.**

**FVSCHEMES**

CASO	ddt Schemes	grad Schemes	div Schemes	Laplacian Schemes	Interpolation Schemes	snGrad Schemes	flux required
dhcRa5bb	steadyState	Gauss linear	bounded Gauss upwind Gauss Linear	Gauss linear corrected	linear	corrected	No
dhcRa10bb	steadyState	Gauss linear	bounded Gauss upwind Gauss Linear	Gauss linear corrected	linear	corrected	No
dhcR5pfvS	steadyState	Gauss linear	bounded Gauss limited Linear	Gauss linear Orthogonal	linear	Orthogonal	No
dhcR10pfvP	Euler	Gauss linear	Gauss upwind Gauss Linear	Gauss linear corrected	linear	corrected	No
Fluido Air	Euler	Gauss linear	Gauss upwind Gauss Linear Gauss linear Upwind	Gauss linear corrected	linear	corrected	No
Solidos	Euler	Gauss linear	none	Gauss linear corrected	linear	corrected	No

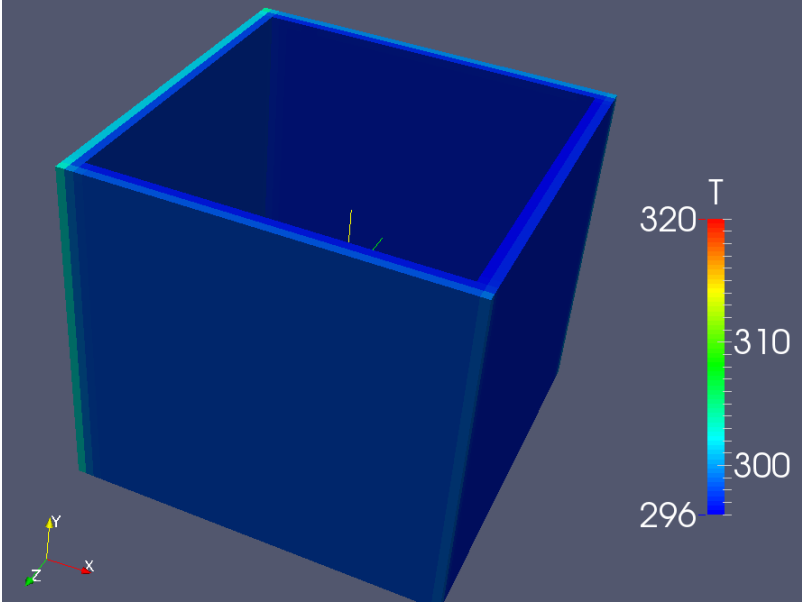
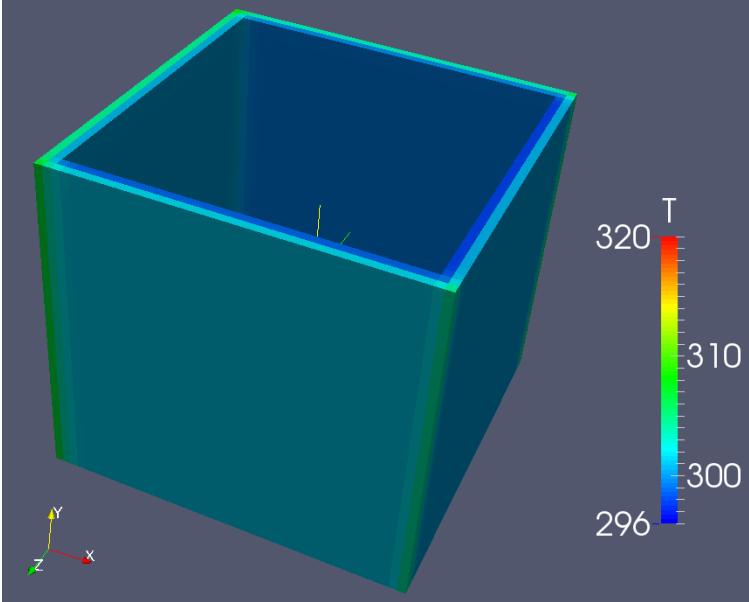
**ANEXO D. PARÁMETROS FVSOLUTION UTILIZADOS EN TODAS LAS SIMULACIONES.**

**FVSOLUTION**

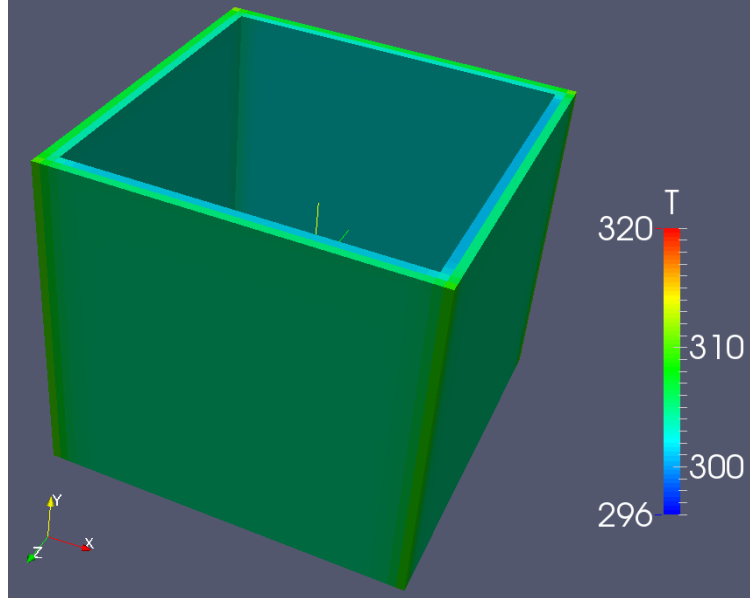
CASO	SOLVER			
	P_rhg	U T k epsilon R	Rho	
dhcRa5bb	Solver PCG Preconditioner DIC Tolerance 1e-08 relTol 0.1	Solver PBiCG Preconditioner DILU Tolerance 1e-5 relTol 0.01	--	Simple
dhcRa10bb	Solver PCG Preconditioner DIC Tolerance 1e-08 relTol 0.1	Solver PBiCG Preconditioner DILU Tolerance 1e-5 relTol 0.01	--	Simple
dhcR5pfvS	Solver GAMG Tolerance 1e-07 relTol 0.1  smoother DICGaussSeidel	Solver PBiCG Preconditioner DILU Tolerance 1e-8 relTol 0.01	--	Simple
dhcR10pfvP	Solver PCG Preconditioner DIC Tolerance 1e-08 relTol 0	Solver PBiCG Preconditioner DILU Tolerance 1e-5 relTol 0	Solver PCG Preconditioner DIC Tolerance 0 relTol 0	Pimple
Fluido Air	Solver GAMG Tolerance 1e-7 relTol 0.01  smoother DICGaussSeidel	Solver PBiCG Preconditioner DILU Tolerance 1e-5 relTol 0	Solver PCG Preconditioner DIC Tolerance 1e-7 relTol 0.01	Pimple

CASO	SOLVER	
	h	
Solidos	solver PCG; preconditioner DIC; tolerance 1e-06; relTol 0.1;	Pimple

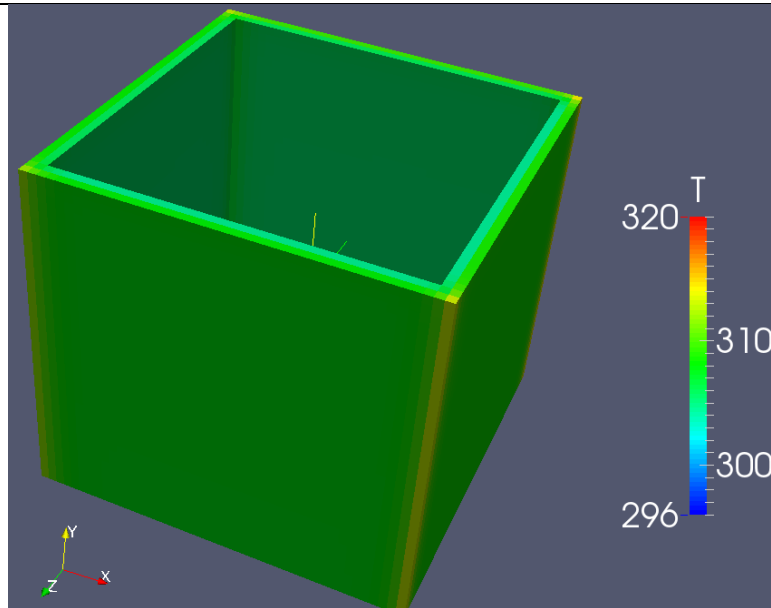
**ANEXO E. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LAS PAREDES SEGÚN SU POSICIÓN A TRAVÉS DEL TIEMPO.**

Tiempo de simulación	PLACA DE CONCRETO TEMPERATURA EN LAS PAREDES
3600	
7200	

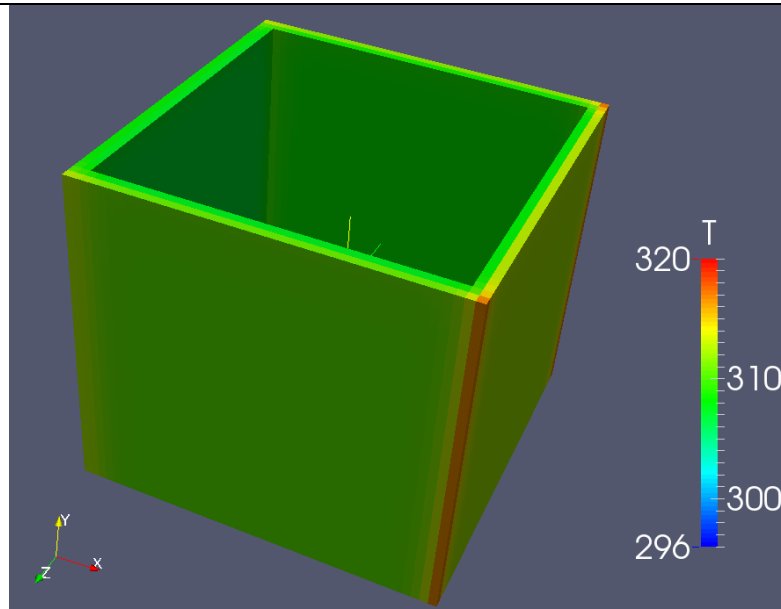
10800



14400



18000



21600

