

CONSTRUCCIÓN DE UN MÚLTIPLE DE INYECCIÓN DE AIRE

Autores:

JESUS SEBASTIAN ESTEBAN PARDO

CESAR LEONARDO MAYORGA MOJICA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2012

CONSTRUCCIÓN DE UN MÚLTIPLE DE INYECCIÓN DE AIRE

Autores:

JESUS SEBASTIAN ESTEBAN PARDO

CESAR LEONARDO MAYORGA MOJICA

Aspirantes al título de ingeniero mecánico

Proyecto de grado

Director, Profesor:

ING. WILSON FELIPE JAIMES ALFONSO

Coodirector, Profesor:

PHD. RENE CARREÑO OLEJUA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2012

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 18 de octubre de 2012

DEDICATORIA

A mis padres Salvador Mayorga, Elsa Mojica, les dedico este libro por su incesante apoyo en el camino que me guía en el saber y el éxito de mis ideales.

(Mayorga, Cesar)

DEDICATORIA

Agradezco a mi padre Luis Esteban y mi madre Gloria Pardo por el apoyo que me brindaron en todos estos años de educación y crecimiento personal.

Agradezco a mi esposa Jennifer Blanco y mi hijo Thomas Esteban por todo el apoyo moral que me brindaron, igualmente por toda esa confianza que depositaron en mí.

(Esteban, Jesus)

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Pontificia Bolivariana por su colaboración en la parte económica del presente proyecto de grado.

Agradecimientos a los ingenieros René Carreño y Wilson Jaimes por su apoyo en el conocimiento científico para la culminación de este proyecto.

Agradecemos a los ingenieros Rossvan Plata y Pablo Prada por su colaboración en la consecución de los elementos de medición.

CONTENIDO

1. OBJETIVOS	18
1.1. OBJETIVO GENERAL	18
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2. METODOLOGÍA	20
3. MARCO TEÓRICO	22
3.1. PROCESO DE SECADO	22
3.1.1. Antecedentes históricos	22
3.2. OBJETIVOS DEL SECADO	23
3.3. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE SECADO	25
3.3.1. Temperatura del aire	25
3.3.2. El agua en los alimentos	26
3.3.3. Contenido de humedad del aire seco	27
3.3.4. Velocidad del aire	27
3.4. CLASIFICACIÓN PARA LOS SECADORES	28
3.4.1. Secadores directos o convectivos	28
3.4.2. Generación de aire caliente	29
3.4.2.1. Secadores de túnel:	29
3.4.2.2. Secadores rotativos:	30
3.4.2.3. Secadores por aspersión (spray):	30
3.4.3. Secadores indirectos o por conducción	31
3.4.3.1. Secadores de tambor:	31
3.4.3.2. Secadores indirectos al vacío con anaqueles:	32
3.4.4. Secadores por radiación	32
3.4.4.1. Secadores solares:	32
3.4.5. Secadores con bomba de calor	32
3.4.6. Secadores en bandejas:	33

3.5.	PERDIDAS DE PRESIÓN EN TUBERIA	34
3.5.1.	Pérdidas Lineales	34
3.5.2.	Pérdidas Singulares	35
3.5.3.	Factores de perdida friccional	35
3.5.4.	Viscosidad Dinámica	35
3.5.5.	Régimen Laminar y Turbulento	36
3.5.6.	Flujo Laminar	36
3.5.7.	Flujo Turbulento	36
3.5.8.	Numero de Reynolds	37
4.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SIMULACIÓN	38
4.1.	DECISIONES PRELIMINARES	38
4.2.	PRE PROCESAMIENTO	39
4.3.	PROCESAMIENTO	39
4.4.	POS PROCESAMIENTO	39
5.	PROCESO DE SIMULACIÓN PARA EL MODELO PROPUESTO	40
5.1.	MODELACIÓN GEOMÉTRICA CAD	40
5.2.	MALLADO GEOMÉTRICAS CAD	43
5.3.	CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN	45
5.3.1.	MODELOS	45
5.3.2.	MATERIAL	51
5.3.3.	CONDICIONES DE LAS CELDAS	52
5.3.4.	CONDICIONES DE LAS FRONTERAS	52
5.3.4.1.	Entrada (Inlet)	52
5.3.4.2.	Salidas (Outlets)	54
5.3.5.	VALORES DE REFERENCIA	55
5.3.6.	MÉTODOS PARA EL SOLUCIONADOR	55
5.4.	INICIALIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN	56
5.5.	INICIO DE LA SOLUCIÓN	57
5.6.	POS-PROCESAMIENTO	59
6.	DESARROLLO DEL MODELO	62
6.1.	PRIMERA FASE DE DESARROLLO	62
6.1.1.	DECISIONES PRELIMINARES	62
6.1.2.	DESARROLLO DE LA GEOMETRÍA	63

6.1.3.	MALLADO	63
6.1.4.	CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN	63
6.1.5.	CORRIDA DE LA SIMULACIÓN	64
6.1.6.	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
6.1.6.1.	PROCEDIMIENTO PARA EJECUCIÓN DEL EXPERI- MENTO	71
6.2.	SEGUNDA FASE DE DESARROLLO	76
6.2.1.	MODIFICACIONES EN LAS GEOMETRÍAS	76
6.2.2.	PARAMETRIZACIÓN DE LAS GEOMETRÍAS	81
6.2.3.	SIMULACIÓN DE LOS MODELOS GEOMÉTRICOS	83
6.2.4.	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	83
6.3.	PRUEBAS DE DESEMPEÑO	86
6.3.1.	PROCEDIMIENTO PARA EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO	86
6.4.	RESULTADOS	88
6.5.	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DEL MODELO SIMULADO CON EL MO- DELO FABRICADO	89
7.	CONCLUSIONES	91
8.	OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	92
9.	ANEXOS	93

LISTA DE FIGURAS

1.	Herramienta de análisis de sistemas (FLUENT).	38
1.	Geometría base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).	40
2.	Dimensiones geometría base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).	41
3.	Geometría base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	41
4.	Dimensiones geometría base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	42
5.	Geometría base cuadrada variando una sola dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	42
6.	Dimensiones geometría base cuadrada variando una sola dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	43
1.	Mallado geometría base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).	44
2.	Mallado geometría base cuadrada variando toda sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	44
3.	Mallado geometría base cuadrada variando una dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	44
1.	Modelos disponibles en ANSYS Fluent	45
2.	Esta opción activa / desactiva el cálculo de la energía en el modelo.	46
3.	Cuadro de dialogo modelos de turbulencia.	46
4.	Cuadro de dialogo de las propiedades físicas de los materiales.	51
5.	Cuadro de dialogo de las condiciones operativas de las celdas.	52
6.	Cuadro de dialogo Inlet Momentum.	53
7.	Cuadro de dialogo Inlet Thermal.	53

8.	Cuadro de dialogo Outlet Momentum.	54
9.	Cuadro de dialogo Outlet Thermal.	54
10.	Cuadro de dialogo de los valores de referencia para las celdas	55
11.	Selección del método del solucionador.	56
1.	Configuración del método de inicialización.	57
1.	Configuración del número de iteraciones.	57
2.	Diagrama del proceso de iteración.	58
1.	Diagrama del comportamiento de la velocidad al interior del modelo geométrico.	59
2.	Diagrama del comportamiento de la presión al interior del modelo geométrico.	60
3.	Diagrama del comportamiento de la temperatura al interior del modelo geométrico.	61
1.	Dimensiones geometría circular fase 1.	63
2.	Diagramas de comportamiento de la presión del flujo de aire.	65
3.	Diagramas de comportamiento de la velocidad del flujo de aire.	66
4.	Diagramas de comportamiento de la temperatura del flujo de aire.	66
5.	Prototipo de geometría base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).	68
6.	Prototipo de geometría base circular sin variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (cilindro).	68
7.	Montaje experimento Prototipo de control cónico.	69
8.	Montaje experimento Prototipo de control cilíndrico.	69
9.	Anemómetro de hilo caliente (ALNOR AVM 440).	70
10.	Termo-anemómetro de aletas (ERASMUS EA-200).	70
11.	Soplador eléctrico (BLACK & DECKER BB600-B3).	71
1.	Junta de acople elástica.	77
2.	Dimensiones geometría base circular modificada con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).	78
3.	Dimensiones geometría base cuadrada modificada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	79
4.	Dimensiones geometría base cuadrada modificada variando solo una de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	80
5.	Ítem de configuración de parámetros y puntos de diseño.	81
6.	Comportamiento de la presión del fluido en la geometría seleccionada.	85
7.	Comportamiento de la velocidad del fluido en la geometría seleccionada.	85

8.	Comportamiento de la temperatura del fluido en la geometría seleccionada. . .	86
1.	Montaje del experimento.	87
2.	Toma de datos usando el anemómetro de hilo caliente.	88
1.	Diagrama de tendencia de la velocidad en las salidas entre los resultados de las pruebas de desempeño y la simulación.	90
2.	Diagrama de tendencia del caudal en las salidas entre los resultados de las pruebas de desempeño y la simulación.	90
3.	Múltiple de inyección de aire.	93
4.	Gráfico de comportamiento de la velocidad en la geometría de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	97
5.	Gráfico de comportamiento de la presión en la geometría de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	97
6.	Gráfico de comportamiento de la temperatura en la geometría de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	98
7.	Gráfico de comportamiento de la velocidad en la geometría de base cuadrada variando solo una de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	98
8.	Gráfico de comportamiento de la presión en la geometría de base cuadrada variando solo una de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	99
9.	Gráfico de comportamiento de la temperatura en la geometría de base cuadrada variando solo una de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	99

LISTA DE TABLAS

1.	Tabla de resultados de la fase 1 de simulación.	67
2.	Tabla de resultados de mediciones de velocidad en prototipo cilíndrico. . . .	72
3.	Tabla de resultados de mediciones de velocidad en prototipo cónico.	73
4.	Tabla comparativa de porcentaje de error modelo geométrico cónico.	74
5.	Tabla comparativa de porcentaje de error modelo geométrico cilíndrico. . . .	74
6.	Balance de flujos másico.	75
7.	Definición de los parámetros de la geometría de base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).	81
8.	Definición de los parámetros de la geometría de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	82
9.	Definición de los parámetros de la geometría de base cuadrada variando una sola de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	82
10.	Tabla de resultados de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).	83
11.	Tabla de resultados de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal. . .	83
12.	Tabla de resultados de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando una sola de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	84
13.	Resultados de geometría base circular seleccionada para fabricación.	84
14.	Tabulación de resultados pruebas de desempeño.	88
15.	Promedio y desviación estándar de los resultados de la velocidad en las salidas.	89
16.	Calculo del porcentaje de error de la velocidad del aire en las salida entre los resultados de las pruebas de desempeño y de la simulación.	89
17.	Calculo del porcentaje de error de la velocidad del aire en las salida entre los resultados de las pruebas de desempeño y de la simulación.	89

18.	Tabla de resultados de caudal de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).	94
19.	Tabla de resultados de caudal de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	94
20.	Tabla de resultados de caudal de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando una sola de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	94
21.	Tabla de resultados de presión de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).	95
22.	Tabla de resultados de presión de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	95
23.	Tabla de resultados de presión de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando una sola de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	95
24.	Tabla de resultados de temperatura de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).	96
25.	Tabla de resultados de temperatura de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	96
26.	Tabla de resultados de temperatura de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando una sola de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.	96

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: CONSTRUCCIÓN DE UN MÚLTIPLE DE INYECCIÓN DE AIRE
AUTORES: Jesús Sebastian Esteban Pardo
César Leonardo Mayorga Mojica
FACULTAD: Facultad de Ingeniería Mecánica
DIRECTOR: ING. WILSON FELIPE JAIMES ALFONSO

RESUMEN

Este trabajo presenta la construcción de un múltiple de inyección para optimizar la distribución del flujo de aire, que posteriormente pueda ser adaptado a una cámara de secado de productos agrícolas dispuestos en bandejas. Este múltiple de inyección se desarrollo, haciendo uso de herramientas computacionales basadas en la metodología de volúmenes finitos y la dinámica computacional de fluidos, por medio de los software ANSYS Fluent y ANSYS Workbench que tienen licencia académica de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA seccional Bucaramanga.

El resultado que se espera es un prototipo construido del múltiple de inyección de aire, con el cual finalmente se puedan comprobar los resultados de los diagramas de comportamiento del fluido obtenidos en la simulación.

Palabras claves: múltiple de inyección; dinámica computacional de fluidos; prototipo; fluido; volúmenes finitos.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: CONSTRUCTION OF A MANIFOLD TO INYECTION OF AIR
AUTHOR: Jesus Sebastian Esteban Pardo
Cesar Leonardo Mayorga Mojica
FACULTY: Faculty of Mechanical Engineering
DIRECTOR: ING. WILSON FELIPE JAIMES ALFONSO

ABSTRACT

This paper presents the construction of an intake manifold to distribution of the flow of air, that can be adapted later to a drying chamber of agroindustrial products arranged in trays. This intake manifold, was developed using computational tools based on the finite volume method and computational fluid dynamics, using the software ANSYS Fluent and ANSYS Workbench with academic license of the Universidad Pontificia Bolivariana Bucaramanga. The expected result is a prototype built manifold injection of air, which eventually can validate the results of the fluid behavior diagrams obtained in the simulation.

KEYWORDS: intake manifold, computational fluid dynamics, prototype, fluid, finite volume.

INTRODUCCIÓN

En el contexto socio económico de un país, el campo de la tecnología agroindustrial juega un papel muy importante, y siendo Colombia una nación donde la agricultura es el principal sustento de su economía, es necesario implementar desarrollo en dicha área, debido a que en nuestro país se produce una gran variedad de materia prima de muy buena calidad, que puede ser transformada para darle un valor agregado, y de esta manera comercializar los productos terminados en muchas partes del mundo.

En la industria alimentaria, el secado es una operación muy importante para la preservación de alimentos, la cual puede realizarse mediante secadores directos e indirectos, continuos o discontinuos, cuya elección depende de las cantidades de producto que se desee deshidratar. Por ello, en este proyecto se seleccionaron los secadores de bandejas, los cuales tienen la desventaja de no secar el producto uniformemente, ya que para ello se requieren velocidades similares y elevadas, o bien se necesitan sacar y voltear las bandejas para lograr un secado correcto. Por ello, surge la necesidad de diseñar un dispositivo (múltiple) que permita suministrar aire de manera uniforme a todas las bandejas, para así garantizar un perfecto secado del producto. Igualmente se requiere como operación complementaria, desarrollar un mecanismo de movimiento mecánico para evitar la operación de voltear las bandejas durante el proceso.

A partir de las anteriores afirmaciones, se plantea la solución a uno de los problemas propuestos para el secador de bandejas, realizando la construcción de un múltiple de inyección de aire, usando para su desarrollo, simulaciones del comportamiento del flujo de aire en su interior, para determinar sus dimensiones, a través del uso del software ANSYS Fluent y del modelamiento paramétrico de las dimensiones del mismo con ANSYS Workbench, para de esta manera lograr un ajuste en la distribución de los parámetros de velocidad, presión y caudal.

Inicialmente se presenta una revisión bibliográfica de los diferentes procesos de secado, antecedentes históricos de los mismos, objetivos del secado, factores que intervienen el proceso, pasando por los diferentes tipos de secadores existentes. Posteriormente se cita una reseña sobre las pérdidas de presión en tubería y del funcionamiento del software ANSYS Fluent y ANSYS Workbench que tienen licencia académica de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA

BOLIVARIANA seccional Bucaramanga.

Luego se hace una descripción del proceso de simulación para el modelo propuesto, explicando cómo se realizó el dimensionamiento del múltiple, haciendo énfasis en la correcta distribución de los parámetros de velocidad, presión y caudal, en los diferentes orificios de entrada y salida. Y finalmente, se presentan las conclusiones a las cuales se llegaron con la realización del proyecto y las recomendaciones correspondientes.

1 OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Construir un múltiple de inyección de aire para un prototipo de secado de productos agrícolas dispuestos en bandejas, en el que la distribución de flujo de aire y sus parámetros de funcionamiento se determinaran haciendo uso de herramientas computacionales basadas en la metodología de volúmenes finitos (FVM) dentro de la dinámica computacional de fluidos (CFD).

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dimensionar tres múltiples de inyección de aire cuyas máximas dimensiones podrán estar entre 800 mm de altura, 250 mm de profundidad y ancho, teniendo como parámetros la distribución de velocidad, presión, caudal y temperatura del fluido. **Resultado:** Geometría de un múltiple de inyección de aire. **Indicador:** La geometría debe permitir modificaciones en todas sus dimensiones, a través de las cuales se pueda ajustar la distribución de los parámetros, de velocidad, presión y caudal del fluido.
- Simular el comportamiento del flujo de aire determinando la distribución velocidad, presión, caudal y temperatura en las tres geometrías de los múltiples de inyección, usando como herramienta de simulación el software CFD ANSYS Fluent. **Resultado:** Gráficos de comportamiento de la velocidad, presión, caudal y temperatura del fluido para cada uno de los modelos propuestos. **Indicador:** Tabla comparativa de los parámetros de velocidad, presión, caudal y temperatura del fluido en cada uno de los modelos propuestos para múltiples de inyección haciendo uso del software ANSYS Fluent y el modelamiento paramétrico de las dimensiones de los mismos en ANSYS Workbench.
- Fabricar un múltiple de inyección de aire utilizando el modelo desarrollado mediante las simulaciones. **Resultado:** Múltiple de inyección de aire fabricado. **Indicador:**

El múltiple de inyección sera construido haciendo uso de las dimensiones del modelo desarrollado durante la simulación.

- Probar el prototipo de múltiple construido, con las condiciones utilizadas durante la simulación del modelo desarrollado. **Resultado:** Tabla comparativa entre los resultados obtenidos de las mediciones y en la simulación. **Indicador:** Validación del modelo a través de los parámetros de velocidad y caudal medidos en la admisión y los orificios de salida en el múltiple de inyección construido.

2 METODOLOGÍA

El proceso metodológico utilizado para dar cumplimiento a los objetivos de éste proyecto contempló seis fases detalladas a continuación.

Fase 1: Recopilación de información

Revisión bibliográfica y documentación de la inyección de aire a través de un múltiple, como también búsqueda de información sobre los tipos de secadores y selección existentes. Las fuentes de información utilizadas incluyen artículos científicos de la base de datos de Science direct, libros de secado, páginas web, literatura técnica, catálogos y trabajos de grado.

Fase 2: Dimensionamiento y parametrización de los múltiples de inyección

Dimensionamiento básico que contiene una alternativa que permite obtener las geometrías a ser evaluadas, en las cuales sus principales dimensiones como lo son la longitud total del elemento y el diámetro de la sección transversal a lo largo del mismo, puedan ser parametrizadas para posteriormente poder realizar las modificaciones necesarias y optimizar la distribución del flujo.

Fase 3: Simulación

Consiste en el desarrollo de las simulaciones en las que se devén definir las condiciones de frontera en la entrada, las salidas y en las paredes del elemento, así como el modelo de turbulencia acorde a las condiciones de frontera planteadas en las geometrías propuestas, para con ello obtener resultados de distribución de presión velocidad y caudal en tablas comparativas y diagramas de comportamiento, a través de las cuales se determina el elemento o modelo de mejor desempeño.

Fase 4: Fabricación del múltiple de inyección

En esta fase se procede con la fabricación del modelo de mejor de desempeño utilizando como material acero inoxidable.

Fase 5: Pruebas de desempeño

En esta fase se pone en funcionamiento el ventilador para verificar la funcionalidad del múltiple y se realiza la adquisición de datos de velocidad y caudal con un anemómetro en la entrada y las salidas para con estos realizar la validación del modelo simulado.

Fase 6: Análisis y comparación del modelo simulado con el modelo fabricado

En esta etapa se realiza la comparación de la velocidad del flujo de aire medido a las salidas del modelo fabricado, con los valores obtenidos en las simulaciones.

3 MARCO TEÓRICO

3.1. PROCESO DE SECADO

El secado de sólidos se refiere generalmente a la separación de un líquido de un sólido por evaporación y tiene, como consecuencia la reducción en peso y volumen, minimizando los costos de empaque, almacenamiento y transporte, permitiendo la estabilidad en el producto. Esta operación tiene la ventaja de ser utilizada como una técnica de preservación ya que los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua, además, muchas de las enzimas que causan los cambios en alimentos y otros materiales biológicos no pueden funcionar sin agua¹. Los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de humedad se reduce por debajo del 10 % en su peso, sin embargo, generalmente es necesario reducir este contenido de humedad por debajo del 5 % en peso en los alimentos, para preservar su sabor y valor nutritivo².

3.1.1. Antecedentes históricos

Las técnicas de deshidratación probablemente son los métodos más antiguos y más importantes practicados por los humanos para la preservación de los alimentos. Todos los granos de cereal por ejemplo son conservados por secado y el proceso natural es tan eficiente que difícilmente requiere de ayuda del esfuerzo humano. Sin embargo, hubo periodos en la historia en que los factores climáticos hicieron que los granos no se secaran apropiadamente en el campo. En estos casos, el hombre intentó ayudar a la acción natural suministrando calor a los granos que de otra forma podrían descomponerse. Los granos, las legumbres, nueces y ciertas frutas maduran sobre las plantas y secan en el viento caliente. Mas frutas son preservadas por secado que por cualquier otro método de preservación de alimentos. El secado natural de los alimentos por el sol da materiales bastante concentrados de calidad durable. Con todo, una ci-

¹Moreno B. *Microorganismos de los Alimentos*. Acribia, España, 1985

²Geankoplis C. J. *Procesos de Transporte y Operaciones unitarias*. CECSA, 1998

vilización altamente compleja no puede depender de los elementos, ya que son impredecibles. El secado por el sol permanece aún como la mayor acción de preservación de alimentos³.

Sin embargo el uso del calor del fuego para secar alimentos fue descubierto independientemente por muchos hombres en el nuevo y viejo mundo. El primer hombre seco sus alimentos en sus refugios, los indios americanos precolombinos usaron el calor del fuego para secar los alimentos. Pero no fue sino hasta 1795 que se inventó el cuarto de deshidratación de aire caliente. El equipo de Masson y Challet en Francia desarrollo un deshidratador de hortalizas que consistía de un flujo de aire caliente (105°F) sobre tajadas delgadas de hortaliza. Es importante hacer notar que el enlatado y la deshidratación aparecieron, aproximadamente, al mismo tiempo, hace casi siglo y medio. El significado del término deshidratación se considera que es secado artificial; la deshidratación ha asumido en la industria alimenticia el significado de aquel proceso de secado artificial⁴.

3.2. OBJETIVOS DEL SECADO

La mayoría de los procesos químicos requieren de la operación de secado. Sus aplicaciones tienen por objetivo:

1. Permitir el empleo satisfactorio del producto en otros procesos o tratamientos.
2. Facilitar el manejo posterior del producto.
3. Reducir su peso y por tanto su coste de embalaje y darle mayor valor y utilidad al producto final. Aun cuando el producto pueda ser utilizado en estado húmedo, resulta más barato eliminar el agua por medios térmicos que transportarlo húmedo.
4. Aumentar la capacidad de los aparatos.
5. Proteger los productos durante su almacenamiento y transporte.
6. Recuperar reactivos o subproductos valiosos (casos en el que la humedad que acompaña a un producto es un solvente caro).

En la industria alimentaria el secado es una operación unitaria la cual puede llevarse a cabo mediante secadores directos e indirectos, continuos o discontinuos, esto dependerá de las cantidades de producto que se quiera deshidratar. Uno de los equipos más empleados para la deshidratación de frutas y hortalizas, es el secador de bandejas estático, el aire utilizado es arrojado por un ventilador y calentado mediante resistencias eléctricas, vapor de agua o me-

³Desrosier Norman w. *Conservación de Alimentos*. Continental, Mexico, 1995

⁴Desrosier Norman w. *Conservación de Alimentos*. Continental, Mexico, 1995

diante un gas inerte. Generalmente los secadores de bandejas tienen la desventaja de no secar el producto uniformemente, y para esto se requiere de velocidades de aire elevadas, o bien, las bandejas se necesitan sacar y voltear durante el proceso para lograr un secado uniforme⁵.

La selección de un secador adecuado para la elaboración de productos alimenticios implica considerar aspectos como: definir el tipo de material que se debe deshidratar, capacidad de producción para determinar si se necesita un deshidratador continuo o discontinuo, conocer el contenido de humedad inicial del alimento, las características organolépticas y nutritivas que hacen atractivo el producto, entre otros⁶.

Debido a la gran variedad de alimentos deshidratados existentes en el mercado, se ha despertado últimamente un gran interés sobre las especificaciones de calidad y conservación de la energía, enfatizando en la necesidad del entendimiento de los procesos de secado.

Cuando un sólido húmedo es sometido a un proceso de secado en el cual se presentan dos subprocesos:

1. Transferencia de la humedad interna del sólido hacia la superficie de éste y subsecuente evaporación. El movimiento de la humedad dentro del sólido es una función de su naturaleza y composición física, temperatura y contenido de humedad.
2. Transferencia de energía en forma de calor del ambiente hacia al sólido para evaporar la humedad de su superficie. Este segundo subproceso depende de las condiciones externas de temperatura, humedad y flujo del aire, presión, área de exposición y el tipo de secador empleado.

En el proceso de secado, cualquiera de los dos subprocesos descritos es el factor limitante que gobierne la velocidad del secado, a pesar de que ambos subprocesos pueden ocurrir simultáneamente durante el ciclo de secado. El comportamiento de los sólidos en el secado, es medido como la pérdida de humedad como una función del tiempo. Existen tres etapas en el proceso de secado:

- Durante la primera parte del secado, la velocidad de secado es uniforme, la vaporización da inicio cuando el contenido de humedad en el sólido llega a la superficie de éste. Durante este periodo la difusión del vapor de agua es lo que controla el proceso a través de la interfase humedad-aire. Cuando el contenido de humedad promedio ha alcanzado el punto crítico, esto significa que la capa de humedad de localizada en la superficie ha

⁵Okos M. R., Narsimhan G., Singh R. K., and Weitnauer A. C. *Handbook of Food Engineering*. Marcel Dekker, New York, 1992

⁶Perry J. H. *Chemical Engineering Handbook*. Mc Graw Hill, New York, 6ta edición, 1992

sido casi evaporada en su totalidad.

- La segunda etapa, está conformada por el periodo de secado de la superficie insaturada, hasta lograr la completa evaporación del líquido contenido en la superficie del sólido.
- En la tercera etapa, la medida que controla es la velocidad a la que la humedad se mueve en el interior del sólido como resultado de gradientes de concentración, a medida que la concentración de humedad reduzca, la velocidad de secado aumente hasta que el contenido de humedad llegue a un punto de equilibrio con la humedad del aire de secado, es aquí donde el proceso de secado finaliza.

La cantidad final de humedad, determina el tiempo de secado y las condiciones requeridas para el proceso de secado. Las limitaciones de temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso, resultan debido a la degradación, decoloración, manchado, flamabilidad (provocada principalmente por polvos) y otros factores que afectan el alimento.

“La sensibilidad térmica fija la temperatura máxima a la cual la sustancia o alimento puede ser expuesto en el tiempo de secado, esto se debe a que por ejemplo, muchos materiales higroscópicos se pudren durante el secado”⁷.

La velocidad y uniformidad del secado, son dos factores importantes que modifican la calidad del proceso y evitan las pérdidas físicas, estructurales, químicas y nutricionales del alimento.

Un proceso de secado es inmejorable cuando el tiempo en el que se lleva a cabo es el menor posible, utilizando el mínimo de energía, lo cual está fuertemente relacionado con la eficiencia energética del secador empleado.

3.3. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE SECADO

3.3.1. Temperatura del aire

La temperatura desempeña un papel importante en los procesos de secado. En forma general, conforme se incrementa su valor se acelera la eliminación de humedad dentro de los límites posibles. En la práctica del secado, la elección de la temperatura se lleva a cabo tomando en consideración la especie que se vaya a someter al proceso.

La temperatura de secado está estrechamente relacionada con la humedad relativa del aire, ya que influye en la calidad organoléptica del producto final, por ejemplo, si la temperatura del aire de secado es alta y su humedad relativa es baja, existe peligro de que la humedad

⁷Mujumdar A. S. *Handbook of industrial drying*, volume 1 and 2. Marcel Dekker, New York, 1995

que será eliminada de la superficie de ellos alimentos se elimine más rápido de lo que el agua puede difundirse del interior húmedo del alimento al exterior y se forme un endurecimiento o costra en la superficie del material. Esta capa impermeable o límite, retarda la libre difusión de la humedad y puede ser evitada controlando la humedad relativa del aire circulante y la temperatura del mismo⁸.

Existen diversos niveles de temperaturas que se mantienen durante el proceso técnico de secado:

- **Temperatura de bulbo seco:** es aquella del ambiente, se mide con instrumentación ordinaria, como un termómetro de mercurio.
- **Temperatura superficial:** es la de la especie a secar, generalmente se mide por medio de un sensor infrarrojo.
- **Temperatura de bulbo húmedo:** es la temperatura de equilibrio dinámico obtenida por una superficie de agua cuando la velocidad de transferencia de calor por convección, a la misma, es igual a la transferencia de masa que se aleja de la superficie⁹.

Durante el proceso de secado, se origina un gradiente de temperatura con respecto al espesor del material, mismo que tiende a disminuir conforme se reduce el contenido de humedad.

3.3.2. El agua en los alimentos

El agua es un contribuyente importante a las propiedades organolépticas de los alimentos. La pérdida de agua en los alimentos ricos en ella, o la ganancia de agua en alimentos en que es escasa, reduce su calidad organoléptica y por tanto su aceptabilidad. Por otra parte, la presencia de agua a ciertas concentraciones en los alimentos, facilita su deterioro por acción de los microorganismos y las enzimas. Por lo tanto, retirando agua de los alimentos o haciéndola menos disponible se puede extender la vida útil de los mismos¹⁰.

Al considerar la influencia del contenido del agua en la estabilidad de los alimentos, no es el contenido total en agua lo importante, sino la cantidad de agua disponible para el crecimiento microbiano y la actividad química, para esto, es importante saber que una parte del contenido de agua de los alimentos se halla fuertemente ligada a puntos específicos de los componentes sólidos, esta agua se llama “agua ligada” y otra cantidad adicional se halla menos firmemente ligada, se volatiliza fácilmente, se pierde en el calentamiento, se congela primero y es la única

⁸Ress J. A. and Bettison J. *Procesado Térmico y Envasado de los Alimentos*. Acribia, España, 1991

⁹Perry J. H. *Chemical Engineering Handbook*. Mc Graw Hill, New York, 6ta edición, 1992

¹⁰Brennan J. G., J. R. Butters, and Cowell N. D. *Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos*. Acribia, España, 1998

disponible para el crecimiento de los microorganismos o para intervenir en las transformaciones hidrológicas, químicas, enzimáticas, etc., esta agua se llama “agua libre”^{11 12}.

3.3.3. Contenido de humedad del aire seco

El contenido de humedad en el aire seco humedad relativa es una variable importante en el secado de materiales con determinada humedad. Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua revisten gran interés en la etapa de post-cosecha de productos agrícolas, por el efecto que tiene la humedad del aire atmosférico sobre el contenido de humedad de los productos. El conocimiento de las condiciones de humedad y temperatura del aire es de gran importancia en muchos otros aspectos de la actividad humana ya que la pérdida de peso depende de la humedad del aire en la cámara de almacenamiento, si la humedad del aire es baja, la pérdida de peso del alimento es elevada. El aire normalmente tiene vapor de agua asociado, lo que da origen al que se denomina aire húmedo, que es una mezcla binaria de aire seco y vapor de agua. La cantidad de vapor presente en la mezcla puede variar entre cero y un valor correspondiente al estado de saturación. Esto último corresponde a la cantidad máxima de vapor de agua que el aire puede soportar a una temperatura determinada¹³.

3.3.4. Velocidad del aire

La velocidad del aire dentro del secador tiene como funciones principales, en primer lugar, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el material facilitando su evaporación, y en segundo lugar, transportar la humedad saliente del material. La capa límite que existe entre el material a secar y el aire juega un papel importante en el secado. Cuanto menor sea el espesor de esta capa límite, más rápida será la remoción de humedad. La forma de la corriente del aire es importante para la velocidad, una corriente turbulenta es mucho más eficaz que una laminar, pues la primera afecta una mayor forma la capa límite y el aire¹⁴.

Durante las primeras etapas de secado, la velocidad del aire desempeña un papel muy importante, sobre todo cuando el material contiene un alto contenido de humedad. A mayor velocidad, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y viceversa, si la

¹¹Brennan J. G., J. R. Butters, and Cowell N. D. *Las Operaciones de la Ingenieria de los Alimentos*. Acribia, España, 1998

¹²Badui D. S. *Quimica de los Alimentos*. Pearson Educacion, Mexico, 1993

¹³ASAE D271.2 ASAE. *Agricultural Engineers Yearbook*. St. Joseph, Michigan, 1980

¹⁴Maupoey Pedro Fito, Andrés Grau Ana Maria, Barat Baviera Jose Manuel, and Ana Maria Albors Sorolla. *Introduccion al Secado de Alimentos*. Universidad Politecnica de Valencia, España, 2001

velocidad del aire disminuye y el tiempo de secado aumenta. Por tal razón, para asegurar un secado rápido y uniforme es indispensable una circulación del aire fuerte y regular¹⁵.

Las ventajas de velocidades altas de aire, disminuyen en cuanto mayor es el espesor del material, menor el contenido de humedad inicial y la temperatura de bulbo seco inicial. En la práctica, la economía del proceso determina la velocidad del aire. Se utilizan velocidades mayores a 3 m/s solo en casos excepcionales (material muy húmedo), pero en general, la velocidad se considera entre 2 m/s y 3 m/s. En algunos casos, es recomendable utilizar velocidades de secado altas al inicio del proceso de secado, pero a medida que disminuye la humedad se sugiere disminuir la velocidad. Lo anterior es posible si se cuenta con ventiladores de velocidad variable¹⁶.

3.4. CLASIFICACIÓN PARA LOS SECADORES

Debido a que la humedad es uno de los factores que contribuyen seriamente a la descomposición de alimentos, se han diseñado secadores orientados al secado de cierto tipo de alimentos. Por ejemplo: granos, polvos, carne, frutas, vegetales, entre otros.

Estos dispositivos poseen las características necesarias para lograr un secado óptimo¹⁷.

La clasificación de los secadores es muy amplia, sin embargo, la más general esta dada por el método con el que se lleva a cabo la transferencia de calor, que puede ser:

1. Convección.
2. Conducción
3. Radiación

3.4.1. Secadores directos o convectivos

En el secado convectivo el calor se transfiere al sólido que se está secando mediante una corriente de aire caliente que además de transmitir el calor necesario para la evaporación del agua es también el agente transportador del vapor de agua que se elimina del sólido.

¹⁵Maupoey Pedro Fito, Andrés Grau Ana Maria, Barat Baviera Jose Manuel, and Ana Maria Albors Sorolla. *Introduccion al Secado de Alimentos*. Universidad Politecnica de Valencia, España, 2001

¹⁶Maupoey Pedro Fito, Andrés Grau Ana Maria, Barat Baviera Jose Manuel, and Ana Maria Albors Sorolla. *Introduccion al Secado de Alimentos*. Universidad Politecnica de Valencia, España, 2001

¹⁷Geankoplis C. J. *Procesos de Transporte y Operaciones unitarias*. CECSA, 1998

Este tipo de secadores son utilizados para secar partículas y alimentos en forma laminar o en pasta. El aire, los gases inertes, el vapor sobrecalentado, o gases de combustión directa pueden ser utilizados en sistemas de secado convectivos¹⁸.

Este tipo de equipos pueden operar de forma continua o discontinua.

3.4.2. Generación de aire caliente

En los secadores convectivos, el aire caliente es impulsado a través del secador por medio de ventiladores. Las fuentes de energía utilizadas para calentar el aire son muy variadas, entre ellas el gas natural ofrece mayor flexibilidad y una respuesta más rápida a menor coste, y también permite trabajar a temperaturas más altas. Sin embargo los requerimientos de seguridad son muy estrictos y rigurosos.

La mayoría de los secadores son calentados con vapor evitando así el contacto del producto que se está secando con los productos procedentes de la combustión. Las temperaturas que se consiguen en este caso son limitadas (normalmente en torno a los 150°C. Sin embargo se usan otro tipo de gases calientes como:

- Productos de la combustión.
- Gases inertes.
- Vapor recalentado.
- Aire calentado por radiación solar.

En este tipo de secadores el consumo de combustible es tanto mayor cuanto más bajo es el contenido de humedad residual del producto final.

Este tipo de secadores pueden ser continuos o intermitentes, siendo el costo de funcionamiento menor en los primeros y utilizándose los segundos para bajas capacidades de producción y para el tratamiento de productos que exigen manipulación especial¹⁹.

Algunos ejemplos de secadores convectivos o directos son:

3.4.2.1. Secadores de túnel:

Estos secadores, se utilizan para secar frutas y hortalizas de forma semicontinua, en instalaciones de gran capacidad de producción y consisten en túneles que pueden tener hasta unos 24 metros de longitud. El producto húmedo se extiende en capas uniformes sobre bandejas,

¹⁸Mujumdar A. S. *Handbook of industrial drying*, volume 1 and 2. Marcel Dekker, New York, 1995

¹⁹Geankoplis C. J. *Procesos de Transporte y Operaciones unitarias*. CECSA, 1998

las cuales se apilan en carretillas dejando espacios entre las bandejas para que pase el aire de secado. Las carretillas cargadas se introducen de una en una, a intervalos adecuados en el túnel. A medida que se introduce una carretilla por el “extremo húmedo” del túnel se retira otra de producto seco por el “extremo seco”. El aire se mueve mediante ventiladores, que lo hacen fluir a través de las mismas. Normalmente se emplean velocidades de aire entre 2.5 a 6 m/s²⁰.

3.4.2.2. Secadores rotativos:

Consiste en un cilindro que gira y, por lo común, tienen una leve inclinación en relación con la horizontal. La longitud del cilindro varía de 4 a más de 10 veces su diámetro, que oscila entre 0.3 hasta más de 3 metros. Los sólidos, por lo general granos de café semillas que se introducen por un extremo del cilindro se desplazan a lo largo de él, debido a la rotación, el efecto de la carga y la pendiente del cilindro, y se descargan por el otro extremo como producto terminado. Los gases que circulan por el cilindro pueden reducir o aumentar la velocidad de movimiento de los sólidos, según la circulación del gas, ya sea a contracorriente o siga una corriente paralela con la circulación de sólidos²¹.

3.4.2.3. Secadores por aspersión (spray):

Este tipo de secadores se usa ampliamente en la industria alimentaria para secar soluciones y papillas. El producto se rocía en una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas. El agua se evapora de dichas gotas con rapidez y se obtienen partículas secas de sólido que se separa de la corriente del gas. El flujo del gas y de líquido de la cámara de aspersión puede ser a contracorriente, en paralelo, o una combinación de ambos. Las principales características de este tipo de secado son unos tiempos de secado muy cortos de 1 a 20 segundos. Las gotas suelen tener diámetros de 10 a 20 micrómetros y por tanto, ofrecen al aire un área superficial por unidad de volumen muy grande, lo que da como resultado un proceso de secado muy rápido²².

Es necesario asegurarse de que las gotas o partículas húmedas no choquen ni se adhieran a las superficies solidas antes de que se hayan secado. Por consiguiente, se emplean cámaras

²⁰Brennan J. G., J. R. Butters, and Cowell N. D. *Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos*. Acribia, España, 1998

²¹Perry J. H. *Chemical Engineering Handbook*. Mc Graw Hill, New York, 6ta edición, 1992

²²Brennan J. G., J. R. Butters, and Cowell N. D. *Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos*. Acribia, España, 1998

bastante grandes. Los sólidos secos salen por el fondo de la cámara a través de un transportador de tornillo y los gases de escape fluyen hacia un separador de ciclón para filtrar las partículas muy finas. Las partículas que obtienen son muy ligeras y bastante porosas²³.

3.4.3. Secadores indirectos o por conducción

Los secadores por conducción o indirectos son apropiados para productos de poco espesor o para sólidos con alto grado de humedad. El calor para evaporación se suministra a través de superficies calientes (estáticas o en movimiento). El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. De igual forma que el secador directo, puede operar de forma continua o discontinua²⁴.

Algunos ejemplos de secadores indirectos son:

3.4.3.1. Secadores de tambor:

Los materiales fluidos y semifluidos, como soluciones, lodos, pastas y suspensiones como leche, sopas, alimentos infantiles, purés de papa, entre otros, pueden secarse en estos equipos. En este tipo de secadores, un tambor metálico giratorio, calentado internamente con vapor se sumerge en un tanque que contiene la sustancia por secar; una película delgada de la sustancia se retiene sobre la superficie del tambor. El espesor de la película se regula mediante un cuchillo repartidor; al ir girando el tambor, la humedad se evapora en el aire que lo rodea mediante el calor transferido a través del metal del tambor. El material seco se desprende continuamente de la superficie del tambor mediante un cuchillo. Para un secador de este tipo el factor que controla al proceso de secado es la transferencia de calor. El líquido o solución se calienta inicialmente hasta su punto de ebullición; entonces se desprende la humedad por ebullición a temperatura constante. Con frecuencia, los vapores se recogen en una campana con ventilación construida directamente sobre el secador²⁵.

Las ventajas del secado en tambores, son sus velocidades de secado altas y su economía en el uso del calor. La limitación principal este método es que solo puede aplicarse a alimentos líquidos, o en forma de papilla, capaces de resistir temperaturas relativamente altas (90°C) durante tiempos cortos de 2 a 30 segundos²⁶.

²³Geankoplis C. J. *Procesos de Transporte y Operaciones unitarias*. CECSA, 1998

²⁴Mujumdar A. S. *Handbook of industrial drying*, volume 1 and 2. Marcel Dekker, New York, 1995

²⁵Treybal R. E. *Operaciones de Transferencia de Masa*. Mc Graw Hill, New York, 2 edition, 2001

²⁶Brennan J. G., J. R. Butters, and Cowell N. D. *Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos*. Acribia, España, 1998

3.4.3.2. Secadores indirectos al vacío con anaqueles:

Es un gabinete cerrado con bandejas o anaqueles que opera al vacío. El calor se conduce a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles. Se usa principalmente para materiales sensibles a la temperatura o que se oxiden fácilmente.

3.4.4. Secadores por radiación

El secador por radiación se lleva a cabo mediante radiación electromagnética cuya longitud de onda se encuentra dentro del rango espectro solar y microondas²⁷.

3.4.4.1. Secadores solares:

Está formado principalmente por un gabinete cubierto cuya tapa consta de un material traslucido que deja pasar los rayos de sol, de esta manera se utiliza la energía de los rayos en forma de calor para lograr la evaporación de la humedad del sólido. Sin embargo, el funcionamiento de este secador depende de las condiciones climáticas y los tiempos de secado suelen ser largos, además de tener una capacidad de producción pequeña, aun cuando se trabaje en equipo. El desempeño de un secador se puede definir de acuerdo a su capacidad o efectividad energética. La tasa de humedad extraída (MER, kilogramos de humedad removida por hora) indica la capacidad del secador. La tasa de extracción de humedad específica (SMER, kilogramos de humedad removida por kilowatt-hora) define la efectividad de la energía usada en el proceso de secado²⁸.

3.4.5. Secadores con bomba de calor

Los secadores con bomba de calor son la coexistencia de dos sistemas ingenieriles: la bomba de calor y el secador.

El desarrollo en la tecnología del secado ha estimulado la necesidad de ahorrar energía, producir alimentos con mejor calidad demandados por el consumidor y minimizar el impacto ambiental.

Un mejor entendimiento del efecto de las condiciones de secado en la calidad del producto y el consumo de energía del equipo ha impulsado el manejo de los secadores con bomba de calor para diversas aplicaciones de secado.

²⁷Mujumdar A. S. *Handbook of industrial drying*, volume 1 and 2. Marcel Dekker, New York, 1995

²⁸Mujumdar A. S. *Handbook of industrial drying*, volume 1 and 2. Marcel Dekker, New York, 1995

Los secadores con bomba de calor permiten un proceso energéticamente eficiente, proporcionando calor al sistema y recuperándolo a través del funcionamiento interno de la misma²⁹.

Las ventajas que ofrecen este tipo de secadores son:

1. Eficiencias energéticas altas con recuperación de calor, resultando un consumo mínimo por unidad de agua removida.
2. Mejor calidad del producto mediante el control de temperatura.
3. Un amplio rango de condiciones de secado que va desde -20°C a 100°C (con calentamiento auxiliar y humedades relativas desde el 15 % a 80 %).

Las desventajas son:

1. Uso de clorofluorcarbonados (CFC's) en el ciclo refrigerante, los cuales no son ambientalmente amistosos.
2. Requiere mantenimiento regular de los componentes (compresor, filtros de refrigerante, evaporador, etc.) y cambio de refrigerante.
3. Control de proceso y diseño 4. Temperaturas de secado limitantes.

3.4.6. Secadores en bandejas:

También es llamado secador de anaqueles, de gabinetes o compartimentos. El funcionamiento de los secadores de bandejas depende del mantenimiento de una temperatura constante y una velocidad del aire uniforme sobre todo el material que se está secando. Conviene tener una circulación de aire con velocidad de 1 a 10 m/s para mejorar el coeficiente de transmisión de calor en la superficie y con el propósito de eliminar bolsas de aire estancado. La corriente de aire adecuada para este tipo de secadores depende de que el ventilador tenga una capacidad suficiente, del diseño de la red de ductos para modificar cambios repentinos de dirección y de desviadores correctamente ubicados. La corriente de aire no uniforme es uno de los problemas más graves que se presentan en el funcionamiento de los secadores de bandejas³⁰.

Es el secador más utilizado a nivel planta piloto, con calentamiento directo y modo de funcionamiento continuo o discontinuo, el material puede ser un sólido en forma de terrones o pasta, este se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal, el aire utilizado es arrojado por un ventilador y calentado mediante resistencias eléctricas, vapor de agua o mediante un gas inerte. Después del secado, se abre el gabinete y las bandejas se reemplazan con otras

²⁹Mujumdar A. S. *Handbook of industrial drying*, volume 1 and 2. Marcel Dekker, New York, 1995

³⁰Geankoplis C. J. *Procesos de Transporte y Operaciones unitarias*. CECSA, 1998

conteniendo más material para secar. Generalmente los secadores de bandejas operan por cargas, además tienen la desventaja de no secar el producto uniformemente, dependiendo de la posición en el secador. Por ello, se necesita girar las bandejas durante el proceso para lograr un secado uniforme³¹.

3.5. PERDIDAS DE PRESIÓN EN TUBERIA

Todo fluido real pierde energía al circular de un punto a otro en la conducción. Esta pérdida de energía se debe a la fricción que se produce entre el fluido y las paredes de la conducción así como por el paso del mismo a través de los obstáculos que se presentan en el ducto como: cambios de dirección, estrechamientos o cambios de sección, válvulas, derivaciones, manguitos, etc.

De este modo existen dos tipos de pérdidas de carga:

- Una debida a los tramos rectos de los ductos, llamada perdida de carga lineal.
- Y otra debida a los elementos singulares de la conducción llamada pérdidas de carga localizada.

Las características de los esfuerzos cortantes son muy distintas en función de que el flujo sea laminar o turbulento. En el caso de flujo laminar, las diferentes capas del fluido discurren ordenadamente, siempre en dirección paralela al eje de la tubería y sin mezclarse, siendo el factor dominante en el intercambio de cantidad de movimiento la viscosidad. En flujo turbulento, en cambio, existe una fluctuación tridimensional en la que la velocidad de las partículas, se superpone a los componentes de la velocidad. Es este el fenómeno de la turbulencia, que origina un fuerte intercambio de cantidad de movimiento entre las distintas capas de fluido, lo que da unas características especiales a este tipo de flujo³².

3.5.1. Pérdidas Lineales

Las pérdidas lineales son debidas a las tensiones cortantes de origen viscoso que aparecen entre el fluido y las paredes de la tubería.

³¹Okos M. R., Narsimhan G., Singh R. K., and Weitnauer A. C. *Handbook of Food Engineering*. Marcel Dekker, New York, 1992

³²CENGEL YUNUS A. and CIMBALA JHON M. *MECANICA DE FLUIDOS Fundamentos y Aplicaciones*. Mc Graw Hill, Mexico, 2006

El tipo de flujo, laminar o turbulento, depende del valor de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas, es decir el Numero de Reynolds Re ³³.

3.5.2. Pérdidas Singulares

Las pérdidas singulares son las producidas por cualquier obstáculo colocado en la tubería que suponga una mayor o menor obstrucción al paso del flujo y que se deben a fenómenos de turbulencia: entrada y salida de las tuberías, codos, válvulas, cambios de sección, etc. Normalmente son pequeñas comparadas con las perdidas lineales, salvo que se trate de válvulas casi completamente cerradas³⁴.

3.5.3. Factores de perdida friccional

Los factores más importantes que inciden en la pérdida de carga friccional son:³⁵

- Viscosidad dinámica.
- Densidad del flujo.
- Rugosidad de la tubería.
- Diámetro de la tubería.
- Temperatura del fluido.

3.5.4. Viscosidad Dinámica

Si pensamos que un fluido está formado por delgadas capas unas sobre otras, la viscosidad dinámica será el grado de rozamiento interno entre las capas de fluido. A causa de la viscosidad, será necesario ejercer una fuerza para obligar a una capa de fluido a deslizarse sobre la otra³⁶.

³³CENGEL YUNUS A. and CIMBALA JHON M. *MECANICA DE FLUIDOS Fundamentos y Aplicaciones*. Mc Graw Hill, Mexico, 2006

³⁴CENGEL YUNUS A. and CIMBALA JHON M. *MECANICA DE FLUIDOS Fundamentos y Aplicaciones*. Mc Graw Hill, Mexico, 2006

³⁵CENGEL YUNUS A. and CIMBALA JHON M. *MECANICA DE FLUIDOS Fundamentos y Aplicaciones*. Mc Graw Hill, Mexico, 2006

³⁶CENGEL YUNUS A. and CIMBALA JHON M. *MECANICA DE FLUIDOS Fundamentos y Aplicaciones*. Mc Graw Hill, Mexico, 2006

3.5.5. Régimen Laminar y Turbulento

Cuando un fluido circula por una tubería lo puede hacer en régimen laminar o turbulento. La diferencia entre estos dos regímenes se encuentra en el comportamiento de las partículas fluidas, que a su vez depende del balance entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas o de rozamiento.

La importancia que tiene el determinar el tipo de régimen de un fluido, radica en que influye directamente en las pérdidas de carga friccionales.

Otro parámetro importante es el Número de Reynolds que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las viscosas en el interior de una corriente, por lo que el régimen hidráulico va a depender su valor³⁷.

3.5.6. Flujo Laminar

El flujo laminar es el tipo de movimiento de un fluido cuando éste es perfectamente ordenado, estratificado, suave, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse. En este caso, la distribución de velocidades es curva, siendo cero en el contorno de la tubería y máxima al centro de la tubería.

A menudo se presenta en pequeñas velocidades, en tubos de pequeño diámetro y con fluidos viscosos. En estas condiciones, las fuerzas viscosas predominan sobre las de inercia³⁸.

3.5.7. Flujo Turbulento

Flujo turbulento se denomina al comportamiento del movimiento de un fluido que se da de forma caótica, en que las partículas se mueven desordenadamente.

El comportamiento de un fluido (en particular en lo que se refiere a las pérdidas de carga) depende de que el flujo sea laminar o turbulento³⁹.

De otra manera, se sabe que el tipo de flujo depende de:

- Densidad del fluido.
- Viscosidad dinámica del fluido.

³⁷CENGEL YUNUS A. and CIMBALA JHON M. *MECANICA DE FLUIDOS Fundamentos y Aplicaciones*. Mc Graw Hill, Mexico, 2006

³⁸CENGEL YUNUS A. and CIMBALA JHON M. *MECANICA DE FLUIDOS Fundamentos y Aplicaciones*. Mc Graw Hill, Mexico, 2006

³⁹CENGEL YUNUS A. and CIMBALA JHON M. *MECANICA DE FLUIDOS Fundamentos y Aplicaciones*. Mc Graw Hill, Mexico, 2006

- Diámetro del tubo.
- Velocidad promedio del tubo.

3.5.8. Numero de Reynolds

Es el coeficiente que relaciona la velocidad de un fluido, el diámetro de la tubería por la que pasa el fluido, su densidad y su viscosidad, con el fin de determinar si el flujo respectivo es laminar o turbulento.

El Número de Reynolds representa el efecto de la viscosidad del fluido sobre las condiciones de escurrimiento.

Los flujos que tienen grandes **Re** son debido a una velocidad elevada y/o una viscosidad baja. En este caso, el flujo tenderá a ser turbulento.

En el caso que los fluidos tengan viscosidad alta y/o que se muevan a una velocidad baja, tendrán **Re** bajos y tenderán a comportarse como flujo laminar⁴⁰.

⁴⁰CENGEL YUNUS A. and CIMBALA JHON M. *MECANICA DE FLUIDOS Fundamentos y Aplicaciones*. Mc Graw Hill, Mexico, 2006

4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SIMULACIÓN

Una simulación numérica está compuesta por 4 etapas:

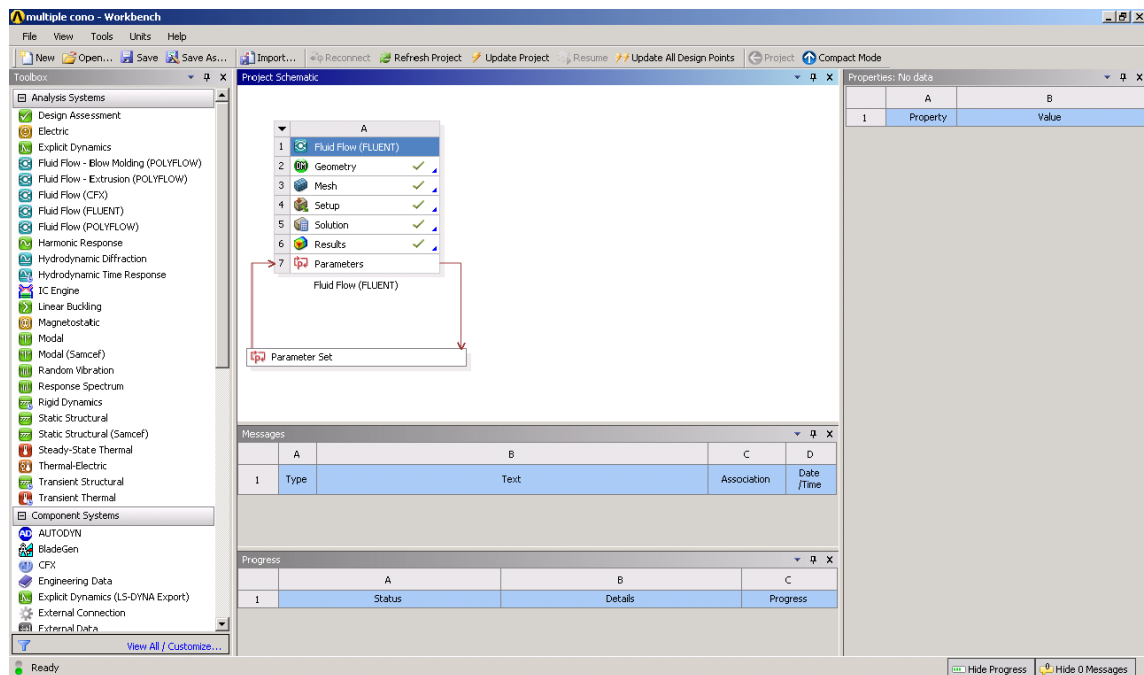


Figura 1: Herramienta de análisis de sistemas (FLUENT).

4.1. DECISIONES PRELIMINARES

En esta etapa se define de manera general, como se realizara la simulación, bajo que condiciones y parámetros físicos, que materiales se usaran, que simplificaciones se podrían aplicar al modelo numérico y que resultados se esperan obtener.

4.2. PRE PROCESAMIENTO

Durante la etapa de pre procesamiento se genera la geometría, el enmallado y configuración de la simulación.

La simulación CFD comienza con la modelación geométrica CAD del dominio a analizar, es decir representar en el computador la geometría de lo que se quiera simular, este dominio representa el fluido sobre el cual se quiere tener información, analizar y predecir el comportamiento ¹.

Una vez se tenga el dominio computacional o modelo CAD del fluido, éste se discretiza o divide espacialmente en celdas para formar una malla o grilla. Las mallas pueden ser regulares, definidos por celdas en formas de triángulos (2D) o en tetraedros (3D), o pueden ser regulares definidos por celdas en formas de cuadrado (2D) o hexaedros (3D). Luego de dividir el modelo geométrico en celdas se procede a generar la configuración de la simulación. Esto significa establecer materiales, velocidades en el contorno de la geometría, modelos adicionales para el análisis, etc ²³.

4.3. PROCESAMIENTO

Durante la etapa de procesamiento se resuelven numéricamente las ecuaciones fundamentales (tiempo de computo). Las propiedades físicas del fluido, son calculadas en cada uno de estos volúmenes como solución de las ecuaciones fundamentales ⁴.

4.4. POS PROCESAMIENTO

La etapa de pos procesamiento está definida para la visualización y análisis de resultados.

¹Orrego Santiago. SIMULACIÓN DE FLUIDOS UTILIZANDO COMPUTADORES: una moderna herramienta para el estudio y análisis de fluidos, November 2009

²Orrego Santiago. SIMULACIÓN DE FLUIDOS UTILIZANDO COMPUTADORES: una moderna herramienta para el estudio y análisis de fluidos, November 2009

³ANSYS. Inc. ANSYS Help (2011 sas ip, inc. all rights reserved. unauthorized use, distribution or duplication is prohibited)

⁴Orrego Santiago. SIMULACIÓN DE FLUIDOS UTILIZANDO COMPUTADORES: una moderna herramienta para el estudio y análisis de fluidos, November 2009

5 PROCESO DE SIMULACIÓN PARA EL MODELO PROPUESTO

5.1. MODELACIÓN GEOMÉTRICA CAD

Dentro de nuestro proceso de hipótesis se planteó el interrogante de cuanto podrían variar los resultados del flujo de aire, dependiendo de la base geométrica de nuestro elemento (múltiple de inyección). Con el fin de dar solución a esta interrogante se planteó el análisis de tres modelos con bases geométricas diferentes, las cuales se presentan a continuación.

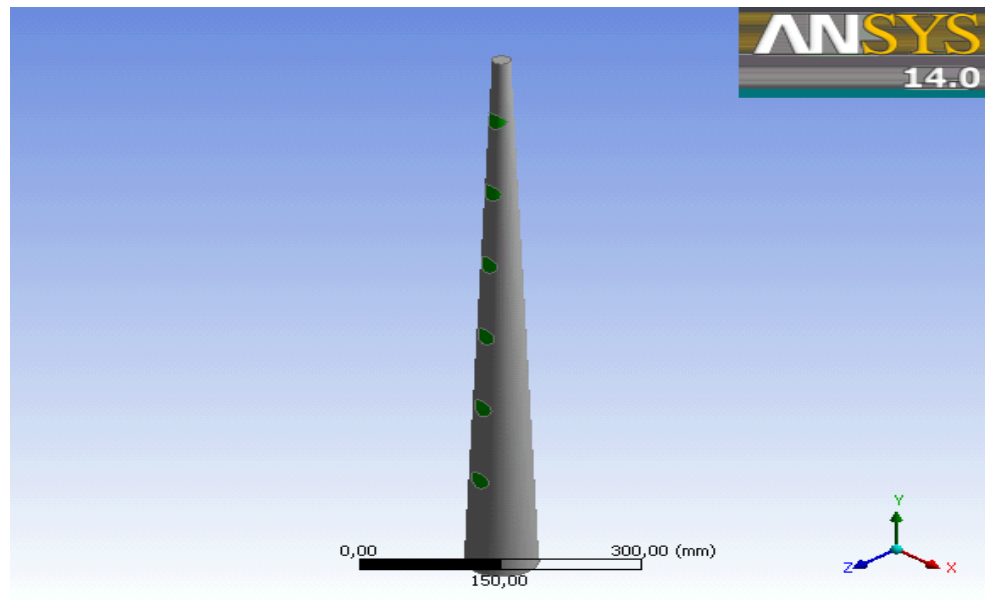


Figura 1: Geometría base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).

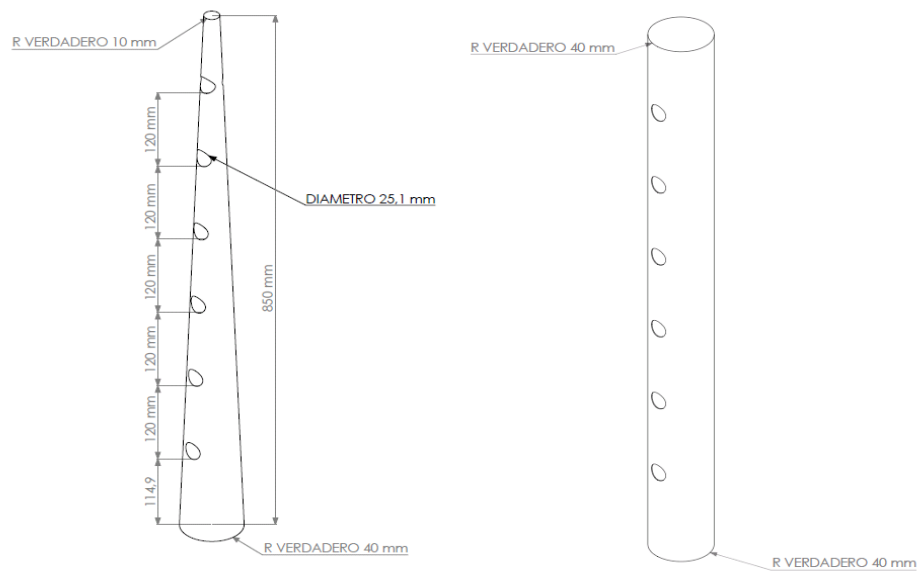


Figura 2: Dimensiones geometría base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).

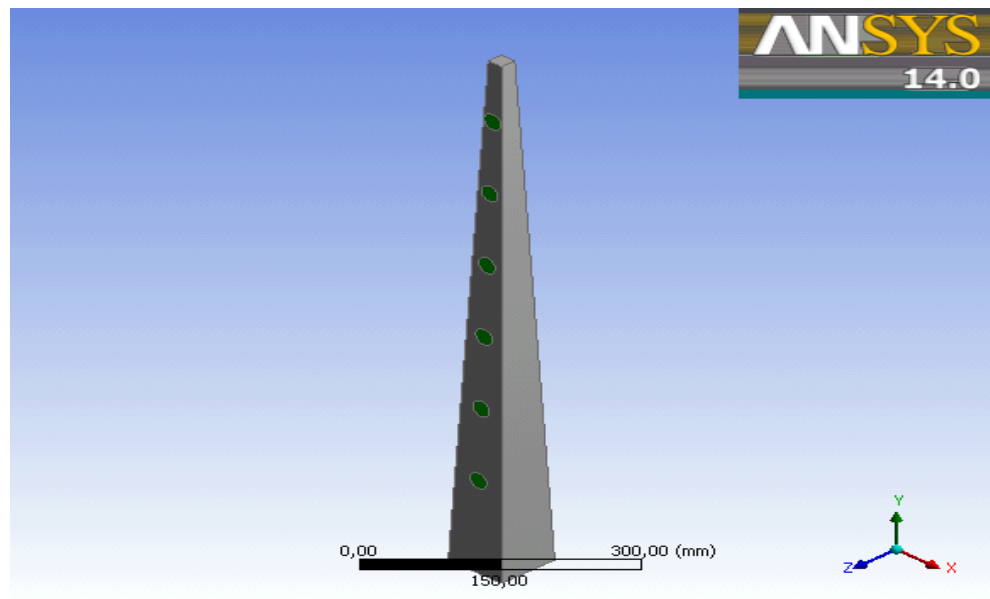


Figura 3: Geometría base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

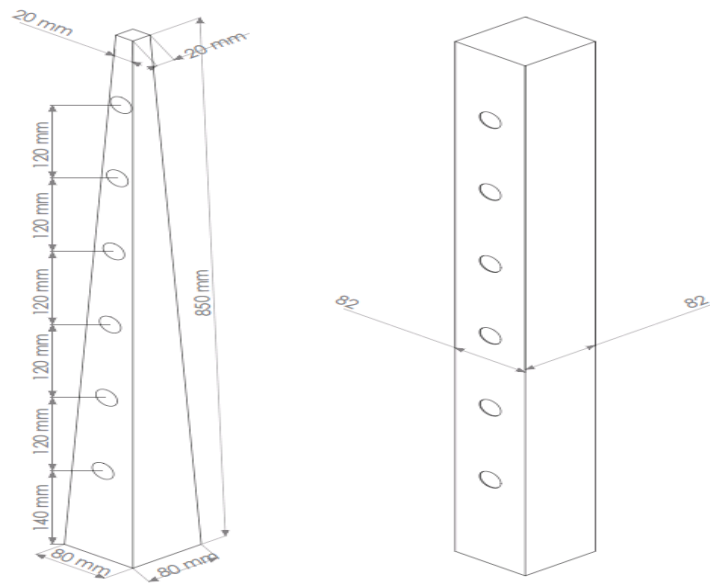


Figura 4: Dimensiones geometría base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

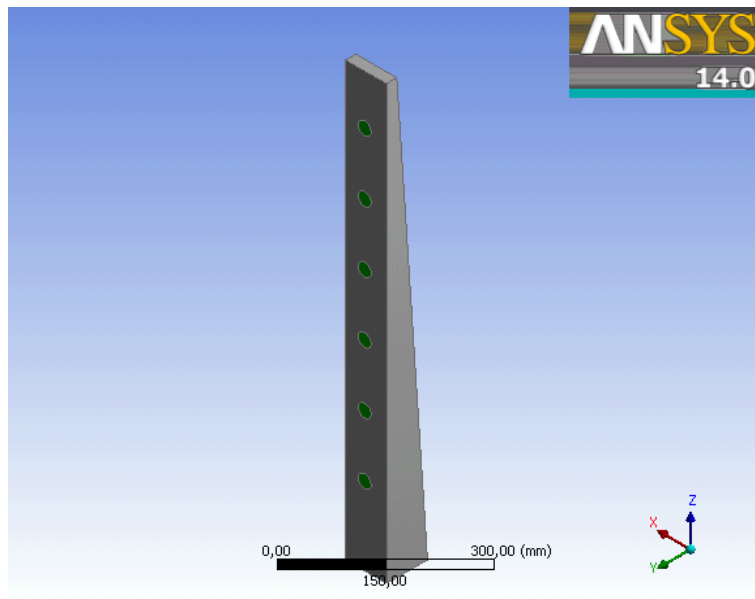


Figura 5: Geometría base cuadrada variando una sola dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

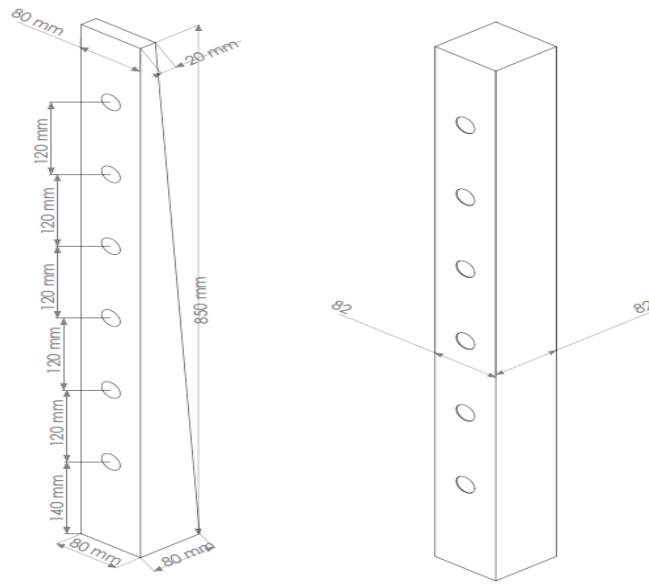


Figura 6: Dimensiones geometría base cuadrada variando una sola dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

5.2. MALLADO GEOMÉTRICAS CAD

A continuación se presenta el mallado de las geometrías a las cuales se les realiza el mismo tratamiento, el cual consiste en el uso de la metodología **CUTCELL** la cual se tiene un enfoque de mallado basado en volúmenes independientes (mallado de superficie creado automáticamente desde los límites del volumen de la malla), esta metodología es usada para el mallado de fluidos en las partes individuales del fluido, en partes multicuerpo (multibody) y ensambles de sólidos desconectados.

El algoritmo CutCell es adecuado para una amplia gama de aplicaciones, y debido a la gran fracción de celdas hexagonales en la malla, a menudo produce mejores resultados que los métodos tetraedicos.

Y la metodología **INFLATION** la cual es útil en CFD para ejercer controles en las capas límite del fluido donde se hacen más críticos los fenómenos físicos de los mismos ¹.

¹ANSYS. Inc. ANSYS Help (2011 sas ip, inc. all rights reserved. unauthorized use, distribution or duplication is prohibited)

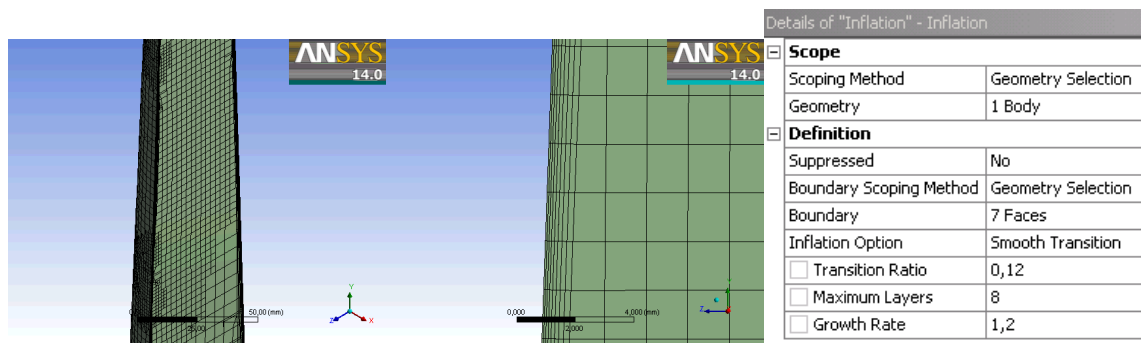


Figura 1: Mallado geometría base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).

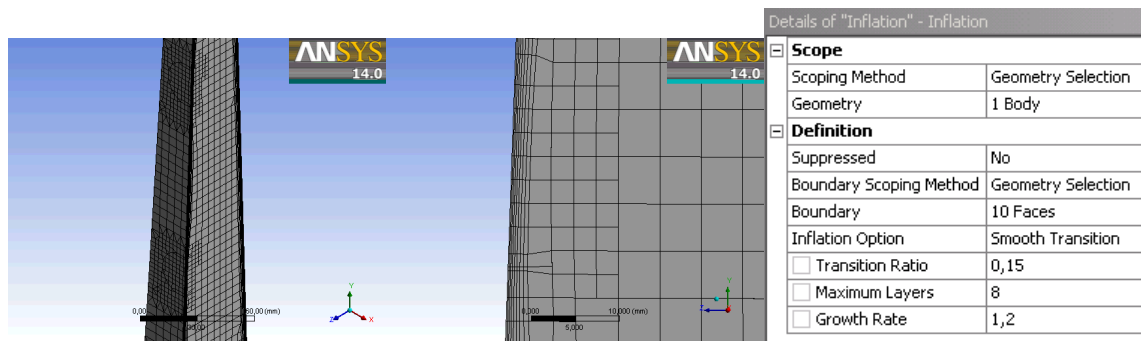


Figura 2: Mallado geometría base cuadrada variando toda sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

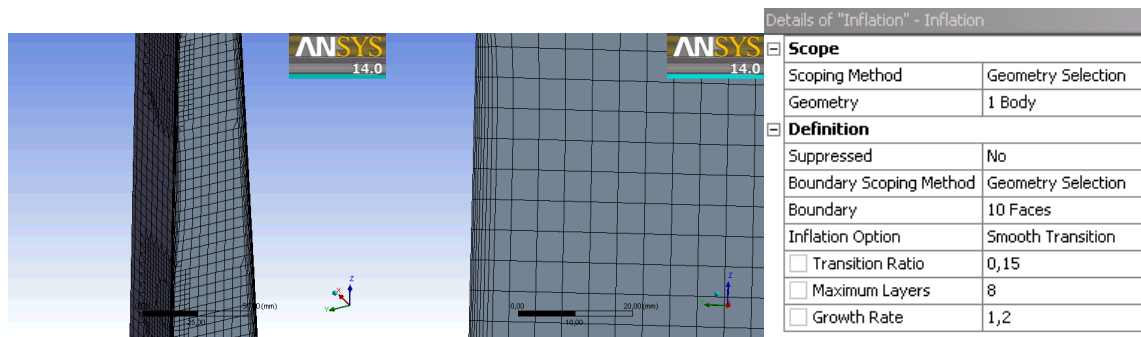


Figura 3: Mallado geometría base cuadrada variando una dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

5.3. CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

A continuación veremos las configuraciones de los modelos, del material, de las condiciones de las celdas, de las condiciones de las fronteras, de los valores de referencia y métodos para el solucionador.

5.3.1. MODELOS

En esta sección se seleccionan los modelos de los fenómenos físicos que se pretenden analizar.

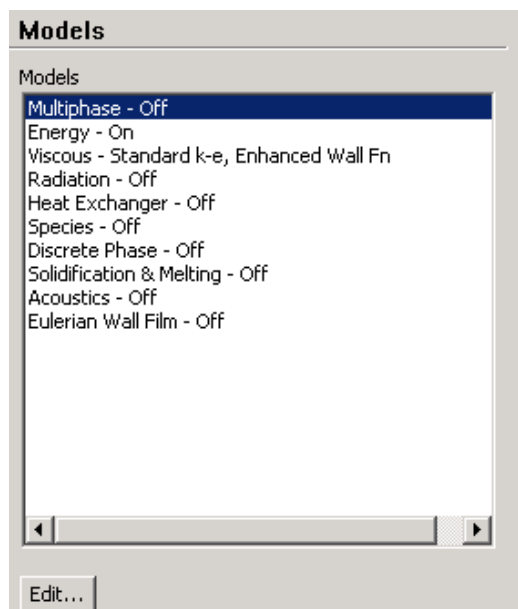


Figura 1: Modelos disponibles en ANSYS Fluent

■ MODELO DE ENERGÍA

Este modelo configura los parámetros relacionados con la energía o la transferencia de calor en el modelo.

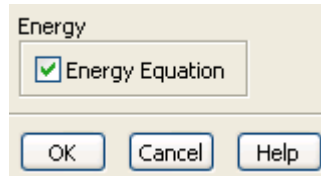


Figura 2: Esta opción activa / desactiva el cálculo de la energía en el modelo.

■ PRINCIPALES MODELOS DE TURBULENCIA

Los principales modelos de turbulencia, que fueron analizados dentro del proyecto con el fin de encontrar el modelo que se asemejara mejor con el fenómeno real estudiado.

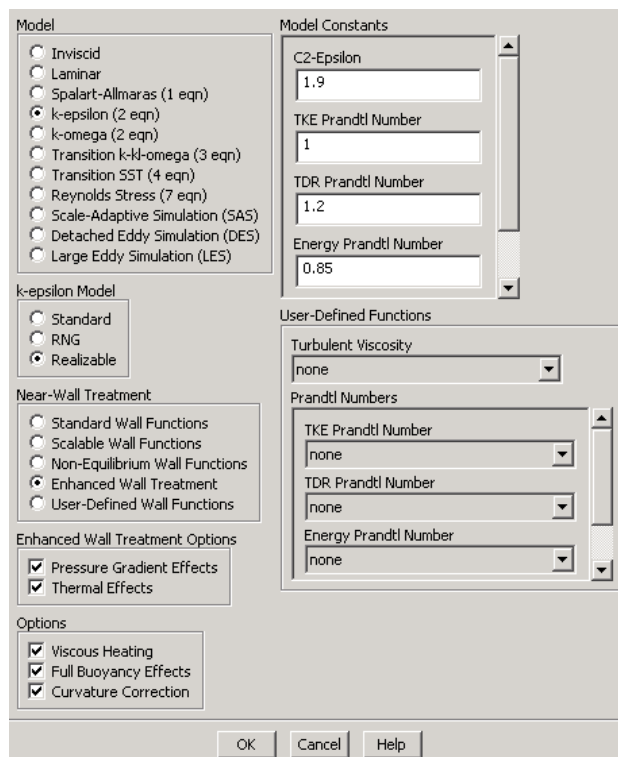


Figura 3: Cuadro de dialogo modelos de turbulencia.

1. MODELO Spalart-Allmaras

El modelo Spalart-Allmaras ² es un modelo de una ecuación, que resuelve una ecuación de conducción para el modelado de viscosidad cinemática (turbulenta) de Eddy. El modelo Spalart-Allmaras fue diseñado específicamente para aplicaciones aeroespaciales en la pared que implican flujos acotados y ha demostrado dar buenos resultados para capas límites sometidas a gradientes de presión adversos. También está ganando acogida en aplicaciones de turbo maquinaria. ³.

El modelo Spalart-Allmaras fue desarrollado para los flujos aerodinámicos. No está calibrado para flujos industriales, y se producen errores relativamente grandes para algunos flujos cortantes. Además no puede ser usado para predecir la turbulencia isotrópica ⁴.

2. MODELOS Estándar, RNG, y Realizable $k - \varepsilon$

Los tres modelos tienen formas similares, con las ecuaciones de conducción para k y ε . Las principales diferencias en los modelos son los siguientes: ⁵

- El método de cálculo de la viscosidad en turbulencia.
- Los números Prandtl de turbulencia que rigen la difusión en turbulencia de k y ε .
- La generación y destrucción de los términos de la ecuación ε .

3. MODELO Estándar $k - \varepsilon$

El modelo estándar $k - \varepsilon$ en ANSYS FLUENT se ha convertido en el caballo de batalla de la práctica los cálculos de ingeniería de flujo en el tiempo desde que fue propuesto por Launder y Spalding ⁶.

La robustez, la economía, y razonable precisión para un amplio rango de flujos turbulentos explican su popularidad en simulaciones de flujo industrial y de transferencia de calor. Se trata de un modelo semi-empírico, y la derivación de las ecuaciones del modelo se basa en consideraciones fenomenológicas y el empirismo. El modelo estándar

²Spalart P. and Allmaras S. *A one-equation turbulence model for aerodynamic flows*. Technical Report AIAA-92-0439. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992

³ANSYS. Inc. ANSYS Help (2011 sas ip, inc. all rights reserved. unauthorized use, distribution or duplication is prohibited)

⁴ANSYS. Inc. ANSYS Help (2011 sas ip, inc. all rights reserved. unauthorized use, distribution or duplication is prohibited)

⁵ANSYS. Inc. ANSYS Help (2011 sas ip, inc. all rights reserved. unauthorized use, distribution or duplication is prohibited)

⁶Launder B. E. and Spalding D. B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England, 1972

$k - \varepsilon$ ⁷ es un modelo basado en modelos de ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y su tasa de disipación (ε).

El modelo de ecuación de transporte para (k) se deriva de la ecuación exacta, mientras que el modelo de la ecuación de transporte para (ε) se obtuvo usando un razonamiento físico y tiene poca semejanza con su contraparte matemáticamente exacta. En la derivación del modelo $k - \varepsilon$, la hipótesis es que el flujo es completamente turbulento, y los efectos moleculares de viscosidad son insignificantes. El modelo estándar $k - \varepsilon$ es plenamente válido sólo para flujos totalmente turbulentos⁸.

4. MODELO RNG $k - \varepsilon$

El modelo RNG $k - \varepsilon$ ⁹ fue obtenido utilizando una técnica estadística denominada teoría de la renormalización de grupo. Esto es similar en forma al modelo estándar $k - \varepsilon$, sino que incluye las mejoras siguientes:

- El modelo RNG tiene un término adicional en la ecuación ε que mejora la precisión de los flujos esforzados rápidamente.
- El efecto de remolino en la turbulencia está incluido en el modelo RNG de generador de números aleatorios, la mejora de la precisión de las corrientes de remolino.
- La teoría RNG proporciona una fórmula analítica para números de Prandtl turbulentos, mientras que el modelo estándar $k - \varepsilon$ utiliza el usuario, valores constantes.
- Mientras que el modelo estándar $k - \varepsilon$ es un modelo de alto número de Reynolds, la teoría RNG proporciona una fórmula diferencial analítica derivada de la viscosidad efectiva que da cuenta de los efectos de bajo número de Reynolds. El uso eficaz de esta función, sin embargo, dependen de un tratamiento adecuado de la región próxima a la pared del flujo.

Estas características hacen que el modelo RNG $k - \varepsilon$ más preciso y fiable para una clase más amplia de los flujos que el modelo estándar $k - \varepsilon$.

El modelo de turbulencia RNG $k - \varepsilon$ se deriva de las ecuaciones de Navier-Stokes instantáneas, utilizando una técnica matemática llamada "grupo de renormalización"

⁷Launder B. E. and Spalding D. B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England, 1972

⁸ANSYS. Inc. ANSYS Help (2011 sas ip, inc. all rights reserved. unauthorized use, distribution or duplication is prohibited)

⁹Yakhot V. and Orszag S. A. *Renormalization Group Analysis of Turbulence I Basic Theory*. Journal of Scientific Computing, 1986

métodos (RNG) ¹⁰¹¹.

5. **MODELO Realizable $k - \varepsilon$**

El modelo de realizable $k - \varepsilon$ ¹² se diferencia del modelo estándar $k - \varepsilon$ de dos maneras importantes:

- El modelo realizable $k - \varepsilon$ contiene una formulación alternativa para la viscosidad turbulenta.
- Una modificación de la ecuación de conducción para la rata de disipación, ε , se ha derivado de una ecuación exacta para la conducción de la fluctuación vorticidad media cuadrática.

El término "realizable" significa que el modelo cumpla con ciertas limitaciones matemáticas sobre los esfuerzos de Reynolds, en consistencia con la física de flujos turbulentos. Ni el modelo estándar $k - \varepsilon$, ni el modelo RNG $k - \varepsilon$ es realizable.

Tanto los modelos realizables y RNG $k - \varepsilon$ han mostrado mejoras sustanciales en el modelo estándar $k - \varepsilon$, donde las características de flujo incluyen fuertes curvas aerodinámicas, vórtices, y rotaciones. Dado que el modelo es todavía relativamente nuevo, no está claro exactamente en qué casos el modelo de realizable $k - \varepsilon$ supera consistentemente el modelo de RNG. Sin embargo, los estudios iniciales han demostrado que el modelo de realizable proporciona el mejor rendimiento de todas las versiones del modelo $k - \varepsilon$ para varias validaciones de los flujos separados y flujos complejos con características de flujo secundarias ¹³.

6. **MODELO Estándar y SST $k - \omega$**

A continuación se presentan el modelo estándar ¹⁴ y de esfuerzo cortante SST $k - \omega$ ¹⁵. Ambos modelos tienen formas similares, con las ecuaciones de transporte para k y ω . Las principales formas en que el modelo de SST ¹⁶, se diferencia del modelo estándar son los siguientes:

¹⁰Orszag S. A., Yakhot V., Flannery W. S., Boysan F., Choudhury D., Maruzewski J., and Patel B. *Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations*. In International Conference on Near- Wall Turbulent Flows. Tempe, Arizona, 1993

¹¹ANSYS. Inc. ANSYS Help (2011 sas ip, inc. all rights reserved. unauthorized use, distribution or duplication is prohibited)

¹²Shih T.H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., and Zhu J. *A New $k - \text{Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation}$* . Computers fluids edition, 1995

¹³ANSYS. Inc. ANSYS Help (2011 sas ip, inc. all rights reserved. unauthorized use, distribution or duplication is prohibited)

¹⁴Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD*, volume DCW Industries. Inc. La Canada, California, 1998

¹⁵Menter F. R. *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*. AIAA Journal, August 1994

¹⁶Menter F. R., Kuntz M., and Langtry R. *Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model*. editors-

- Cambio gradual del modelo estándar $k - \omega$ en la región interior de la capa límite hacia una versión de número de Reynolds alto del modelo $k - \varepsilon$ en la parte externa de la capa límite.
- Cambio de la formulación para la turbulencia en la viscosidad para dar cuenta de los efectos de conducción de los principales esfuerzos cortantes ¹⁷.

7. MODELO Estándar $k - \omega$

El modelo estándar $k - \omega$ en ANSYS FLUENT se basa en el modelo de Wilcox $k - \omega$ ¹⁸, que incorpora modificaciones para efectos de números de Reynolds bajos, la compresibilidad, y difusión de flujo cortante. Uno de los puntos débiles del modelo de Wilcox es la sensibilidad de las soluciones para valores para k y ω fuera de la capa cortante (sensibilidad de flujo libre). Mientras que la nueva formulación implementada en ANSYS FLUENT ha reducido esta dependencia, todavía puede tener un efecto significativo en la solución, especialmente para los flujos cortantes libres ¹⁹.

El modelo estándar $k - \omega$ es un modelo empírico basado en las ecuaciones del modelo de conducción para la turbulencia en la energía cinética (k) y la tasa específica de disipación (ω), que también se puede considerar como la relación entre k y ε ²⁰²¹.

8. MODELO de Conducción de Esfuerzos Cortantes SST $k - \omega$

El modelo de Conducción de Esfuerzos Cortantes SST $k - \omega$ fue desarrollado por Menter ²², para mezclar eficazmente la formulación robusta y la precisa del modelo $k - \omega$, en la región cercana a la pared con la independencia de corrientes libres en el campo lejano del modelo $k - \varepsilon$. Para lograr esto el modelo $k - \varepsilon$ se convirtió en una formulación $k - \omega$. El modelo SST $k - \omega$ es similar al modelo estándar $k - \omega$, pero incluye los siguientes refinamientos ²³:

- El modelo estándar $k - \omega$ y el modelo $k - \varepsilon$ transformado son ambos multiplicados

Turbulence, Heat and Mass Transfer. In K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, begell house inc edition, 2003

¹⁷ANSYS. Inc. ANSYS Help (2011 sas ip, inc. all rights reserved. unauthorized use, distribution or duplication is prohibited)

¹⁸Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD*, volume DCW Industries. Inc. La Canada, California, 1998

¹⁹Menter F. R. *Review of the SST Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective*, volume 23. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2009

²⁰Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD*, volume DCW Industries. Inc. La Canada, California, 1998

²¹ANSYS. Inc. ANSYS Help (2011 sas ip, inc. all rights reserved. unauthorized use, distribution or duplication is prohibited)

²²Menter F. R. *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*. AIAA Journal, August 1994

²³ANSYS. Inc. ANSYS Help (2011 sas ip, inc. all rights reserved. unauthorized use, distribution or duplication is prohibited)

por una función de mezclado y ambos modelos son sumados juntos. La función de mezclado es diseñada para ser una en la región cercana a la pared, que activa el modelo estándar $k - \omega$, y “0” lejos de la superficie que activa el modelo transformado $k - \varepsilon$.

- El modelo SST incorpora un amortiguador de difusión longitudinal, y un término derivado en la ecuación ω .
- La definición de turbulencia en la viscosidad se modifica para tener en cuenta la conducción de los esfuerzos constantes en la turbulencia.
- Las constantes de modelación son diferentes.

5.3.2. MATERIAL

El material al que se hace referencia es el material del fluido que en este proyecto es aire a temperatura ambiente aproximadamente de 27 °C.

The screenshot shows the 'Create/Edit Materials' dialog box. The 'Name' field is 'air'. The 'Material Type' is 'fluid'. The 'Chemical Formula' field is empty. The 'FLUENT Fluid Materials' list includes 'air'. The 'Mixture' is set to 'none'. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. The 'Properties' section shows the following values:

Property	Value
Density (kg/m³)	constant 1.225
Cp (Specific Heat) (J/kg-K)	constant 1006.43
Thermal Conductivity (W/m-K)	constant 0.0242
Viscosity (kg/m-s)	constant 1.7894e-05

Buttons at the bottom: Change/Create, Delete, Close, Help.

Figura 4: Cuadro de dialogo de las propiedades físicas de los materiales.

5.3.3. CONDICIONES DE LAS CELDAS

En esta sección se realiza la configuración de las propiedades físicas, como presión operativa (atmosférica = 101325 Pa), gravedad ($9,81 \frac{m}{s^2}$) y temperatura operativa aproximada de (27 °C), que regirán a las celdas de las geometrías.

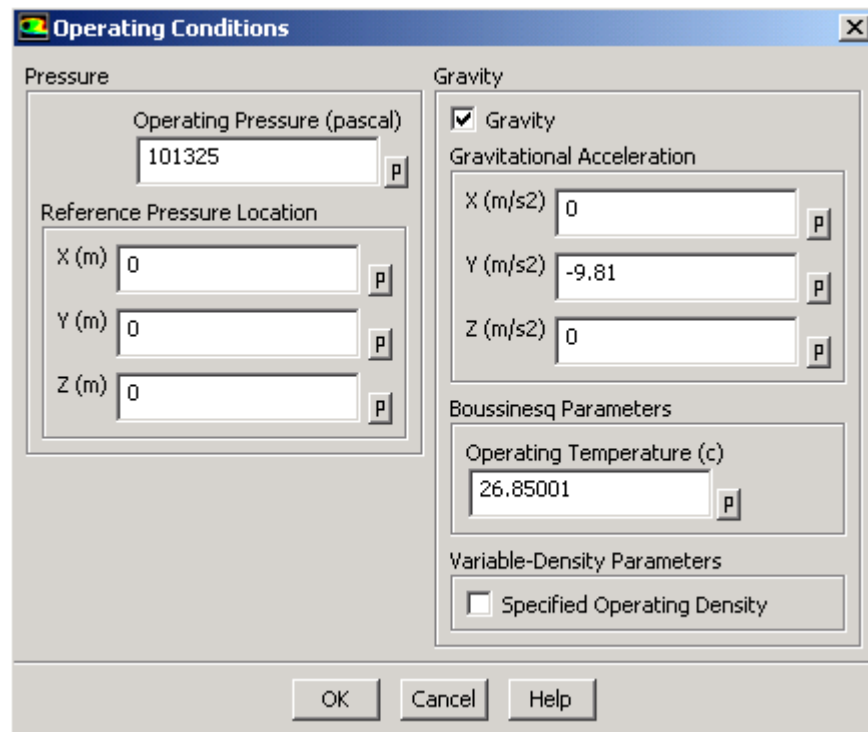


Figura 5: Cuadro de dialogo de las condiciones operativas de las celdas.

5.3.4. CONDICIONES DE LAS FRONTERAS

En esta etapa se procede con la configuración de los parámetros o condiciones de las fronteras como las entradas, salidas y los límites o paredes.

5.3.4.1. Entrada (Inlet)

En el cuadro de dialogo podemos configurar las condiciones operativas de la entrada como velocidad, dirección, presión manométrica y de acuerdo con el modelo de turbulencia seleccionado [5.3.1], se especifica el método y parámetros para el cálculo de la misma.

Velocity Inlet

Zone Name
inlet

Momentum | Thermal | Radiation | Species | DPM | Multiphase | UDS

Velocity Specification Method: Magnitude and Direction

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude (m/s): 5 constant

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 180 constant

Coordinate System: Cartesian (X, Y, Z)

X-Component of Flow Direction: 0 constant

Y-Component of Flow Direction: 1 constant

Z-Component of Flow Direction: 0 constant

Turbulence

Specification Method: Intensity and Hydraulic Diameter

Turbulent Intensity (%): 10

Hydraulic Diameter (m): Dh1

OK Cancel Help

Figura 6: Cuadro de dialogo Inlet Momentum.

Velocity Inlet

Zone Name
inlet

Momentum | Thermal | Radiation | Species | DPM | Multiphase | UDS

Temperature (c): 26.85001 constant

OK Cancel Help

Figura 7: Cuadro de dialogo Inlet Thermal.

5.3.4.2. Salidas (Outlets)

En el cuadro de dialogo podemos configurar las condiciones operativas de las salidas como dirección, presión manométrica y de acuerdo con el modelo de turbulencia seleccionado [5.3.1], se especifica el método y parámetros para el cálculo de la misma.

En este proyecto las condiciones operativas para la simulación de las salidas serán iguales.

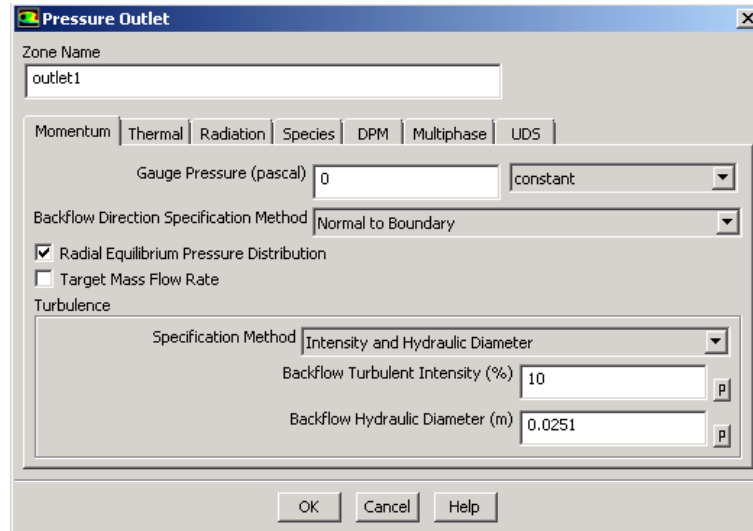


Figura 8: Cuadro de dialogo Outlet Momentum.

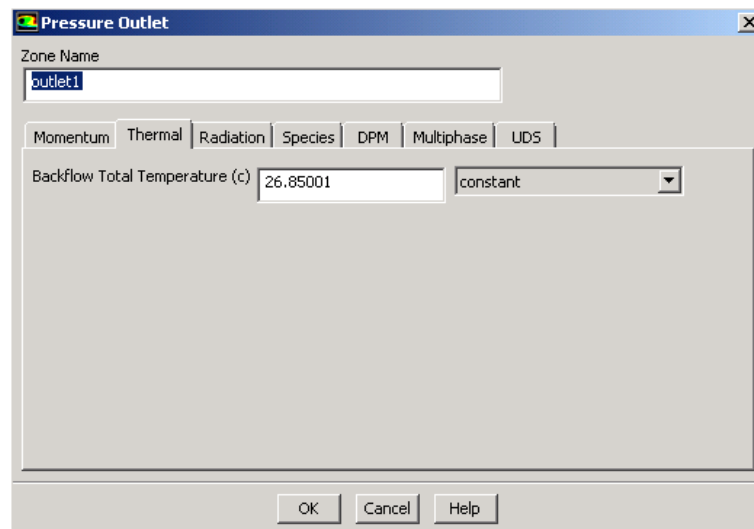


Figura 9: Cuadro de dialogo Outlet Thermal.

5.3.5. VALORES DE REFERENCIA

Los valores de referencia son las propiedades físicas que se asignan a las celdas para la solución de las ecuaciones por parte del software, los cuales pueden ser asignados desde las fronteras.

Reference Values

Compute from
inlet

Reference Values

Area (m2)	1
Density (kg/m3)	1.225
Enthalpy (J/kg)	0
Length (m)	1
Pressure (pascal)	180
Temperature (C)	26.85001
Velocity (m/s)	5
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

Reference Zone
fluid

Figura 10: Cuadro de dialogo de los valores de referencia para las celdas

5.3.6. MÉTODOS PARA EL SOLUCIONADOR

En ANSYS FLUENT, están disponibles dos tecnologías para la el solucionador:

1. Basado en la presión.
2. Basado en la densidad.

Ambos solucionadores se pueden utilizar para una amplia gama de flujos, pero en algunos casos, una formulación puede funcionar mejor (producir una solución más rápidamente o resolver mejor ciertas características del flujo) que el otro. Los enfoques basados en la presión

y basados en la densidad difieren en la forma en que las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía se resuelven.

El solucionador basado en la presión tradicionalmente se ha utilizado para flujos incompresibles y ligeramente compresibles. El enfoque basado en la densidad, por otra parte, fue originalmente diseñado para flujos compresibles de alta velocidad. Ambos enfoques son aplicables hoy día a una amplia gama de flujos (de incompresible a altamente compresible), pero el origen de la formulación basada en la densidad puede darle una ventaja en la precisión sobre el solucionador basado en la presión, en flujos compresibles de alta velocidad.

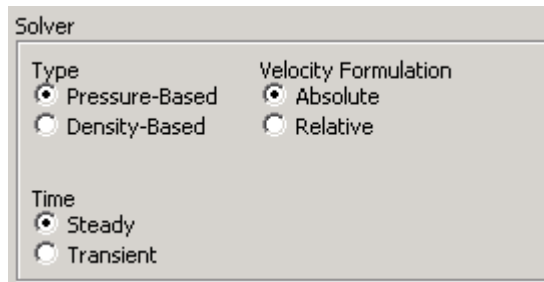


Figura 11: Selección del método del solucionador.

5.4. INICIALIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Antes de comenzar la simulación CFD, se debe proporcionar a ANSYS Fluent una primer "conjetura" para el campo de flujo de la solución. En muchos casos, se debe tener un cuidado especial para proporcionar una solución inicial que permita que la solución final deseada pueda alcanzarse. Para la simulación numérica el flujo debe ser inicializado a un flujo supersónico, o simplemente ahogarlo y permanecer subsónico ²⁴.

²⁴ANSYS. Inc. ANSYS Help (2011 sas ip, inc. all rights reserved. unauthorized use, distribution or duplication is prohibited)

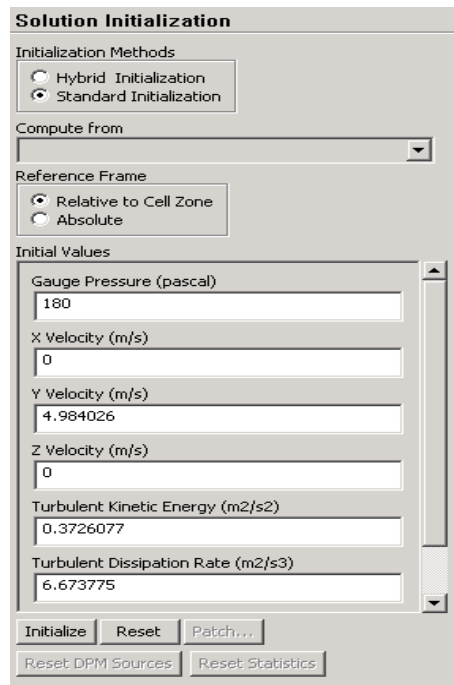


Figura 1: Configuración del método de inicialización.

5.5. INICIO DE LA SOLUCIÓN

Para poder dar inicio a la solución se debe realizar la configuración del número de iteraciones los límites para la convergencia y los intervalos de reportes.

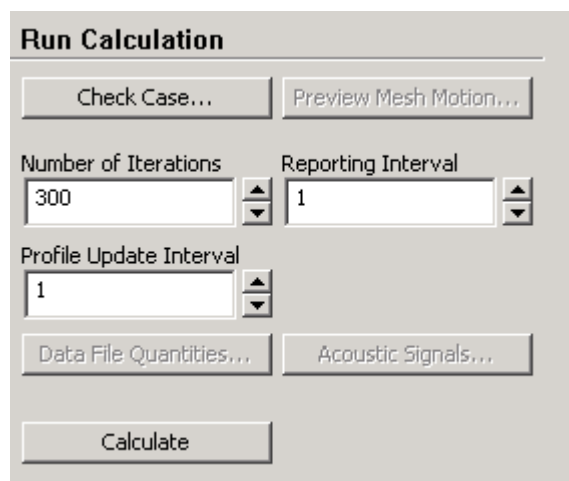


Figura 1: Configuración del número de iteraciones.

Durante la solución se pueden observar el comportamiento de los resultados en un diagrama de proceso de iteración de las ecuaciones de movimiento, continuidad y energía entre otros dependiendo de los modelos de fenómenos físicos configurados previamente [5.3.1].

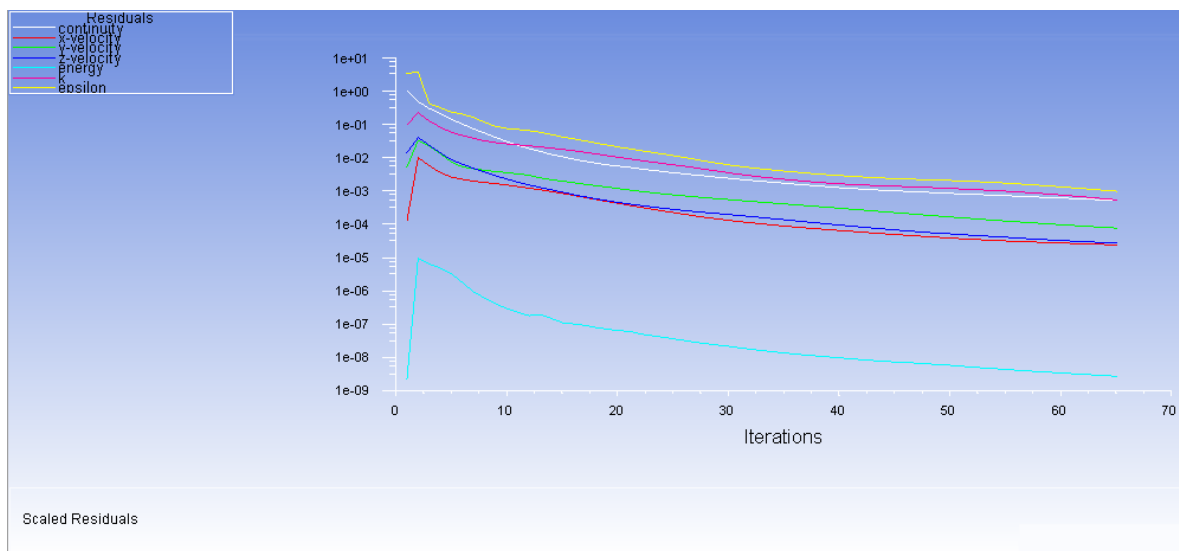


Figura 2: Diagrama del proceso de iteración.

5.6. POS-PROCESAMIENTO

La etapa de pos-procesamiento podremos hacer la visualización y el análisis de resultados, mediante diagramas de comportamiento de la velocidad, la presión y la temperatura.

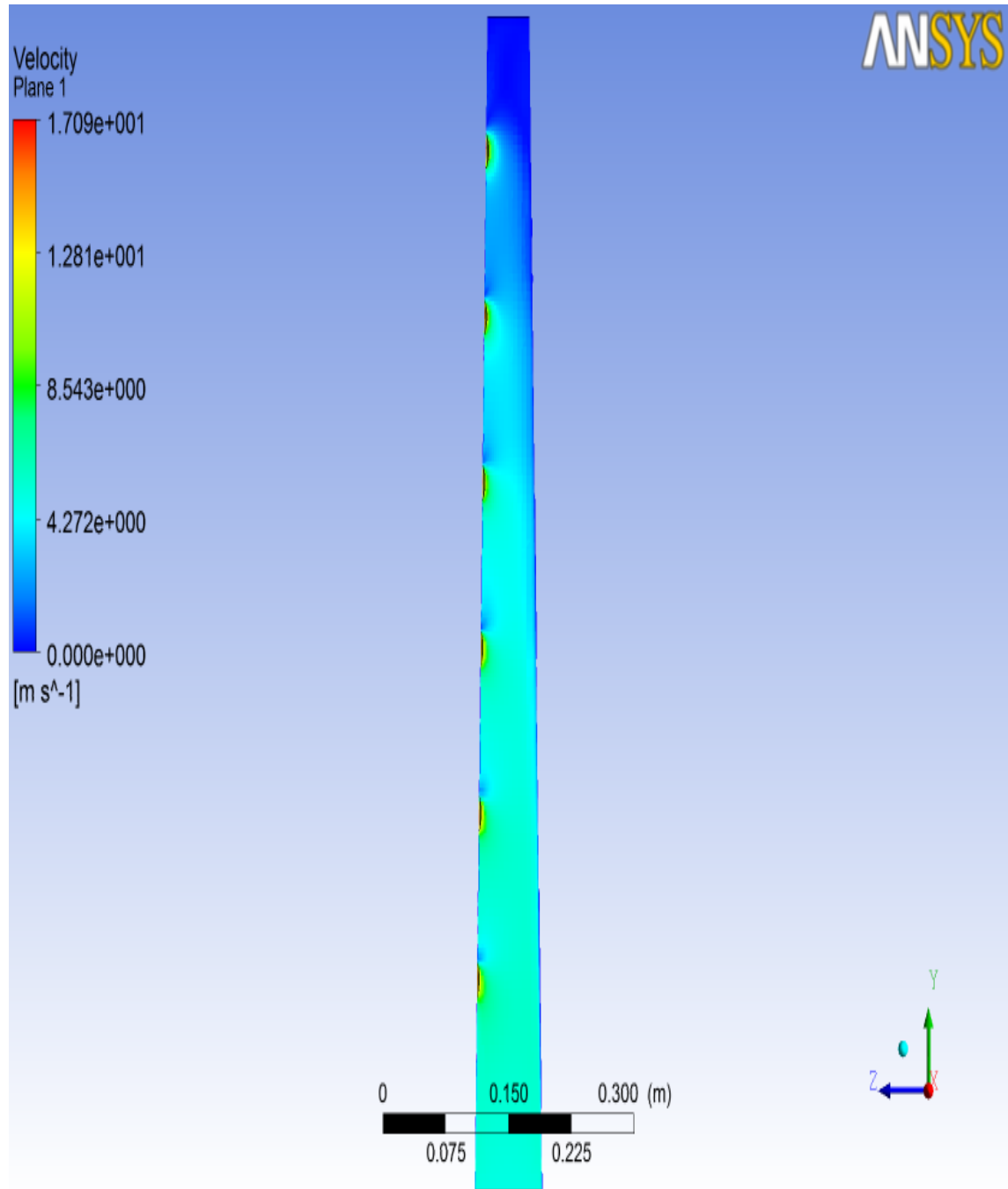


Figura 1: Diagrama del comportamiento de la velocidad al interior del modelo geométrico.

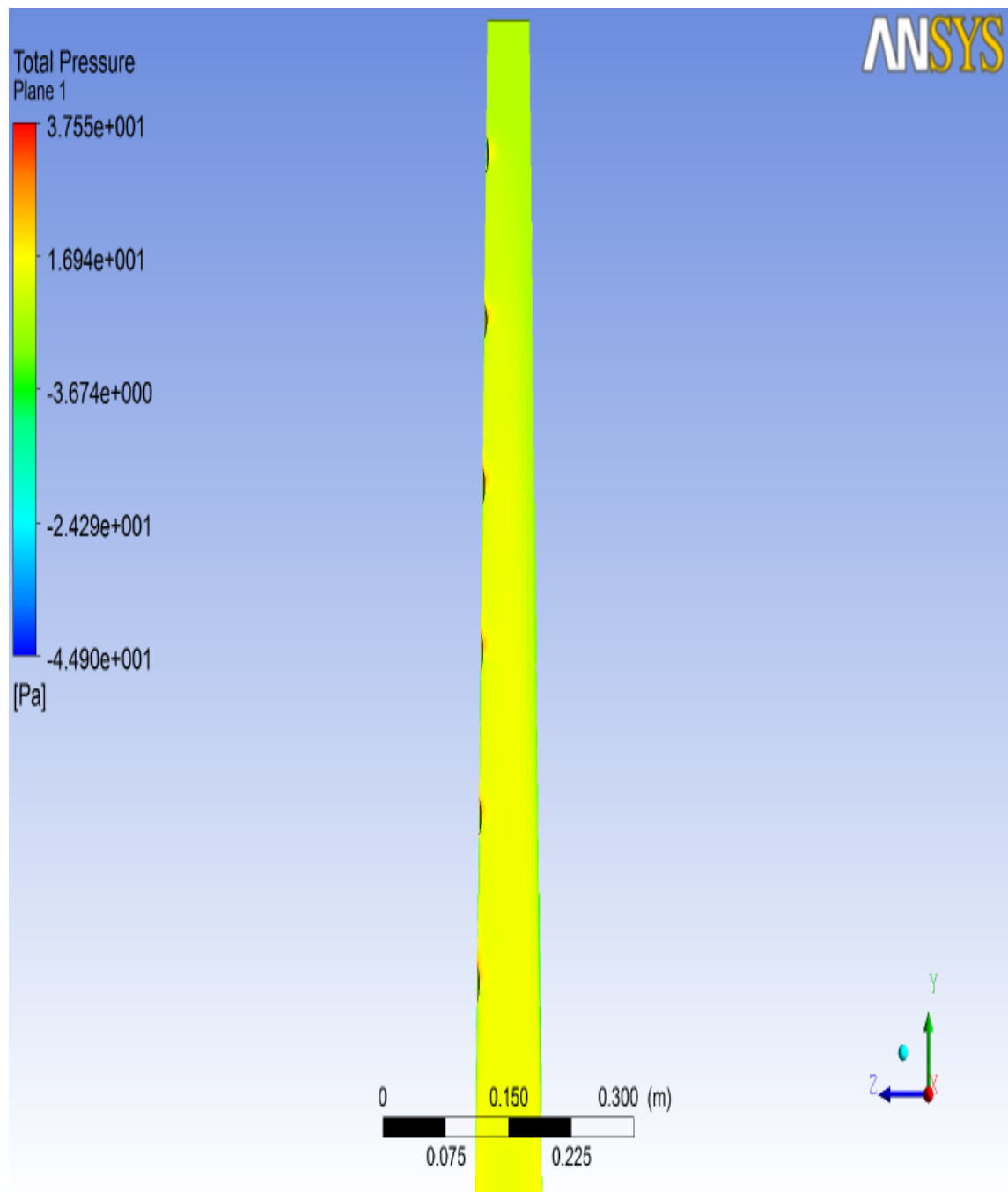


Figura 2: Diagrama del comportamiento de la presión al interior del modelo geométrico.

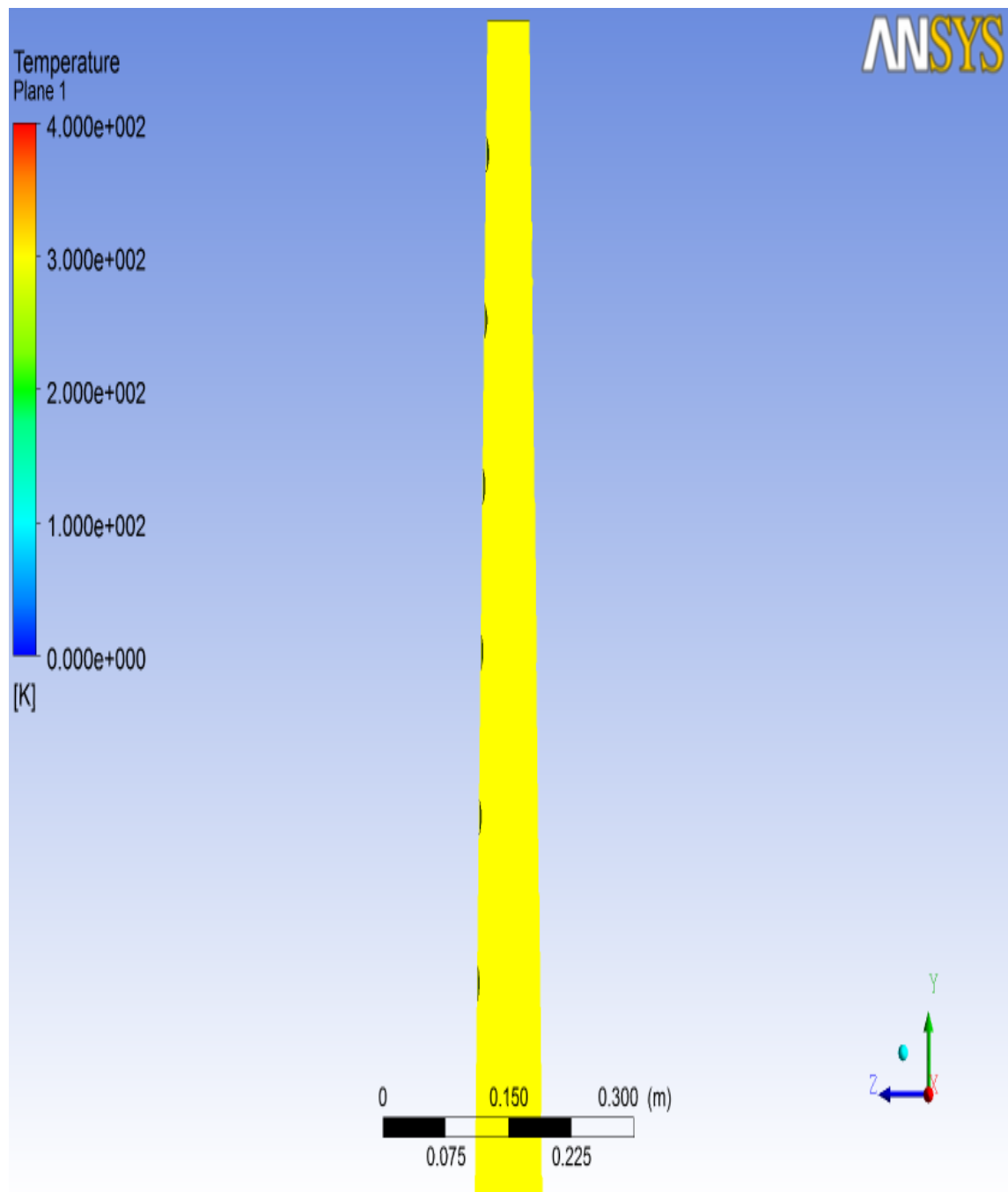


Figura 3: Diagrama del comportamiento de la temperatura al interior del modelo geométrico.

6 DESARROLLO DEL MODELO

6.1. PRIMERA FASE DE DESARROLLO

Durante la primer fase de desarrollo se trabajó solamente sobre una de las geometrías propuestas, esta fue la geometría de base circular (Cónica), ya que como quedó demostrado en el capítulo 5, el procedimiento de las simulaciones es el mismo para las tres geometrías y nuestro interés durante esta fase de desarrollo, fue realizar un primer análisis de los resultados de las simulaciones, con el fin de hacer la comprobación del proceso de simulación.

6.1.1. DECISIONES PRELIMINARES

De acuerdo con las revisiones bibliográficas y los conceptos de ingeniería en mecánica de fluidos, se definió que la simulación se realizaría bajo las condiciones descritas a continuación, presión atmosférica de 101325 Pa y temperatura ambiente de 27 °C, también se estableció que el modelo numérico del flujo en la simulación seria de flujo incompresible, puesto que el fenómeno que se propone para analizar, es de las pérdidas de carga lineal y las pérdidas de carga localizada de presión en tuberías, además se planteó como parámetro de la simulación, que la velocidad del flujo de aire en las salidas estaría entre 3 m/s y 4 m/s, debido a las recomendaciones de la velocidad del aire para el secado de productos agroindustriales de la sección 3.3.4 ¹.

¹Maupoey Pedro Fito, Andrés Grau Ana Maria, Barat Baviera Jose Manuel, and Ana Maria Albors Sorolla. *Introduccion al Secado de Alimentos*. Universidad Politécnica de Valencia, España, 2001

6.1.2. DESARROLLO DE LA GEOMETRÍA

Se planteó la geometría de base circular con las siguientes dimensiones:

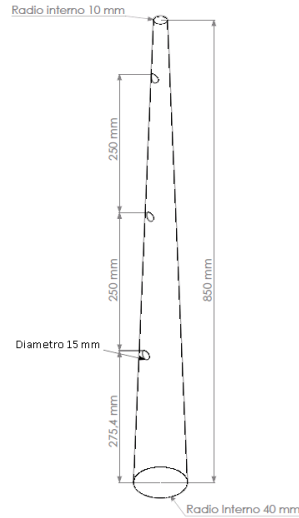


Figura 1: Dimensiones geometría circular fase 1.

Se genera una geometría de 850 mm de largo, con tres agujeros de 15 mm de diámetro espaciados a 250 mm desde la base, cuyo radio interno es 40 mm y el radio en la cara opuesta es 10 mm.

6.1.3. MALLADO

Se realizó el mallado como se demostró en la sección 5.2 para esta geometría, haciendo uso de la metodología Cutcell y haciendo un control de mallado inflation de 8 capas, radio de transición de 0,12 y rata de crecimiento de 1,2 (por defecto) figura 1.

6.1.4. CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Se realizó la configuración de la simulación siguiendo las directrices demostradas en la sección 5.3.

- Modelo de energía: Activado.
- Modelo de viscosidad (Turbulencia): Modelo estándar $k - \varepsilon$.
- Material: Aire a temperatura ambiente ($\approx 27^{\circ}C$).

- Método del solucionador: Basado en la presión.
- Condiciones de las celdas (Propiedades físicas generales):
 - Presión operativa (atmosférica = 101325 Pa).
 - Gravedad ($9,81 \frac{m}{s^2}$).
 - Temperatura operativa (26,85001 °C).
- Condiciones de frontera:
 1. Entrada (Inlet):
 - a) Velocidad: $7 \frac{m}{s}$.
 - b) Presión manométrica: 180 pa.
 - c) Dirección en vectores X,Y,Z: 0,1,0.
 - d) Metodología de turbulencia: Intensidad y Diámetro hidráulico.
 - 1) Intensidad: 10 %.
 - 2) Diámetro hidráulico: Parámetro Dh1 = 0,08 m.
 - e) Temperatura: $\approx 27^{\circ}C$.
 2. Salidas (Outlets):
 - a) Presión manométrica: 0 pa.
 - b) Metodología de la dirección del flujo: Normal al límite.
 - c) Distribución de presión radial equilibrada: Activado.
 - d) Metodología de turbulencia: Intensidad y Diámetro hidráulico.
 - 1) Intensidad: 10 %.
 - 2) Diámetro hidráulico: Parámetro: 0,0251 m.
 - e) Temperatura: $\approx 27^{\circ}C$.
- Valores de referencia: Calculados desde inlet .

6.1.5. CORRIDA DE LA SIMULACIÓN

Se da inicio a la realización de los cálculos por parte del solucionador, configurando el número de iteraciones necesario para asegurar la convergencia de la simulación.

- Número de iteraciones: 300.

6.1.6. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se obtuvieron los siguientes diagramas de comportamiento del flujo de aire y resultados de velocidad en las salidas:

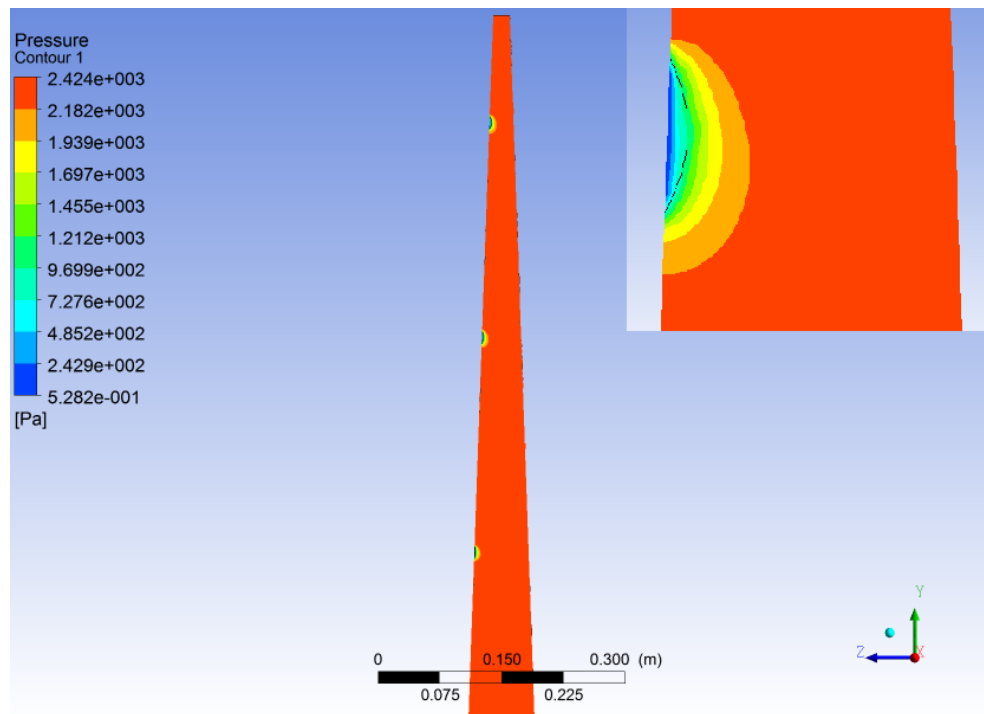


Figura 2: Diagramas de comportamiento de la presión del flujo de aire.

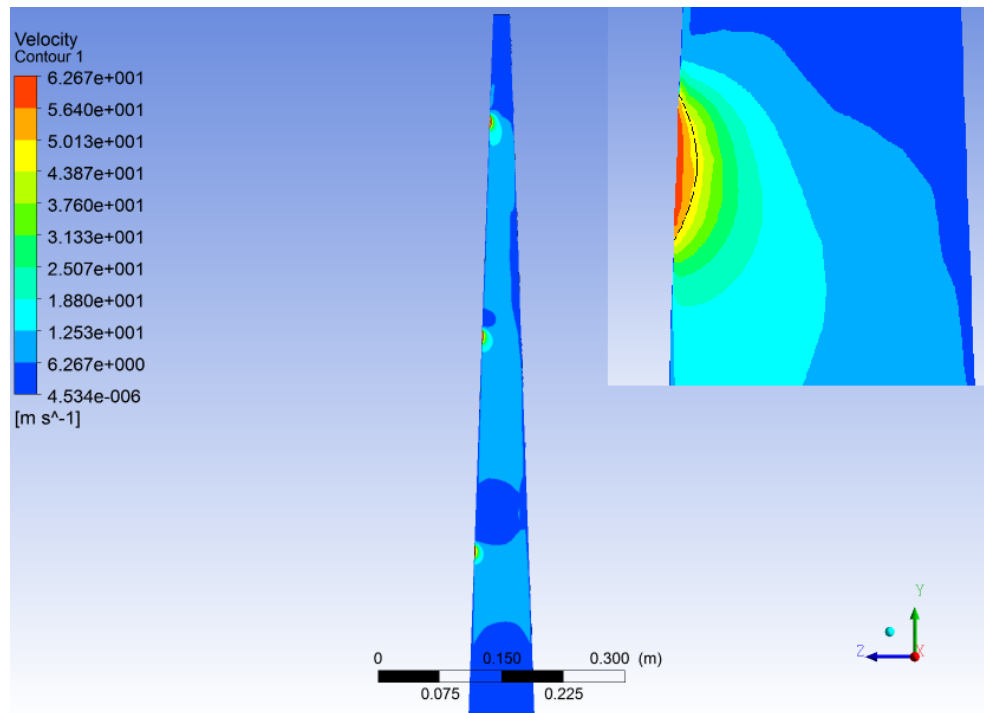


Figura 3: Diagramas de comportamiento de la velocidad del flujo de aire.

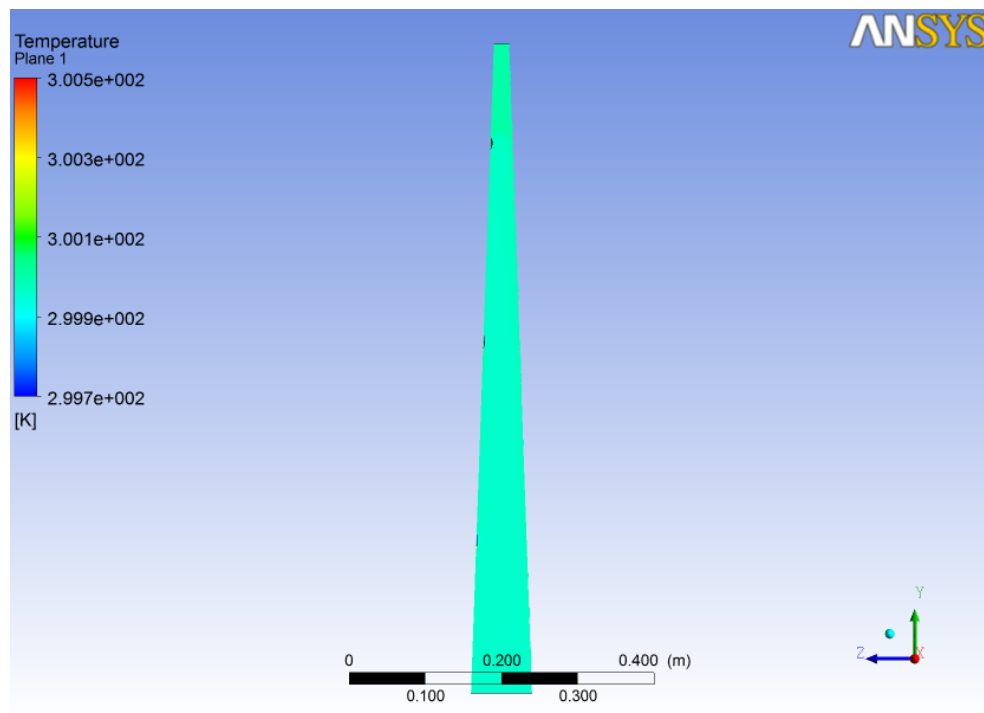


Figura 4: Diagramas de comportamiento de la temperatura del flujo de aire.

Parametrización de Dimensiones Geométricas					
Geometría	Radio base (D1) (mm)	Radio cara opuesta (D2) (mm)	Outlet 1 (m/s)	Outlet 2 (m/s)	Outlet 3 (m/s)
Cónica	80	20	59,9221687	60,2544594	60,0411987
Cilíndrica	80	80	59,666328	59,761093	59,446449

Cuadro 1: Tabla de resultados de la fase 1 de simulación.

De acuerdo con la tabla de resultados y los diagramas de comportamiento obtenidos, se observa un aumento considerable de la velocidad en las salidas, comparado con la velocidad configurada en la entrada de $7 \frac{m}{s}$, igualmente los valores de la presión observados también estuvieron elevados, comparados con la presión manométrica configurada de 180 Pa, por otra parte los valores de temperatura observados no tienen variaciones, como se esperaba, puesto que la temperatura configurada fue igual en la entrada, las salida y las fronteras.

Debido a la escasa información acerca de validación y porcentajes de error para los resultados de simulaciones como esta, se procedió a realizar la fabricación de dos prototipos de control, con el fin de hacer pruebas y obtener resultados experimentales para poder contrastar con los arrojados en la simulación, y así poder realizar una comprobación del modelo numérico, el procedimiento y resultados del mismo.

Las dimensiones de los prototipos de control se describieron de acuerdo a lo descrito en la sección 6.1.2.

- Prototipo de geometría base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (cónica).
 - Radio verdadero base = 40 mm.
 - Radio verdadero cara opuesta = 10 mm.
 - Altura total = 850 mm.
 - Diámetro de agujeros = 15 mm.
 - Espaciado entre agujeros = 250 mm desde centros y la base.
- Prototipo de geometría base circular sin variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (cilindro).
 - Radio verdadero base = 40 mm.
 - Radio verdadero cara opuesta = 40 mm.

- Altura total = 850 mm.
- Diámetro de agujeros = 15 mm.
- Espaciado entre agujeros = 250 mm desde centros y la base.



Figura 5: Prototipo de geometría base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).

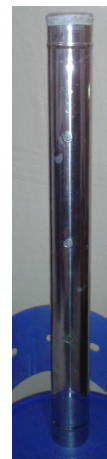


Figura 6: Prototipo de geometría base circular sin variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (cilindro).

El experimento se realizó bajo las condiciones físicas y parámetros configurados en la simulación, los cuales se definieron en la sección 6.1.4, para hacer la medición y toma de datos de velocidad del flujo de aire en las salidas de los prototipos.



Figura 7: Montaje experimento Prototipo de control cónico.



Figura 8: Montaje experimento Prototipo de control cilíndrico.

En el montaje del experimento se utilizaron los siguientes elementos para la medición y recreación de los parámetros y de las condiciones físicas de la simulación del flujo de aire, que están definidos en la sección 6.1.4.

- Anemómetro de hilo caliente (ALNOR AVM 440).
- Anemómetro de aletas (ERASMUS EA-200).
- Soplador eléctrico (BLACK & DECKER BB600-B3).



Figura 9: Anemómetro de hilo caliente (ALNOR AVM 440).



Figura 10: Termo-anemómetro de aletas (ERASMUS EA-200).



Figura 11: Soplador eléctrico (BLACK & DECKER BB600-B3).

6.1.6.1. PROCEDIMIENTO PARA EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO

Se definió un procedimiento para la realización del experimento, la cual contó con las siguientes etapas:

1. Calibración de la velocidad en la entrada del prototipo, lo cual se lleva a cabo haciendo modificaciones de la resistividad en el soplador eléctrico para cambiar la velocidad del motor, posteriormente se verifica la velocidad en el flujo de aire mediante con el anemómetro de aletas, se continúa haciendo las modificaciones en el soplador hasta obtener el valor deseado en la velocidad del aire.
2. Acoplamiento del soplador eléctrico con el prototipo.
3. Puesta en marcha del soplador eléctrico y verificación de la no existencia de fugas de aire.
4. Toma de datos haciendo uso del anemómetro de hilo caliente, para esta etapa se definió la realización de 5 mediciones de la velocidad del flujo de aire en cada una de las salidas del prototipo, se hace un promedio con los datos para reducir el porcentaje de error por factores externos.
5. Los datos fueron tabulados y son presentados a continuación.

Nota: El experimento se realizó en un salón aislado de corrientes de aire.

FLAUTA GEOMETRIA CILINDRICA																
							OUT1			OUT2			OUT3			
Velocidad Inlet (m/s)	Vel Outlet 1 (ft/min)	Vel Outlet 1 (m/s)	Vel Outlet 2 (ft/min)	Vel Outlet 2 (m/s)	Vel Outlet 3 (ft/min)	Vel Outlet 3 (m/s)		Min (ft/min)	Max (ft/min)	Average (ft/min)	Min (ft/min)	Max (ft/min)	Average (ft/min)	Min (ft/min)	Max (ft/min)	Average (ft/min)
6,5	1900	9,5	2437,5	12,1875	2858	14,29	Medicion 1	1889	1911	1900	2431	2444	2437,5	2850	2866	2858
6,5	1821	9,105	2442,5	12,2125	2811,5	14,0575	Medicion 2	1810	1832	1821	2434	2451	2442,5	2803	2820	2811,5
6,5	1858,5	9,2925	2405,5	12,0275	2887	14,435	Medicion 3	1844	1873	1858,5	2403	2408	2405,5	2877	2897	2887
6,5	1911	9,555	2378	11,89	2858	14,29	Medicion 4	1883	1939	1911	2376	2380	2378	2855	2861	2858
6,5	1981,5	9,9075	2355	11,775	2837	14,185	Medicion 5	1974	1989	1981,5	2353	2357	2355	2827	2847	2837
6,5	1894,4	9,472	2403,7	12,0185	2850,3	14,2515	Average	1880	1908,8	1894,4	2399,4	2408	2403,7	2842,4	2858,2	2850,3

Cuadro 2: Tabla de resultados de mediciones de velocidad en prototipo cilíndrico.

FLAUTA GEOMETRIA CONICA														
					OUT1			OUT2			OUT3			
Velocida d Inlet (m/s)	Vel Outlet 1 (ft/min)	Vel Outlet 1 (m/s)	Vel Outlet 2 (ft/min)	Vel Outlet 2 (m/s)	Vel Outlet 3 (ft/min)	Vel Outlet 3 (m/s)		Min (ft/min)	Max (ft/min)	Average (ft/min)	Min (ft/min)	Max (ft/min)	Average (ft/min)	
6,5	2354	11,77	2532,5	12,6625	2678,5	13,3925	Medicion 1	2333	2375	2354	2530	2535	2532,5	2678,5
6,5	2363	11,815	2465,5	12,3275	2615,5	13,0775	Medicion 2	2350	2376	2363	2458	2473	2465,5	2615,5
6,5	2382	11,91	2446	12,23	2631,5	13,1575	Medicion 3	2374	2390	2382	2442	2450	2446	2631,5
6,5	2356,5	11,7825	2453,5	12,2675	2625,5	13,1275	Medicion 4	2354	2359	2356,5	2450	2457	2453,5	2625,5
6,5	2347	11,735	2412,5	12,0625	2623,5	13,1175	Medicion 5	2337	2357	2347	2410	2415	2412,5	2623,5
6,5	2360,5	11,8025	2462	12,31	2634,9	13,1745	Average	2349,6	2371,4	2360,5	2458	2466	2462	2634,9

Cuadro 3: Tabla de resultados de mediciones de velocidad en prototipo cónico.

Al analizar los resultados obtenidos de la simulación y el experimento, se encontró un porcentaje de error de + o - 79 %.

Fuente de datos	Vel Outlet 1 (m/s)	Vel Outlet 2 (m/s)	Vel Outlet 3 (m/s)
Experimento	11,8025	12,31	13,1745
Simulacion	59,9221687	60,2544594	60,0411987
% De Error	80,3036168	79,5699769	78,0575667

Cuadro 4: Tabla comparativa de porcentaje de error modelo geométrico cónico.

Fuente de datos	Vel Outlet 1 (m/s)	Vel Outlet 2 (m/s)	Vel Outlet 3 (m/s)
Experimento	9,472	12,0185	14,2515
Simulacion	59,666328	59,761093	59,446449
% De Error	84,1250496	79,8890894	76,0263224

Cuadro 5: Tabla comparativa de porcentaje de error modelo geométrico cilíndrico.

Al revisar los diagramas de comportamiento de velocidad y de presión, se encontraron cambios bruscos de velocidad solo en las zonas aledañas a las salidas con una variación de alrededor de $50 \frac{m}{s}$, y a su vez los valores observados de la presión presentaron irregularidades dado que estos datos estuvieron alrededor de los 2400 Pa, lo que estuvo bastante elevado comparado con el valor configurado en la frontera de entrada sección 6.1.4, con lo cual se planteó la posibilidad de estar simulando un fenómeno de flujo compresible, lo cual es totalmente incompatible con el solucionador seleccionado “basado en la presión”, el cual solamente trabaja con precisión, para flujos incompresibles, lo que es totalmente diferente con el modelo propuesto.

Para corroborar esta hipótesis se procedió a hacer un balance de flujo másico, para verificar que la masa de gas que ingresa fuese igual a la que sale del sistema.

$$\dot{m}_{entrada} + \dot{m}_{Salida} = 0$$

$$\dot{m}_{entrada} + \dot{m}_{Salida1} + \dot{m}_{Salida2} + \dot{m}_{Salida3} = 0$$

$$\dot{m} = v * A * \rho$$

$$\dot{m} = FlujoMásico.$$

$$v = Velocidad.$$

$$A = Area.$$

$$\rho = Densidad.$$

Geometria	Flujo Másico Inlet (Kg/s)	Flujo Másico Outlet 1 (Kg/s)	Flujo Másico Outlet 2 (Kg/s)	Flujo Másico Outlet 3 (Kg/s)	Balance (Kg/s)
Conica	0,04002	-0,00255	-0,00266	-0,00285	0,03195
Cilindrica	0,04002	-0,00205	-0,00260	-0,00309	0,03229

Cuadro 6: Balance de flujos másico.

El análisis del balance de flujo másico nos permitió comprobar que la masa de entrada comparada con la de las salidas no estaba equilibrada, con lo cual se pudo constatar que el sistema se está comportado bajo condiciones de flujo compresible.

Para dar solución a esto se plantearon dos alternativas:

1. Modificación del modelo de flujo incompresible en la simulación, a un modelo de flujo compresible. Esto implicaría hacer varias modificaciones en la configuración del modelo de turbulencia, propiedades físicas del material y condiciones de las celdas. Lo cual resultaría poco práctico.
2. Realizar variaciones de las condiciones operacionales y parámetros físicos del modelo en la simulación, para no caer en condiciones de simulación de flujo compresible. Pero esta solución requeriría modificar las condiciones de frontera, lo que estaría en contra de los parámetros recomendados para el secado de productos agroindustriales dispuestos en bandejas.
3. Realizar cambios a las geometrías, para asegurar que las salidas tenga la suficiente capacidad para manejar el flujo másico de la entrada y evitar las condiciones de flujo compresible. Esta solución solo necesitara algunos cambios en las geometrías, particularmente en los agujeros para las salidas, y sería muy práctico y rápido de implementar.

Se decidió poner en práctica la alternativa de solución número tres, puesto que hacer los cambios en las geometrías solo requirió modificar el área de los agujeros de las salidas, además nos permitió continuar trabajando con el modelo de flujo incompresible, las condiciones físicas operacionales y parámetros físicos ya preestablecidos.

6.2. SEGUNDA FASE DE DESARROLLO

6.2.1. MODIFICACIONES EN LAS GEOMETRÍAS

Para determinar el diámetro adecuado para los agujeros se realizaron unos cálculos basados en el flujo másico de entrada.

$$\dot{m}_{Inlet} = V * A * \rho$$

$$V = 5 \frac{m}{s}$$

$$A = \frac{\pi}{4} * (d1)^2$$

$$\rho = 1,225 \frac{Kg}{m^3}$$

d1 = Diámetro agujero entrada.

$$\dot{m}_{Inlet} = 0,03633 \frac{Kg}{s}$$

Optamos por aumentar el número de agujeros de las salidas para no modificar demasiado su diámetro.

Nueva cantidad de agujeros = 6

$$\dot{m}_{Inlet} = \frac{0,03633 \frac{Kg}{s}}{6}$$

Flujo másico por cada orificio

$$\dot{m}_{Outlet} = 0,00605 \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{m}_{Outlet} = 0,00605 \frac{Kg}{s} = V * A * \rho$$

$$0,00605 \frac{Kg}{s} = V_{Outlet} * \left(\left(\frac{\pi}{4} * (d2)^2 \right) * \rho \right)$$

De acuerdo con las mediciones de velocidad en las salidas en el experimento de la fase 1 de desarrollo, definimos una velocidad en las salidas aproximada de $= 10 \frac{m}{s}$.

$$V_{Outlet} = 10 \frac{m}{s}$$

$$d_2 \simeq 0,0251m$$

Además se empleara una junta de acople elástica para hacer el acoplamiento del múltiple que se fabricara y el Soplador eléctrico cuyas dimensiones son: diámetros internos en los extremos de 35 mm y 80 mm, espesor de 5 mm y altura de 250 mm.

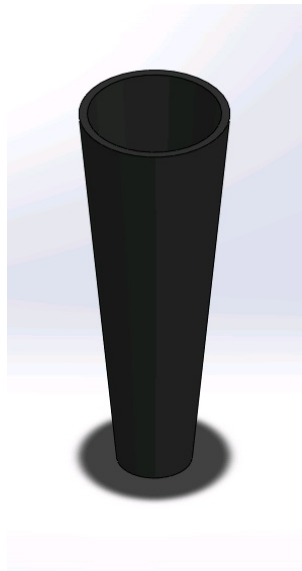


Figura 1: Junta de acople elástica.

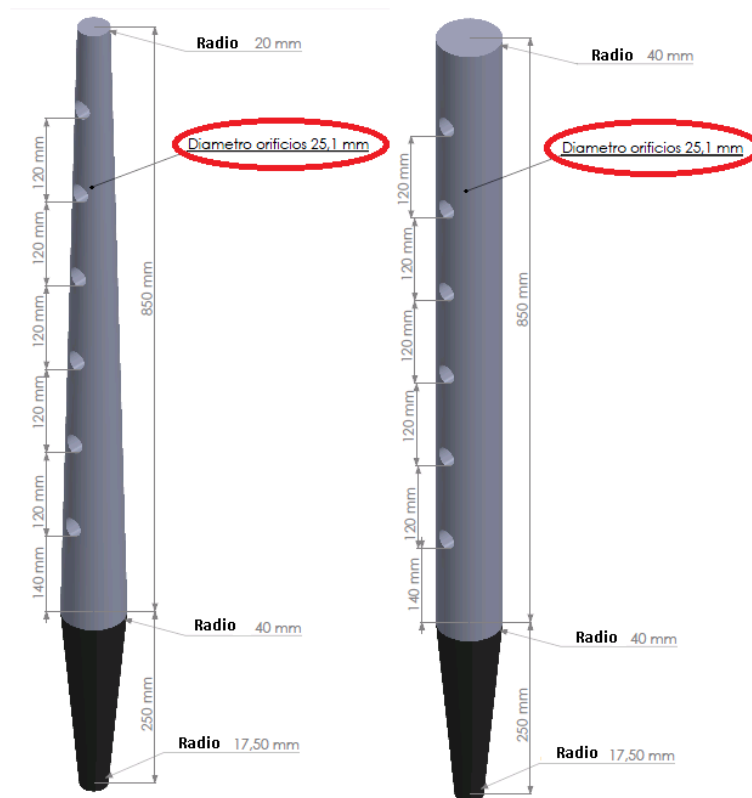


Figura 2: Dimensiones geometría base circular modificada con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).

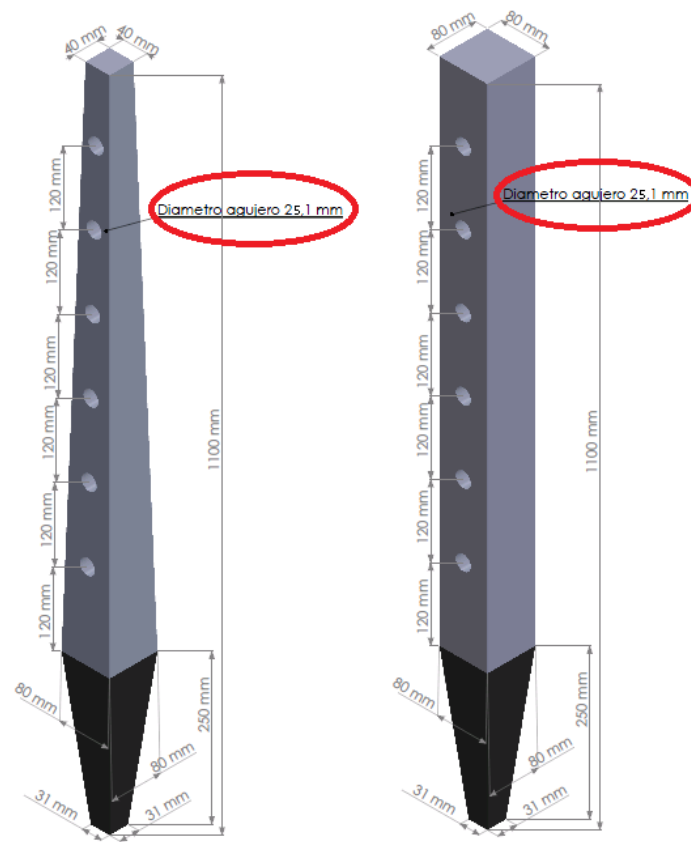


Figura 3: Dimensiones geometría base cuadrada modificada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

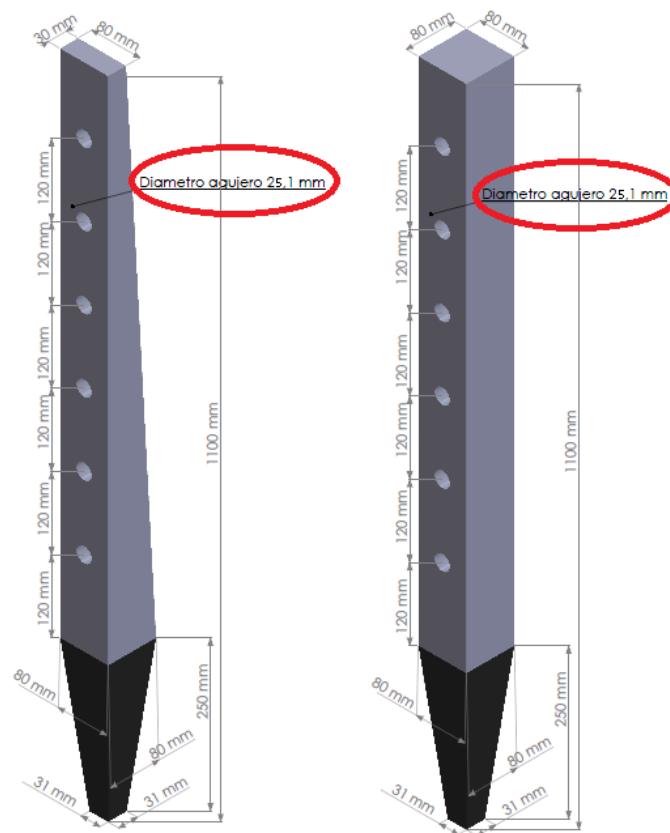


Figura 4: Dimensiones geometría base cuadrada modificada variando solo una de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

6.2.2. PARAMETRIZACIÓN DE LAS GEOMETRÍAS

La parametrización de las geometrías se realizó con el objetivo de generar puntos de diseño, permitieran hacer cambios de la sección transversal de las geometrías, para con esto poder realizar una gran cantidad de simulaciones y encontrar la mejor distribución de flujo de aire tomando como parámetro las velocidades en los orificios de salida del flujo.

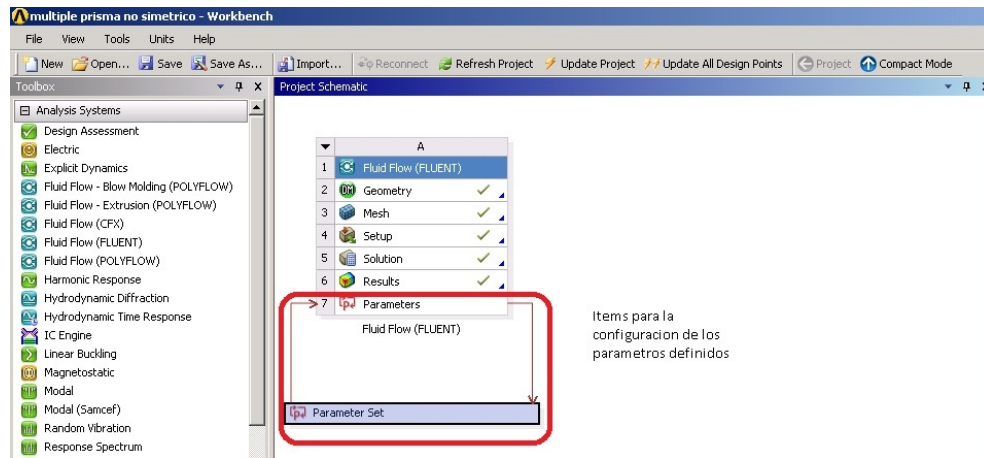


Figura 5: Ítem de configuración de parámetros y puntos de diseño.

Parameters	Parameter Name	Value	Unit
Input Parameters			
Fluid Flow (FLUENT) (A1)			
P13	D2	50	mm
P12	D1	80	mm
New input parameter			
Output Parameters	New name	New expression	Unit
Fluid Flow (FLUENT) (A1)			
P14	out1	8,2912493	m s ⁻¹
P18	out5	7,2957468	m s ⁻¹
P17	out4	7,7756891	m s ⁻¹
P16	out3	7,9056826	m s ⁻¹
P15	out2	8,2411575	m s ⁻¹
P19	out6	7,2640591	m s ⁻¹

Cuadro 7: Definición de los parámetros de la geometría de base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).

Parameters	Parameter Name	Value	Unit
Input Parameters			
Fluid Flow (FLUENT) (A1)			
P1	H2	20	mm
P2	MedH2	10	mm
P3	V2	20	mm
P4	MedV2	10	mm
New input parameter	New name	New expression	
Output Parameters			
Fluid Flow (FLUENT) (A1)			
P6	Outv1	15,310463	m s ⁻¹
P7	Outv2	15,409081	m s ⁻¹
P8	Outv3	15,371461	m s ⁻¹
P9	Outv4	15,1758	m s ⁻¹
P10	Outv5	14,981445	m s ⁻¹
P11	Outv6	14,818539	m s ⁻¹

Cuadro 8: Definición de los parámetros de la geometría de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

Parameters	Parameter Name	Value	Unit
Input Parameters			
Fluid Flow (FLUENT) (A1)			
P14	H1	80	mm
P16	H2	20	mm
P9	Ancho	40	mm
P15	H1med	40	mm
New input parameter	New name	New expression	
Output Parameters			
Fluid Flow (FLUENT) (A1)			
P18	out1	14,336282	m s ⁻¹
P22	out5	14,282416	m s ⁻¹
P21	out4	14,327848	m s ⁻¹
P20	out3	14,386804	m s ⁻¹
P19	out2	14,373569	m s ⁻¹
P23	out6	14,104568	m s ⁻¹

Cuadro 9: Definición de los parámetros de la geometría de base cuadrada variando una sola de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

6.2.3. SIMULACIÓN DE LOS MODELOS GEOMÉTRICOS

Se realizó la simulación para las nuevas geometrías, usando las configuraciones de mado y de simulación ya planteadas en la primera fase de desarrollo en las secciones 6.1.3 y 6.1.4, además de la misma configuración para el número de iteraciones, planteado en la sección 6.1.5.

6.2.4. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como resultado de las simulaciones, se tabularon los resultados de la velocidad del flujo de aire en las salidas, de los puntos de diseño generados a partir de la parametrización, para de esta manera poder escoger el tipo y dimensiones de geometría que proporcionen la mejor distribución de flujo de aire.

Name	D2	D1	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6	Promedio	Desviación
Units	mm	mm	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	Estandar
Current	20	80	3,3901765	3,3174877	3,3657029	3,435539	3,4578366	3,1822827	3,3581709	0,09091383
DP 1	30	80	3,1704612	3,2061734	3,2006166	3,2681234	3,2876492	3,1335502	3,21109567	0,05308971
DP 2	40	80	3,0579267	3,1284921	3,1169679	3,1621211	3,1572833	3,042269	3,11084335	0,04589422
DP 3	50	80	2,9226956	2,9985893	3,0087891	3,0413814	3,0575414	3,0293283	3,00972085	0,04353508
DP 4	60	80	2,8801327	2,978461	2,9844177	3,0125229	3,0160544	2,9826407	2,9757049	0,04518353
DP 5	70	80	2,8244021	2,9858165	2,9732425	2,9809794	2,983815	2,9479811	2,94937277	0,05730439

Cuadro 10: Tabla de resultados de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).

Name	H2	MedH2	P3 - V2	MedV2	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6	Promedio	Desviación
Units	mm	mm	mm	mm	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	Estandar
Current	20	10	20	10	3,3618104	3,284621	3,2281694	3,2015815	3,1177635	3,0652595	3,20986755	0,098719272
DP 1	30	15	30	15	3,2189207	3,159416	3,1194565	3,128422	3,0102465	2,9676409	3,10068377	0,086052868
DP 2	40	20	40	20	3,1516252	3,0821111	3,0725818	3,0745847	2,9874873	2,939887	3,05137952	0,068913522
DP 3	50	25	50	25	3,0855138	3,010293	3,0276048	2,9879355	2,9320738	2,9324591	2,99598	0,053859249
DP 4	60	30	60	30	3,0413084	2,9932702	2,9854732	2,9181311	2,9038274	2,9210577	2,96051133	0,049649011
DP 5	70	35	70	35	3,0227261	3,0014596	2,9662528	2,906831	2,9009757	2,8866019	2,94747452	0,052359852

Cuadro 11: Tabla de resultados de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

Name	H1	H2	Ancho	H1med	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6	Promedio	Desviacion
Units	mm	mm	mm	mm	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	Estandar
Current	80	20	40	40	2,9446721	2,9772186	2,9853265	3,0266612	3,0254352	2,9222667	2,98026338	0,038424192
DP 1	80	30	40	40	2,9099045	2,9574966	2,9670579	2,9982274	2,9918382	2,9282022	2,9587878	0,031735702
DP 2	80	40	40	40	2,8879325	2,942251	2,9516778	2,981535	2,9733865	2,9160986	2,9421469	0,032238432
DP 3	80	50	40	40	2,868264	2,9263437	2,9360471	2,9667225	2,9573622	2,9076943	2,9270723	0,032671642
DP 4	80	60	40	40	2,8522201	2,9187407	2,9251642	2,9538784	2,9444375	2,9016254	2,91601105	0,033190015
DP 5	80	70	40	40	2,8402138	2,9087129	2,9156914	2,9461234	2,9369738	2,8980873	2,90763377	0,034266034

Cuadro 12: Tabla de resultados de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando una sola de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

Para la elección de la geometría, sus dimensiones y fabricación se establecieron dos condiciones:

- Cálculo de la desviación estándar de la velocidad del flujo de aire en las salidas, para la determinación de la geometría que permite la mejor distribución uniforme de flujo.
- Cumplimiento de las condiciones de velocidad de flujo de aire en las salidas, preestablecidas en las decisiones preliminares en la sección 6.1.1.

Name	D2	D1	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6	Promedio	Desviacion
Units	mm	mm	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	m s ⁻¹	Estandar
DP 3	50	80	2,9226956	2,9985893	3,0087891	3,0413814	3,0575414	3,0293283	3,00972085	0,04353508

Cuadro 13: Resultados de geometría base circular seleccionada para fabricación.

Dando cumplimiento a las condiciones mencionadas anteriormente se seleccionó la geometría de base circular con diámetros de 80 mm en su base y 50 mm en su cara opuesta, ya que fue la configuración geométrica con la menor desviación estándar, y cumplido con las condiciones de velocidad de flujo de aire en las salidas deseadas, además se analizaron los diagramas de comportamiento de la velocidad presión y temperatura del fluido en la geometría, los cuales no presentaron anomalías y son mostrados a continuación.

Las tablas comparativas de caudal presión y temperatura, para las tres geometrías, quedan adjuntas en el anexo B, en las tablas 8 a la 8.

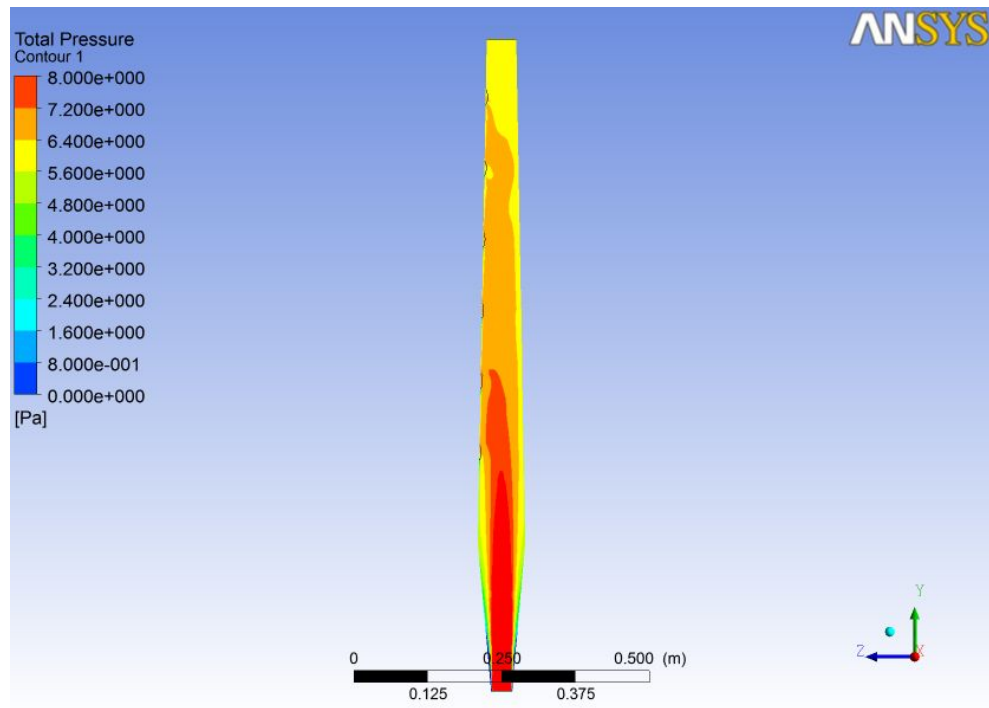


Figura 6: Comportamiento de la presión del fluido en la geometría seleccionada.

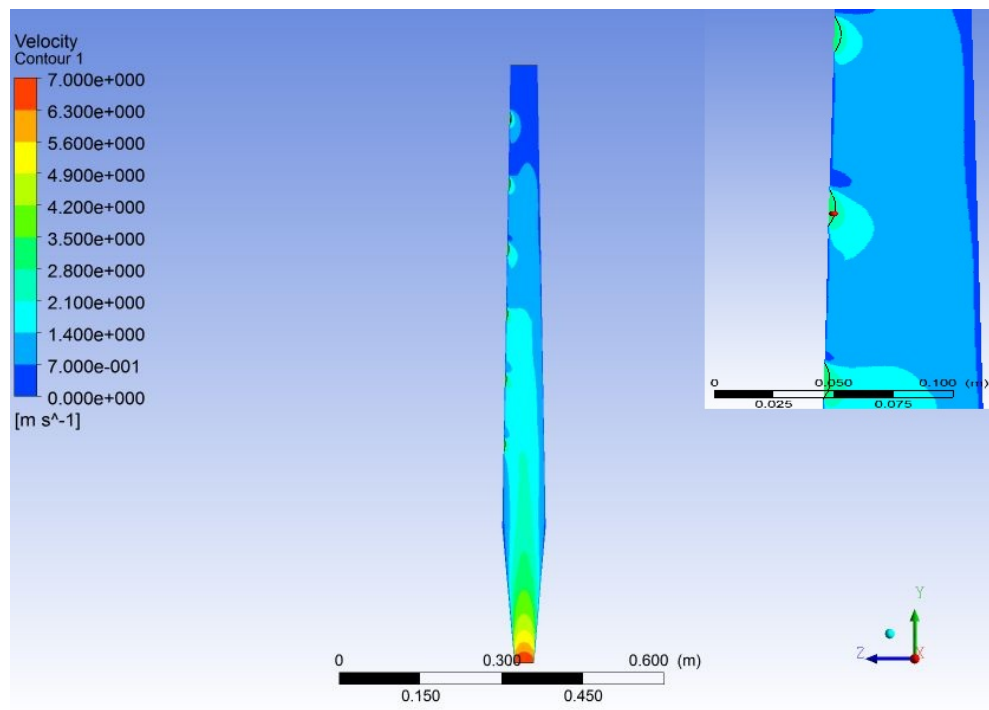


Figura 7: Comportamiento de la velocidad del fluido en la geometría seleccionada.

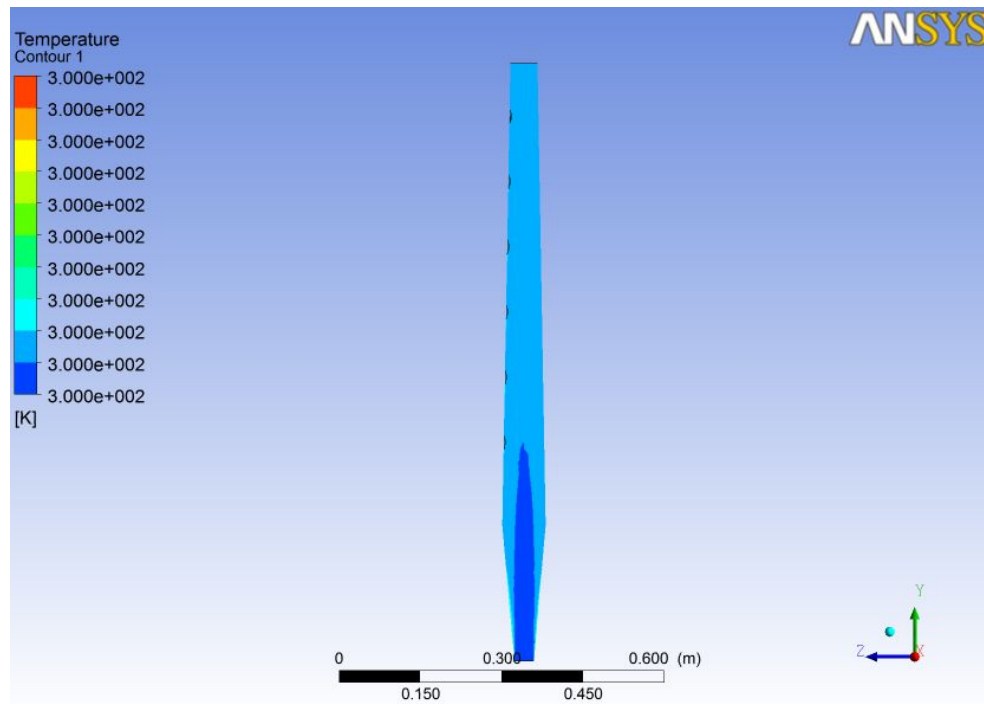


Figura 8: Comportamiento de la temperatura del fluido en la geometría seleccionada.

Los gráficos de comportamiento de velocidad, presión y temperatura, de las demás geometrías quedaran adjuntos en el anexo C, en las figura 8 a la 9.

Se procede con la fabricación de un prototipo de múltiple de inyección basado en la geometría seleccionada, que se especifica en el plano constructivo de esta geometría en el anexo A, figura 3.

6.3. PRUEBAS DE DESEMPEÑO

Se realizó un montaje para realizar un nuevo experimento con el fin de obtener datos de desempeño del prototipo, los cuales son recopilados haciendo mediciones de la velocidad del flujo de aire en las salidas del múltiple de inyección de aire.

6.3.1. PROCEDIMIENTO PARA EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO

Se definió un nuevo procedimiento para la realización del experimento, la cual contó con las siguientes etapas:

1. Calibración de la velocidad en la entrada del prototipo, lo cual se lleva a cabo haciendo modificaciones de la resistividad en el soplador eléctrico para cambiar la velocidad del motor, posteriormente se verifica la velocidad en el flujo de aire mediante con el anemómetro de aletas, se continúa haciendo las modificaciones en el soplador hasta obtener el valor deseado en la velocidad del aire.
2. Acoplamiento del soplador eléctrico con el prototipo mediante una junta de acople elástica figura 1.
3. Puesta en marcha del soplador eléctrico y verificación de la no existencia de fugas de aire.
4. Toma de datos haciendo uso del anemómetro de hilo caliente, para esta etapa se definió la realización de 13 mediciones de la velocidad del flujo de aire en cada una de las salidas del prototipo, se hace un promedio con los datos para reducir el porcentaje de error por factores externos.
5. Tabulación de los datos.

Nota: El experimento se realizó en un salón aislado de corrientes de aire.



Figura 1: Montaje del experimento.



Figura 2: Toma de datos usando el anemómetro de hilo caliente.

6.4. RESULTADOS

A continuación se presentan tabulados los datos del experimento de las pruebas de desempeño.

FLAUTA GEOMETRIA CILINDRICA						
Vel Inlet (m/s)	OUT1	OUT2	OUT3	OUT4	OUT5	OUT6
	Vel Outlet 1 (m/s)	Vel Outlet 2 (m/s)	Vel Outlet 3 (m/s)	Vel Outlet 4 (m/s)	Vel Outlet 5 (m/s)	Vel Outlet 6 (m/s)
Med 1	3,07	3,39	3,47	3,14	2,94	2,93
Med 2	3,02	3,47	3,4	3,09	2,93	2,92
Med 3	3,08	3,49	3,39	3,13	2,9	2,92
Med 4	3,09	3,46	3,39	3,16	2,95	2,94
Med 5	3,04	3,46	3,4	3,13	2,96	2,94
Med 6	3,06	3,43	3,38	3,12	3,01	2,91
Med 7	3,04	3,44	3,36	3,07	3,02	2,86
Med 8	3,07	3,44	3,36	3,06	3,01	2,85
Med 9	3,03	3,42	3,42	3,03	3,03	2,88
Med 10	3,16	3,39	3,43	3,06	3,01	2,89
Med 11	3,14	3,38	3,36	3,07	3	2,89
Med 12	3,12	3,37	3,36	3,05	2,99	2,84
Med 13	3,13	3,4	3,38	3,03	2,97	2,8
Average	3,080769	3,426154	3,392308	3,087692	2,978462	2,89

Cuadro 14: Tabulación de resultados pruebas de desempeño.

Promedio (m/s)	Desviacion estandar (m/s)
3,142564103	0,240342801

Cuadro 15: Promedio y desviación estándar de los resultados de la velocidad en las salidas.

6.5. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DEL MODELO SIMULADO CON EL MODELO FABRICADO

El análisis y comparación de resultados se realizó haciendo gráficos de tendencia y determinando el porcentaje de error, de los resultados de la velocidad y el caudal en los orificios de salida, en las pruebas de desempeño y la simulación, el cual fue aproximadamente del 7 %.

Porcentaje de error de la velocidad del aire en las salidas							
Fuente de datos	Vel Outlet 1 (m/s)	Vel Outlet 2 (m/s)	Vel Outlet 3 (m/s)	Vel Outlet 4 (m/s)	Vel Outlet 5 (m/s)	Vel Outlet 6 (m/s)	Promedio (m/s)
Pruebas de desempeño	3,080769	3,426154	3,392308	3,087692	2,978462	2,89	3,142564103
Simulacion	2,922696	2,998589	3,008789	3,041381	3,057541	3,029328	3,00972085
% de error	5,408488	14,25886	12,74661	1,522693	2,586387	4,599313	6,853724551

Cuadro 16: Calculo del porcentaje de error de la velocidad del aire en las salida entre los resultados de las pruebas de desempeño y de la simulación.

Porcentaje de error del caudal del aire en las salidas							
Fuente de datos	Vel Outlet 1 (m ³ /s)	Vel Outlet 2 (m ³ /s)	Vel Outlet 3 (m ³ /s)	Vel Outlet 4 (m ³ /s)	Vel Outlet 5 (m ³ /s)	Vel Outlet 6 (m ³ /s)	Promedio (m ³ /s)
Pruebas de desempeño	0,001524	0,001695	0,001679	0,001528	0,001474	0,00143	0,001554968
Simulacion	0,001398	0,001477	0,001471	0,001475	0,001476	0,001459	0,001459375
% de error	9,076864	14,74764	14,09455	3,579794	0,179417	1,966807	7,274178052

Cuadro 17: Calculo del porcentaje de error de la velocidad del aire en las salida entre los resultados de las pruebas de desempeño y de la simulación.

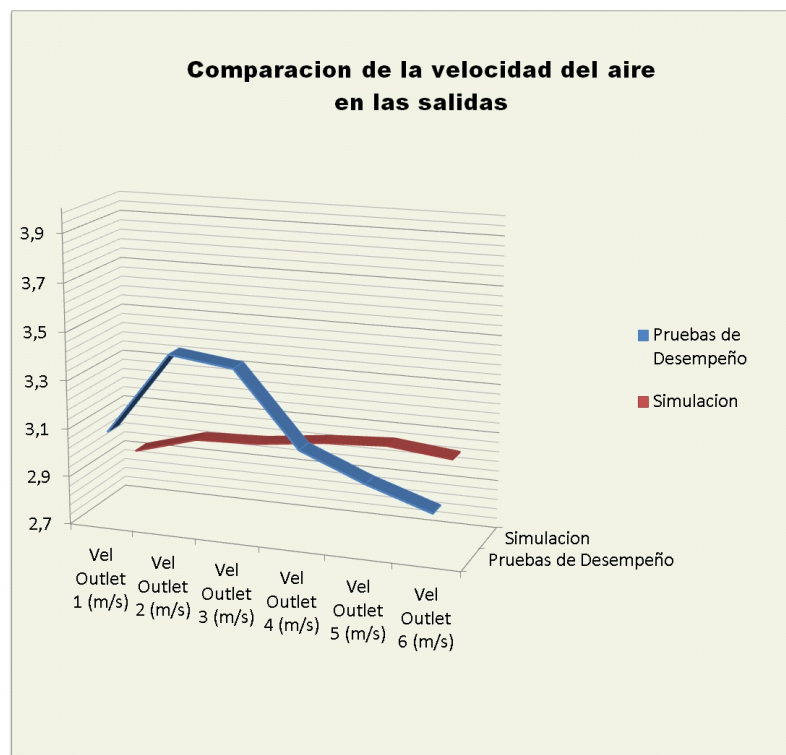


Figura 1: Diagrama de tendencia de la velocidad en las salidas entre los resultados de las pruebas de desempeño y la simulación.

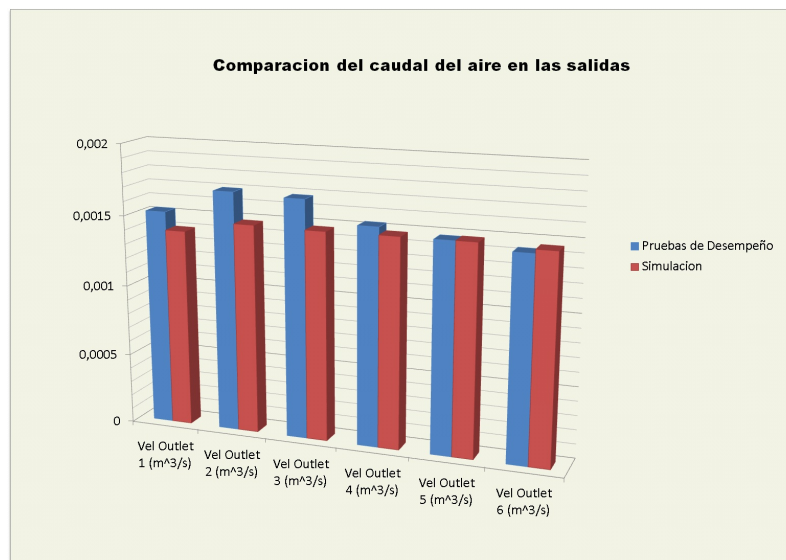


Figura 2: Diagrama de tendencia del caudal en las salidas entre los resultados de las pruebas de desempeño y la simulación.

7 CONCLUSIONES

1. Durante el proceso se determinó que el múltiple de inyección de base circular de diámetro en la base de 80 mm y en el extremo opuesto de 50 mm, obtuvo el mejor desempeño dentro de las tres geometrías propuestas, de acuerdo a los resultados y las condiciones preestablecidas, donde encontramos que al hacer la comparación con el prototipo construido se evidencio que el porcentaje de error fue del 7 %.
2. Aunque los gráficos de comportamiento de caudal no pueden obtenerse con el software ANSYS Fluent, los gráficos de velocidad y presión proporcionaron información suficiente para evaluar el desempeño de los modelos, y este trabajo queda como punto de referencia para quienes desean utilizar modelamientos numéricos, en el diseño de dispositivos en los cuales esté presente el comportamiento de los fluidos.
3. El proyecto que realizamos ha contribuido de manera muy importante, para identificar y resaltar los puntos a considerar al realizar una simulación del comportamiento de un fluido como el aire al interior de un múltiple, entres estos puntos están, el procedimiento de la simulación, la definición de sus condiciones de entrada, salidas, fronteras y otros necesarios en la configuración de la misma.
4. De acuerdo a lo resultados obtenidos en la simulación, vimos que la geometría de base cuadrada variando una sola de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal, no cumplió con las condiciones y parámetros del flujo de aire, pero si evidencia tener un potencial elevado para este tipo de aplicaciones, ya que las velocidades a la salida presentaron una desviación estándar pequeña, con lo cual recomendaríamos hacer una investigación con este tipo de geometría también, ya que dependiendo el diseño del secador esta podría ser utilizada.

8 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Fue necesaria la construcción de unos prototipos de control y realizar pruebas de desempeño a estos, durante la etapa de simulación, para poder comprobar algunos resultados, ya que la bibliografía existente no proporciona información acerca del porcentaje de error aceptable para este tipo de estudios.
- Durante la etapa de pruebas de desempeño del múltiple de inyección, se evidenció que el dispositivo con el que se varia la velocidad del soplador utilizado, no trabajo de manera constante, cosa que se podría comprobar al medir la corriente consumida mediante una pinza amperimétrica, con lo cual observaríamos cambios en el consumo de energía en algunos episodios durante la prueba, y de este modo la velocidad a la entrada al múltiple estaría afectada, variando a su vez las lecturas obtenidas a las salidas igualmente. Esto dejaría entrever la necesidad de hacer uso de herramientas mas precisas para recrear las condiciones de flujo.
- Teniendo en cuenta los porcentajes de errores obtenidos, podemos inferir como posibles fuentes de estos, las simplificaciones aplicadas al modelo numérico, como la metodología del solucionador, el modelos de turbulencia, la calidad del mallado entre otros.

9 ANEXOS

ANEXO A: PLANO CONSTRUCTIVO DE LA GEOMETRÍA SELECCIONADA PARA LA FABRICACIÓN.

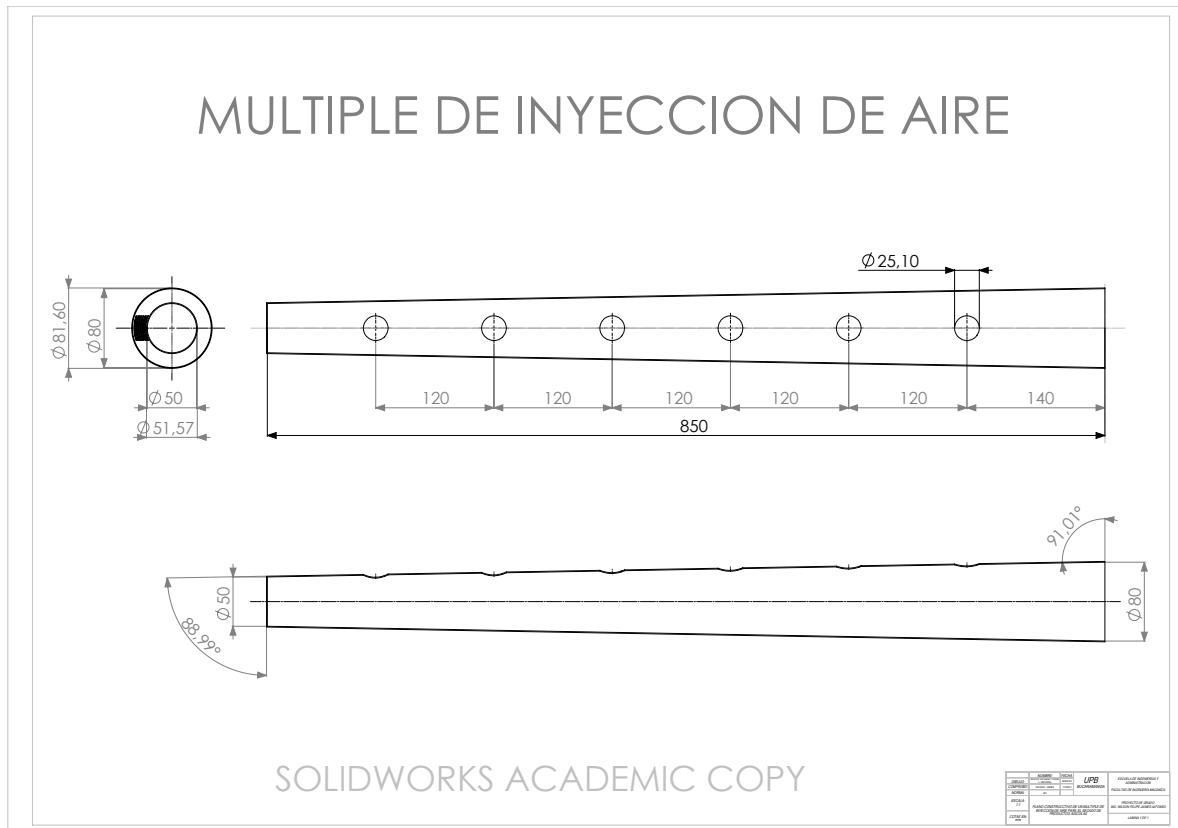


Figura 3: Múltiple de inyección de aire.

ANEXO B: TABLAS COMPARATIVAS DE CAUDAL, PRESIÓN Y TEMPERATURA.

Name	D2	D1	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6	Promedio	Desviacion Estandar
Units	mm	mm	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Current	20	80	0,00167749	0,00164152	0,00166538	0,00169993	0,00171097	0,00157462	0,00166165	4,4985E-05
DP 1	30	80	0,00156877	0,00158644	0,00158369	0,0016171	0,00162676	0,00155051	0,00158888	2,62693E-05
DP 2	40	80	0,00151309	0,00154801	0,0015423	0,00156465	0,00156225	0,00150534	0,00153927	2,27089E-05
DP 3	50	80	0,00144618	0,00148373	0,00148878	0,0015049	0,0015129	0,00149894	0,00148924	2,15415E-05
DP 4	60	80	0,00142511	0,00147377	0,00147672	0,00149062	0,00149237	0,00147584	0,0014724	2,23572E-05
DP 5	70	80	0,00139754	0,00147741	0,00147119	0,00147501	0,00147642	0,00145869	0,00145938	2,83547E-05

Cuadro 18: Tabla de resultados de caudal de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).

Name	H2	MedH2	P3 - V2	MedV2	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6	Promedio	Desviacion Estandar
Units	mm	mm	mm	mm	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Current	20	10	20	10	0,00166345	0,00162526	0,00159733	0,00158417	0,0015427	0,00151672	0,00158827	4,88472E-05
DP 1	30	15	30	15	0,00159275	0,00156331	0,00154353	0,00154797	0,0014895	0,00146841	0,00153425	4,25797E-05
DP 2	40	20	40	20	0,00155945	0,00152506	0,00152034	0,00152133	0,00147823	0,00145468	0,00150985	3,4099E-05
DP 3	50	25	50	25	0,00152674	0,00148952	0,00149809	0,00147846	0,00145082	0,00145101	0,00148244	2,665E-05
DP 4	60	30	60	30	0,00150487	0,0014811	0,00147724	0,00144392	0,00143684	0,00144536	0,00146489	2,45668E-05
DP 5	70	35	70	35	0,00149567	0,00148515	0,00146773	0,00143833	0,00143543	0,00142832	0,00145844	2,59081E-05

Cuadro 19: Tabla de resultados de caudal de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

Name	H1	H2	Ancho	H1med	Outlet 1	Outlet 2	Outlet 3	Outlet 4	Outlet 5	Outlet 6	Promedio	Desviacion Estandar
Units	mm	mm	mm	mm	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Current	80	20	40	40	0,00145705	0,00147315	0,00147717	0,00149762	0,00149701	0,00144596	0,00147466	1,90126E-05
DP 1	80	30	40	40	0,00143985	0,0014634	0,00146813	0,00148355	0,00148039	0,0014489	0,00146403	1,57031E-05
DP 2	80	40	40	40	0,00142897	0,00145585	0,00146052	0,00147529	0,00147126	0,00144291	0,0014558	1,59519E-05
DP 3	80	50	40	40	0,00141924	0,00144798	0,00145278	0,00146796	0,00146333	0,00143875	0,00144834	1,61662E-05
DP 4	80	60	40	40	0,0014113	0,00144422	0,0014474	0,0014616	0,00145693	0,00143575	0,00144287	1,64227E-05
DP 5	80	70	40	40	0,00140536	0,00143926	0,00144271	0,00145777	0,00145324	0,001434	0,00143872	1,69551E-05

Cuadro 20: Tabla de resultados de caudal de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando una sola de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

Name	P13 - D2	P12 - D1	P23 - P OUT1	P24 - P OUT2	P25 - P OUT3	P26 - P OUT4	P27 - P OUT5	P28 - P OUT6	Promedio	Desviacion estandar
Units	mm	mm	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
Current	20	80	7,3306675	7,5840187	7,4910398	7,1685424	6,98631	6,4327087	7,16554785	0,3824299
DP 1	30	80	6,4511685	6,8631091	6,7735672	6,4742885	6,4692597	6,1796393	6,53517205	0,22578985
DP 2	40	80	5,97612	6,3345652	6,3255796	6,1346884	6,1618829	5,8330374	6,12764558	0,17933645
DP 3	50	80	5,4817982	5,9415774	5,8750601	5,7204494	5,6542072	5,7809348	5,74233785	0,14996019
DP 4	60	80	5,3314586	5,7830939	5,7529445	5,6270099	5,5921636	5,6048737	5,61525737	0,14631465
DP 5	70	80	5,131433	5,6519389	5,6442518	5,5843821	5,6253114	5,4801517	5,51957815	0,18287202

Cuadro 21: Tabla de resultados de presión de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).

Name	P1 - H2	P2 - MedH2	P3 - V2	P4 - MedV2	P23 - P OUT1	P24 - P OUT2	P25 - P OUT3	P26 - P OUT4	P27 - P OUT5	P28 - P OUT6	Promedio	Desviacion estandar
Units	mm	mm	mm	mm	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
Current	20	10	20	10	7,4843068	7,029634	6,7464828	6,578825	6,2674584	5,9849973	6,68195072	0,48938843
DP 1	30	15	30	15	6,8234501	6,5039172	6,319303	6,2830968	5,8394403	5,6773896	6,2410995	0,38626068
DP 2	40	20	40	20	6,5419903	6,1886125	6,1172271	6,1030374	5,7561431	5,5889215	6,04932198	0,30755564
DP 3	50	25	50	25	6,2741652	5,9253621	5,9386535	5,7514763	5,5678754	5,5571327	5,83577753	0,24742467
DP 4	60	30	60	30	6,0986261	5,8378415	5,783196	5,5106077	5,4602022	5,516911	5,70123075	0,22792892
DP 5	70	35	70	35	6,0343866	5,8812895	5,7114029	5,4633226	5,4538937	5,4024076	5,65778382	0,23778941

Cuadro 22: Tabla de resultados de presión de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

Name	P14 - h1	P16 - h2	P9 - ancho	P15 - h1med	P23 - P OUT1	P24 - P OUT2	P25 - P OUT3	P26 - P OUT4	P27 - P OUT5	P28 - P OUT6	Promedio	Desviacion estandar
Units	mm	mm	mm	mm	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
Current	80	20	40	40	5,5535212	5,8551135	5,8471441	5,6932135	5,6594796	5,4566312	5,67751718	0,14436706
DP 1	80	30	40	40	5,4232564	5,7261381	5,7378397	5,624661	5,5768008	5,4818301	5,59508768	0,11627167
DP 2	80	40	40	40	5,3425336	5,6560707	5,6746817	5,5665216	5,5227757	5,4368758	5,53324318	0,11687978
DP 3	80	50	40	40	5,2708211	5,5955234	5,6189561	5,5075488	5,4646273	5,4030533	5,476755	0,11780148
DP 4	80	60	40	40	5,2126298	5,546948	5,5706716	5,4671507	5,4347095	5,3806577	5,43546122	0,11858415
DP 5	80	70	40	40	5,1693039	5,518918	5,5417595	5,4315267	5,3998089	5,3676796	5,40483277	0,12203577

Cuadro 23: Tabla de resultados de presión de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando una sola de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

Name	P13 - D2	P12 - D1	P23 - P OUT1	P24 - P OUT2	P25 - P OUT3	P26 - P OUT4	P27 - P OUT5	P28 - P OUT6	Promedio	Desviacion estandar
Units	mm	mm	°k	°k	°k	°k	°k	°k	°k	°k
Current	20	80	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 1	30	80	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 2	40	80	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 3	50	80	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 4	60	80	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 5	70	80	300	300	300	300	300	300	300	0

Cuadro 24: Tabla de resultados de temperatura de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base circular con variaciones del diámetro a lo largo de su eje longitudinal (Cono).

Name	P1 - H2	P2 - MedH2	P3 - V2	P4 - MedV2	P23 - P OUT1	P24 - P OUT2	P25 - P OUT3	P26 - P OUT4	P27 - P OUT5	P28 - P OUT6	Promedio	Desviacion estandar
Units	mm	mm	mm	mm	°K	°K	°K	°K	°K	°K	°K	°K
Current	20	10	20	10	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 1	30	15	30	15	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 2	40	20	40	20	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 3	50	25	50	25	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 4	60	30	60	30	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 5	70	35	70	35	300	300	300	300	300	300	300	0

Cuadro 25: Tabla de resultados de temperatura de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

Name	P14 - h1	P16 - h2	P9 - ancho	P15 - h1med	P23 - P OUT1	P24 - P OUT2	P25 - P OUT3	P26 - P OUT4	P27 - P OUT5	P28 - P OUT6	Promedio	Desviacion estandar
Units	mm	mm	mm	mm	°K	°K	°K	°K	°K	°K	°K	°K
Current	80	20	40	40	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 1	80	30	40	40	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 2	80	40	40	40	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 3	80	50	40	40	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 4	80	60	40	40	300	300	300	300	300	300	300	0
DP 5	80	70	40	40	300	300	300	300	300	300	300	0

Cuadro 26: Tabla de resultados de temperatura de los puntos de diseño de la geometría parametrizada de base cuadrada variando una sola de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

ANEXO C: GRÁFICOS DE COMPORTAMIENTO DE VELOCIDAD PRESIÓN Y TEMPERATURA.

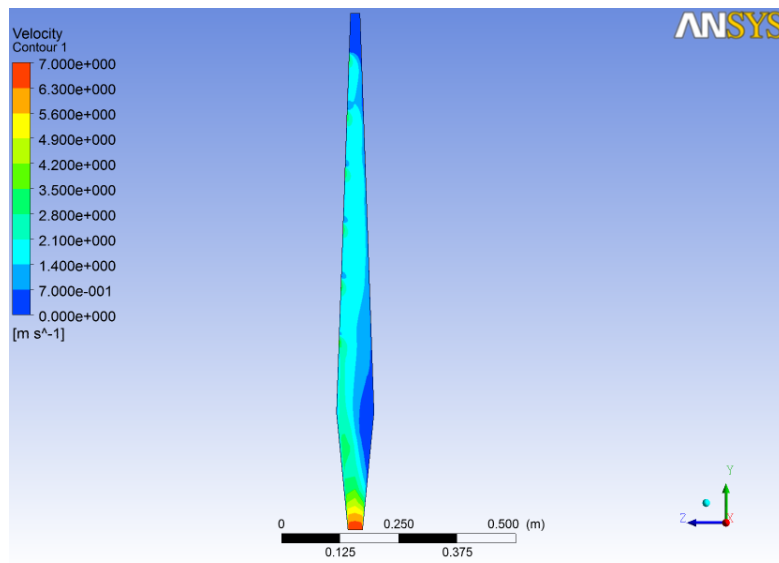


Figura 4: Gráfico de comportamiento de la velocidad en la geometría de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

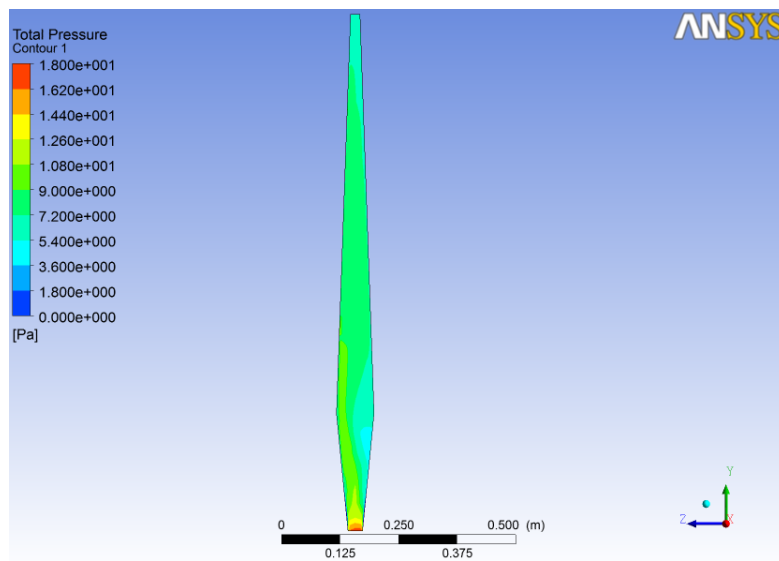


Figura 5: Gráfico de comportamiento de la presión en la geometría de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

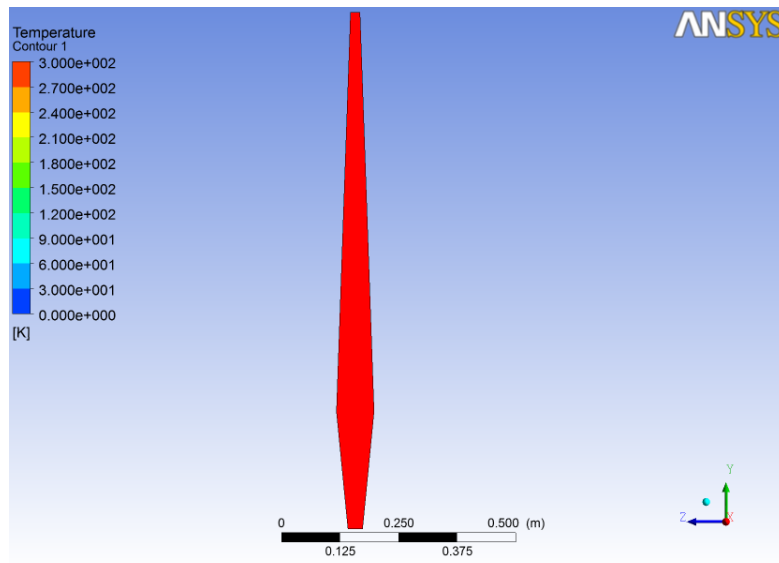


Figura 6: Gráfico de comportamiento de la temperatura en la geometría de base cuadrada variando sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

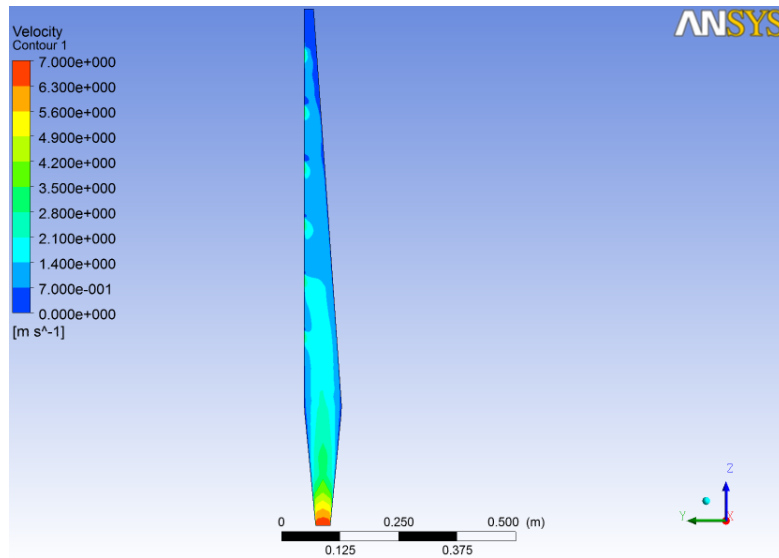


Figura 7: Gráfico de comportamiento de la velocidad en la geometría de base cuadrada variando solo una de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

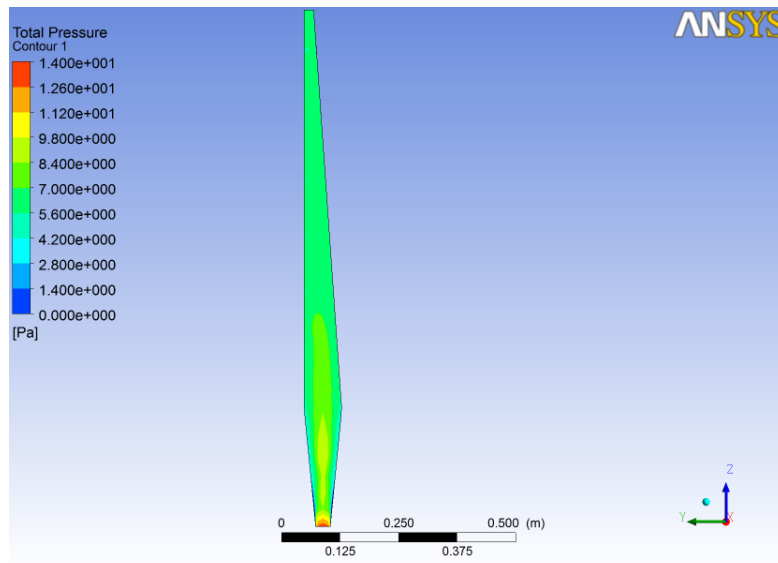


Figura 8: Gráfico de comportamiento de la presión en la geometría de base cuadrada variando solo una de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

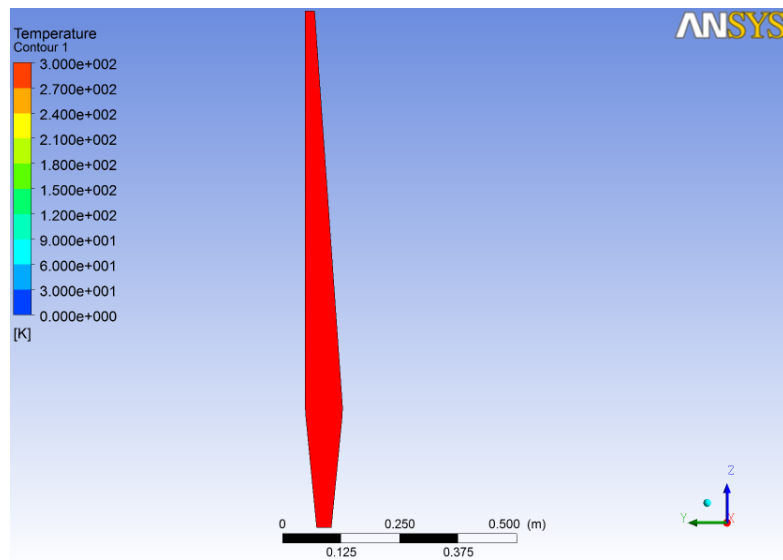


Figura 9: Gráfico de comportamiento de la temperatura en la geometría de base cuadrada variando solo una de sus dimensiones a lo largo de su eje longitudinal.

Bibliografía

- [1] CENGEL YUNUS A. and CIMBALA JHON M. *MECANICA DE FLUIDOS Fundamentos y Aplicaciones*. Mc Graw Hill, Mexico, 2006.
- [2] Orszag S. A., Yakhot V., Flannery W. S., Boysan F., Choudhury D., Maruzewski J., and Patel B. *Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations*. In International Conference on Near- Wall Turbulent Flows. Tempe, Arizona, 1993.
- [3] Ress J. A. and Bettison J. *Procesado Termico y Envasado de los Alimentos*. Acribia, España, 1991.
- [4] ASAE D271.2 ASAE. *Agricultural Engineers Yearbook*. St. Joseph, Michigan, 1980.
- [5] Moreno B. *Microorganismos de los Alimentos*. Acribia, España, 1985.
- [6] Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD*, volume DCW Industries. Inc. La Canada, California, 1998.
- [7] Launder B. E. and Spalding D. B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England, 1972.
- [8] Treybal R. E. *Operaciones de Transferencia de Masa*. Mc Graw Hill, New York, 2 edition, 2001.
- [9] Maupoey Pedro Fito, Andrés Grau Ana Maria, Barat Baviera Jose Manuel, and Ana Maria Albors Sorolla. *Introduccion al Secado de Alimentos*. Universidad Politecnica de Valencia, España, 2001.
- [10] Brennan J. G., J. R. Butters, and Cowell N. D. *Las Operaciones de la Ingenieria de los Alimentos*. Acribia, España, 1998.
- [11] Perry J. H. *Chemical Engineering Handbook*. Mc Graw Hill, New York, 6ta edition, 1992.
- [12] ANSYS. Inc. ANSYS Help (2011 sas ip, inc. all rights reserved. unauthorized use, distribution or duplication is prohibited).
- [13] Geankoplis C. J. *Procesos de Transporte y Operaciones unitarias*. CECSA, 1998.

- [14] Spalart P. and Allmaras S. *A one-equation turbulence model for aerodynamic flows*. Technical Report AIAA-92-0439. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992.
- [15] Menter F. R. *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*. AIAA Journal, August 1994.
- [16] Menter F. R. *Review of the SST Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective*, volume 23. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2009.
- [17] Menter F. R., Kuntz M., and Langtry R. *Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model*. editorsTurbulence, Heat and Mass Transfer. In K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, begell house inc edition, 2003.
- [18] Okos M. R., Narsimhan G., Singh R. K., and Weitnauer A. C. *Handbook of Food Engineering*. Marcel Dekker, New York, 1992.
- [19] Badui D. S. *Química de los Alimentos*. Pearson Educacion, Mexico, 1993.
- [20] Mujumdar A. S. *Handbook of industrial drying*, volume 1 and 2. Marcel Dekker, New York, 1995.
- [21] Orrego Santiago. *SIMULACIÓN DE FLUIDOS UTILIZANDO COMPUTADORES: una moderna herramienta para el estudio y análisis de fluidos*, November 2009.
- [22] Shih T.H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., and Zhu J. *A New k - Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation*. Computers fluids edition, 1995.
- [23] Yakhot V. and Orszag S. A. *Renormalization Group Analysis of Turbulence I Basic Theory*. Journal of Scientific Computing, 1986.
- [24] Desrosier Norman w. *Conservación de Alimentos*. Continental, Mexico, 1995.