



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL ATOMIZADOR SACMI ATM-15 DE LA EMPRESA C. A. ECUACERÁMICA POR MEDIO DEL DISEÑO DE UN DIFUSOR DE 18000 m³/h

CARLOS JAVIER CAMPOS ORTIZ

Trabajo de Titulación modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAGÍSTER EN DISEÑO MECÁNICO

Riobamba - Ecuador

Enero 2021

©2021, Carlos Javier Campos Ortiz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado “Optimización de la eficiencia del atomizador SACMI ATM-15 de la Empresa C. A. Ecuacerámica por medio del diseño de un difusor de 18000 m³/h”, de responsabilidad del Sr. Carlos Javier Campos Ortiz, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Ing. Luis Eduardo Hidalgo Almeida; PhD

PRESIDENTE

LUIS
EDUARDO
HIDALGO
ALMEIDA

Firmado digitalmente por LUIS
EDUARDO HIDALGO ALMEIDA
Nombre de reconocimiento (DN):
c=EC, o=BANCO CENTRAL DEL
ECUADOR, ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE INFORMACION
KICCA, h=QUITO,
serialNumber=00044288, cn=LUIS
EDUARDO HIDALGO ALMEIDA
Fecha: 2021.01.19 10:38:02 -0500'

Ing. Jorge Isaias Caicedo Reyes; Mag

DIRECTOR

Firmado digitalmente por:
JORGE ISAIAS
CAICEDO REYES

Ing. Miguel Angel Escobar Guachambala; Mag

MIEMBRO

Firmado digitalmente
por MIGUEL ANGEL
ESCOBAR
GUACHAMBALA
Fecha: 2021.01.20
17:13:46 -0500'

Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade; Mtr

MIEMBRO

Firmado digitalmente por:
GEOVANNY
GUILLERMO NOVILLO
ANDRADE

Riobamba, enero 2021

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Carlos Javier Campos Ortiz declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Carlos Javier Campos Ortiz
No. Cédula: 0602886590

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Carlos Javier Campos Ortiz, declaro que el presente **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación de Maestría.

Carlos Javier Campos Ortiz
No. Cédula: 0602886590

DEDICATORIA

A mis padres, Hilda y Gustavo, ejemplo de entrega, dedicación, sacrificio, fidelidad, honradez y trabajo.

A Dollys, por soportarme siempre.

A Pamela y Adriana, razón y motivo de mi superación.

A mis hermanos y familia.

A mis amigos.

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, sus autoridades, personal docente y administrativo.

A los ingenieros Isaías Caicedo, Miguel Escobar y Geovanny Novillo, quienes con su guía y exigencia han contribuido para la realización del presente trabajo.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	xv
SUMMARY	xvi
CAPÍTULO I	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.1.1 Situación Problemática	1
1.1.2 Formulación del problema	1
1.1.3 Preguntas directrices	1
1.1.4 Justificación	2
1.1.5 Objetivo general.....	1
1.1.6 Objetivos específicos	1
1.1.7 Hipótesis	1
CAPÍTULO II	2
2 MARCO TEÓRICO.	2
2.1 Antecedentes.	2
2.2 Base Teórica.....	6
2.2.1 Secado.....	6
2.2.2 Clasificación y selección de secadores.....	7
2.2.3 Secado por atomización.	8
CAPÍTULO III.....	11
3 METODOLOGÍA.....	11
3.1 Tipo y diseño de investigación.	11
3.2 Métodos de investigación a utilizar.	11
3.3 Enfoque de la investigación.....	11
3.4 Alcance.....	12
3.5 Población de estudio.....	12
3.6 Unidad de análisis.	12

3.7	Selección de la muestra	12
3.8	Tamaño de la muestra.....	12
3.9	Técnica de recolección de datos.	12
3.10	Instrumentos de recolección de datos.	12
3.11	Instrumentos para procesar datos recopilados	13
CAPÍTULO IV.....		14
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	14
4.1	Determinación de la geometría del difusor	14
4.1.1	Operación del sistema actual.....	14
4.1.2	Configuración geométrica del difusor	15
4.2	Dimensionamiento del difusor.....	17
4.2.1	Parámetros de diseño	17
4.2.2	Determinación de dimensiones del difusor	18
4.2.3	Desarrollo de los álabes del difusor	24
4.3	Determinación de las variables de diseño para cualquier difusor	25
4.4	Selección del material	25
4.4.1	Filtrado del material.....	26
4.4.2	Selección final.	28
4.5	Cálculo de la energía cinética de turbulencia en el sistema de caracol	28
4.6	Cálculo de la energía cinética de turbulencia en el sistema de difusor.....	29
4.7	Proceso de simulación para las cámaras de secado.....	31
4.8	Modelación de la cámara de secado con sistema de caracol	32
4.9	Modelación del difusor.....	32
4.10	Simulación del movimiento de aire en la cámara de secado	34
4.10.1	Preprocesamiento para el sistema de caracol.	34
4.10.2	Procesamiento para el sistema de caracol.	40
4.10.3	Postprocesamiento para el sistema de caracol.	43
4.10.4	Simulación de la cámara de secado con difusor	44
4.11	Comparación de resultados de simulación entre el caracol y el difusor de 8 álabes ...	47

4.12	Selección del difusor adecuado	47
4.13	Cálculo de la eficiencia del atomizador con sistema de caracol.....	49
4.14	Cálculo de la eficiencia del atomizador alcanzada con el difusor	52
4.15	Cálculo de la reducción en el consumo de combustible.....	52
4.16	Resumen de resultados obtenidos	53
CONCLUSIONES		54
RECOMENDACIONES		55
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Métodos de secado vs forma de alimentación del material.	7
Tabla 1-4: Materiales del segundo filtrado y que se encuentran disponibles en el mercado ecuatoriano	27
Tabla 2-4: Comparación de propiedades mecánicas de aceros existentes en el mercado.	27
Tabla 3-4: Valoración de la calidad de malla según criterio de oblicuidad.	37
Tabla 4-4: Comparación de pesos entre sistema de caracol y sistema de difusor.	49
Tabla 5-4: Resumen de resultados obtenidos.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Atomizador SACMI ATM-15 de la empresa Ecuacerámica.....	9
Figura 2-2: Esquema de los componentes de un atomizador.....	9
Figura 3-2: Distribuidor de aire caliente en forma de voluta.....	10
Figura 1-4: Representación del flujo de aire en el sistema actual.....	14
Figura 2-4: Representación esquemática del flujo de aire al interior de la cámara de secado. ..	15
Figura 3-4: Esquema inicial de ingreso de aire propuesto.....	15
Figura 4-4: Primera restricción al flujo de aire.....	16
Figura 5-4: Conducción del flujo de aire por debajo de la restricción.....	16
Figura 6-4: Representación del flujo una vez efectuada la modificación a la restricción.	17 17
Figura 7-4: Representación del área de sección transversal para los ductos.....	18
Figura 8-4: Dimensiones del actual sistema de distribución.....	19
Figura 9-4: Dimensiones de los diámetros medios del caracol.....	19
Figura 10-4: Circunferencia interna que determina el diámetro de la salida primaria del difusor.....	20
Figura 11-4: Detalle de zona en la que no se produce intercambio de calor entre el aire caliente y el producto atomizado.	20 21
Figura 12-4: Diámetros del ingreso de aire caliente al difusor.....	21
Figura 13-4: Volumen de control zona primaria del difusor.....	22
Figura 13-4: Vista lateral del volumen de control de la zona primaria del difusor.....	22
Figura 14-4: Secuencia de la construcción del perfil para la sección primaria del difusor.....	23
Figura 15-4: Trazado del perfil de la sección secundaria del difusor.....	24
Figura 16-4: Desarrollo de la voluta para los álabes.....	24
Figura 17-4: Parámetros para un segundo filtrado de los materiales.....	26
Figura 18-4: Diagrama de flujo del proceso de simulación de la cámara de secado.....	31
Figura 19-4: Modelación de la cámara de secado con sistema de caracol.....	32
Figura 20-4: Difusor de cuatro álabes primarios.....	33
Figura 21-4: Difusor de seis álabes primarios.....	33
Figura 22-4: Difusor de ocho álabes primarios.....	33
Figura 23-4: Difusor de diez álabes primarios.....	34
Figura 24-4: Modelo exportado al generador de geometría de CFX-ANSYS.....	35
Figura 25-4: Volumen de control para sistema de caracol.....	35
Figura 26-4: Detalle del volumen de control generado para el sistema de caracol.....	36

Figura 27-4: Parámetros de dimensionamiento de la malla.....	38
Figura 28-4: Parámetros de calidad de la malla.	38
Figura 29-4: Gráfica de número de elementos del mallado vs valor de oblicuidad.	38
Figura 30-4: Mallado de la cámara de secado con sistema de caracol.....	39
Figura 31-4: Esquemmatización del criterio de oblicuidad.	39
Figura 32-4: Configuración de la entrada de aire al sistema de caracol.	40
Figura 33-4: Configuración de la salida de aire del volumen de control.	41
Figura 34-4: Configuración de las paredes del volumen de control.	41
Figura 35-4: Volumen de control para el sistema de caracol.....	42
Figura 36-4: Gráfica de convergencia de resultados	42
Figura 37-4: Parámetros para la visualización.	43
Figura 44-4: Comparación de las simulaciones del sistema con caracol y del sistema con difusor de ocho álabes primarios.	48
Figura 45-4: Vista superior de la simulación del flujo de aire al interior de la cámara de secado para los distintos tipos de difusor.	49

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A** PROCESO DE SIMULACIÓN PARA EL DIFUSOR DE 8 ÁLABES PRIMARIOS
- ANEXO B** FOTOS DEL PROCESO DE CONSTRUCCION E INSTALACIÓN DEL DIFUSOR
- ANEXO C** PLANOS DEL DIFUSOR

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo optimizar la eficiencia del atomizador SACMI ATM-15 de la empresa C. A. Ecuacerámica por medio del diseño y la simulación de la operación de un difusor para aire caliente de 18000 m³/h. Como una primera etapa, se determinaron las características geométricas de la cámara de secado del atomizador en el sistema actual en cuanto al ingreso de aire caliente; a partir de dichas características sería diseñado el difusor que permitirá una circulación interna de aire caliente que mejore la eficiencia del equipo. Para determinar la diferencia entre el sistema actual y el sistema propuesto, se calculó la energía cinética de turbulencia, pudiéndose evidenciar que existe un incremento energético en el sistema de difusor. A continuación, se efectuó una modelación y una simulación del flujo de aire caliente al interior de la cámara de secado, tanto para el sistema antiguo como para el difusor, con el fin de visualizar las variaciones existentes en el flujo de aire que ingresa al atomizador, con lo cual se pudo evidenciar que se puede conseguir una mejor distribución del aire al interno del atomizador. Debido a que no se encontró en la bibliografía existente ecuaciones que permitan la determinación teórica de la eficiencia de los sistemas de ingreso de aire a las cámaras de secado de los atomizadores, una vez determinado el diseño que técnicamente podía ser implementado, se procedió a la construcción y reemplazo del difusor en el sistema actual; posteriormente a la modificación efectuada en el atomizador, se pudo evidenciar un incremento en la eficiencia del equipo de un 6%, cuyo resultado trae como consecuencia un ahorro anual para la empresa de aproximadamente \$55000 en consumo de combustible.

Palabras clave: <EFICIENCIA DEL ATOMIZADOR>, <SIMULACIÓN OPERACIÓN DE DIFUSOR>, <ENERGÍA CINÉTICA DE TURBULENCIA>, <CÁMARA DE SECADO>, <MODELACIÓN Y SIMULACIÓN FLUJO DE AIRE CALIENTE>



Firmado electrónicamente por:
LUIS ALBERTO
CAMINOS
VARGAS



0001-DBRAI-UPT-IPEC-2020

ABSTRACT

The following investigation's objective is to an efficient atomizer of the SACMI ATM-15 atomizer from the company C. A. Ecuacerámica through the design and simulation of the operation of a diffuser for hot air of 18000 m³ / h. As a first stage, the geometric characteristics of the drying chamber of the atomizer in the current system, it was determined in terms of the entry of hot air; Based on these characteristics, the diffuser would be designed that will allow an internal circulation of hot air that improves the efficiency of the equipment. To determine the difference between the current system and the proposed system, the turbulence kinetic energy was calculated, it can show that there is an energy increase in the diffuser system. Next, modeling and simulation of the hot air flow into the drying chamber was carried out, both for the old system and for the diffuser, to visualize the existing variations in the flow of air entering the atomizer, with which it was evident that a better distribution of the air inside the atomizer can be achieved. Because it did not find equations in the existing bibliography that allow the theoretical determination of the efficiency of the air intake systems to the drying chambers of the atomizers, once the design that could be technically implemented was determined, it proceeded to the construction and replacement of the diffuser in the current system; After the modification made to the atomizer, it was possible to see an increase in the efficiency of the equipment of 6%, the result of which is an annual saving for the company of approximately \$ 55,000 in fuel consumption..

Key words: <MECHANICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY>, <ATOMISER EFFICIENCY>, <DIFFUSER OPERATION SIMULATION>, <TURBULENCE KINETIC ENERGY>, <DRYING CHAMBER>, <HOT AIR FLOW MODELING > <HOT AIR FLOW SIMULATION>

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Situación Problemática

El desarrollo de los países industrializados a nivel mundial, ha estado acompañado de acciones que han generado un impacto ambiental negativo en muchas zonas del planeta. Esta situación ha provocado que la Organización de las Naciones Unidas tome acciones y es así que en año 1985 establece su Programa para el Medio Ambiente.

La ONU en conjunto con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL, desarrollaron el documento denominado “Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe”.

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, aprobada en septiembre de 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, establece una visión transformadora hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental de los 193 Estados Miembros que la suscribieron y será la guía de referencia para el trabajo de la institución en post de esta visión durante los próximos 15 años (C

EPAL, 2018).

El Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021. Toda una Vida, en su eje 2 Economía al servicio de la sociedad, establece en el objetivo 4, Consolidar la sostenibilidad del sistema económico, social y solidario, y afianzar la dolarización, la política 4.7, Incentivar la inversión privada nacional y extranjera de largo plazo, generadora de empleo y transferencia tecnológica, intensiva en componente nacional y con producción limpia; en sus diversos esquemas, incluyendo mecanismos de asociatividad y alianzas público-privadas, con una regulación previsible y simplificada. (SENPLADES, 2017).

Los esfuerzos que se hacen a nivel mundial y que trascienden a cada uno de los países que se preocupan por el impacto ambiental generado por el desarrollo industrial, hace que a nivel regional y nacional existan incentivos para el desarrollo de procesos productivos menos contaminantes.

La empresa C. A. Ecuacerámica, es una empresa del sector industrial manufacturero dedicada a la fabricación de revestimiento cerámico para pisos y paredes cuya operación tiene más de 55 años. En todo el tiempo de funcionamiento de la empresa, han existido varias etapas de remodelación de maquinaria y actualización tecnológica, cuyo impulso se debe al crecimiento productivo.

Sin embargo, aún existen equipos operativos al 100% de funcionalidad, pero cuya eficiencia debe ser mejorada en vista que tienen más de 25 años de operación y deben ser rediseñados de acuerdo al desarrollo tecnológico que ha evolucionado con el paso del tiempo. Uno de los equipos que deben ser repotenciados es un atomizador de pasta, de procedencia italiana de marca SACMI modelo ATM-15, para el cual es necesario rediseñar el sistema de ingreso y circulación de aire caliente de manera que se incremente su eficiencia y por lo tanto, el consumo de combustible requerido para su operación, sea el óptimo.

1.1.2 Formulación del problema

¿De qué manera el diseño de un difusor para aire caliente de 18000 m³/h para el atomizador SACMI ATM-15 de la empresa C. A. Ecuacerámica permitirá optimizar la eficiencia del equipo?

1.1.3 Preguntas directrices

¿De qué manera el diseño del difusor aportará a la mejora de la eficiencia del equipo?

¿En qué forma la selección del material adecuado para la construcción del difusor aportará a la mejora de la eficiencia del equipo?

¿De qué manera el efectuar la simulación de la operación del difusor del atomizador aportará al mejora de la eficiencia del equipo?

¿En qué forma el cálculo de la eficiencia teórica del difusor nuevo aportará a la mejora de la eficiencia del equipo?

¿De qué manera la determinación del TIR y el VAN de la construcción del difusor aportará a la mejora de la eficiencia del equipo?

1.1.4 Justificación

El producto de esta investigación tiene un alto impacto en la implementación de tecnologías de disminución del impacto ambiental causado por las actividades industriales.

Mediante la ejecución del presente proyecto, se pretende alcanzar el diseño de un difusor de aire caliente más eficiente para la operación de un atomizador. El incremento de la eficiencia del equipo se traduce en una disminución de combustible para la producción de polvo atomizado.

El beneficiario directo de la presente investigación es la empresa C. A. Ecuacerámica. Los beneficiarios indirectos, entre otros:

- Empresas de otros sectores industriales cuyo proceso involucra la intervención de un secador por atomización.
- El medio ambiente por la implementación de un equipo con mayor eficiencia energética que la actual.

El aporte de la presente investigación es la consecución de un nuevo dise

ño de difusor de aire caliente para equipos de atomización de pasta en la industria cerámica.

1.1.5 Objetivo general

Optimizar la eficiencia del atomizador SACMI ATM-15 de la empresa C. A. Ecuacerámica por medio del diseño, simulación e implementación de un difusor para aire caliente de 18000 m³/h.

1.1.6 Objetivos específicos

- Elaborar el diseño del difusor.
- Seleccionar el material adecuado para la construcción del difusor.
- Efectuar la simulación de la operación del difusor de aire caliente del atomizador en un software CAE.
- Determinar la eficiencia del difusor diseñado.

1.1.7 Hipótesis

¿El diseño de un difusor de aire caliente de 18000 m³/h para el atomizador SACMI ATM-15 de la empresa C. A. Ecuacerámica si permitirá optimizar la eficiencia del equipo?

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO.

2.1 Antecedentes.

“Diseño óptimo y control del proceso de secado por atomización de micro partículas huecas”.

Autor: Vikram Shabde, Texas Tech University (2006),

Los procesos de secado por pulverización tienen una amplia variedad de aplicaciones en industrias desde la fabricación de alimentos hasta productos farmacéuticos y, más recientemente, micropartículas poliméricas huecas. A pesar de los amplios usos del proceso de secado por aspersión, el enfoque del diseño del secador por aspersión ha sido experimental. Una razón para esto es que el propio proceso de secado por aspersión exhibe ciertas características, como la transferencia de masa y calor rápida y una naturaleza distribuida, que son desafiantes desde la perspectiva del modelado de los primeros principios. Además, el control de estos procesos es difícil, ya que las mediciones directas en línea en tiempo real de la calidad del producto (por ejemplo, el tamaño de partícula) no están disponibles. En el proceso de secado por pulverización, una pulverización líquida se pone en contacto con un gas de calentamiento para evaporar el disolvente presente en la solución. El producto está en forma de partículas. El contacto entre el gas de calentamiento y el rociado de líquido se puede lograr ya sea en forma simultánea o contracorriente. En el diseño del secador por pulverización, el tiempo de residencia de las partículas individuales dentro del secador por pulverización es importante. Una partícula debe permanecer en el secador por aspersión el tiempo suficiente para que se evapore por completo el disolvente, pero no demasiado tiempo para causar la degradación del producto, por ejemplo, mediante carbonización.

En esta investigación, se desarrolla y presenta un modelo riguroso basado en los principios del secador por aspersión. El modelo consta de dos partes: la primera, estudia los cambios que se producen en una sola gota a medida que se expone al gas de calefacción; el segundo, rastrea las partículas individuales y calcula la transferencia total de calor y masa entre la fase de gota y el gas de calefacción. La primera parte del modelo consiste en un conjunto acoplado de ecuaciones diferenciales parciales parabólicas con una condición de límite móvil. Este modelo se resuelve

utilizando el Método de elemento finito móvil ponderado por degradado. Para resolver la segunda parte del modelo, se utiliza un marco de Lagrangian para rastrear las gotas individuales. La tasa de flujo del gas de calefacción se calcula a partir de las ecuaciones empíricas disponibles en la literatura. Los resultados del modelo se validan frente a una unidad de secado por pulverización experimental a escala de laboratorio existente. El modelo validado se utiliza para desarrollar un diseño óptimo del sistema de secado por aspersión.

Se desarrolla una estructura de control para regular las propiedades del producto del secador por pulverización. Las dos variables de propiedades importantes que deben controlarse son el tamaño medio de las partículas (diámetro de las partículas) y la concentración de solvente residual en el producto. Las mediciones confiables y eficientes en línea y en tiempo real de estas variables son difíciles de obtener. Por lo tanto, estas variables deben estimarse a partir de las mediciones disponibles, tales como la temperatura del gas de calefacción medida en puntos a lo largo de la longitud del secador por aspersión. Aplicando el método de Regresión de Componentes Principales, se desarrollan modelos inferenciales para estimar el tamaño de partícula y la concentración de solvente residual a partir de las mediciones de temperatura del gas de calefacción. Usando estas estimaciones, se desarrolla y prueba una estrategia de control adecuada en presencia de las perturbaciones esperadas. Finalmente, se aborda el acoplamiento de diseño y control que existe naturalmente debido a la interconexión de las operaciones unitarias y el reciclaje de material y energía. Tradicionalmente, el diseño del proceso y la síntesis del controlador se han tratado como tareas distintas con la síntesis del controlador después de la generación de la hoja de flujo del diseño del proceso. Este enfoque en serie ignora los efectos que las decisiones de diseño del proceso tienen en la síntesis de la estructura de control. Por lo tanto, el rendimiento de control alcanzable en función del diseño del proceso. En este trabajo, se utiliza una nueva estrategia de optimización de dos niveles para optimizar tanto el diseño del proceso como la síntesis del controlador. La estrategia de dos niveles opera en dos niveles. En el primer nivel, el problema combinado de diseño y control se resuelve sujeto solo a las restricciones del problema de diseño. En el segundo nivel, el problema de control se resuelve parametrizado por la solución de diseño. Las soluciones encontradas en los enfoques de dos niveles y en serie se comparan y analizan.

“Flujo turbulento en la cámara de un atomizador”

Hiromoto Usui, Yuji Sano, Yoshihiro Yanagimoto y Yoshito Yamasaki, Department of Chemical Engineering, Yamaguchi University, Japón (1985).

El flujo turbulento en una cámara de secado por pulverización se analizó experimentalmente. La velocidad de fluctuación instantánea se midió mediante un anemómetro de hilo caliente con una sonda de película dividida. Esta medida nos permitió obtener el campo de velocidad correcto en la cámara sin atomización. La fluctuación turbulenta en la cámara de secado por aspersión fue extremadamente mayor que el nivel turbulento habitual de flujo de chorro o tubo libre. Se sugiere que la gran fluctuación puede atribuirse a la naturaleza inestable del chorro descendente, causada por la interacción entre la forma de la cámara y el chorro descendente.

“Modelado del secado de gotitas en cámaras de pulverización utilizando dinámica de fluidos computacional 2D y 3D”

Autores: M. Mezhericher, A. Levy, and I. Borde, Pearlstone, Centre for Aeronautical Engineering Studies, Department of Mechanical Engineering, Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel (2009).

Se han realizado cálculos aximétricos 2D y 3D en estado estable e inestable de los procesos de transferencia de calor y masa en la cámara de pulverización de cilindro en cono. El modelo teórico del proceso se basa en el enfoque de Euler-Lagrange en dos fases para el flujo de gotas de gas. En estado estacionario, se consideran dos casos: flujo de aire caliente solamente (sin pulverización de líquidos) y transferencia de calor y masa entre la pulverización de agua y el aire caliente. Para el estado inestable, se incluyen las interacciones gota-gota en el agua pulverizada. Se ha encontrado que el modelo de simetría de eje 2D es adecuado para cálculos numéricos de consumo de recursos rápidos y bajos y predice valores de velocidad, temperatura y fracción de masa de vapor en la cámara de pulverización con una precisión razonable. Sin embargo, debido a sus restricciones, el modelo de eje asimétrico 2D no predice la asimetría de los patrones de flujo y la presencia del flujo de aire transversal y no puede proporcionar una imagen tridimensional real de las trayectorias de las partículas dentro de la cámara de pulverización. En el caso de que las características anteriores sean importantes, la utilización del modelo 3D es esencial.

“Uso de la dinámica de fluidos computacional para evaluar las configuraciones alternativas de la cámara del secador por pulverización”.

Autores: Lixin Huang, Kurichi Kumar, y A. S. Mujumdar¹, Mechanical Engineering Department, National University of Singapore, Singapore CFD Division, Institute of High Performance Computing, Singapore Science Park II, Singapur (2007).

Se llevó a cabo un estudio de simulación dinámica de fluidos computacional para comparar los patrones de flujo y temperatura del gas, así como las trayectorias de las partículas para una lechada líquida atomizada por boquilla de presión, secada en cuatro geometrías de cámara diferentes. Las condiciones de gas y líquido se mantienen iguales para las cuatro geometrías de cámara. El flujo de gas es una corriente paralela y entra y sale de manera central, manteniendo así un patrón de flujo axi-simétrico bidimensional. Se encontró que, como resultado de las variaciones en el flujo de gas y los patrones térmicos en las cuatro configuraciones examinadas (es decir, cilindro en cono, cónico, reloj de arena y axi-simétrico en forma de linterna) las trayectorias de las gotitas, los tiempos de residencia, y los tiempos de secado varían. Se observó que el volumen de la cámara efectiva ocupado por las partículas de secado depende del diseño de la cámara.

“Medición y modelado del patrón de flujo de aire en un atomizador de una planta piloto”.

F. G. Kieviet, J. Van Raaij, P. P. E. A. De Moor and P. J. A. M. Kerkhof

Laboratory of Separation Processes and Transport Phenomena, Department of Chemical Engineering, Eindhoven University of Technology, Holanda (1997).

El patrón de flujo de aire en un secador por pulverización de planta piloto simultánea (diámetro 2,2 metros) se modeló y midió para el caso sin pulverización. El ángulo del remolino era cero y el modelado se realizó con un paquete de dinámica de fluidos computacional (FLOW3D by CFDS). Las condiciones de contorno para el modelo CFD (velocidad y cantidades de turbulencia en la entrada) se derivaron de las mediciones con una sonda de cable caliente. Para validar el modelo CFD, las magnitudes de velocidad del aire se midieron en numerosos lugares en la cámara de secado por aspersión. Para interpretar los datos, se desarrolló un enfoque novedoso basado en la interpretación de las distribuciones de velocidad en lugar de promediar el tiempo de las señales. Esto fue necesario debido a las inversiones de flujo y las grandes fluctuaciones en la velocidad del aire. Las mediciones se compararon con los resultados del modelo CFD y el acuerdo entre el modelo y las mediciones fue razonable.

“Calidad de Modelado en un atomizador”.

F. G. Kieviet

Laboratory of Separation Processes and Transport Phenomena, Department of Chemical Engineering, Eindhoven University of Technology, Holanda (1997).

El objetivo de esta investigación fue el desarrollar un modelo fundamental para predecir la calidad del producto en procesos de secado por atomización. El modelo se desarrolló en un atomizador de flujo paralelo a través de un software de dinámica de fluidos computacional. Se estudió a detalle el flujo de aire, se analizaron patrones de temperatura y humedad para su medición y modelización. De manera similar se analizó el tiempo de residencia del producto en el interior del atomizador. Para el estudio de los patrones de temperatura y humedad, se utilizaron dos tipos de fluidos de alimentación: agua pura y una solución acuosa de maltodextrina. Los patrones se modelaron a través del rastreo de partículas en el flujo dentro del dominio de modelación y calculando el intercambio de masa, energía e impulso. La distribución del tiempo de residencia del polvo fue modelada mediante el rastreo de un gran número de partículas de polvo mediante el registro de los tiempos de vuelo en el interior del atomizador. Esta tesis de doctorado concluye con la discusión de las fortalezas y debilidades del enfoque de la dinámica computacional de fluidos.

2.2 Base Teórica.

2.2.1 Secado

El secado describe comúnmente la remoción térmica de sustancias volátiles (humedad) para conseguir un producto sólido. La humedad mantenida en una combinación química suelta, presente como una solución líquida dentro del sólido o incluso atrapada en la microestructura del sólido, que ejerce una presión de vapor menor que la del líquido puro, se denomina humedad de ligado. (Mujumdar, 2006)

Cuando un sólido húmedo se somete a secado térmico, dos procesos ocurren simultáneamente:

1. Transferencia de energía (principalmente en forma de calor) del entorno circundante para evaporar la humedad de la superficie.
2. Transferencia de humedad interna a la superficie del sólido y su posterior evaporación debido al proceso 1.

La velocidad a la que se realiza el secado se rige por la velocidad a la que se desarrollan los dos procesos. La transferencia de energía como calor del ambiente circundante al sólido húmedo puede ocurrir como resultado de la convección, conducción o radiación y, en algunos casos, como resultado de una combinación de estos efectos. Los secadores industriales difieren en tipo y diseño, dependiendo del método principal de transferencia de calor empleado. En la mayoría de los casos, el calor se transfiere a la superficie del sólido húmedo y luego al interior. Sin embargo,

en secado dieléctrico, por radiofrecuencia (RF) o secado por congelación de microondas, se suministra energía para generar calor internamente dentro del sólido y fluye hacia las superficies exteriores. (Mujumdar, 2006)

2.2.1.1 Mecanismos de secado.

Hay dos métodos para remover la humedad:

1. **Evaporación:** Esta ocurre cuando la presión de vapor de la humedad de la superficie del sólido es igual a la presión atmosférica. Esto se debe al aumento de temperatura de la humedad hasta el punto de ebullición. Si el material que está siendo secado es sensible al calor, entonces la temperatura a la cual la evaporación ocurre, puede ser disminuida bajando la presión (evaporación al vacío). Si la presión disminuye más allá del punto triple, entonces la fase líquida no puede existir y la humedad en el producto es congelada.
2. **Vaporización:** El secado es llevado a cabo por convección, pasando aire caliente sobre el producto. El aire es enfriado por el producto y la humedad es transferida hacia el aire. En este caso la presión de vapor de la humedad sobre el sólido es menor a la presión atmosférica. (Mujumdar, 2006)

2.2.2 Clasificación y selección de secadores.

En la mayoría de los procesos productivos, los productos manufacturados deben ser sometidos a procesos de secado, con el fin de que tenga las propiedades adecuadas para su procesamiento posterior o para su comercialización. Los materiales necesitan tener un contenido particular de humedad para el procesamiento, moldeo o granulación. El tamaño de grano y la cantidad de porcentaje de polvos finos contenidos también deben observarse. Cuando los productos, como parte de su proceso deben calentarse a altas temperaturas, como ocurre en los procesos cerámicos y metalúrgicos, el secado previo a temperaturas más bajas antes de los hornos de cocción es conveniente para ahorrar energía. El costo del transporte (como en el caso del carbón) depende del contenido de humedad del producto, y se debe encontrar un equilibrio entre el costo de transporte y el costo de secado. El secado excesivo es un desperdicio; no solo es más calor, es decir, gasto, involucrado de lo necesario, pero a menudo el secado excesivo da como resultado un producto degradado, como en el caso del papel y la madera. (Mujumdar, 2006).

Tabla 1-2: Métodos de secado vs forma de alimentación del material.

Forma de alimentación del secador	Líquidos			Tortas		Sólidos de flujo libre				
	Solución	Lodo	Pasta	Centrífuga	Filtro	Polvo	Granulado	Cristal frágil	Pellet	Fibra
Secadores por Convección										
De banda							X	X	X	X
Flash				X	X	X	X			X
De lecho húmedo	X	X		X	X	X	X		X	
Rotativo				X	X	X	X		X	X
Por atomización	X	X	X							
De bandeja (en batch)				X	X	X	X	X	X	X
De bandeja (continuo)				X	X	X	X	X	X	X
Secadores por Conducción										
De tambor	X	X	X							
Rotativo con chaqueta de vapor				X	X	X	X		X	X
Rotativo con tubo de vapor				X	X	X	X		X	X
De bandeja (en batch)				X	X	X	X	X	X	X
De bandeja (continuo)				X	X	X	X	X	X	X

Fuente: Mujumdar (2006)

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

En la tabla 1-2, se resumen los diferentes métodos de secado existentes, en base fundamentalmente a las propiedades del material cuya humedad debe ser removida.

2.2.3 *Secado por atomización.*

El proceso de secado por atomización es una operación básica que consiste en la transformación de una suspensión o disolución en un material seco particulado, mediante la atomización del primero en un medio caliente y seco. El secado por atomización de gotas es utilizado en muchas aplicaciones industriales de los sectores cerámico, químico, alimentario, farmacéutico. (Mondragón y otros, 2013).

En la industria cerámica, una parte fundamental de la obtención del material para la fabricación de revestimiento para pisos y paredes es el proceso de secado por atomización o simplemente llamado atomización. En este proceso se remueve el agua utilizada en el proceso de molienda de las diferentes materias primas que constituyen el fluido viscoso primario denominado “barbotina”, que es el resultado de la molturación de diferentes tipos de arcillas y aglomerantes en un medio húmedo que en este caso es conseguido por la adición de agua. Una vez que se tiene la barbotina con las propiedades adecuadas para un producto de calidad, el agua debe ser retirada hasta alcanzar un polvo cuyo nivel de humedad es el adecuado para lograr obtener la forma del producto final en el proceso subsiguiente como es el de prensado.

Al equipo en el cual se produce la atomización de la barbotina se lo conoce como atomizador (en inglés spray dryer) (Figura 1-2).



Figura 1-2: Atomizador SACMI ATM-15 de la empresa

Ecuacerámica.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

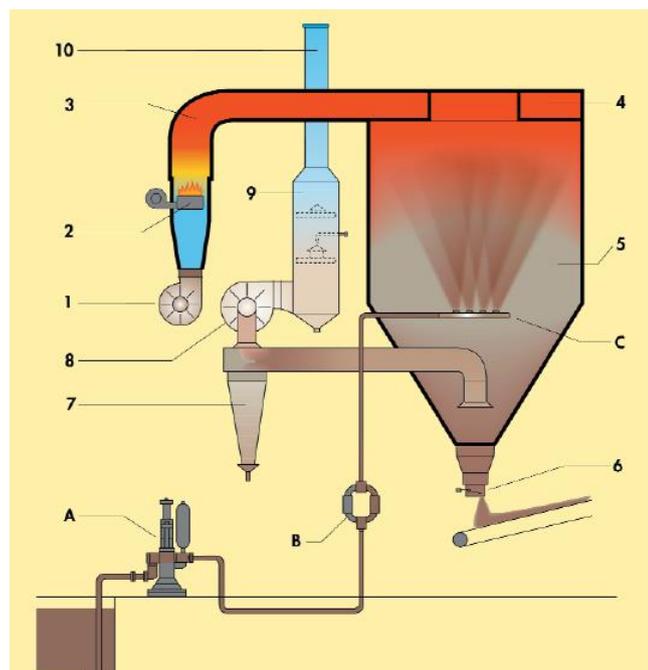


Figura 2-2: Esquema de los componentes de un atomizador.

Fuente: (SACMI, 2014).

En la figura 2-2 puede observarse un esquema básico de los componentes de un atomizador. En la figura se tienen los siguientes componentes: A. Bomba de pistones. B. Filtros. C. Corona de pulverización. 1. Ventilador de presurización. 2. Quemador. 3. Cámara de calor. 4. Distribuidor de aire caliente. 5. Cámara de atomización. 6. Descarga de polvo. 7. Ciclón. 8. Ventilador principal. 9. Sistema de recolección de polvos finos. 10. Chimenea.

En el atomizador se produce la remoción de cierto porcentaje del agua contenida en la barbotina a través de la circulación forzada de la misma a través de pulverizadores o boquillas de pulverización, luego de los cuales, las finas gotas de barbotina atraviesan a contraflujo un vórtice de aire caliente, generándose así un intercambio de calor por convección y la entrega de humedad por parte de las gotas de barbotina; éstas gotas se precipitan a la parte inferior del atomizador convertidas en polvo con muy baja humedad.

El aire caliente se consigue mediante la generación en una cámara de calor por medio de un quemador que puede ser a diésel, búnker o gas natural. El aire a una temperatura de entre 500 y 700 °C es forzado a circular hacia el interior del atomizador y, una vez que ha entregado su energía a la barbotina removiendo su humedad, es succionado junto con el agua removida para descargarse a la atmósfera.

Para la generación del vórtice de aire caliente, existen dos tipos básicos de configuraciones del distribuidor. El primero es en forma de voluta, en el cual, un ducto ingresa tangencialmente a la parte superior de la cámara de atomizado y se divide en un conjunto de ductos que distribuyen el aire caliente para dar forma al vórtice. En la figura 3-2 se esquematiza el distribuidor con forma de voluta.

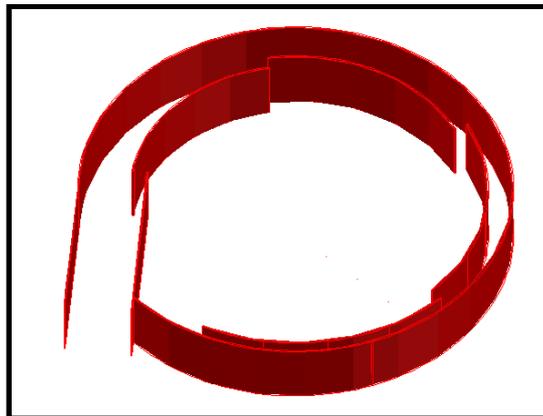


Figura 3-2: Distribuidor de aire caliente en forma de voluta.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Un segundo tipo de distribuidor puede observarse en los atomizadores más modernos. En éstos, la formación del vórtice se genera a mediante la circulación del aire caliente que atraviesa a un difusor centrífugo. La configuración de este difusor provoca que en la corriente de aire caliente que ingresa al atomizador, se origine el vórtice necesario para cubrir en forma eficiente el contraflujo de barbotina que se pretende secar.

Cabe destacar que el flujo existente en el interior del atomizador se debe a la acción del ventilador principal del sistema, el cual genera una depresión en el interior de la cámara de atomización y el

aire caliente producido en el generador de calor del quemador, ingresa al atomizador a cumplir su función de remoción de la humedad de la barbotina.

CAPÍTULO III

3 METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de investigación.

El presente proyecto se trata de una investigación cuasi experimental, cuyo diseño será transversal.

3.2 Métodos de investigación a utilizar.

En la presente investigación se utilizará el método deductivo en vista de que se parte de un problema general a partir del cual se determinarán los diferentes elementos que permitan la consecución de los objetivos.

3.3 Enfoque de la investigación

El enfoque de la investigación es cuantitativo debido a que se basará en la recolección de datos y cálculos de parámetros para la evaluación de la factibilidad y el diseño del equipo.

3.4 Alcance

El alcance de la presente investigación es explicativo, ya que se pretende analizar la relación existente entre la configuración del difusor de aire caliente y la eficiencia del atomizador.

3.5 Población de estudio.

El presente estudio es específico para el atomizador SACMI ATM-15 de la empresa C. A. Ecuacerámica.

3.6 Unidad de análisis.

La presente investigación se efectuará en las instalaciones industriales de la empresa C. A. Ecuacerámica de la ciudad de Riobamba.

3.7 Selección de la muestra

La muestra seleccionada es el equipo en estudio.

3.8 Tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra corresponde a la totalidad de la población del estudio.

3.9 Técnica de recolección de datos.

La recolección de datos se efectuará mediante observación directa. Los parámetros necesarios para la determinación de la viabilidad del proyecto serán medidos en campo.

3.10 Instrumentos de recolección de datos.

Para la recolección de datos se utilizarán herramientas básicas como son:

- Cintas de medición.
- Manómetros en U.
- Pirómetro.
- Anemómetro.

Entre otros.

3.11 Instrumentos para procesar datos recopilados

Para el proceso de datos se utilizará la hoja electrónica Microsoft Excel. Para la elaboración de planos se utilizará un software CAD 2D. Para la modelación se utilizará un software CAD 3D. Para la simulación se utilizará un software CAE.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Determinación de la geometría del difusor

4.1.1 Operación del sistema actual.

El sistema que actualmente opera y que pretende remplazarse con el diseño del presente trabajo de investigación, tiene la configuración representada en la figura 1-4.

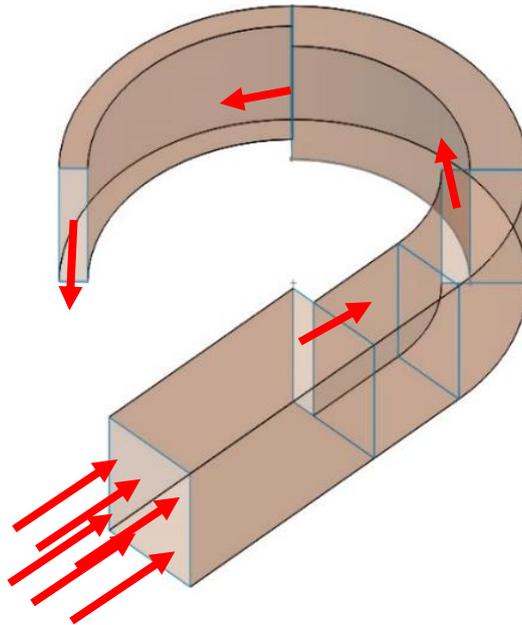


Figura 1-4: Representación del flujo de aire en el sistema actual.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

El aire caliente ingresa a la cámara de secado, a través de un ducto de sección transversal cuadrada y se va dividiendo progresivamente en 4 secciones rectangulares que distribuyen el flujo en forma tangencial al interior de la cámara de secado. De esta manera, se forma un flujo de aire que ingresa en un plano horizontal en forma circunferencial, y gracias a la acción del ventilador principal del atomizador, el cual extrae el aire ingresado a la cámara de secado por su parte inferior, se genera una circulación de aire desde la parte superior hasta la inferior, dando origen a la existencia de un torbellino o vórtice (figura 2-4).

Es así como se mantiene en la cámara de secado un adecuado intercambio de calor entre las partículas del producto a ser secado y la corriente de aire caliente.

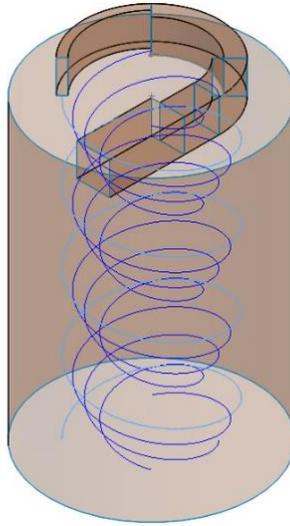


Figura 2-4: Representación esquemática del flujo de aire al interior de la cámara de secado.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

4.1.2 Configuración geométrica del difusor

En primera instancia, es necesario que el ingreso de aire caliente a la cámara de secado sea en forma axial por la parte superior de la cámara de secado (Figura 3-4).

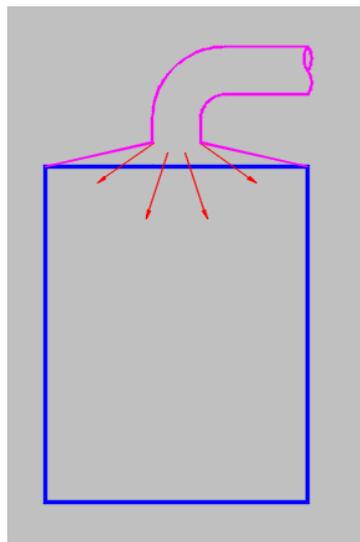


Figura 3-4: Esquema inicial de ingreso de aire propuesto.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Sin embargo, puede notarse que, con esta configuración, el aire caliente se difundirá en el interior de la cámara de secado sin ninguna orientación y no se puede garantizar una distribución homogénea. Adicionalmente, el cambio brusco de la sección transversal por donde circula el aire, ocasionará una disminución en la velocidad del mismo. Para evitar esto, el flujo será orientado en primera instancia, en forma radial a la cámara de secado, como se representa en la figura 4-4.

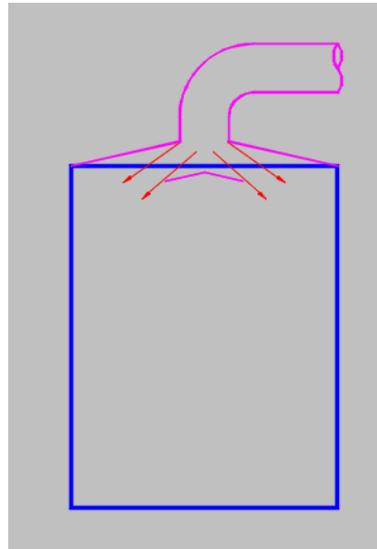


Figura 4-4: Primera restricción al flujo de aire.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Con esta configuración, si bien el flujo de aire se distribuye de forma homogénea, se genera un volumen por debajo de la restricción, en donde no existe circulación de aire. Esto puede solucionarse mediante una abertura que conduzca el aire por debajo de la restricción, como se esquematiza en la figura 5-4.

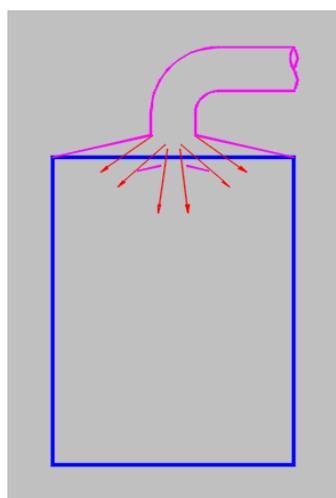


Figura 5-4: Conducción del flujo de aire por debajo de la restricción.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

De esta manera, el flujo de aire que atraviesa el difusor, ocurrirá como se representa en la figura 6-4. Cabe indicar que el movimiento del aire caliente desde arriba hacia debajo de la cámara de combustión, es causado por el tiro forzado que se induce por el ventilador principal del atomizador.

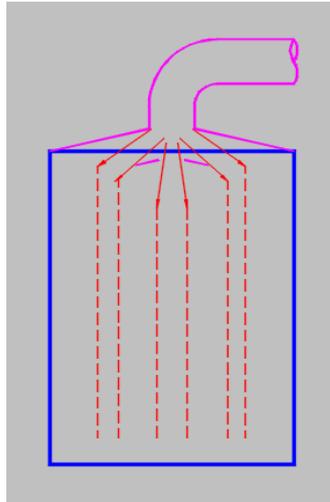


Figura 6-4: Representación del flujo una vez efectuada la modificación a la restricción.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Una vez que se ha determinado la configuración que permite distribuir de forma homogénea el flujo de aire en sentido axial a la cámara de secado, es necesario conducirlo adecuadamente de manera que se genere el vórtice adecuado para lograr un eficiente intercambio de calor entre el flujo de aire y el producto a secar que asciende por la cámara de secado.

La generación del vórtice simplemente puede lograrse mediante la implementación de álabes en el difusor, los cuales direccionan el flujo de aire de manera que al ingresar a la cámara de secado lo hagan en forma tangencial al difusor en el plano perpendicular al eje de la cámara de secado.

4.2 Dimensionamiento del difusor

4.2.1 Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño para obtener una geometría adecuada del difusor serán los siguientes:

- Diámetro del ducto de ingreso de aire al difusor
- Diámetro del anillo primario de salida de aire del difusor
- Altura del anillo primario de salida de aire
- Diámetro del anillo secundario de salida de aire
- Altura del anillo secundario de salida de aire
- Número de álabes

4.2.2 Determinación de dimensiones del difusor

Para que la velocidad con la que ingresa el aire caliente al difusor sea la misma con la que ingresa al caracol del sistema antiguo, debe mantenerse el área de la sección transversal del ducto del caracol. El ducto de ingreso al caracol es de sección cuadrada, de 0,88 m de lado. Calculando el área de la sección transversal y deduciendo el diámetro de la sección circular correspondiente a dicha área, se tiene un diámetro de circunferencia de 0,99 m (figura 7-4).

De acuerdo al área de la sección transversal cuadrada, el diámetro para una tubería circular con la misma sección transversal es de 0,99 metro. Por consideraciones constructivas, se tomará un diámetro de tubería de 1 metro.

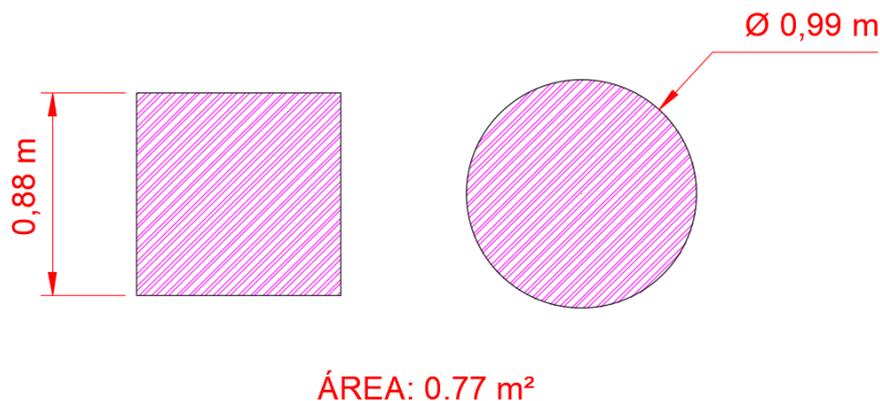


Figura 7-4: Representación del área de sección transversal para los ductos.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

En la figura 8-4 se esquematiza el caracol del sistema antiguo con sus dimensiones. Es necesario tener en cuenta estas dimensiones para, en base a ellas, determinar las dimensiones del difusor de manera que se conserve la geometría de ingreso de aire caliente a la cámara de secado.

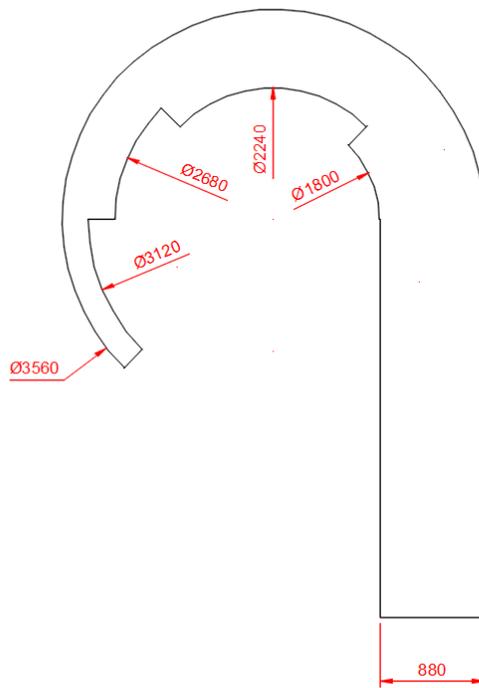


Figura 8-4: Dimensiones del actual sistema de distribución.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Con la finalidad de tomar como medidas base para la configuración geométrica del difusor, se usarán los diámetros medios de las salidas de aire en el caracol. Estas dimensiones se señalan en la figura 9-4.

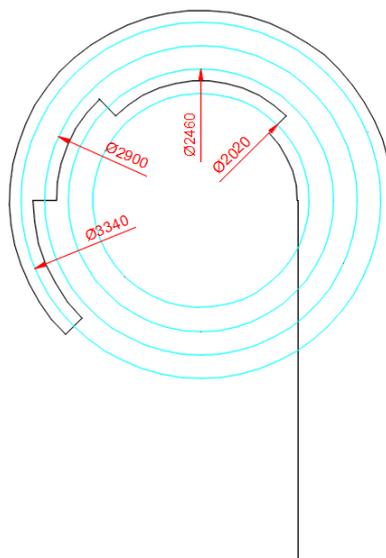


Figura 9-4: Dimensiones de los diámetros medios del caracol.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

El diámetro correspondiente a 2020 mm, que es el diámetro de la salida más cercana al centro de la cámara de calor (figura 9-4), será la medida de referencia para el trazado de la circunferencia exterior de la salida primaria de aire caliente del difusor.

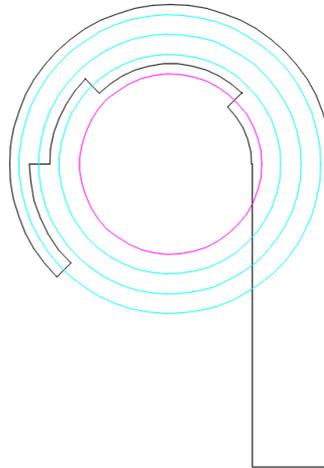


Figura 10-4: Circunferencia interna que determina el diámetro de la salida primaria del difusor.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

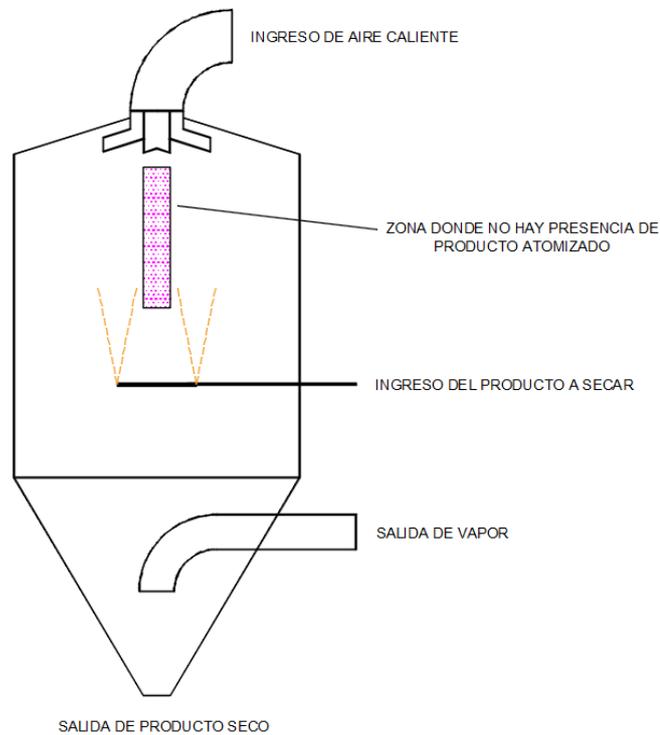


Figura 11-4: Detalle de zona en la que no se produce intercambio de calor entre

el aire caliente y el producto atomizado.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Como ya se indicó en párrafos anteriores, el diámetro de ingreso al difusor es de 1 metro. Pero, es necesario efectuar una división del flujo en el ingreso de manera que el aire se distribuya en las zonas primaria y secundaria del difusor. Se tomará como referencia el diámetro de la sección de la cámara de secado en donde no existe intercambio de calor entre el aire que ingresa al atomizador y el producto atomizado (figura 11-4). Dicho diámetro es de 0.33 metros.

De esta manera, la entrada de aire al difusor se divide en un anillo externo y en una circunferencia interna, por donde se dirigirá el aire caliente hacia la zona primaria y hacia la zona secundaria del difusor, respectivamente.

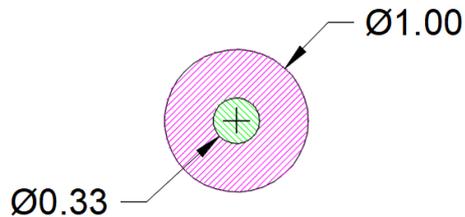


Figura 12-4: Diámetros del ingreso de aire caliente al difusor.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

En la figura 13-4 se representa la configuración del difusor en lo que respecta a su zona primaria.

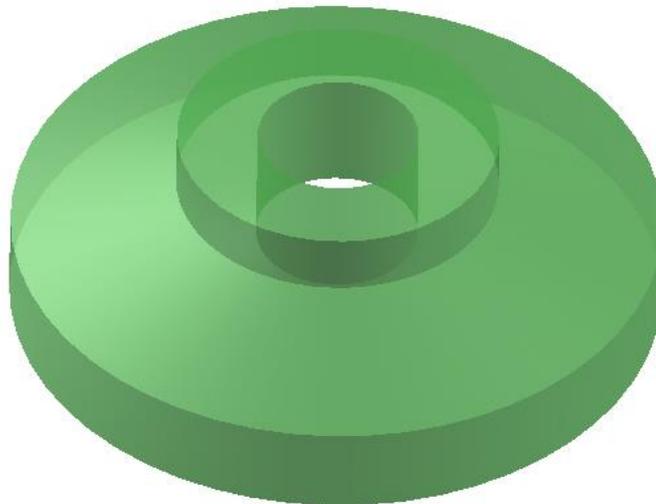


Figura 13-4: Volumen de control zona primaria del difusor.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

La altura h_p , del esquema descrito en la figura 4-14, está determinada por el área de la sección circular descrita en la figura correspondiente al área del anillo externo de la figura 13-4.



Figura 13-4: Vista lateral del volumen de control de la zona primaria del difusor.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

En la figura 13-4 se detalla la determinación gráfica de la altura h_p , en función de las dimensiones establecidas para la sección primaria del difusor. En primer lugar, se trazan las circunferencias con los diámetros ya determinados para la construcción del difusor y se trazan líneas de construcción verticales hasta una horizontal desde la cual se harán el resto de trazos. Luego, se traza una recta desde la intersección entre la horizontal y la vertical proyectada desde el diámetro exterior del difusor (2.02 metros), con un ángulo de inclinación de 18° , que es la misma inclinación de la tapa superior de la cámara de secado; la línea inclinada se trazará hasta la vertical proyectada desde el diámetro del tubo de ingreso al difusor (1 metro). La línea trazada corresponde al perfil de la cara superior de la zona primaria del difusor. En el extremo de la última línea trazada, se dibuja una circunferencia con radio equivalente a la diferencia entre los radios de las circunferencias de la tubería de ingreso de aire y del seccionador de flujo y se traza una recta paralela a la recta inclinada y que a su vez sea tangente a la circunferencia trazada en su extremo, la cual debe prolongarse hasta la proyección del diámetro de 0.33 metros. Finalmente, desde la recta superior del perfil de la zona primaria y desde la recta inferior, en sus extremos internos, se traza una vertical hasta una altura de 0.20 metros sobre el extremo de la recta superior. Esta última altura está dada únicamente en función de las facilidades constructivas que debe presentar el difusor. La altura h_p determinada gráficamente, es de 0.35 metros.

El diámetro de salida de la sección secundaria del difusor, se ha tomado en base a la proporción existente entre los diámetros de entrada y salida de la sección primaria del difusor, cuya relación es de 2 a 1. En consecuencia, el diámetro indicado es 0.66 metros. Para determinar su perfil, se traza una recta paralela a la recta correspondiente a la cara inferior de la sección primaria, a una distancia igual al radio de la circunferencia de ingreso de aire a la sección secundaria, la misma

que debe llegar hasta la proyección del eje de las circunferencias. En esta última recta trazada, se mide el diámetro indicado a inicios de este párrafo y se concluye con el trazado del perfil.

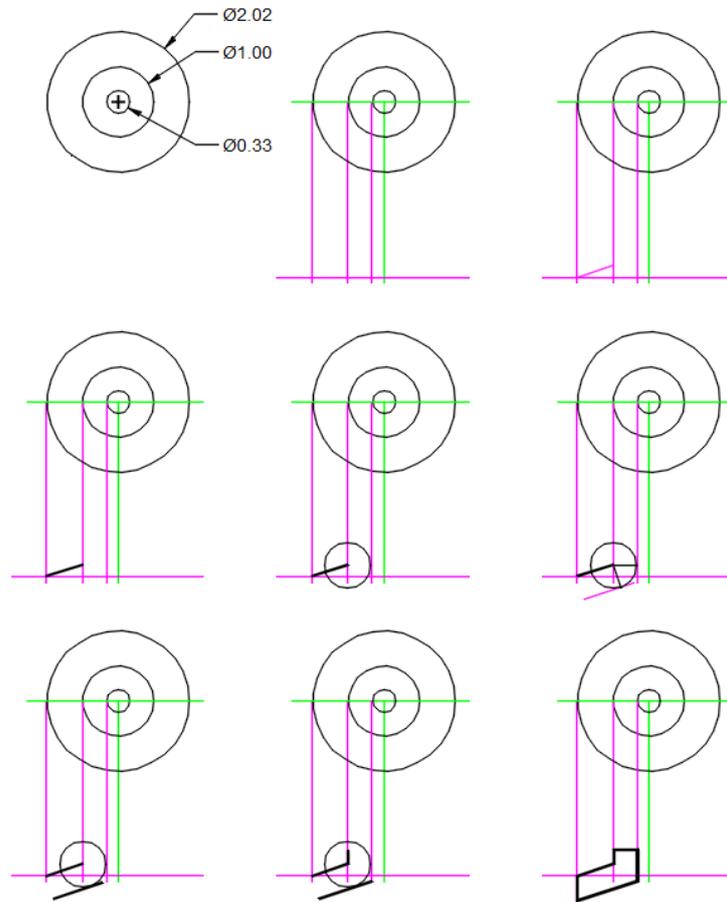


Figura 14-4: Secuencia de la construcción del perfil para la sección primaria del difusor.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

El diámetro de salida de la sección secundaria del difusor, se ha tomado en base a la proporción existente entre los diámetros de entrada y salida de la sección primaria del difusor, cuya relación es de 2 a 1. En consecuencia, el diámetro indicado es 0.66 metros.

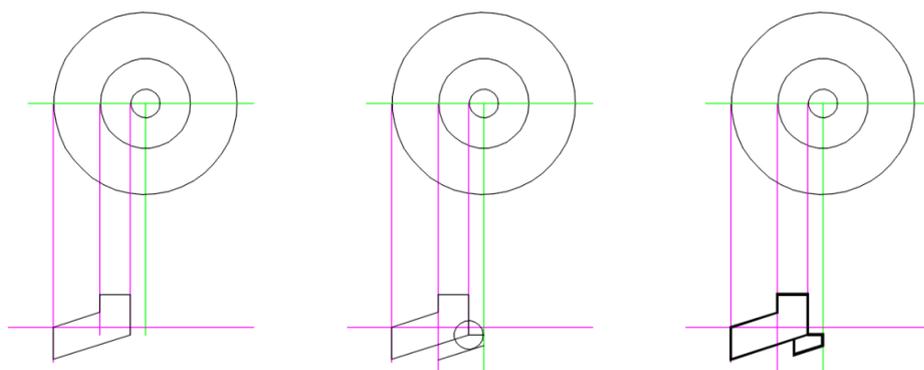


Figura 15-4: Trazado del perfil de la sección secundaria del difusor.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Para determinar su perfil, se traza una recta paralela a la recta correspondiente a la cara inferior de la sección primaria, a una distancia igual al radio de la circunferencia de ingreso de aire a la sección secundaria, la misma que debe llegar hasta la proyección del eje de las circunferencias. En esta última recta trazada, se mide el diámetro indicado a inicios de este párrafo y se concluye con el trazado del perfil.

4.2.3 Desarrollo de los álabes del difusor

Los álabes se diseñarán utilizando la técnica de desarrollo de volutas, que es la geometría utilizada en turbomaquinaria para el direccionamiento de fluidos.

Para el diseño de la voluta, se utilizarán los diámetros de los ductos del sistema de caracol, los cuales se indicaron en la figura 1-4.

Las dimensiones principales que se tomarán en cuenta para el desarrollo de la voluta son las siguientes:

Diámetro medio del ducto interno: 2020 mm

Diámetro medio del ducto externo: 3340 mm

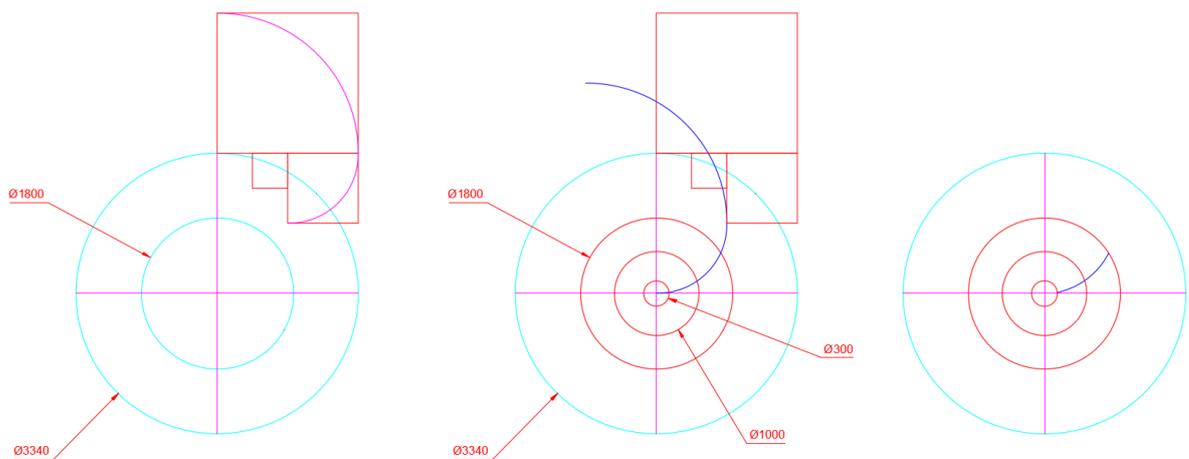


Figura 16-4: Desarrollo de la voluta para los álabes.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

4.3 Determinación de las variables de diseño para cualquier difusor

Las variables en base a las cuales se ha efectuado el diseño del difusor y que deberán ser el punto de partida para el diseño de cualquier difusor que sustituya un sistema de caracol en un atomizador de dimensiones diferentes a las del equipo en estudio en la presente investigación son:

- Área de la sección transversal del ducto de ingreso de aire a la cámara de secado
- Diámetro medio del ducto interno del caracol
- Diámetro medio del ducto externo del caracol
- Diámetro de la zona de la cámara de secado en donde no existe intercambio de calor

4.4 Selección del material

Para la selección del material apropiado para la construcción del difusor, se utilizó la metodología de Ashby (2005). Este autor, propone una estrategia de cuatro etapas, las cuales van a desarrollarse a continuación.

En la primera etapa de la metodología, se determina la función de el o los elementos cuyo material va a ser seleccionado y las cargas funcionales a las que van a estar sometidos.

Para el caso de la presente investigación, la función del difusor de aire es la de distribuir el flujo de aire caliente que ingresa a la cámara de secado del atomizador. Por sus características geométricas, el aire es difundido generando un torbellino que permitirá una transferencia de calor más eficiente.

Es necesario tomar en cuenta que, en base a las condiciones de trabajo existente en la cámara de secado y en función al proceso de manufactura del difusor, el material seleccionado debe tener las siguientes condiciones:

Condiciones no negociables:

- Resistencia a la temperatura
- Resistencia a la humedad
- Disponibilidad en el mercado

Condiciones negociables pero deseables:

- Maquinabilidad en frío
- Soldabilidad
- Rigidez

Condiciones negociables:

- Precio del material

Objetivo:

Maximizar la resistencia a la temperatura y humedad y minimizar el costo.

Variables libres:

Una variable que puede manejarse con cierta libertad es el espesor de la plancha del material que va a utilizarse para la construcción del difusor.

4.4.1 Filtrado del material.

Para una selección inicial, se ha tomado como universo los aceros inoxidable, puesto que son los aceros que presentan mejores propiedades para trabajar en las condiciones funcionales que se citaron en el párrafo anterior.

Dentro de los aceros inoxidable, se tienen 112 materiales cuya temperatura de trabajo supera los 700°C, los cuales pudieran considerarse aptos para la construcción del difusor. Básicamente se tratan de aceros inoxidable austeníticos, ferríticos y martensíticos.

The screenshot displays a software interface for material selection. On the left, there is a list of materials under the heading "Name", including various stainless steel grades like 316Ti, 201, 304, 202, 201LN, 204-Cu, 301L, 302, 304L, 304, 314, 316, 316L, 317, 317L, 321, 347, BS315S16, Nitronic 50, XM-19, 329, 409, 429, 430, 434, 436, 416S41, 403, 403, 410, 410S, 414, 414L, 431, alloy 20, and alloy 904L. On the right, there are three filter panels: "Thermal properties" with fields for Minimum and Maximum values for Melting point, Glass temperature, Maximum service temperature (700, 850), Minimum service temperature, Thermal conductivity, Specific heat capacity, and Thermal expansion coefficient; "Processing properties" with dropdown menus for Metal casting, Metal cold forming (Acceptable, Excellent), Metal hot forming, Metal press forming, Metal deep drawing, Polymer injection molding, Polymer extrusion, and Polymer thermoforming; and "Durability" with dropdown menus for Water (fresh) (Excellent), Water (salt), Weak acids, Strong acids, Weak alkalis, Strong alkalis, Organic solvents, Oxidation at 500C, UV radiation (sunlight), and Flammability.

Figura 17-4: Parámetros para un segundo filtrado de los materiales.

Fuente: CES Edu Pack 2016

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Posteriormente, estableciendo un segundo filtrado, con base en las características requeridas por el material desde el punto de vista de funcionalidad, se tienen 55 materiales que cumplen con los requisitos.

Dentro de los 55 materiales del listado generado en el segundo filtrado, se han escogido los materiales descritos en la tabla 1-4, que son los materiales que se encuentran en el mercado nacional.

Tabla 1-4: Materiales del segundo filtrado y que se encuentran disponibles en el mercado ecuatoriano

Material	Características generales
ACERO AISI 201	ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO
ACERO AISI 304	ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO
ACERO AISI 430	ACERO INOXIDABLE FERRÍTICO

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Tabla 2-4: Comparación de propiedades mecánicas de aceros existentes en el mercado.

Criterios de selección	UNIDAD	ACERO AISI 201	ACERO AISI 304	ACERO AISI 430
Temperatura máxima de servicio	°C	795 - 845	750 - 925	750 - 870
Resistencia a la humedad	-	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE
Maquinabilidad en frío	-	ACEPTABLE	EXCELENTE	ACEPTABLE
Soldabilidad (arco eléctrico)	-	EXCELENTE	EXCELENTE	NO RECOMENDADA
Densidad	kg/m ³	7.70E+03	7.85E+03	7.62E+03
Disponibilidad en el mercado	-	ALTA	ALTA	ALTA

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Las propiedades de los tres aceros seleccionados, se presentan en la tabla 2-4. Las razones por las cuales se han establecido los criterios de selección son las siguientes:

- Temperatura máxima de servicio: esto se debe a que al difusor ingresa aire caliente a una temperatura promedio de 850°C.

- Resistencia a la humedad: el ambiente en el interior de la cámara de secado es de alta humedad debido a que el agua presente en el producto atomizado es removida en forma de vapor.
- Maquinabilidad en frío: el material seleccionado debe utilizarse en forma de planchas para la construcción del difusor; adicionalmente, las planchas deben ser roladas para conseguir la geometría definitiva del diseño.
- Soldabilidad: una vez que se tienen las partes que conforman el difusor, éstas deben unirse mediante proceso de soldadura por arco eléctrico.
- Densidad: esta propiedad es fundamental que sea lo más baja posible para que el peso del elemento construido pueda minimizarse.

4.4.2 Selección final.

De acuerdo a los parámetros establecidos, se tiene el siguiente análisis para la selección final:

- Temperatura máxima de servicio: El acero AISI 304 tiene una temperatura mayor
- Resistencia a la humedad: Los tres tipos de acero son excelentes
- Maquinabilidad en frío: El acero AISI 304 es excelente
- Soldabilidad: Los aceros AISI 201 y 304 son excelentes
- Densidad: El acero AISI 430 es más liviano
- Los tres aceros están disponibles en el mercado

En conclusión, el material seleccionado es el acero AISI 304.

4.5 Cálculo de la energía cinética de turbulencia en el sistema de caracol

Una alta turbulencia en el interior de la cámara de secado permite un intercambio de calor más eficiente entre el material a ser secado y el aire caliente que ingresa al atomizador. La turbulencia de un flujo de aire puede cuantificarse mediante la energía cinética de turbulencia, cuyo valor se calcula de acuerdo a la ecuación

$$k = \frac{1}{2} u^2 \quad (2)$$

En donde u es el valor promedio de la velocidad del fluido y k es la energía cinética de turbulencia. (Kieviet, 1997).

Para determinar la energía cinética de turbulencia, tanto en el sistema de caracol, cuanto, en el sistema de difusor, es necesario determinar primeramente la velocidad del aire que ingresa a través de dichos sistemas.

En el caso del caracol, se tienen ductos de salida rectangular en los cuales se ha dividido el flujo de aire en 4 salidas idénticas. Para cada salida, los datos dimensionales y de caudal, así como los cálculos de área y velocidad se detallan a continuación:

CAUDAL TOTAL DE AIRE:

$$Q = 18000 \text{ m}^3/\text{hora} = 5 \text{ m}^3/\text{s}$$

CAUDAL DE AIRE EN CADA DUCTO DE SALIDA DEL CARACOL:

$$q_{sc} = \frac{Q}{4} = 1,25 \text{ m}^3/\text{s}$$

DIMENSIONES DE DUCTOS DE SALIDA DEL CARACOL: altura $a = 0,88 \text{ m}$, ancho $b = 0,22 \text{ m}$

ÁREA DE DUCTOS DE SALIDA DEL CARACOL: $A_{sc} = a * b = 0,19 \text{ m}^2$

VELOCIDAD DE SALIDA DEL AIRE EN EL CARACOL:

$$V_{sc} = \frac{Q}{A_{sc}} = \frac{1,25}{0,19} = 6,58 \text{ m/s}$$

ENERGÍA CINÉTICA ESPECÍFICA DE TURBULENCIA DEL CARACOL POR CADA SALIDA:

$$k_c = \frac{1}{2} u^2 = \frac{1}{2} 6,58^2 = 21,65 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

4.6 Cálculo de la energía cinética de turbulencia en el sistema de difusor

CAUDAL TOTAL DE AIRE:

$$Q = 18000 \text{ m}^3/\text{hora} = 5 \text{ m}^3/\text{s}$$

DIMENSIONES DE LA SECCIÓN PRIMARIA DEL DIFUSOR: diámetro exterior $d_e = 0,9 \text{ m}$, diámetro interior $d_i = 0,3 \text{ m}$

ÁREA DE SECCIÓN PRIMARIA DEL DIFUSOR: $A_p = \frac{\pi}{4} * (d_e^2 - d_i^2) = 0,57 \text{ m}^2$

(3)

ÁREA DE SECCIÓN SECUNDARIA DEL DIFUSOR: $A_S = \frac{\pi}{4} * (di^2) = 0,07 \text{ m}^2$

(4)

SECCIÓN PRIMARIA DEL DIFUSOR EN PORCENTAJE: $S_P = 1 - \frac{A_S}{A_P} = 0,87 = 87 \%$

(5)

SECCIÓN SECUNDARIA DEL DIFUSOR EN PORCENTAJE: $S_S = \frac{A_S}{A_P} = 0,13 = 13 \%$

(6)

CAUDAL QUE INGRESA A LA SECCIÓN PRIMARIA DEL DIFUSOR:

$$Q_P = 0,87 * Q = 0,87 * 5 = 4,35 \text{ m}^3/\text{s} \quad (7)$$

CAUDAL QUE INGRESA A LA SECCIÓN SECUNDARIA DEL DIFUSOR:

$$Q_S = 0,13 * Q = 0,13 * 5 = 0,65 \text{ m}^3/\text{s} \quad (8)$$

VELOCIDAD DE SALIDA EN LA SECCIÓN PRIMARIA DEL DIFUSOR:

$$V_{SP} = \frac{Q_P}{A_P} = \frac{4,35}{0,57} = 7,63 \text{ m/s} \quad (9)$$

VELOCIDAD DE SALIDA EN LA SECCIÓN SECUNDARIA DEL DIFUSOR:

$$V_{SS} = \frac{Q_S}{A_S} = \frac{0,65}{0,07} = 9,28 \text{ m/s} \quad (10)$$

ENERGÍA CINÉTICA DE TURBULENCIA DEL DIFUSOR POR CADA SALIDA PRIMARIA:

$$k_d = \frac{1}{2} u^2 = \frac{1}{2} 7,63^2 = 29,10 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

ENERGÍA CINÉTICA DE TURBULENCIA DEL DIFUSOR POR CADA SALIDA SECUNDARIA:

$$k_d = \frac{1}{2} u^2 = \frac{1}{2} 9,28^2 = 43,06 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

INCREMENTO DE LA ENERGÍA CINÉTICA DE TURBULENCIA

Para el cálculo del incremento, se determinará el valor promedio de la energía cinética de turbulencia alcanzado con el difusor:

$$k_{dp} = 36,08 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$k_c = 21,65 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$\Delta k = k_{dp} - k_c = 36,08 - 21,65 = 14,43 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (11)$$

4.7 Proceso de simulación para las cámaras de secado

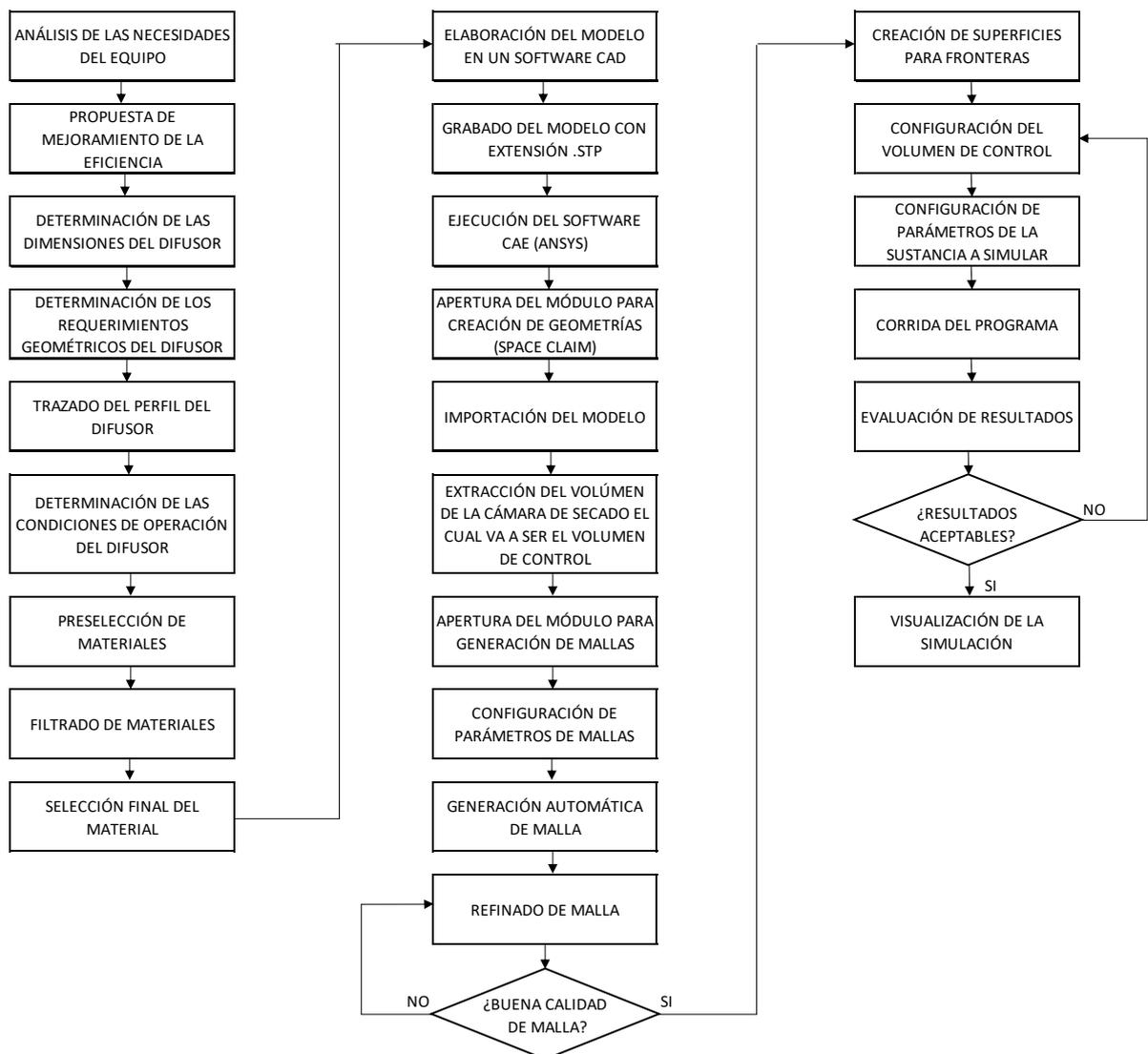


Figura 18-4: Diagrama de flujo del proceso de simulación de la cámara de secado.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

4.8 Modelación de la cámara de secado con sistema de caracol

Para poder evaluar las condiciones iniciales de operación de la cámara de secado con el sistema de caracol, se ha desarrollado también el modelo a partir del cual se va a desarrollar la simulación. Se han conservado las dimensiones reales de la cámara de secado de manera que la simulación arroje resultados reales. La modelación se ha efectuado en el software de diseño asistido por computador SolidWorks.

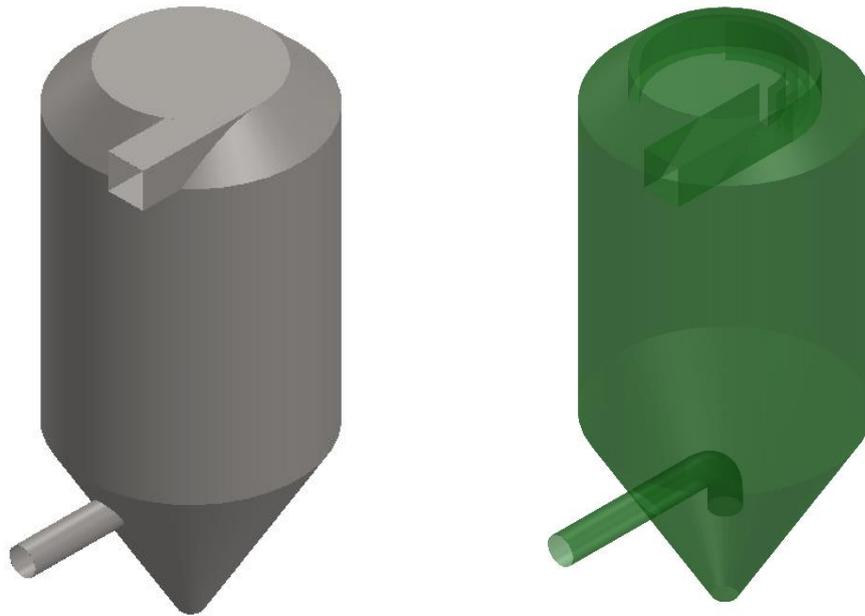


Figura 19-4: Modelación de la cámara de secado con sistema de caracol.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

4.9 Modelación del difusor

Para la modelación geométrica se ha utilizado el software SolidWorks, cuyas prestaciones permiten el diseño y modelación de elementos mecánicos como una importante herramienta del diseño mecánico.

Para el análisis del difusor, se han modelado 4 diferentes tipos en donde varía el número de álabes primarios de 4, 6, 8 y 10. El número de álabes secundarios se mantiene en 4 para todas las opciones.

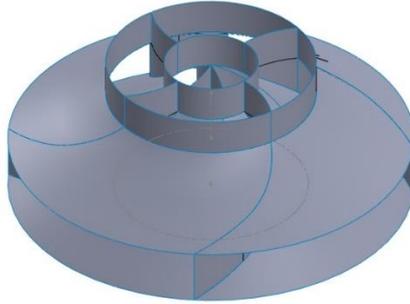


Figura 20-4: Difusor de cuatro álabes primarios.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Las dimensiones del difusor están basadas en los diámetros medios de las salidas de aire caliente en el caracol original. En la figura 14-4 pueden observarse estas dimensiones.

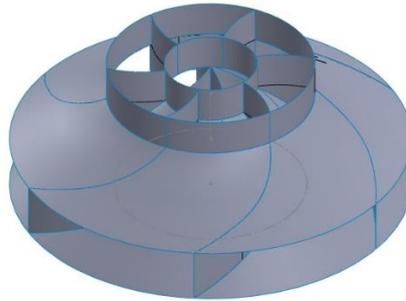


Figura 21-4: Difusor de seis álabes primarios.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

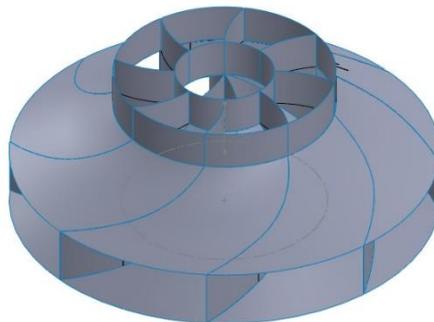


Figura 22-4: Difusor de ocho álabes primarios.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

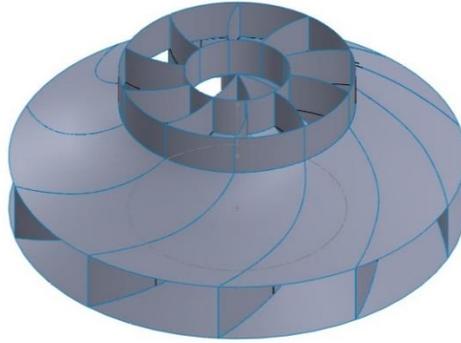


Figura 23-4: Difusor de diez álabes primarios.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

4.10 Simulación del movimiento de aire en la cámara de secado

La simulación del flujo de aire en el interior de la cámara de secado, se ha efectuado mediante la utilización del software ANSYS a través del módulo de dinámica computacional de fluidos CFX. Para el desarrollo de la simulación, deben cumplirse varias etapas de preparación o preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento. A continuación, se describen las diferentes etapas cumplidas en la presente investigación:

4.10.1 Preprocesamiento para el sistema de caracol.

El preprocesamiento básicamente consiste en la preparación de la geometría que será considerada como el dominio de la simulación. En CFX-ANSYS, se puede tanto crear la geometría cuanto importar desde un software que pueda crear un sólido en un formato compatible. En el caso de la presente investigación, se han desarrollado los modelos en SolidWorks para luego ser exportado al generador de geometría de CFX-ANSYS. En la figura 4-23 puede observarse la geometría ya importada en CFX-ANSYS previo a la creación del volumen de control en cuyo dominio se efectuará la simulación.

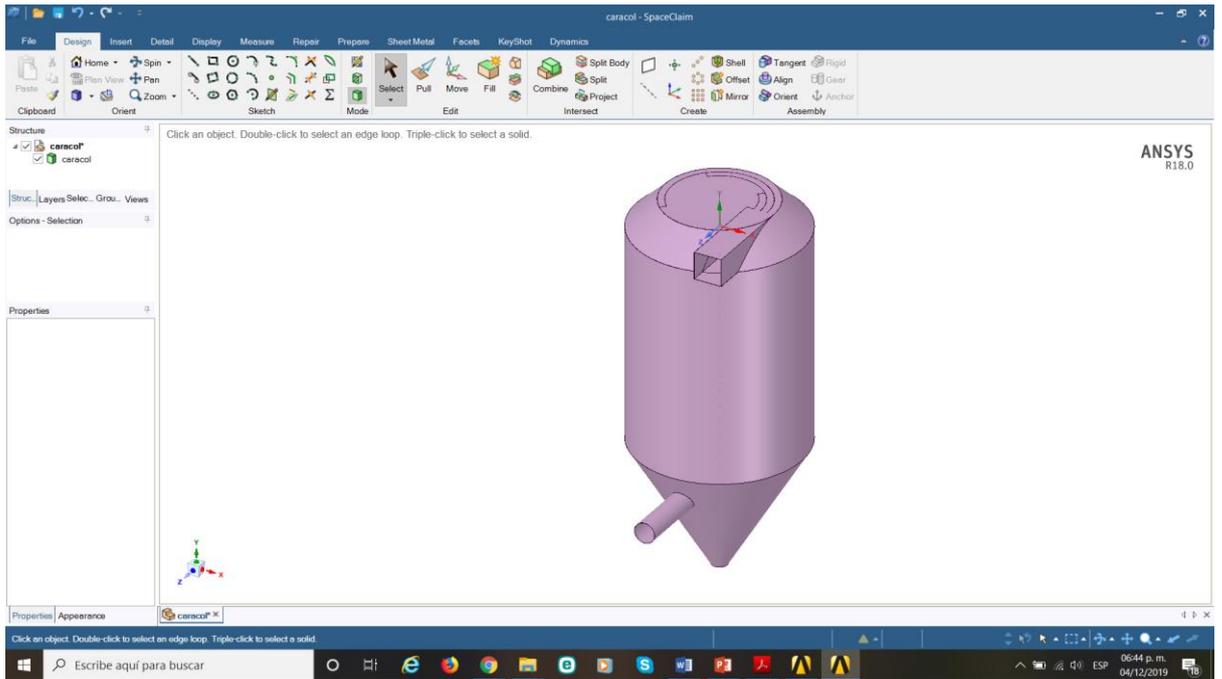


Figura 24-4: Modelo exportado al generador de geometría de CFX-ANSYS.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Una vez generada la geometría, es necesario dar origen al volumen de control en el cual se producirá la simulación del flujo de aire.

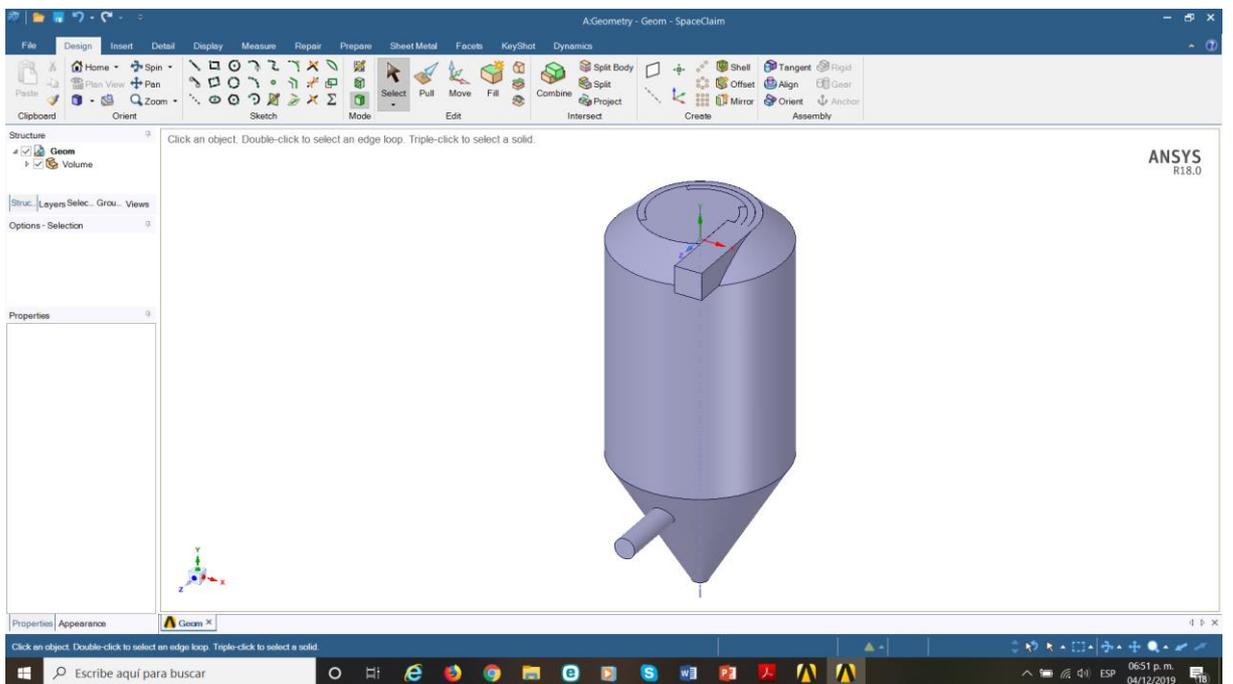


Figura 25-4: Volumen de control para sistema de caracol.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Es importante que el volumen generado tenga todos los detalles geométricos necesarios para que la simulación sea efectiva.

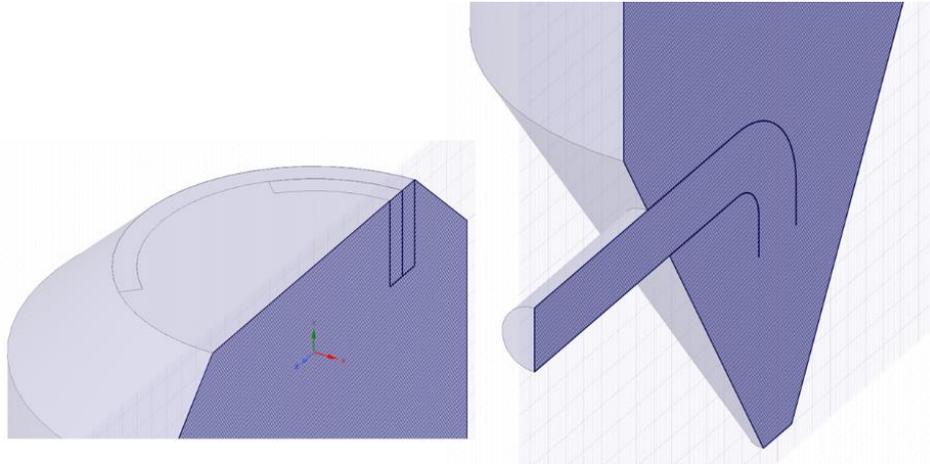


Figura 26-4: Detalle del volumen de control generado para el sistema de caracol.

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Una vez que está creado el volumen, es necesario generar el mallado que permita con mayor eficiencia simular el movimiento del aire al interno de la cámara de calor. Es importante recordar que no se está efectuando un análisis de elementos finitos sino de volúmenes finitos. Es por ello que para que el mallado sea efectivo se generan micro volúmenes de control como componentes del volumen total.

Para la generación del mallado, es necesario seguir el siguiente proceso (Bakker A. 2012):

1. Crear el mallado automático de la geometría
2. Verificar la calidad del mallado
3. Mejorar y reparar el mallado
4. Si se requiere efectuar refinamientos
5. Inspeccionar la calidad del mallado final

Debe también considerarse que el mallado puede utilizarse con parámetros especiales en zonas en donde debe existir una precisión especial, ya sea por la configuración geométrica de los elementos a mallar o por la relevancia de los fenómenos físicos de los fluidos producidos en su proximidad.

Los métodos existentes para mejorar el análisis en zonas puntuales son:

- Curvatura (Curvature): En este método el programa reconoce las curvaturas de la geometría y malla más fino (Carrera, 2019).
- Adaptivo (Adaptive): Busca configuración de curvaturas, linealidad, caras planas y bordes, no reconoce las curvaturas, solo la mayoría de caras planas. Reconoce la unión entre caras planas y curvaturas y ahí malla más fino (Carrera, 2019).
- Proximidad y Curvatura (Proximity and Curvature): Mejora la calidad, pero el procesamiento se vuelve lento (Carrera, 2019).
- Proximidad (Proximity): Busca elementos que se encuentre con cambio de sección o cambio de figura y realiza un mallado más fino (Carrera, 2019)
- Uniformidad (Uniformity): Genera mallados uniformes (Carrera, 2019)

La evaluación de la calidad de la malla aborda varios aspectos (Bakker, 2012):

- La densidad de malla debe ser lo suficientemente alta para capturar todas las características relevantes del flujo
- La malla adyacente a las paredes debe ser lo suficientemente fina como para resolver las condiciones de flujo en capas límites. En estas capas es preferible utilizar prismas
- Existen tres medidas de calidad: oblicuidad (skewness), suavidad (smoothness) y relación de aspecto (aspect ratio)

La calidad de la malla evalúa los elementos, escoge un elemento ideal de todo el volumen, el elemento ideal que tiene las cualidades perfectas y sobre ese elemento el programa evalúa a los demás elementos, dependiendo del tipo de evaluación se le asigna un valor. En el mallado CFD, el programa ANSYS CFX utiliza el método de revisión de forma que se basa en la relación de aspecto, volumen de elemento y ángulo de caras. Se recomienda usar el criterio de oblicuidad (skewness), para calificar la calidad de la malla (Carrera, 2019).

La valoración de la calidad obtenida se determina con la tabla 3-4.

Tabla 3-4: Valoración de la calidad de malla según criterio de oblicuidad.

VALORES DE OBLICUIDAD	0 - 0.25	0.25 - 0.50	0.50 - 0.80	0.80 - 0.95	0.95 - 0.99	0.99 - 1.00
CALIDAD DE ELEMENTOS	EXCELENTE	BUENA	ACEPTABLE	POBRE	MALA	DEGENERADA

Fuente: Jenny Carrera, 2019

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Los parámetros de mallado utilizados se muestran en las figuras 27-4 y 28-4.

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Skewness
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Element Midside Nodes	Dropped
Sizing	
Size Function	Proximity and Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine

Figura 27-4: Parámetros de dimensionamiento de la malla.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1.0289e-007
<input type="checkbox"/> Max	0.89974
<input type="checkbox"/> Average	0.235
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.12554

Figura 28-4: Parámetros de calidad de la malla. El criterio de oblicuidad (skewness), ha obtenido un valor que de acuerdo a valores recomendados

en

bibliografía es excelente.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Al tener un valor promedio de 0.235, de acuerdo a la tabla 4, la calidad del mallado es excelente, por lo cual se continúa con el proceso de simulación.

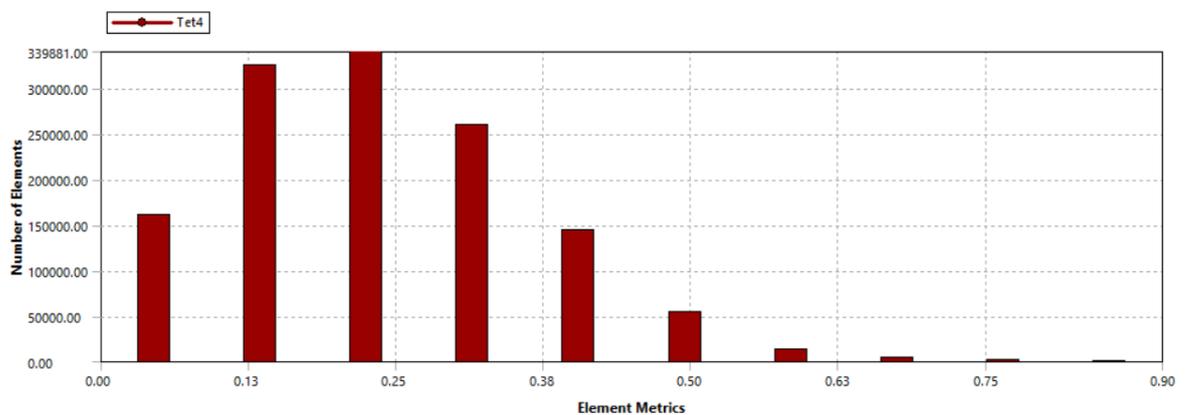


Figura 29-4: Gráfica de número de elementos del mallado vs valor de oblicuidad. De acuerdo a esta gráfica, se tiene en promedio un 69.5% de elementos de excelente calidad y 29.84% de elementos de buena calidad.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

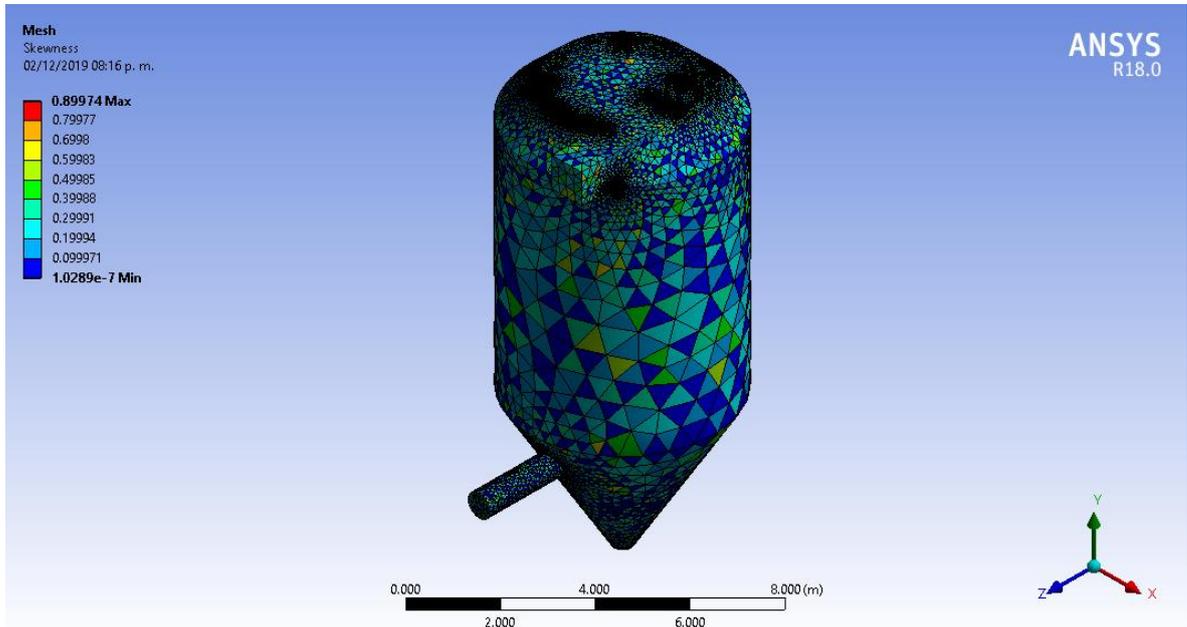


Figura 30-4: Mallado de la cámara de secado con sistema de caracol. Se observa que la mayoría de elementos del mallado se encuentran por debajo del valor de 0.22 lo cual representa un mallado excelente según el criterio de oblicuidad.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

La oblicuidad es una de las principales medidas de calidad de una malla. La oblicuidad determina qué tan cercana está una cara o una celda a condiciones ideales de equilateralidad o equiangularidad. (ANSYS Meshing User's Guide, 2010).

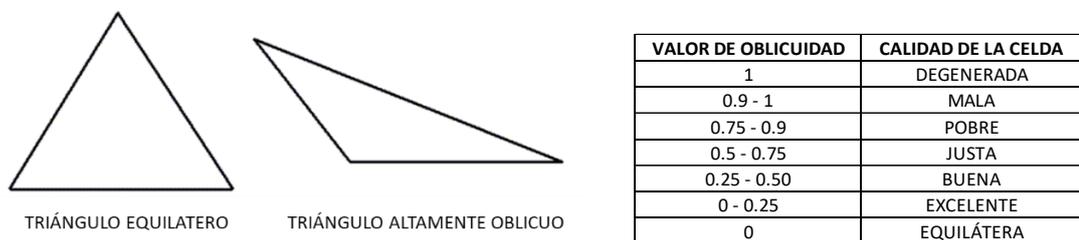


Figura 31-4: Esquematación del criterio de oblicuidad.

Fuente: (ANSYS Meshing User's Guide, 2010).

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Básicamente la oblicuidad permite cuantificar qué tan equiláteros son los triángulos que forman las caras de los tetraedros que conforman los volúmenes finitos. Un valor de 0 será la indicación de una celda con lados perfectamente iguales mientras que un valor de 1 será el indicativo de una celda totalmente distorsionada.

4.10.2 *Procesamiento para el sistema de caracol.*

Una vez que se ha conseguido un mallado eficiente y apropiado para el análisis de la presente investigación, es necesario continuar a la fase de configuración de los parámetros para el procesamiento.

Para ello, es necesario establecer las condiciones de frontera del volumen de control. Es necesario configurar la entrada del flujo de aire, la salida y las paredes del volumen de control.

Para el ingreso del flujo de aire, se ha considerado una velocidad de 6.4 m/s, que corresponde al caudal de 18000 m³/h. De manera análoga, a la salida se ha considerado una velocidad de 14.6 m/s.

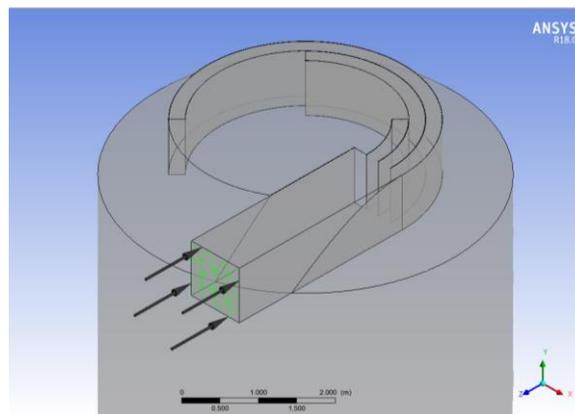


Figura 32-4: Configuración de la entrada de aire al sistema de caracol.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

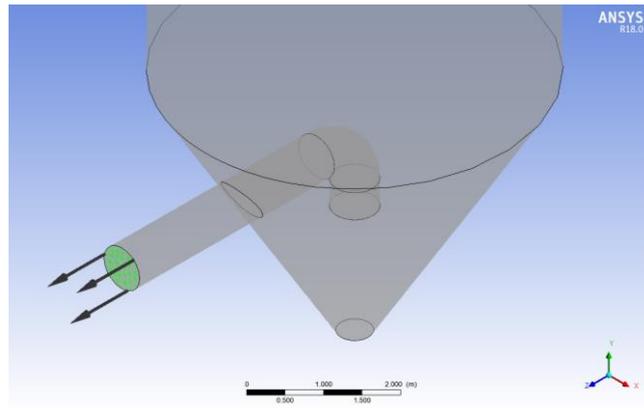


Figura 33-4: Configuración de la salida de aire del volumen de control.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

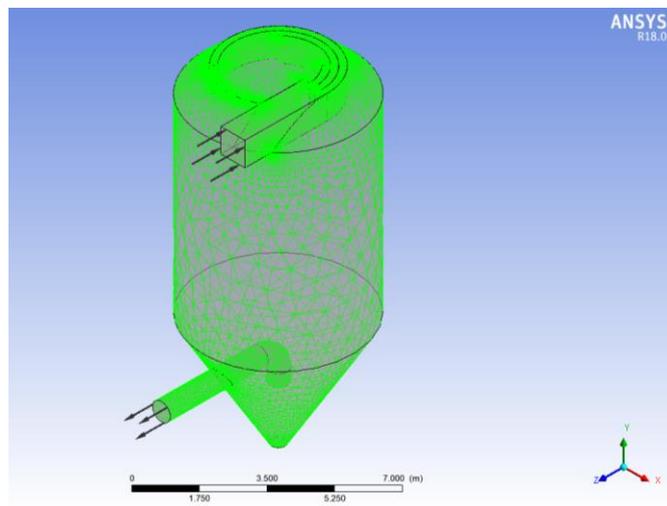


Figura 34-4: Configuración de las paredes del volumen de control.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Una vez efectuada la configuración del volumen de control, se puede proceder a ejecutar el procesamiento. La ejecución del procesamiento puede tomar desde unos pocos segundos hasta varias horas, en dependencia de varios factores como son: número de nodos y elementos, precisión requerida, capacidad del procesador matemático del computador, etc. El proceso iterativo de cálculos se repite hasta que el cambio en la variable de una iteración se vuelve tan pequeño que la solución puede considerarse convergente. En la convergencia todas las ecuaciones de conservación se ajustan a una tolerancia específica en todas las celdas. De esta manera se obtienen los balances de masa, cantidad de movimiento y energía y a través de la convergencia se puede considerar que los resultados de los cálculos son válidos (Bakker, 2012).

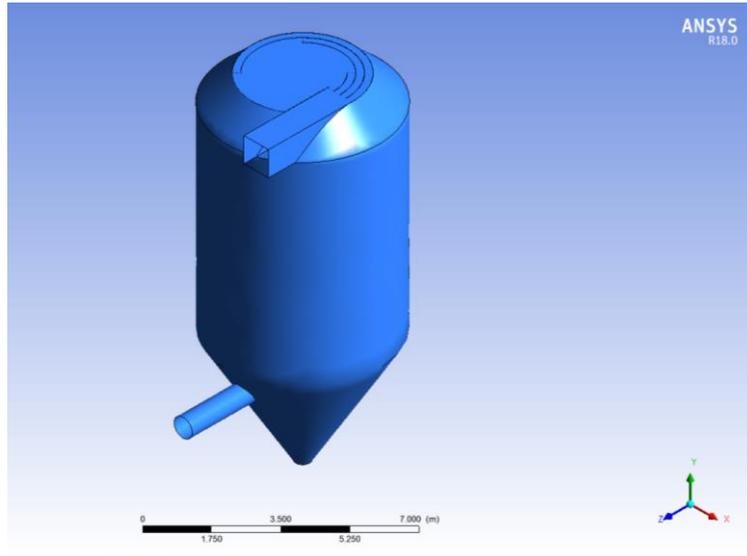


Figura 35-4: Volumen de control para el sistema de caracol.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

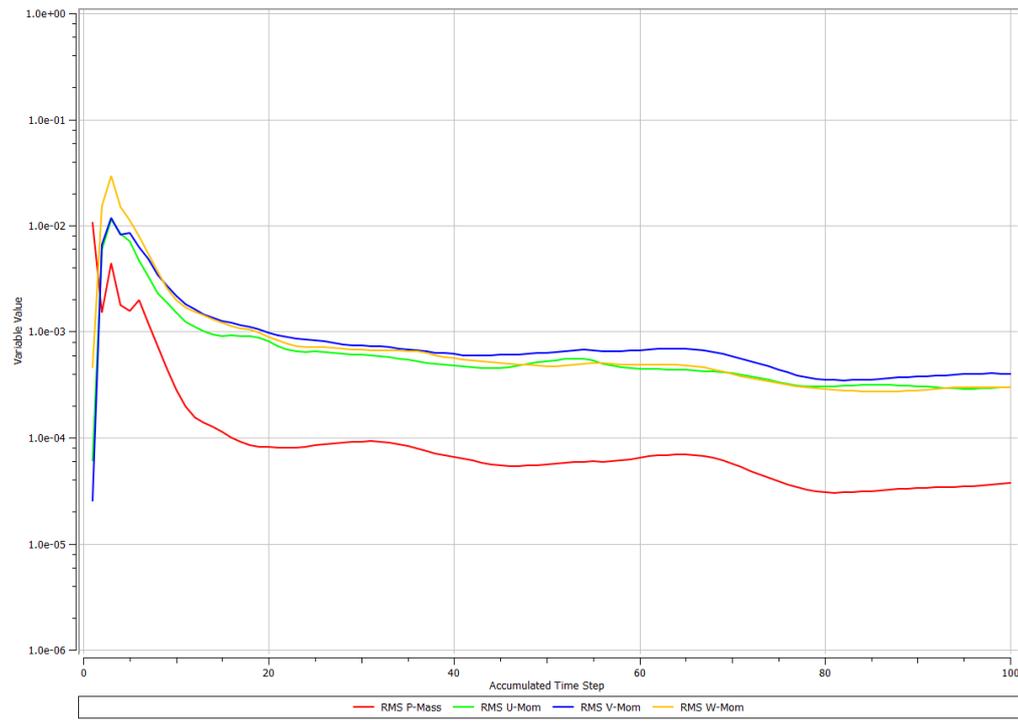


Figura 36-4: Gráfica de convergencia de resultados. En la gráfica se observa la variación de la masa y cantidad de movimiento en cada uno de los ejes comparado con el tiempo de la simulación.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

En la figura 36-4, puede observarse el gráfico de convergencia de valores residuales provenientes del cálculo de masa y cantidad de movimiento que efectúa el software para el procesamiento de datos. En el eje x se registra el tiempo transcurrido para el procesamiento y que obviamente está en función del número de iteraciones que el software efectúa para resolver las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento lineal, y en el eje y se registran los valores de cantidad de movimiento para cada uno de los ejes espaciales. En la gráfica se observa que los valores residuales, a medida que transcurre el tiempo, tienden a mantenerse constantes en un valor aproximado de $1.4E-5$ para el valor de la masa y $1.6E-4$ para los valores de cantidad de movimiento. Estos valores, de acuerdo a la Guía de Usuario de ANSYS, son suficientes para determinar que el mallado del volumen de control ha sido el adecuado y que los resultados obtenidos son aceptables.

4.10.3 Postprocesamiento para el sistema de caracol.

Para efectuar el postprocesamiento, se visualiza el flujo de aire en el interior de la cámara de secado. En la figura 37-4 se observan los parámetros para la visualización en el sistema de caracol.

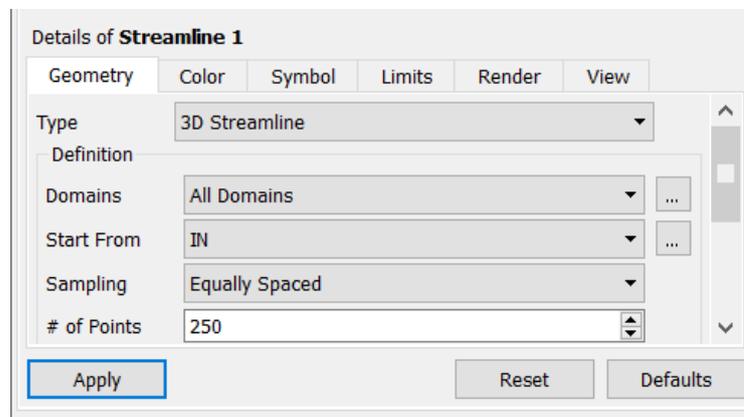


Figura 37-4: Parámetros para la visualización.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

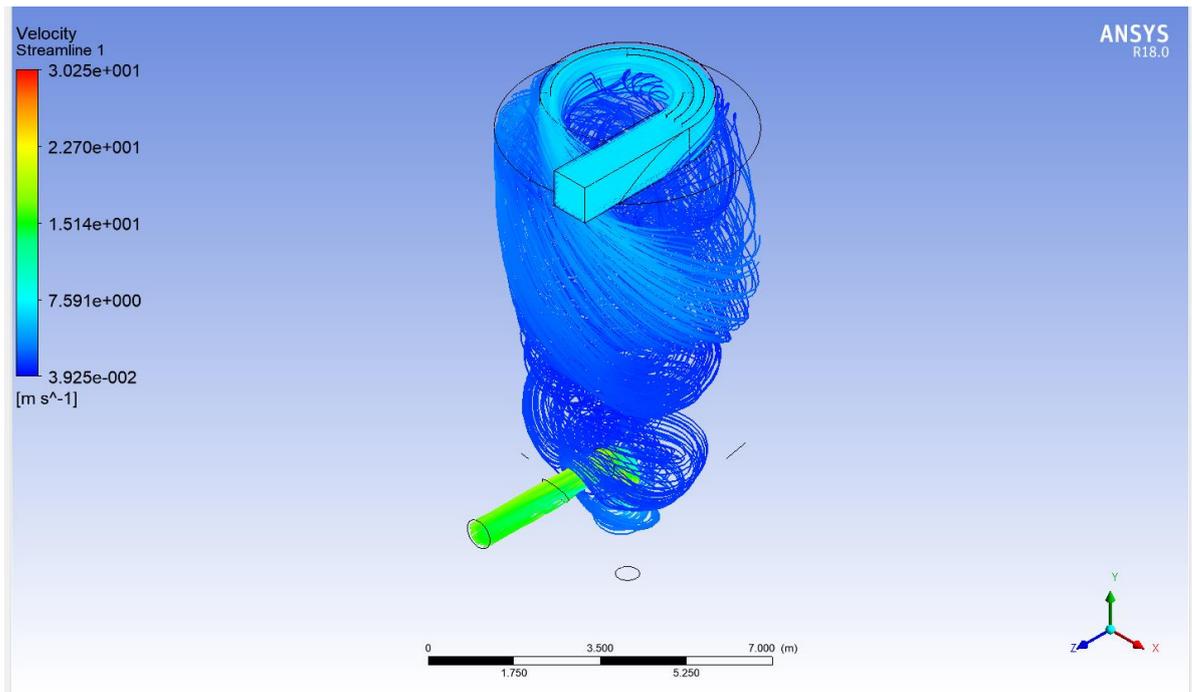


Figura 4-37: Simulación del flujo de aire. Se puede observar las variaciones de velocidad en el interior de la cámara de secado y la formación de un torbellino.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

4.10.4 Simulación de la cámara de secado con difusor

De acuerdo a lo mencionado en capítulos anteriores, se han diseñado 4 tipos de difusores para efectuar la simulación del flujo de aire en el interior de la cámara de secado. Las simulaciones corresponden a difusores de 4, 6, 8 y 10 álabes primarios, de los cuales más adelante, se seleccionará el diseño más eficiente.

Details of "Mesh"	
[-] Display	
Display Style	Skewness
[-] Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Element Midside Nodes	Dropped
[-] Sizing	
Size Function	Proximity and Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine

Figura 39-4: Dimensiones y método de mallado para el sistema de difusor. Son los mismos parámetros utilizados para el mallado del caracol.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Los parámetros utilizados para el desarrollo del mallado en los modelos con difusores se presentan en la figura 4-39. Cabe resaltar que las dimensiones usadas en el mallado para los diferentes modelos, así como el método de mallado, son los mismos.

Los restantes parámetros de mallado, como son dimensión promedio de elementos, número de nodos, número de elementos, etc., son particulares de cada modelo

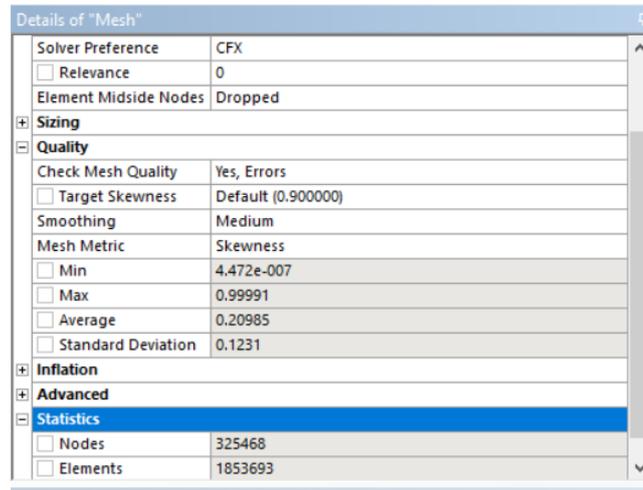


Figura 40-4: Parámetros de calidad de malla para sistema de difusor de ocho

álabes. Se destacan el número de nodos y de elementos existentes.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

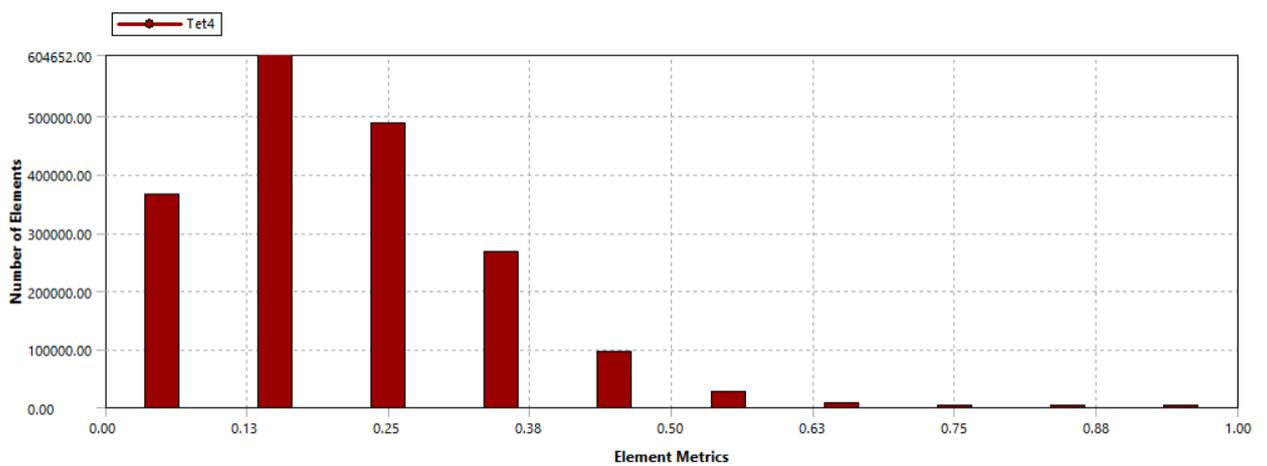


Figura 41-4: Distribución de elementos según el criterio de oblicuidad para sistema de difusor de ocho álabes.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

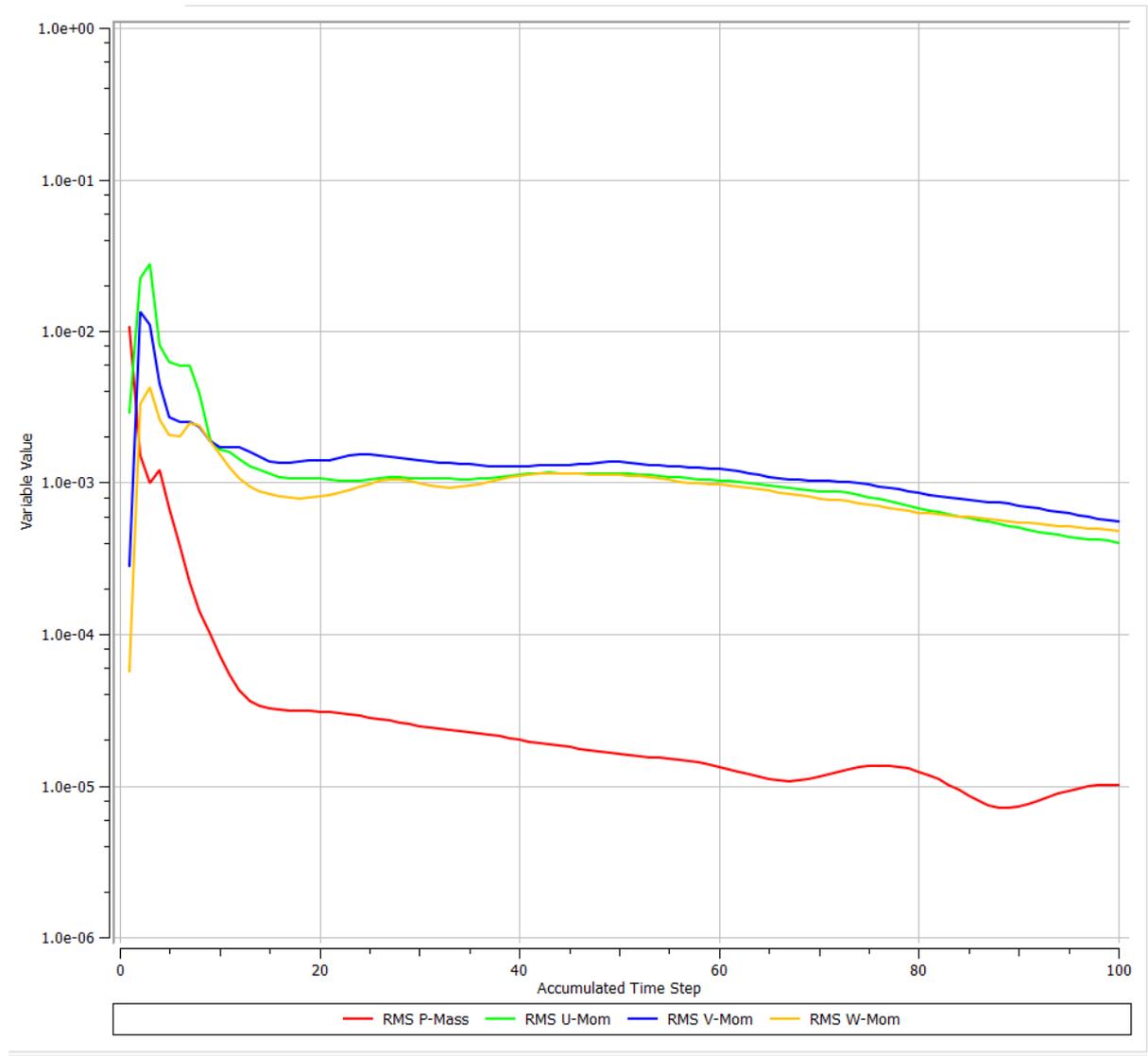


Figura 42-4: Gráfica de convergencia para sistema de difusor de ocho álabes.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

Una solución razonablemente convergente requiere un residuo máximo no superior a 5.0×10^{-4} (ANSYS CFX-Solver Manager User's Guide). En el gráfico de la figura 42-4, se observa que los valores residuales se aproximan a 5.0×10^{-4} , por lo cual puede concluirse que el mallado del volumen de control es adecuado y el análisis de los volúmenes finitos arrojó resultados que se pueden considerar confiables. Los valores de masa (curva de color rojo) y cantidad de movimiento para los tres ejes (curvas amarilla, azul y verde), tienden a estabilizarse con el tiempo.

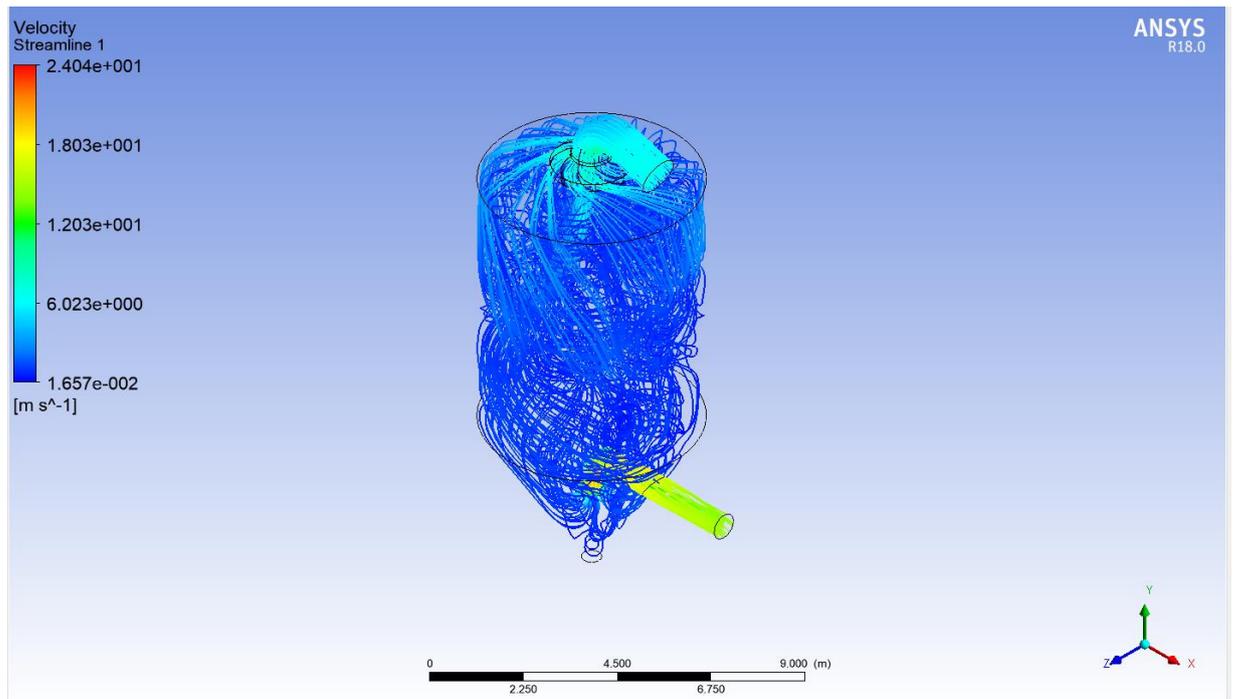


Figura 43-4: Simulación de flujo de aire en la cámara de secado para difusor de ocho álabes. Se observa la presencia de torbellinos y una mejor distribución del flujo de aire al interior de la cámara de secado.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Carlos Campos

4.11 Comparación de resultados de simulación entre el caracol y el difusor de 8 álabes

En la simulación puede observarse que el volumen interior de la cámara de secado, es ocupado casi completamente por el flujo de aire que circula en el interior del sistema de difusor, en donde, además, se observa una mayor turbulencia que la existente en el sistema de caracol (figura 44-4).

Las líneas que representan el flujo de aire al interior de la cámara de secado, permiten predecir una mayor turbulencia al implementarse el difusor.

4.12 Selección del difusor adecuado

Luego de haber analizado las diferentes opciones de difusor, en donde básicamente la diferencia es en el número de álabes primarios, puede observarse en la figura 5-2 que, a medida que se incrementa el número de álabes, se tiene una mejor distribución del aire caliente al ingreso de la

cámara de calor del atomizador. Sin embargo, no es menos importante tomar en cuenta que, mientras más álabes se proponga, mayor será el peso del difusor, así como las dificultades constructivas debido a la limitación de espacio. Por ello, es importante determinar el peso que tiene el sistema original y el peso que tendrá el nuevo sistema, el cual no deberá ser superior al primer sistema, para poder optar por la opción más viable técnicamente.

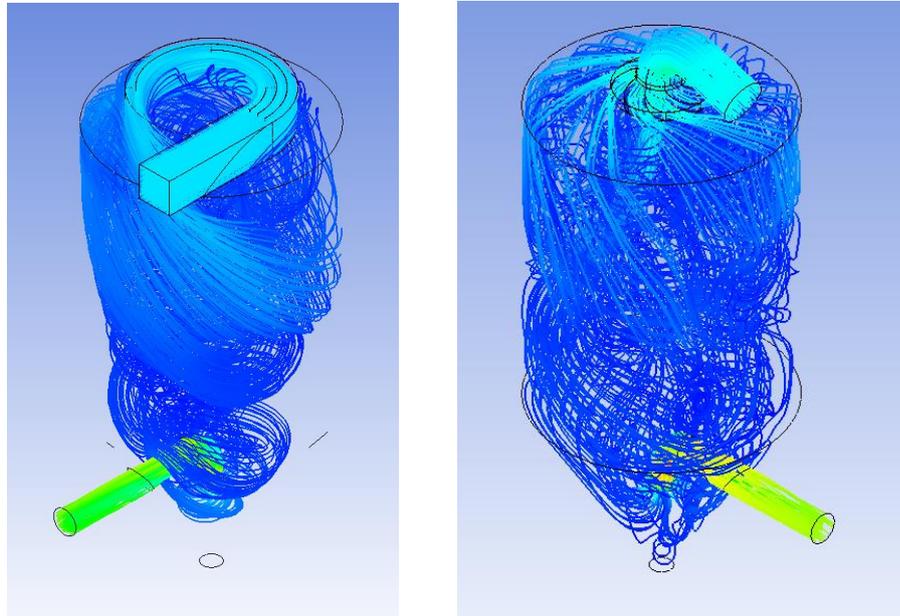


Figura 44-4: Comparación de las simulaciones del sistema con caracol y del sistema con difusor de ocho álabes primarios.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

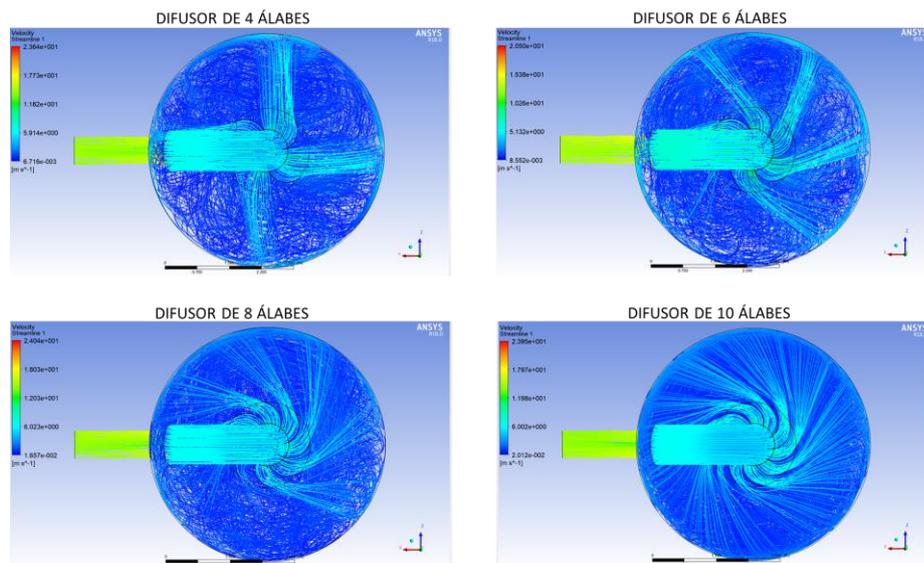


Figura 45-4: Vista superior de la simulación del flujo de aire al interior de la cámara de

secado para los distintos tipos de difusor.

Fuente: ANSYS

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

El peso que alcanza el difusor, en función del número de álabes primarios, se resume en la tabla 1-5.

Tabla 4-4: Comparación de pesos entre sistema de caracol y sistema de difusor.

SISTEMA DE CARACOL						
		MATERIAL	PESO (kg/m)	DIÁMETRO (m)	LONGITUD (m)	PESO TOTAL (kg)
ESTRUCTURA DE LA TAPA	ANILLO SUPERIOR	PLATINA 75X12	7.07	1.84	5.78	40.87
	ANILLO INFERIOR	ANGULO 100 X 10	15.04	5.42	17.03	256.09
	NERVIO CIRCULAR 1	ANGULO 25X3	1.11	3.63	11.40	12.66
		MATERIAL	PESO (kg/m)	CANTIDAD	LONGITUD	PESO TOTAL (kg)
	NERVIOS	PERFIL G 150 X 50 X 15 X 3	6.13	10	1.41	86.43
		MATERIAL	PESO (kg/m²)	ÁREA (m²)		PESO TOTAL (kg)
	PLANCHAS	ACERO INOXIDABLE AISI 304 DE 3 mm	24	6.33		151.92
CARACOL		MATERIAL	PESO (kg/m)			PESO TOTAL (kg)
		ACERO INOXIDABLE AISI 304 DE 3 mm				620.88
		ANGULO 30 X 3	1.36	12.32		17
PESO TOTAL SISTEMA DE CARACOL (kg)						1185.61
SISTEMA DE DIFUSOR						
		MATERIAL	PESO (kg/m)	DIÁMETRO (m)	LONGITUD (m)	PESO TOTAL (kg)
ESTRUCTURA DE LA TAPA	ANILLO SUPERIOR	PLATINA 75X12	7.07	2.24	7.04	49.75
	ANILLO INFERIOR	ANGULO 100 X 10	15.04	5.42	17.03	256.09
	NERVIO CIRCULAR 1	ANGULO 65 X 6	5.84	3.3	10.37	60.54
	NERVIO CIRCULAR 2	ANGULO 65 X 6	5.84	4.36	13.70	79.99
		MATERIAL	PESO (kg)	CANTIDAD	LONGITUD	PESO TOTAL (kg)
	NERVIOS	PERFIL G 100 X 50 X 15 X 3	4.95	13	2.25	144.79
		MATERIAL	PESO (kg/m²)	ÁREA (m²)		PESO TOTAL (kg)
	PLANCHAS	ACERO INOXIDABLE AISI 304 DE 3 mm	24	27		648.00
DIFUSOR		MATERIAL				PESO TOTAL (kg)
		ACERO INOXIDABLE AISI 304 DE 3 mm				340.00
PESO TOTAL SISTEMA DE DIFUSOR						1579.17

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

4.13 Cálculo de la eficiencia del atomizador con sistema de caracol

El análisis de consumo energético y de producción va a efectuarse para 1 hora de proceso.

Masa de producto que ingresa al atomizador: 4387 kg

Humedad del producto que ingresa al atomizador: 27%

Masa de agua que ingresa al atomizador, m_{ac} : 1185 kg

Masa de producto que sale del atomizador: 3400 kg

Humedad del producto que sale del atomizador: 7%

Masa de agua que sale del atomizador, m_{as} : 238 kg

La masa de agua evaporada en el atomizador está dada por la diferencia de masas que ingresa y que sale:

$$m_{ev} = m_{ae} - m_{as} \quad (13)$$

$$m_{ev} = 1185 - 238$$

$$m_{ev} = 947 \text{ kg}$$

Con los datos de operación que se listan a continuación, se calcula la masa teórica de agua que debería evaporar el atomizador:

Combustible: Diésel 2

Poder calorífico: 43.1×10^6 J/kg

Densidad: 0.85 kg/l

Consumo en 1 hora: 40 galones = 151.2 l

Para el cálculo de cantidad de calor capaz de generar el combustible consumido se tiene:

$$Q_D = V_D * \delta_D * P_C \quad (14)$$

Donde:

Q_D = Cantidad de calor que genera el combustible consumido

V_D = Volumen de diésel consumido

δ_D = Densidad del diésel

P_C = Poder calorífico del diésel

Se tiene entonces:

$$Q_D = 151.2 * 0.85 * 43100000$$

$$Q_D = 5539.2 \text{ MJ}$$

A continuación, se determina la expresión de la cantidad de masa de agua que puede ser removida del atomizador en función del calor que puede generar el combustible consumido. Se tiene las siguientes expresiones:

$$Q_T = Q_S + Q_L \quad (15)$$

$$Q_S = m * C_e * \Delta T \quad (16)$$

En donde:

Q_T = Cantidad de calor necesario para evaporar una masa m

Q_S = Calor sensible de vaporización

Q_L = Calor latente de vaporización, 2.264 MJ/kg

m_D = masa de agua

C_e = Calor específico del agua, 4180 J/kg °K

ΔT = Diferencial de temperatura, 72°K

Reemplazando los valores en la ecuación (16), se tiene:

$$Q_T = m_D * 4180 * 72 + m_D * 2.264E6$$

$$Q_T = m_D * 2.565 \text{ MJ/kg} \quad (17)$$

Ahora bien, en base a la cantidad de calor que puede entregar el combustible consumido, calculamos la masa teórica de agua que debería ser evaporada en el atomizador. Es decir:

$$Q_T = Q_D \quad (18)$$

Reemplazando en (18) la ecuación (17) y el valor obtenido de Q_D , se tiene:

$$m_D * 2.565 \text{ MJ/kg} = 5539.2 \text{ MJ} \quad (19)$$

Despejando la ecuación (19), se obtiene:

$$m_D = 2159.5 \text{ kg}$$

Le eficiencia del atomizador viene dada por la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{m_{ev}}{m_D} * 100 \quad (20)$$

$$\eta = \frac{947}{2159.5} * 100$$

$$\eta = 44\%$$

4.14 Cálculo de la eficiencia del atomizador alcanzada con el difusor

Una vez instalado el difusor, se ha conseguido un consumo de combustible de 35 gal (132.3 l) en una hora. En base a este consumo, aplicando la ecuación (14), se tiene el siguiente cálculo para la cantidad de calor generada:

$$Q_D = 132.3 * 0.85 * 43100000$$

$$Q_D = 4846.8 MJ$$

Reemplazando el calor obtenido con el nuevo consumo de combustible en la ecuación (17), se obtiene la masa de agua que es removida:

$$Q_T = m_D * 2.565 MJ/kg$$

$$m_D * 2.565 MJ/kg = 4846.8 MJ$$

$$m_D = 1889.6 kg$$

Aplicando el valor obtenido en la ecuación (20), se tiene:

$$\eta = \frac{947}{1889.6} * 100$$

$$\eta = 50\%$$

4.15 Cálculo de la reducción en el consumo de combustible

El consumo de combustible se ha reducido en un valor de 5 galones por cada hora de operación del atomizador. Tomando en cuenta que el atomizador opera un promedio de 105 horas por cada semana y que la planta opera 50 semanas al año se tiene una reducción de 26250 galones por año.

El cálculo del ahorro estimado para un año se obtiene de la siguiente expresión simple:

$$A_A = C_A * P \quad (21)$$

En donde:

A_A = Ahorro anual (\$)

C_A = Reducción en el consumo anual de combustible (gal)

P = precio del diésel 2 industrial, \$ 2.10

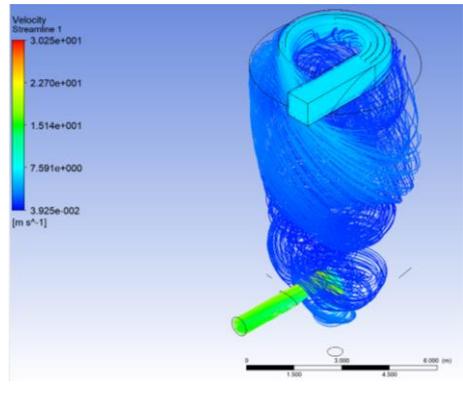
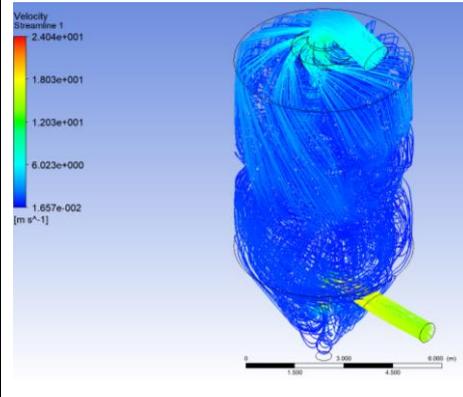
Remplazando los valores:

$$A_A = 26250 * 2.10$$

$$A_A = \$ 55125$$

4.16 Resumen de resultados obtenidos

Tabla 5-4: Resumen de resultados obtenidos.

	CARACOL	DIFUSOR
ENERGÍA CINÉTICA DE TURBULENCIA m^2/s^2	21.65	36.08
SIMULACIÓN DEL FLUJO DE AIRE		
EFICIENCIA DEL ATOMIZADOR	44%	50%
CONSUMO DE COMBUSTIBLE (gal/h)	40	35

Realizado por: Campos, Carlos. 2020

CONCLUSIONES

- Se ha efectuado el diseño del difusor de 8 álabes, el cual permite una mejor distribución de aire caliente al interior de la cámara de secado.
- La geometría del difusor da origen a un vórtice de aire caliente que permite un mejor intercambio de calor con las partículas del producto a ser secado.
- El material más adecuado para la construcción del difusor es el acero inoxidable AISI 304 en plancha de 3 mm.
- Mediante la simulación a través del software de análisis de volúmenes finitos, ha sido posible evidenciar una mejor distribución de aire caliente al interior del atomizador con el difusor diseñado.
- Debido a la inexistencia de información teórica con respecto a diseño y evaluación de difusores, fue necesario construir e instalar el difusor para evaluar los cambios en la eficiencia del atomizador.
- Con el diseño del difusor y remplazo del sistema antiguo se ha conseguido incrementar la eficiencia del atomizador en un 6%, lo cual se traduce en una disminución de combustible equivalente al 12.5%.

RECOMENDACIONES

- Evaluar las demás condiciones de operación del atomizador ATM-15 para incrementar su eficiencia global, como son: estado del aislamiento térmico, eficiencia del ventilador principal, eficiencia del ventilador de presurización, condiciones de bombeo de pasta líquida, eficiencia del quemador.
- Aplicar la misma metodología de modelación, simulación y diseño para el atomizador ATM-600 de la empresa C. A. Ecuacerámica, cuya eficiencia debe ser mejorada por tratarse de un equipo con tecnología obsoleta.
- Continuar con la investigación de equipos de secado por atomización de manera que se determinen modelos matemáticos para el diseño de difusores.

BIBLIOGRAFÍA

ANSYS Help (2018). ANSYS, Inc.

ANSYS Meshing User's Guide (2010). ANSYS, Inc.

ANSYS Solver Manager User's Guide (2011). ANSYS, Inc.

Budynass R.; Keith J.; (2008). Shigley's Mechanical Engineering Design. Ninth Edition.

Editorial McGraw–Hill. Estados Unidos de América.

Bakker, Andre. (2012). The Colorful Fluid Mixing Gallery. Recuperado de:
<http://www.bakker.org/>.

Carrera, J. (2019). Modelación numérica de la unión de dos conducciones a presión de diferente geometría, aplicando el programa Ansys CFX. (Tesis de Pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito

Cengel Y.; Boles M.; (2012). Termodinámica. Editorial McGraw–Hill. México

CEPAL.; (2018). Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.

Huang L.; Kumar K.; Mujumdar A.; (2007). Use of Computational Fluid Dynamics to Evaluate Alternative Spray Dryer Chamber Configurations. Mechanical Engineering Dep. National University of Singapore, Singapore CFD Division, Institute of High Performance Computing, Singapore Science Park II, Singapur

Kieviet F.; Van Raaij J.; De Moor P.; Kerkhof P.; (1997). Measurement and modelling of the air flow pattern in a pilot-plant spray dryer. Laboratory of Separation Processes and Transport Phenomena, Department of Chemical Engineering, Eindhoven University of Technology, Holanda.

Kieviet F.; (1997). Modelling Quality in Spray Drying. Laboratory of Separation Processes and Transport Phenomena, Department of Chemical Engineering, Eindhoven University of Technology, Holanda. Recuperado de: <http://fkieviet.tripod.com/diss/pdf/thesis.pdf>

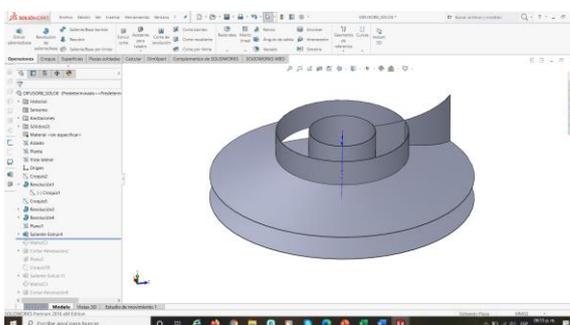
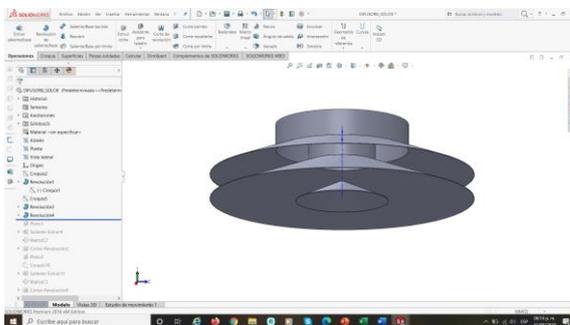
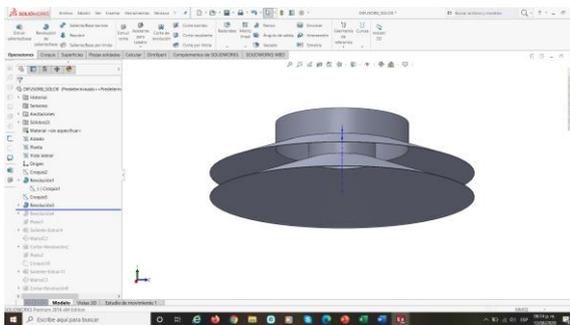
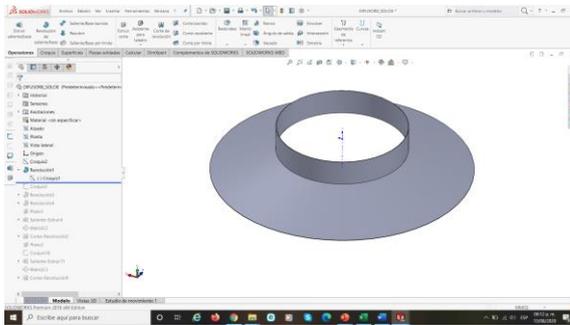
- Lluquay K.; (2016). Desarrollar un modelo cfd para el análisis del comportamiento del fluido en tuberías del banco de pérdidas de turbomaquinaria hidráulica y laboratorio. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador
- Mataix C.; (1986). Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Ediciones del Castillo S. A. Madrid, España
- Mondragón R.; Julia J.; Barba A.; Jarque J.; (2006) El proceso de secado por atomización: formación de gránulos y cinética de secado de gotas. Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Madrid, España. Recuperado de <http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/82688/6084> 1.pdf; jsessionid=FAB8D282C515380CA79C4CCF9967B64F?sequence=1
- Mott P.; (2006); Diseño de elementos de máquinas. Cuarta edición. Editorial Pearson. México.
- Mujudmar A.; (2006) Handbook of Industrial Drying Third Edition. Taylor & Francis Group. Estados Unidos de América.
- Masters K.; (1986). Spray Drying Handbook. University of Wisconsin. Estados Unidos de América.
- Müller E.; (2002). Termodinámica Básica Segunda Edición. Universidad Simón Bolívar. Consultora Editorial Kemiteknik C.A. Caracas, Venezuela.
- Perry R.; Green D.; Maloney J.; Manual del Ingeniero Químico Sexta Edición. Editorial McGraw–Hill. México.
- Pritchard P.; Leylegian J.; (2011). Fox and McDonald's Introduction to fluid mechanics. Eighth Edition. John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos de América.
- Rodríguez A.; Introducción a la termodinámica con algunas aplicaciones en Ingeniería. Universidad Tecnológica Nacional. Buenos Aires, Argentina
- SACMI CERAMICS; Catálogo atomizadores. Imola, Italia.
- SENPLADES.; (2017). Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021. Toda una Vida. Quito, Ecuador.
- Shabde V.; (2006). Optimal design and control of a spray drying process that manufactures hollow micro-particles. Texas Tech University. Estados Unidos de América.
- Streeter V.; Wylie B.; Bedford K.; (1999). Mecánica de Fluidos Novena Edición. Editorial McGraw–Hill. México.

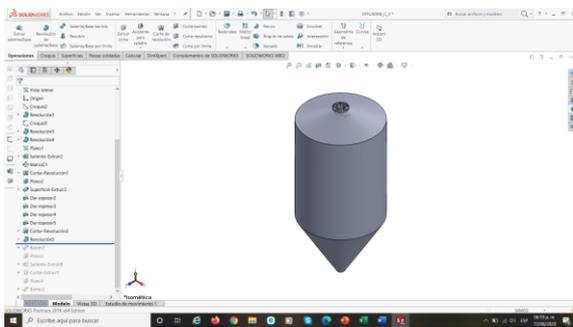
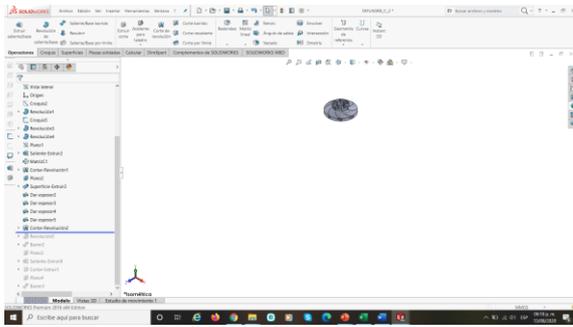
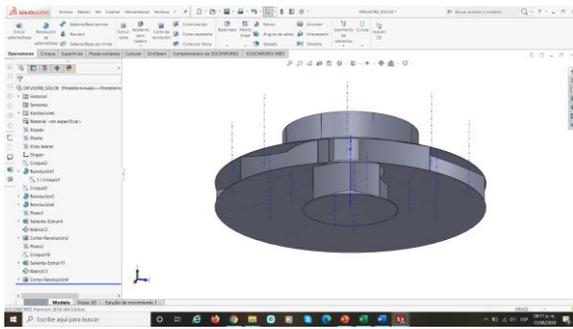
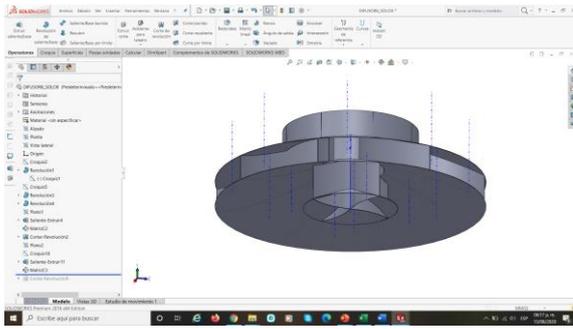
ANEXOS

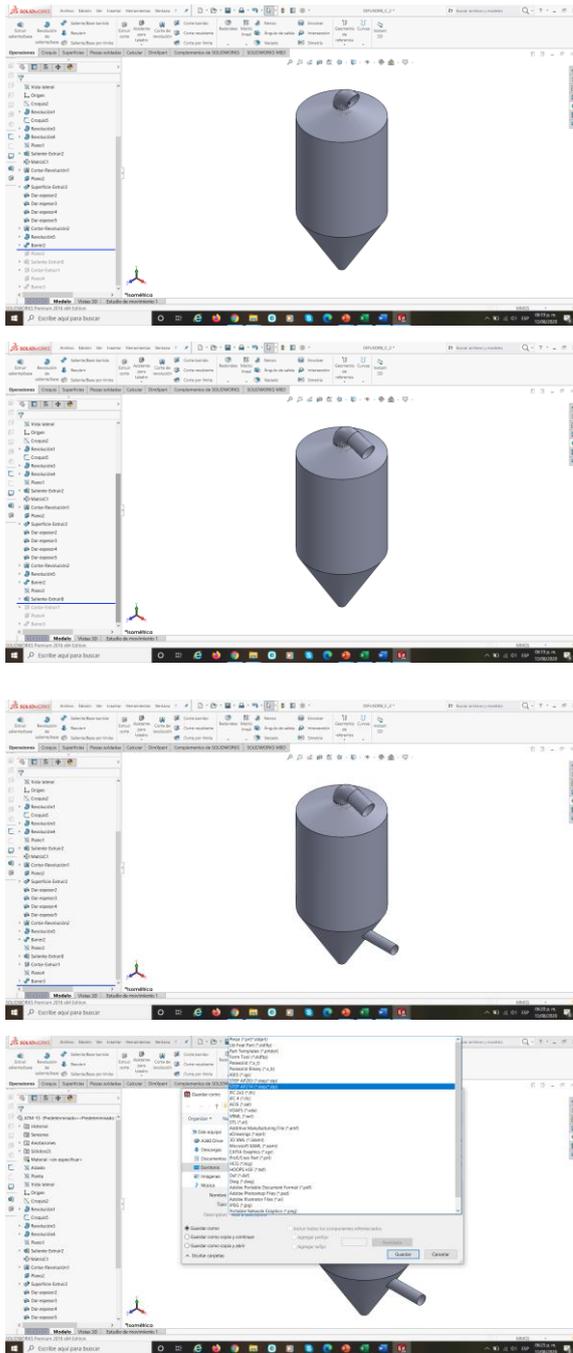
ANEXO A. PROCESO DE SIMULACIÓN PARA EL DIFUSOR DE 8 ÁLABES PRIMARIOSOS

PROCESO DE SIMULACIÓN

1. DESARROLLO DEL MODELO DEL DIFUSOR Y CÁMARA DE SECADO EN SOFTWARE CAD (SOLIDWORKS)





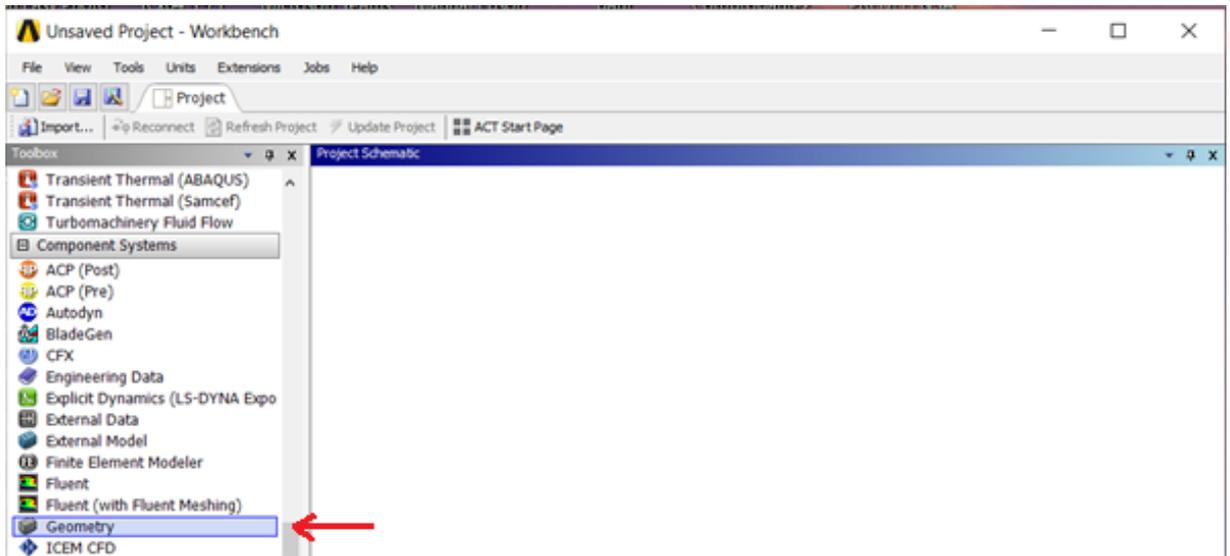


El modelo debe guardarse en formato con extensión .stp para que la exportación hacia Ansys contemple todos los detalles constructivos.

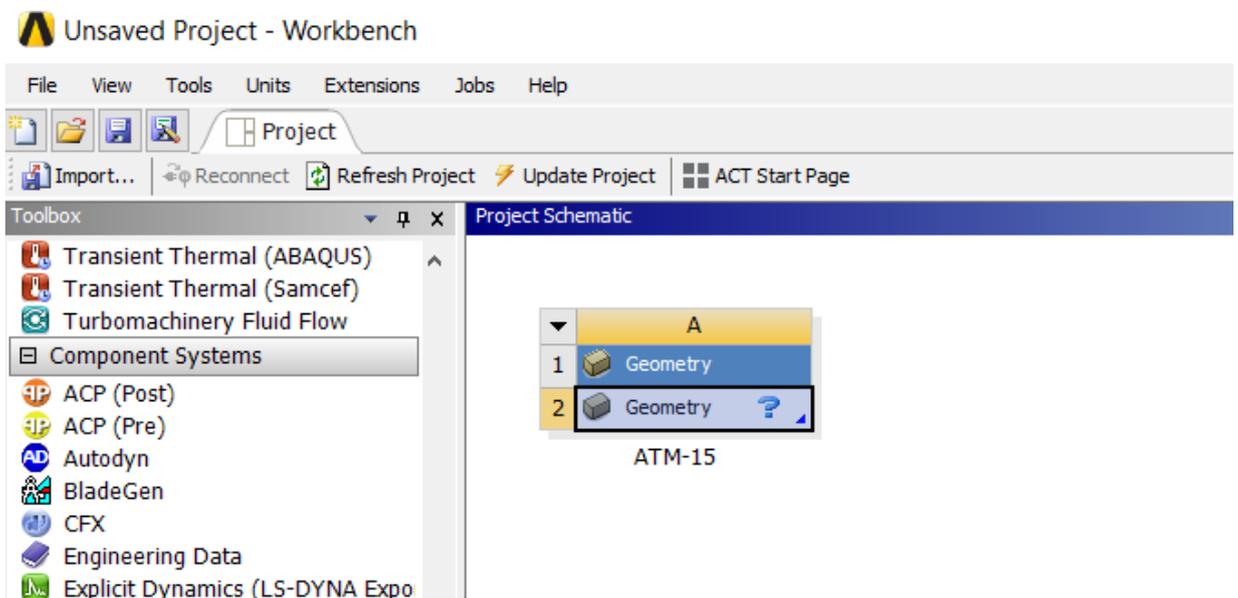
2. SIMULACIÓN EN SOFTWARE CAE (ANSYS)

2.1 Generación del volumen de control.

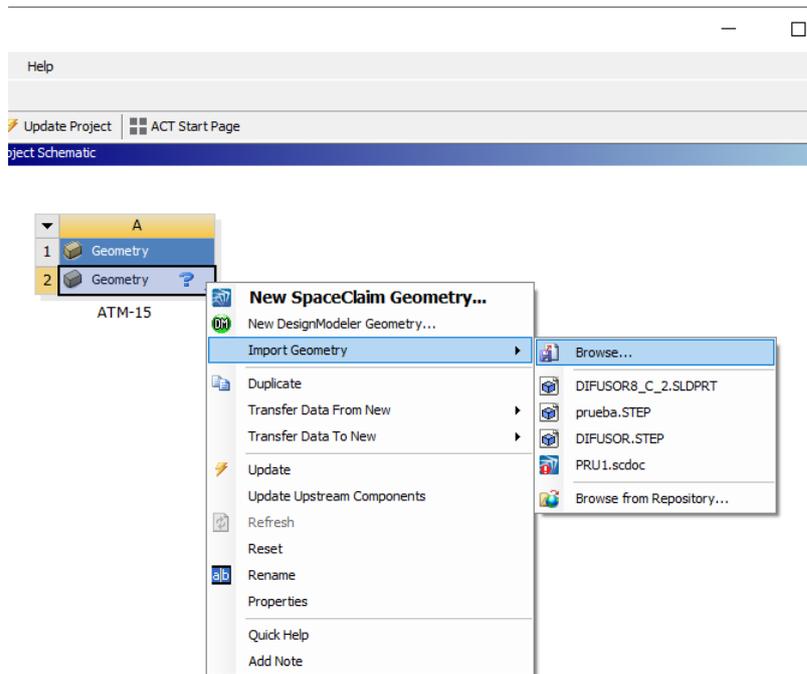
- a. Apertura del programa e importación del modelo al módulo Space Claim de Ansys.



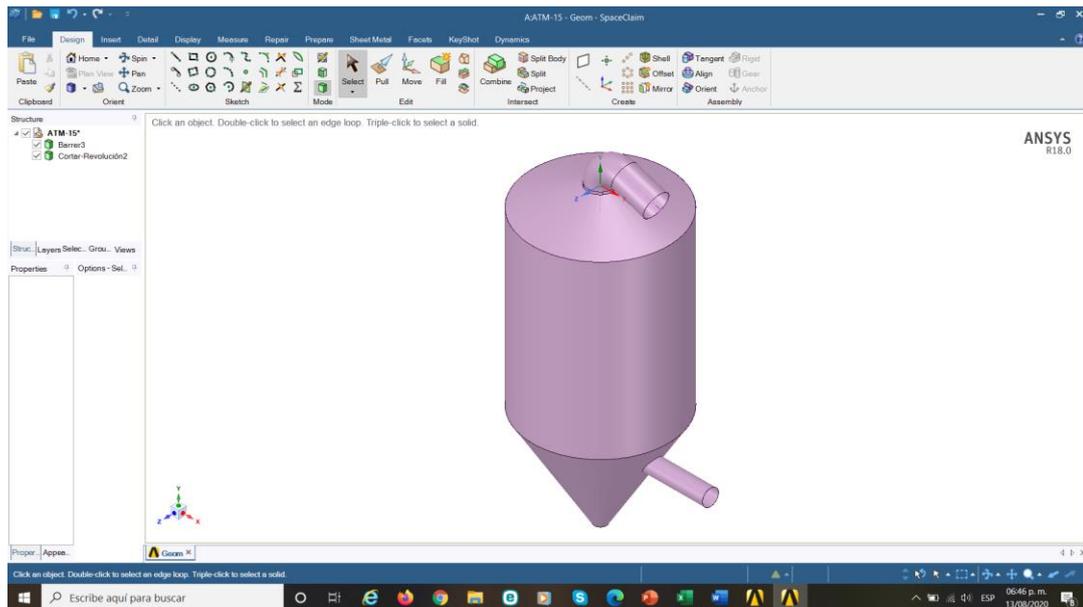
Se genera el ambiente de trabajo para la geometría, al cual se le nombrará, en este caso, como ATM-15.



Pulsando el botón derecho, se accede al menu para importar la figura creada en el software CAD (Solidworks).

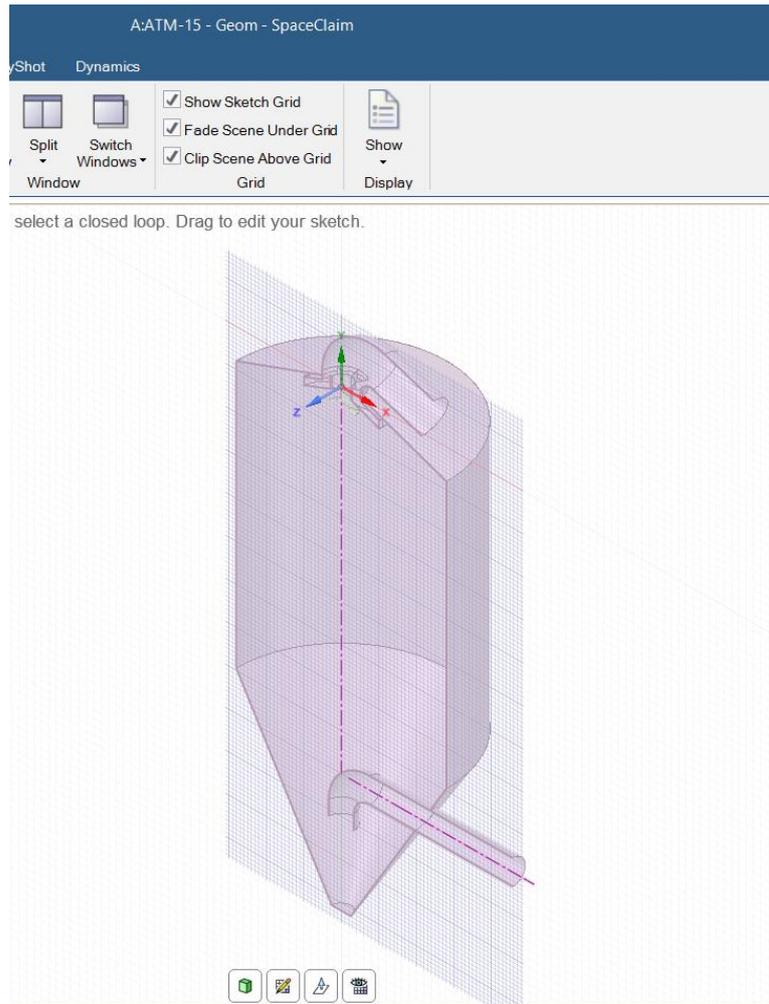


b. Modelo importado en el módulo Space Claim

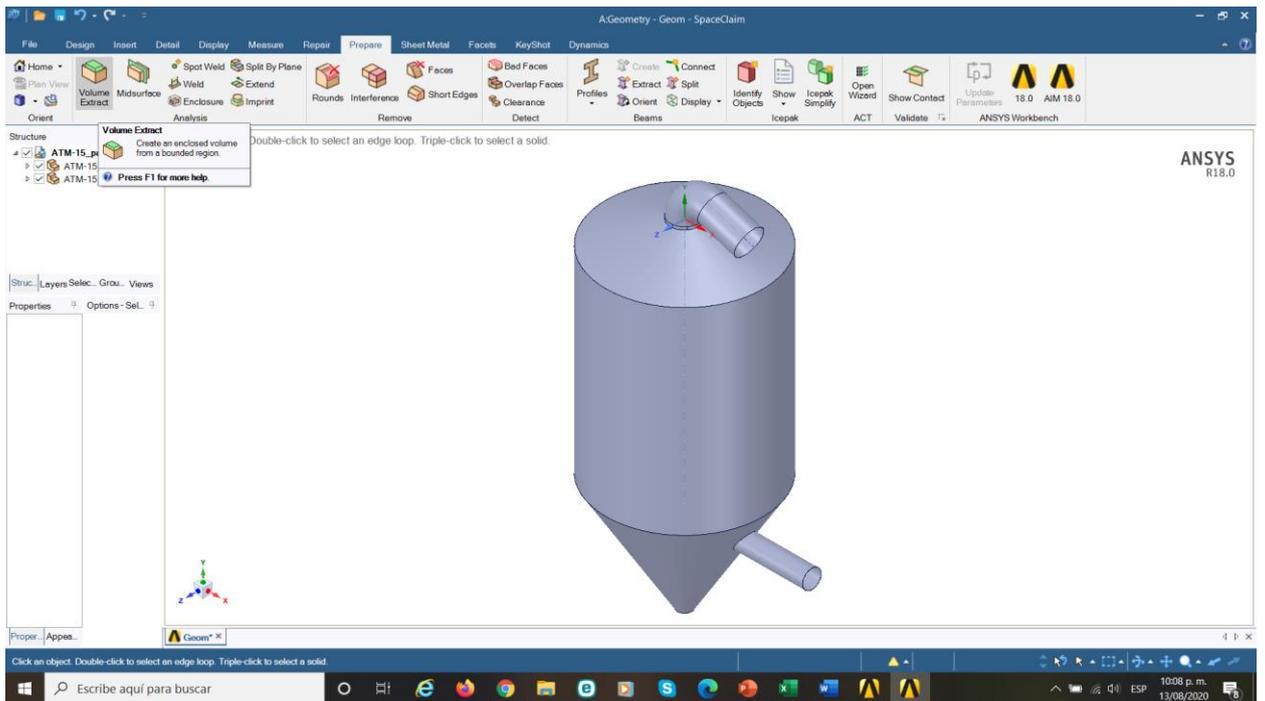


c. Verificación de la geometría

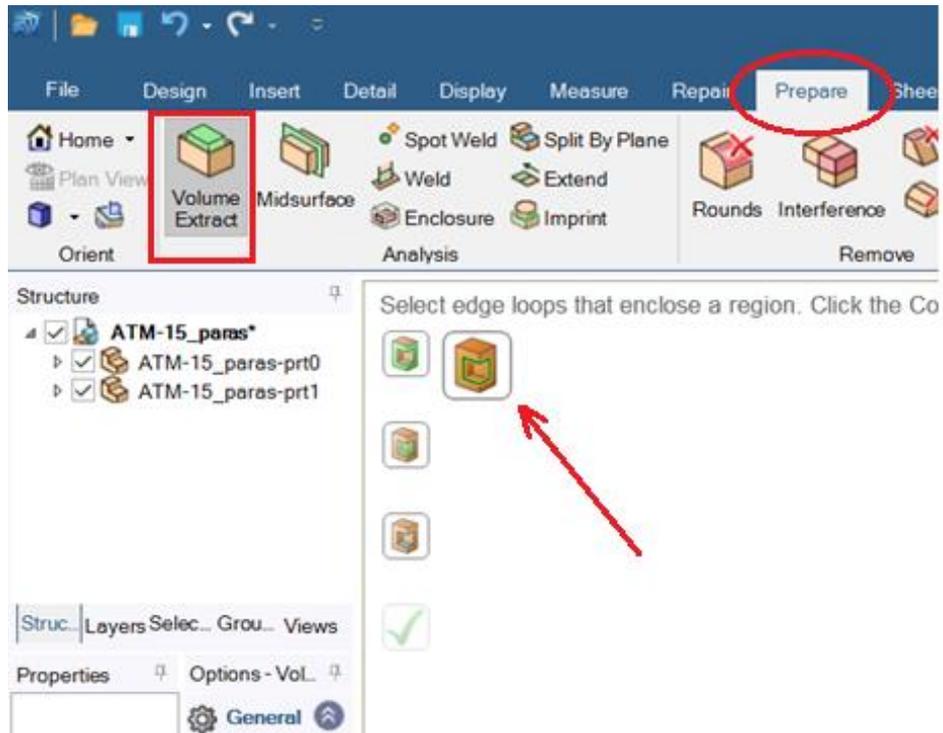
Para verificar la geometría creada, se efectúa una visualización en corte.



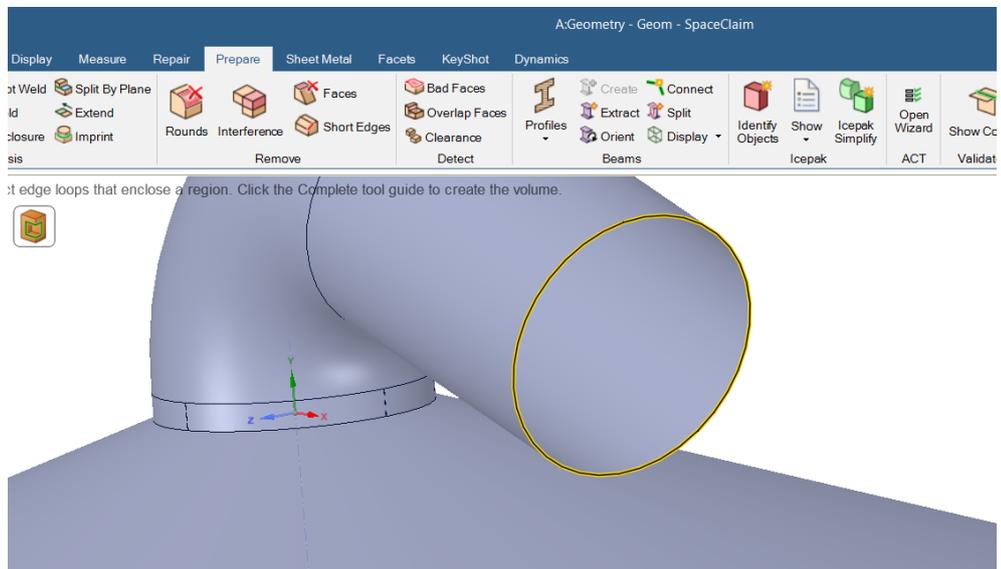
d. Retorno al cuerpo original



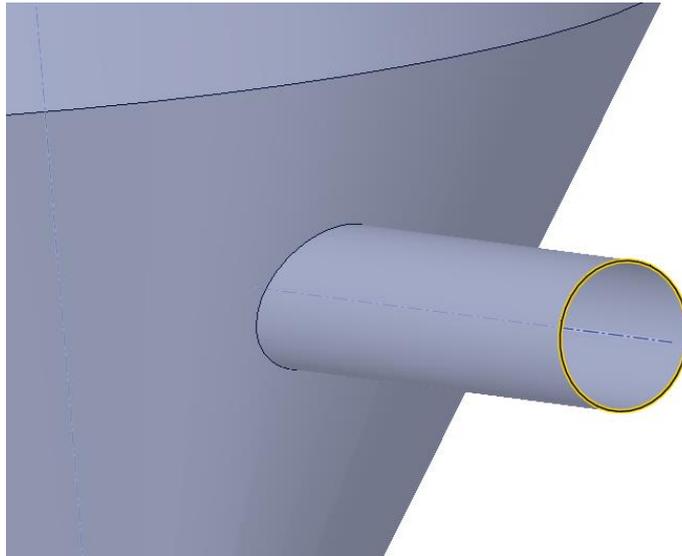
- e. Extracción del volumen de control
Se accede a la opción EXTRAER VOLUMEN en el menú PREPARAR, y se selecciona los perfiles que limitarán el volúmen de control:



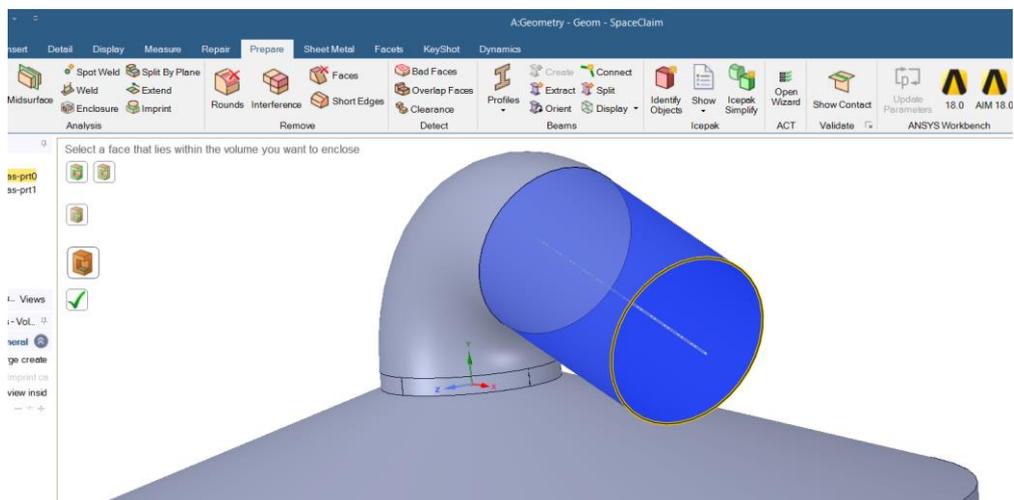
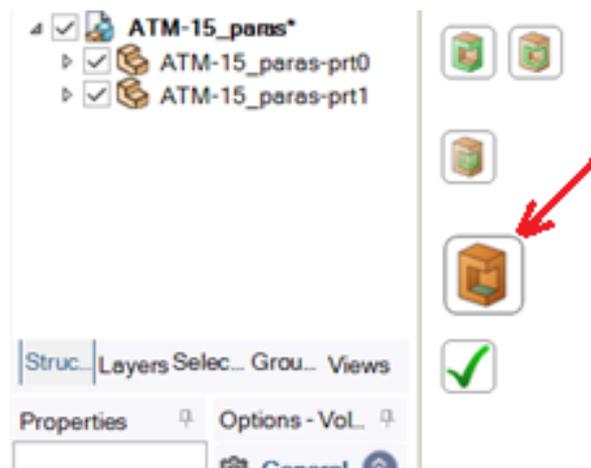
Debe seleccionarse la arista circular interna del ducto de acceso a la cámara de secado:



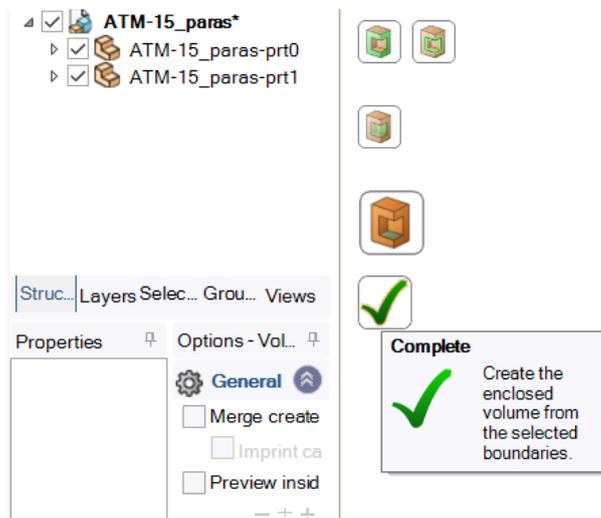
De igual manera, la arista correspondiente al ducto de salida de la cámara:



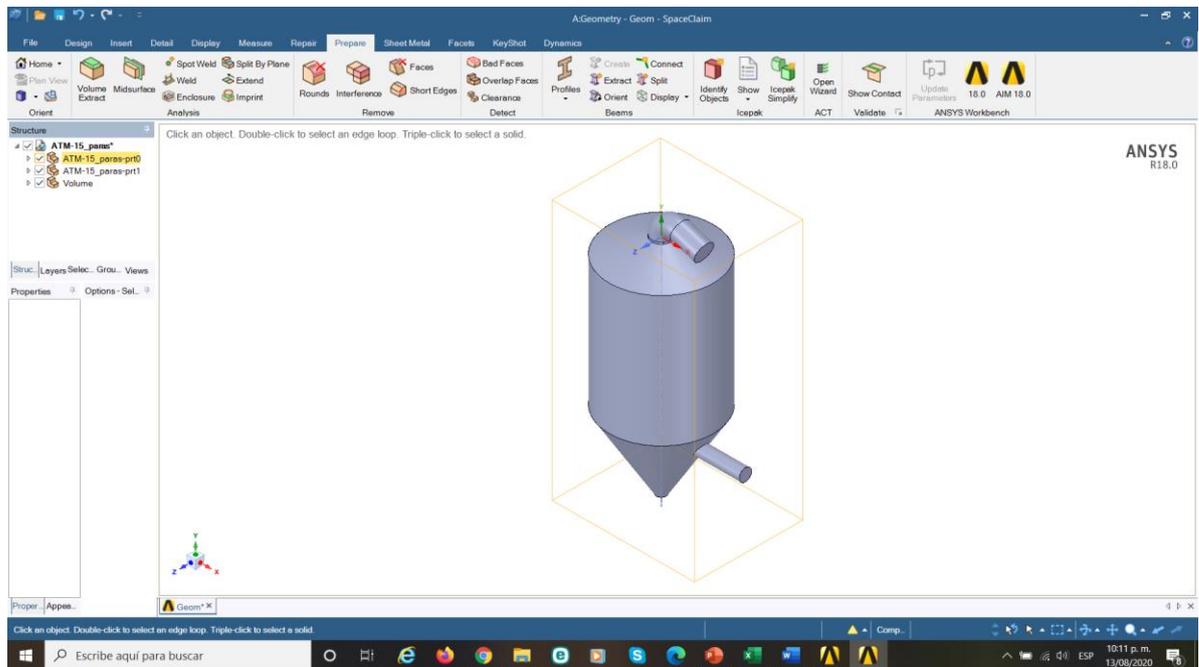
A continuación, por medio de la opción de selección de una cara interna, se selecciona la superficie interior del ducto de entrada, lo cual es suficiente para la generación del volume de control:



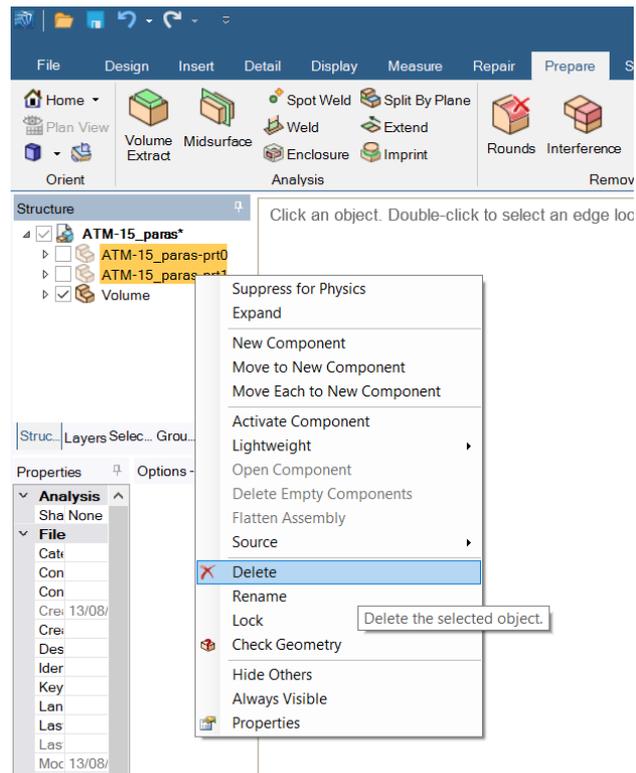
El software activa el botón de completar la creación del volumen extraído.



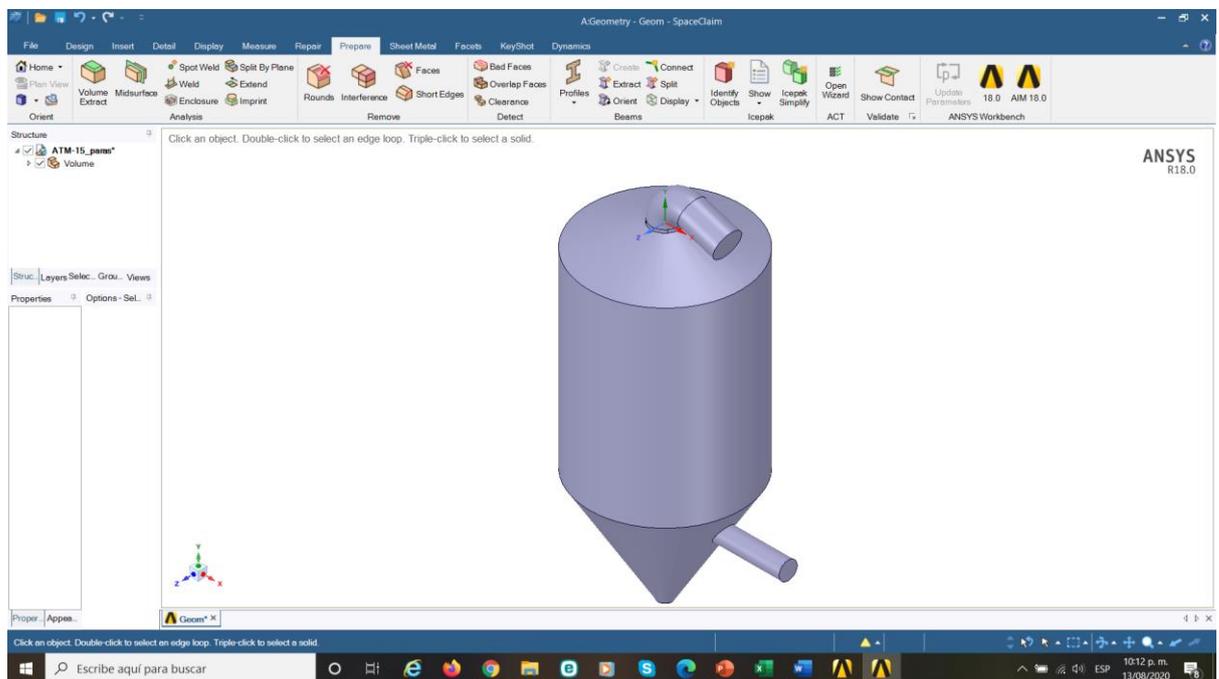
f. Volumen de control extraído.



g. Eliminación del cuerpo original para que se mantenga solamente el volumen de control. Se selecciona los cuerpos que originalmente se importaron al software y se eliminan.

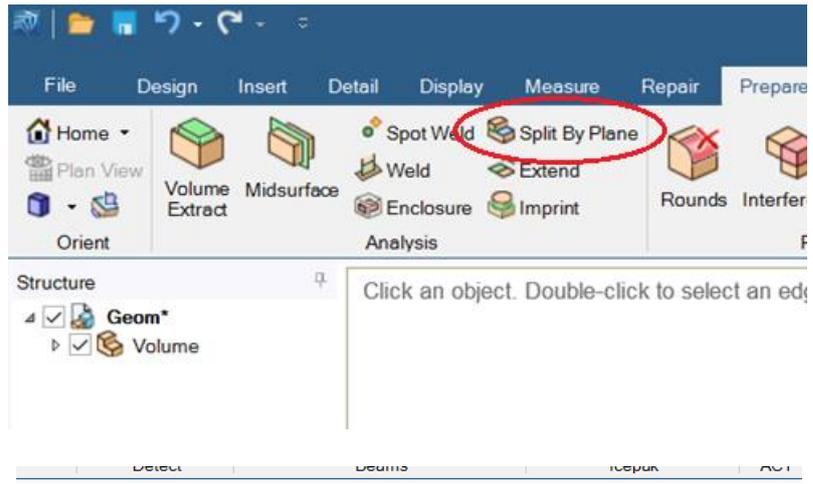


Solamente aparecerá el volumen extraído.

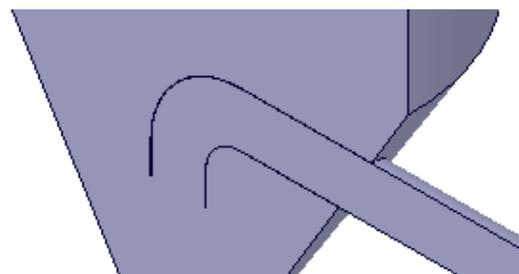
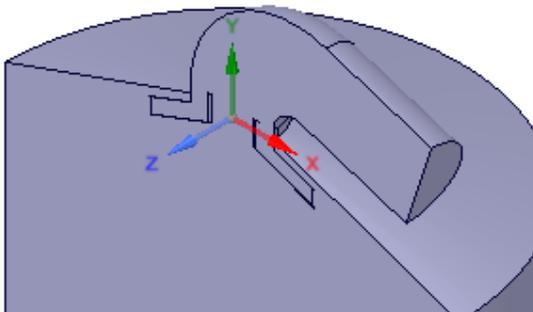
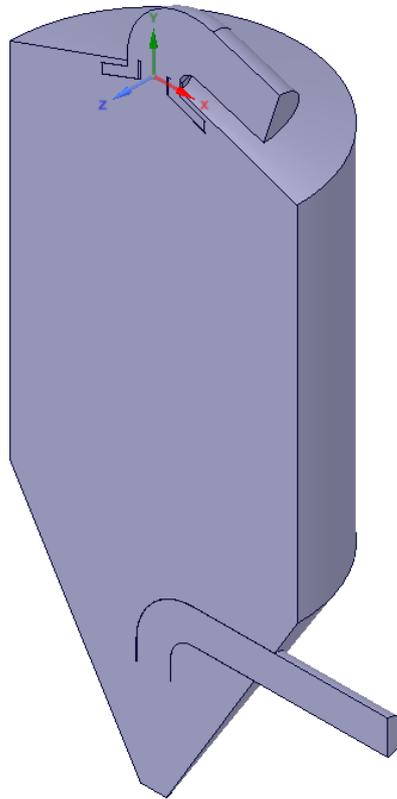


h. Verificación del volumen de control con todos los detalles

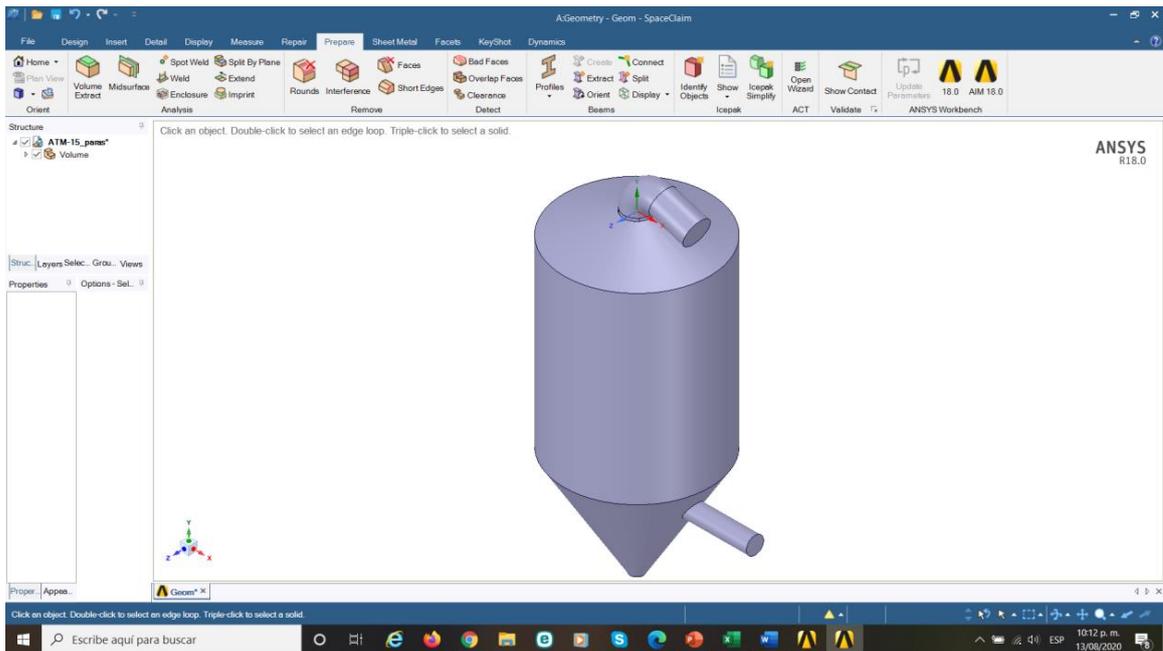
Mediante la opción CORTAR A TRAVÉS DE UN PLANO cortamos por el centro el volumen para verificar que se hayan conservado todos los detalles.



click to select a solid.

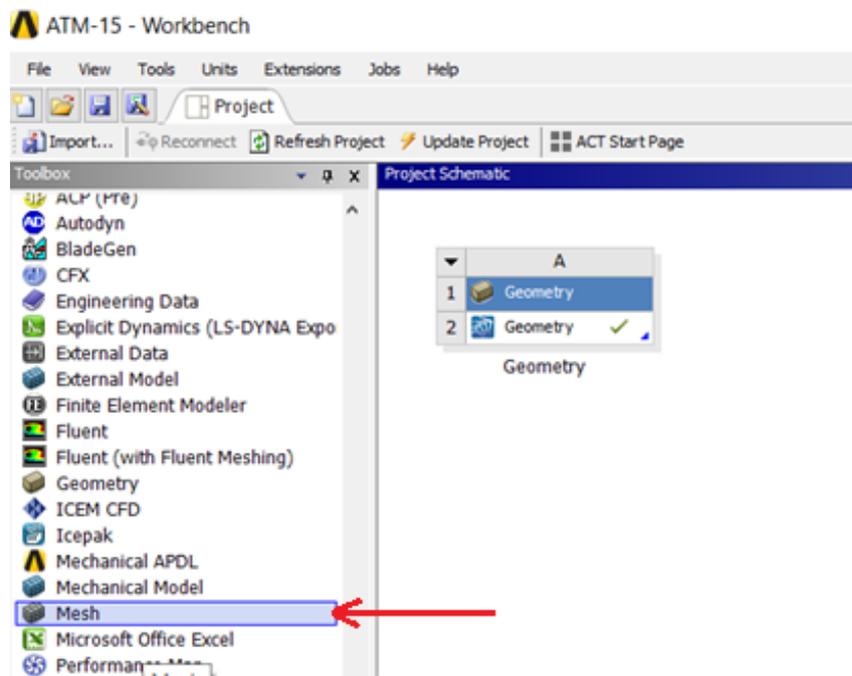


Se retorna al volumen extraído y se concluye con la generación de la geometría.

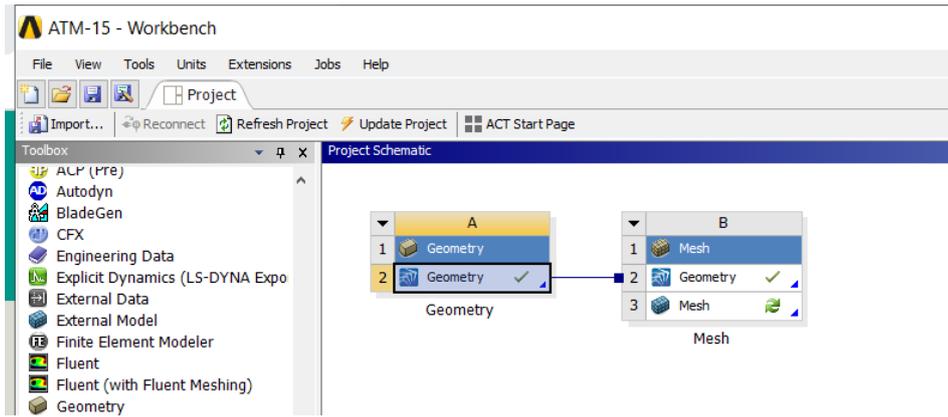


2.2 Generación del mallado.

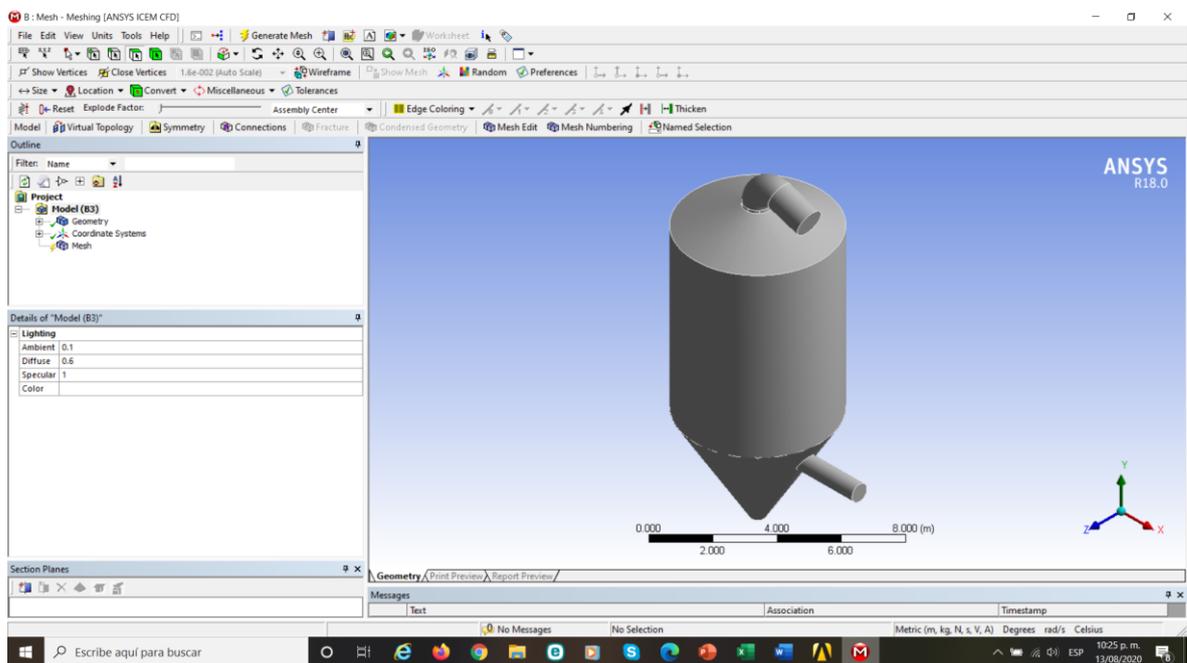
a. Selección del módulo de mallado



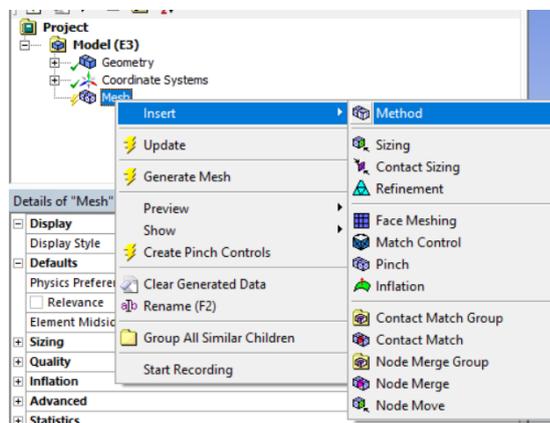
Se crea el ambiente para la generación de mallas, al cual se enlaza con la geometría creada.



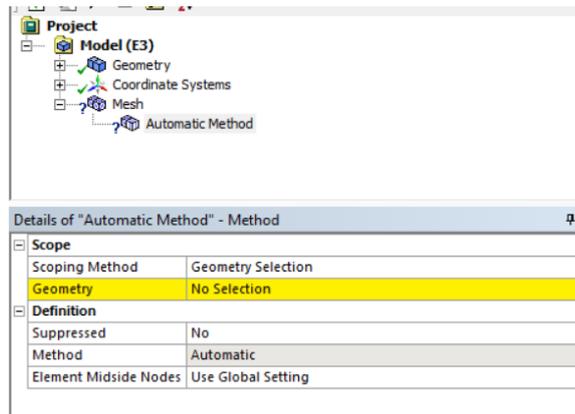
Una vez que se ingresa a la opción de malla, aparece el volume creado.



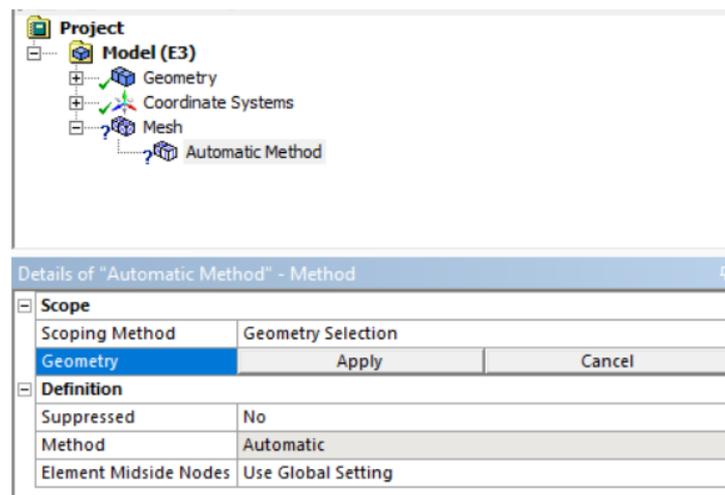
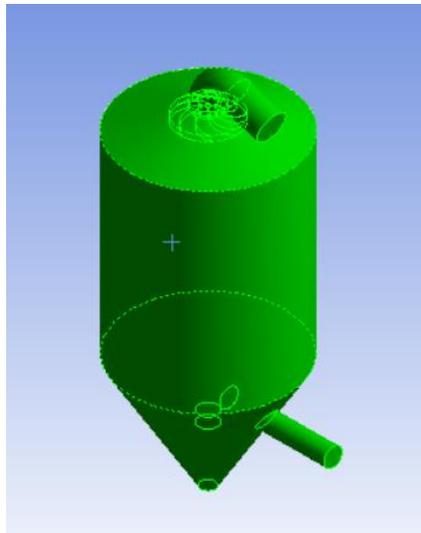
- b. Configuración del método de mallado. Se ubica el cursor en malla, se pulsa el botón derecho y en el menu INSERTAR, se selecciona la opción MÉTODO:



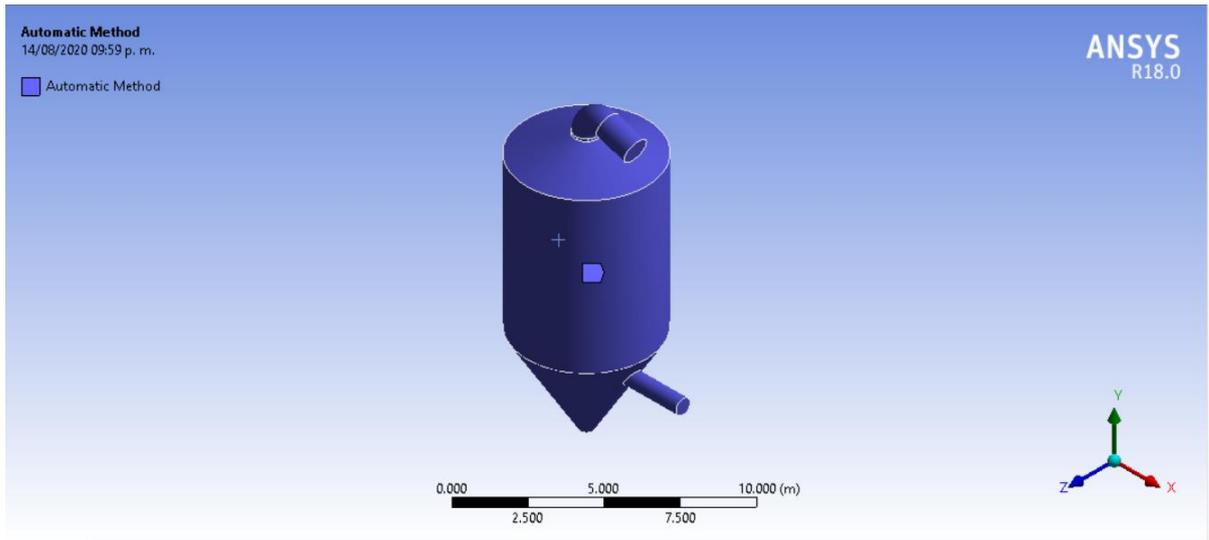
En el menú de detalles aparece la opción de selección de la geometría a mallar:



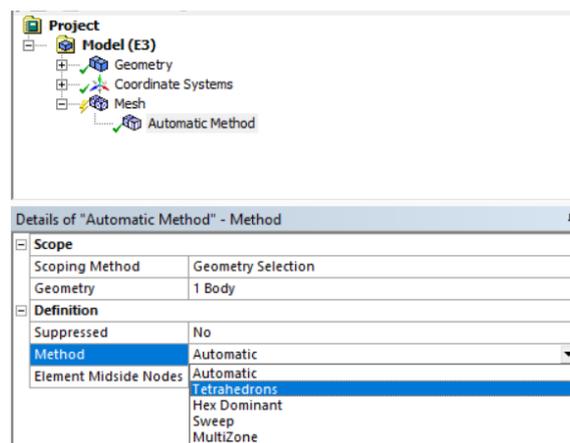
Se selecciona todo el cuerpo y se pulsa en APLICAR.



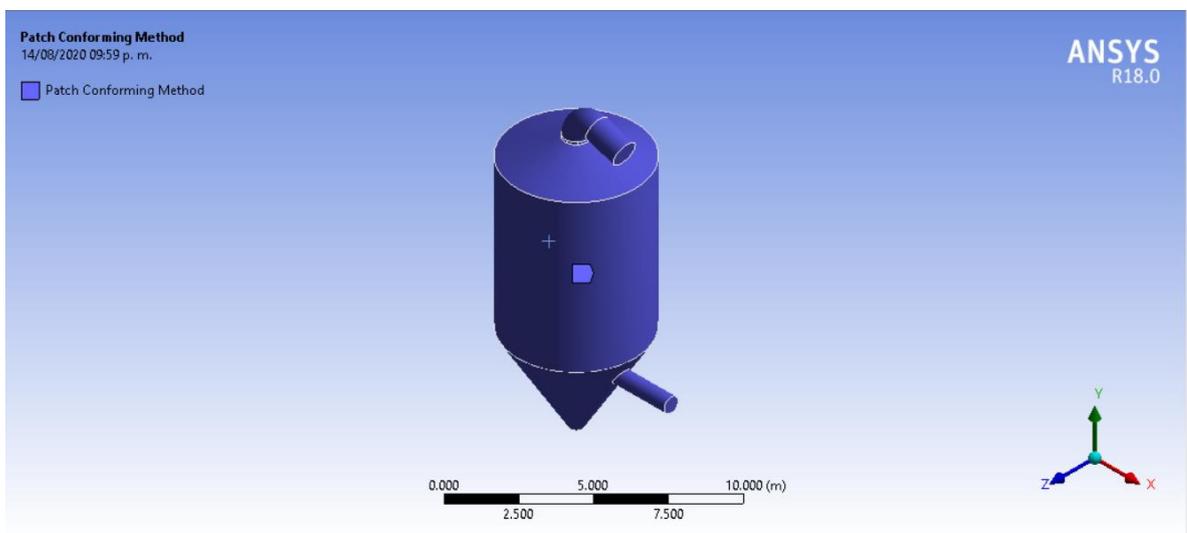
Aparece marcado el cuerpo con el método de mallado por defecto (automático):



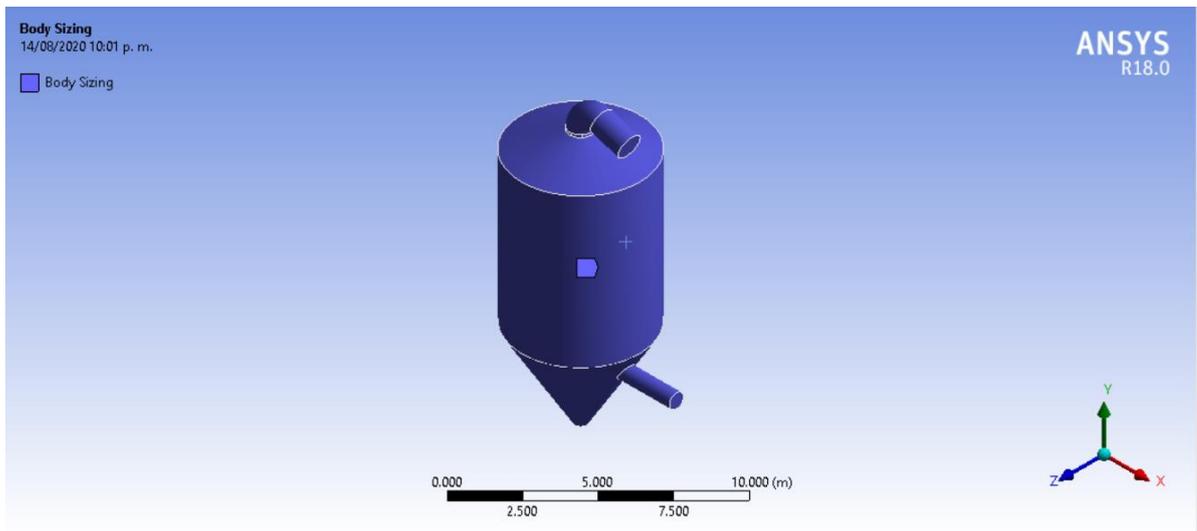
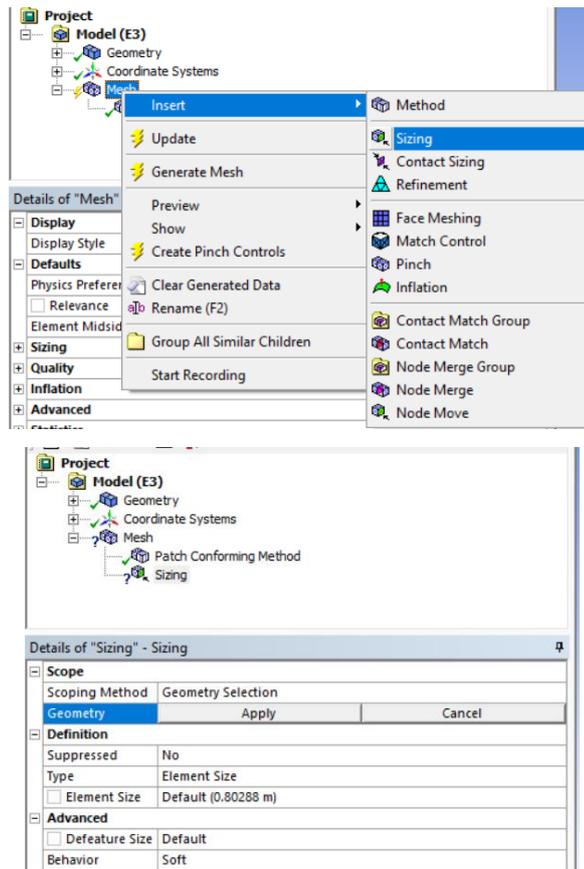
En el menu de detalles, se selecciona el método TETRAEDROS



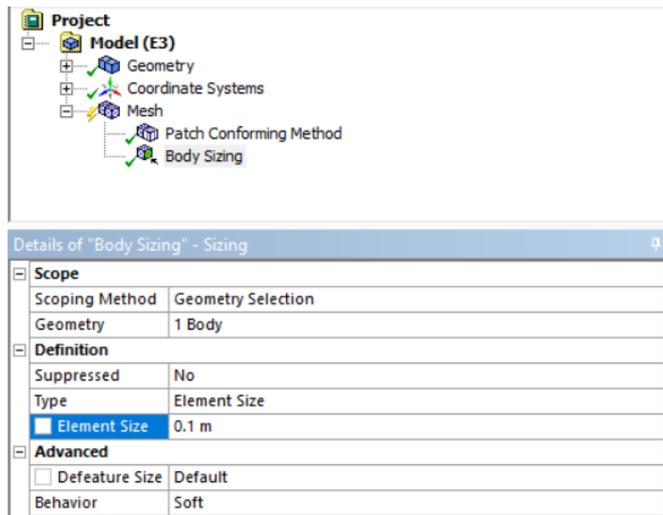
Aparece marcado el cuerpo con el método ya seleccionado:



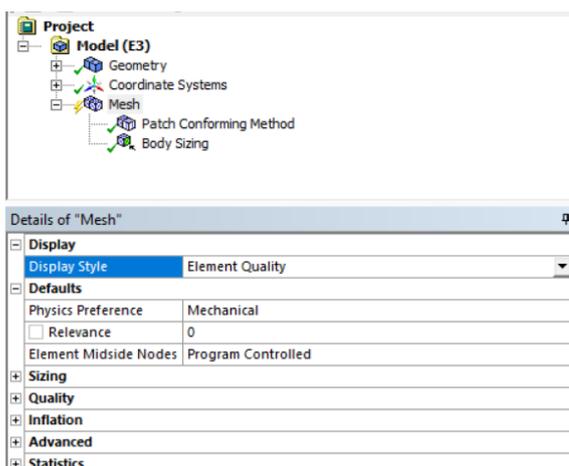
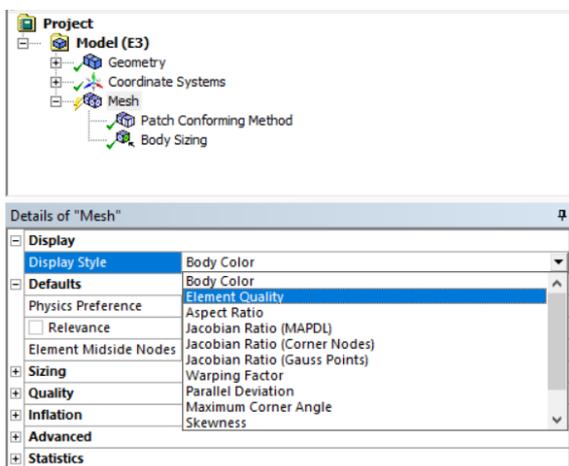
- c. Configuración de las dimensiones de malla. Pulsando con el botón derecho sobre MALLA, se selecciona la opción DIMENSIONAMIENTO y se aplica al cuerpo:



En la opción TAMAÑO DEL ELEMENTO, se ingresa el valor deseado.



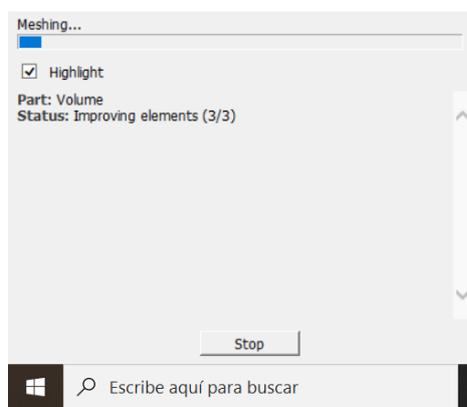
- d. Configuración de la visualización de la malla. En el menú de detalles, en la opción ESTILO DE VISUALIZACIÓN, se selecciona CALIDAD DEL ELEMENTO:



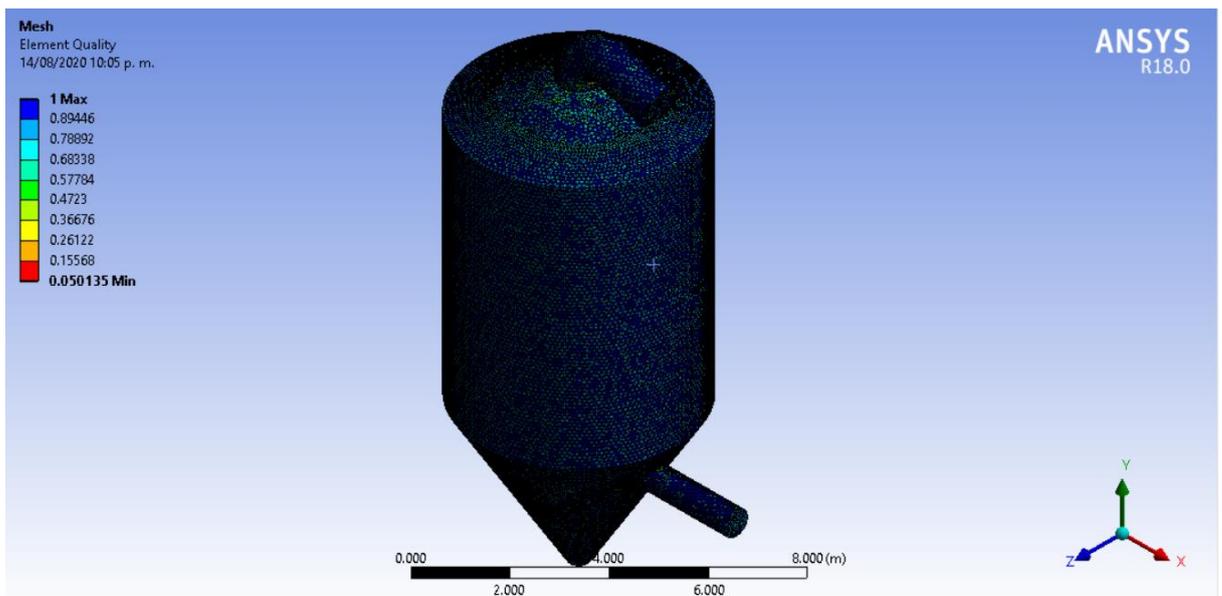
- e. Generación de la malla automática. En la barra de menús, se selecciona la opción de GENERAR MALLA:



Puede observarse que el proceso está en marcha:

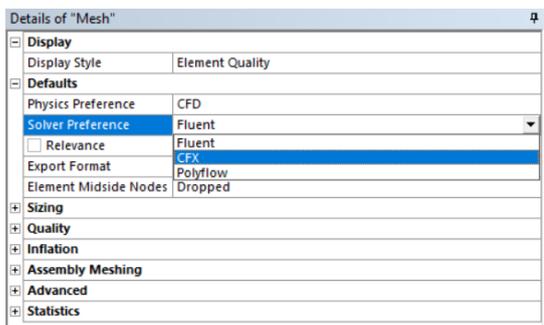
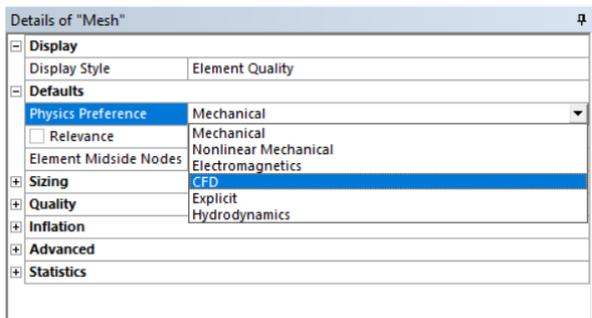


Una vez que está lista la malla, puede observarse con los detalles de calidad:

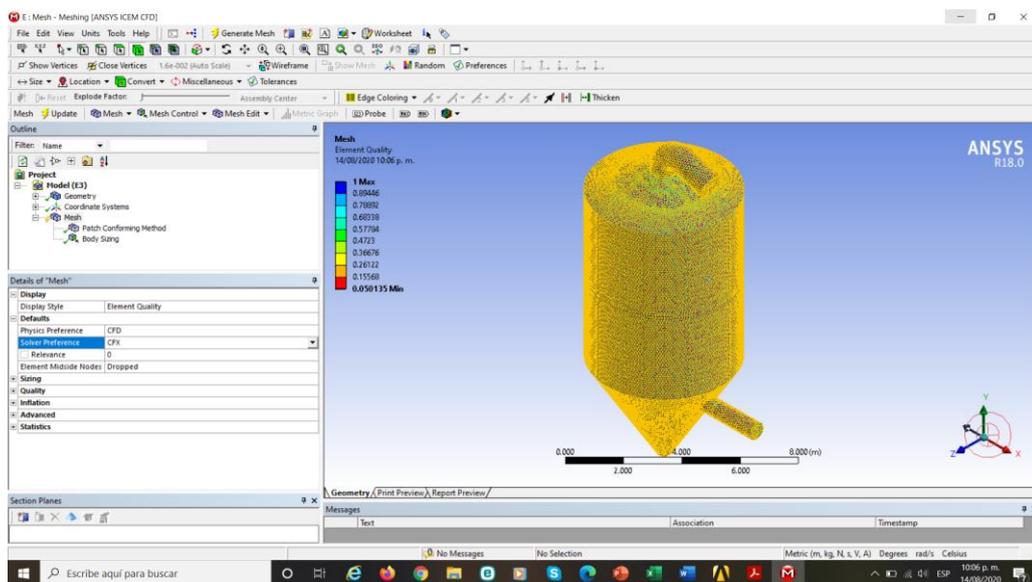


f. Generación de malla para análisis de flujo.

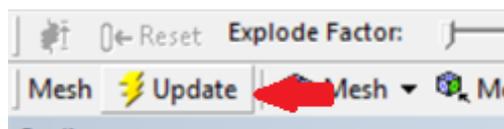
En el menú DETALLES DE MALLA, en la opción POR DEFECTO, se debe escoger el menu PREFERENCIAS FÍSICAS con la opción CFD. Inmediatamente aparece el menu PREFERENCIAS DE RESOLUCIÓN y se selecciona la opción CFX.

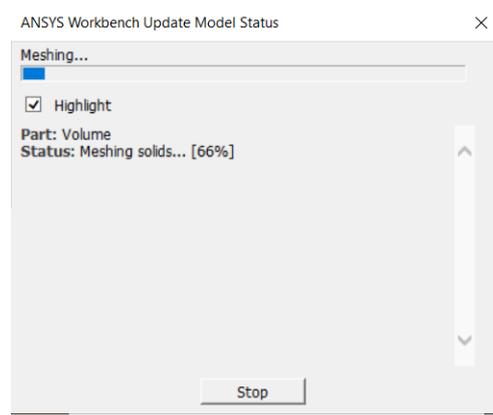


Inmediatamente el mallado se pinta con líneas amarillas, que es señal de que se requactualizer la malla.

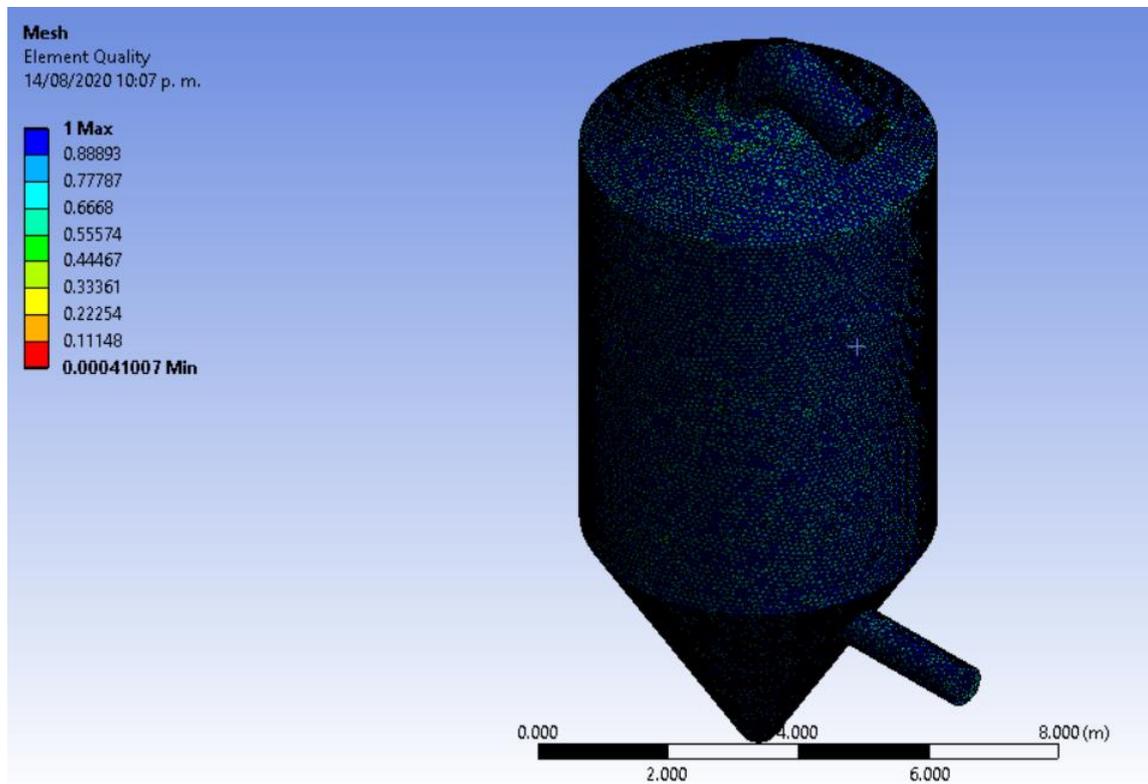


En la barra de tareas se selecciona ACTUALIZAR y se observa que el mallado se está generando nuevamente.



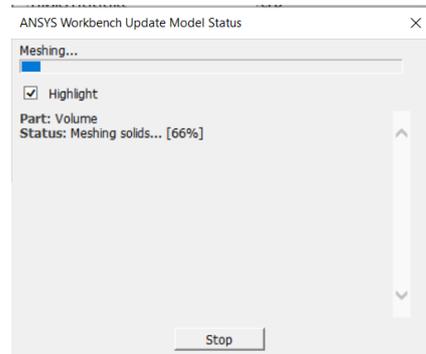
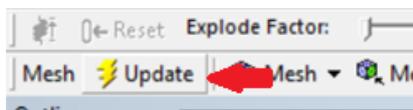
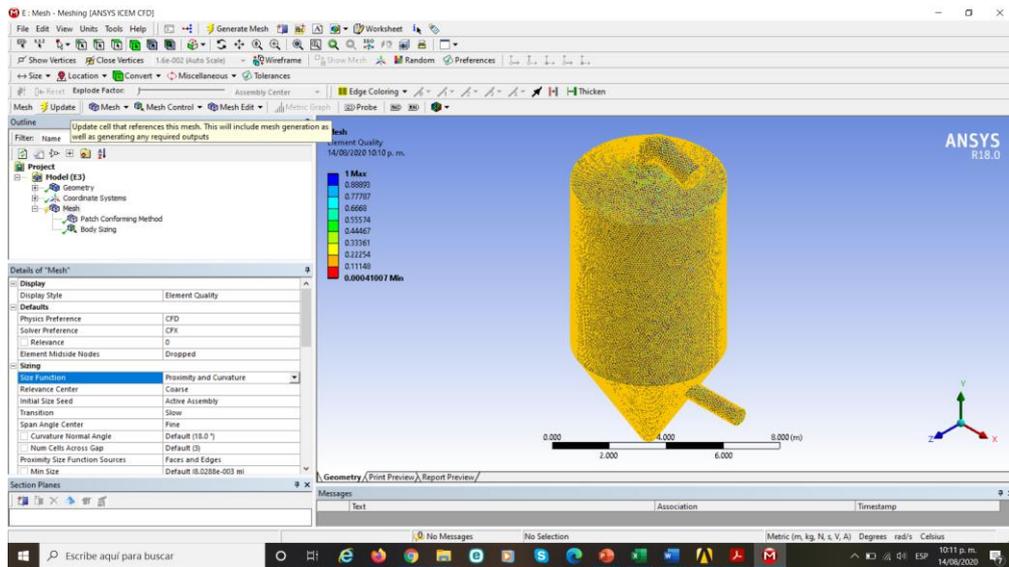


Aparece una actualización del mallado con una calidad mejorada.

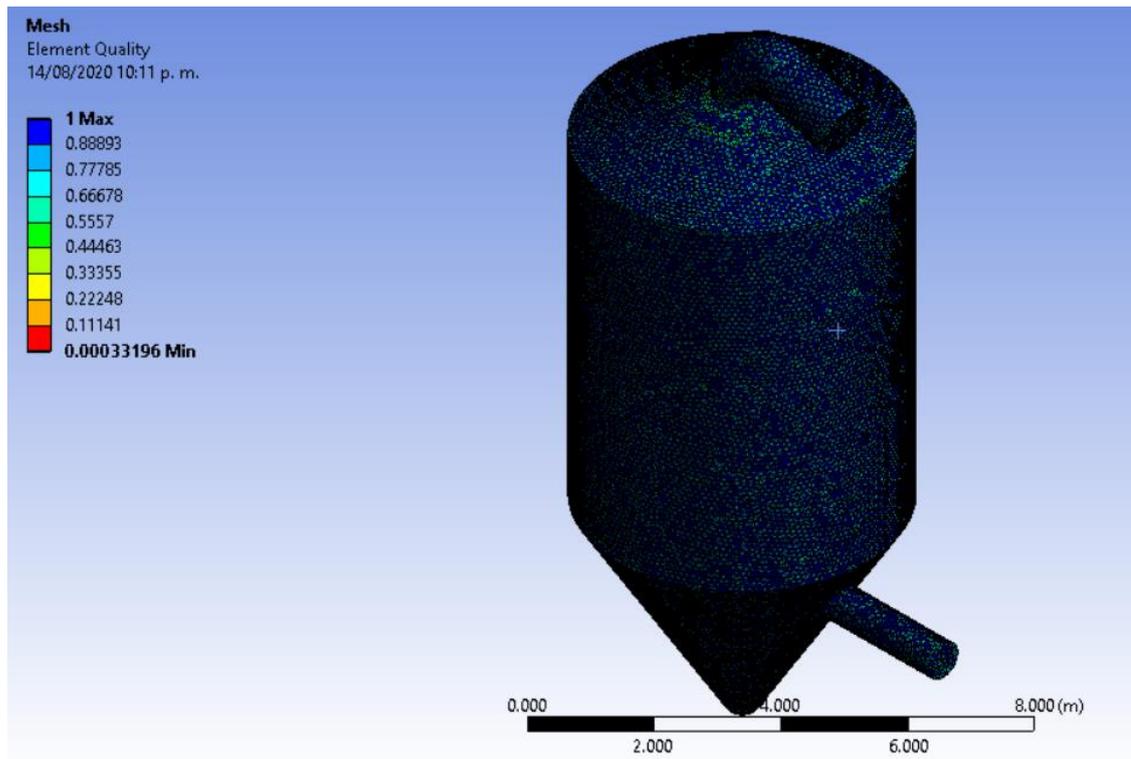


- g. Mejoramiento del mallado a través de los cambios en la configuración. En la opción DIMENSIONAMIENTO DE LA MALLA, en el menu de DETALLES DE MALLA, se selecciona la opción PROXIMIDAD Y CURVATURA y se actualiza nuevamente la generación de la malla:

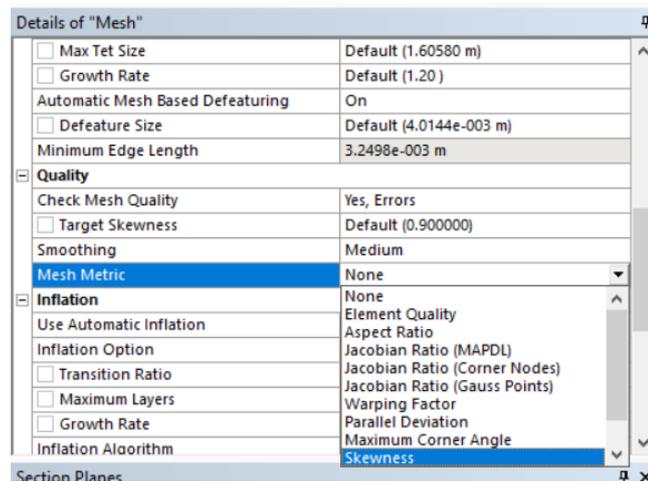
Details of "Mesh"	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Element Midside Nodes	Dropped
Sizing	
Size Function	Proximity and Curvature
Relevance Center	Adaptive
Initial Size Seed	Proximity and Curvature
Transition	Curvature
Span Angle Center	Uniform
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (3)
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (8.0288e-003 m)
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (8.0288e-003 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (0.802880 m)
<input type="checkbox"/> Max Tet Size	Default (1.60580 m)



Se observa un mejoramiento en la calidad del mallado.

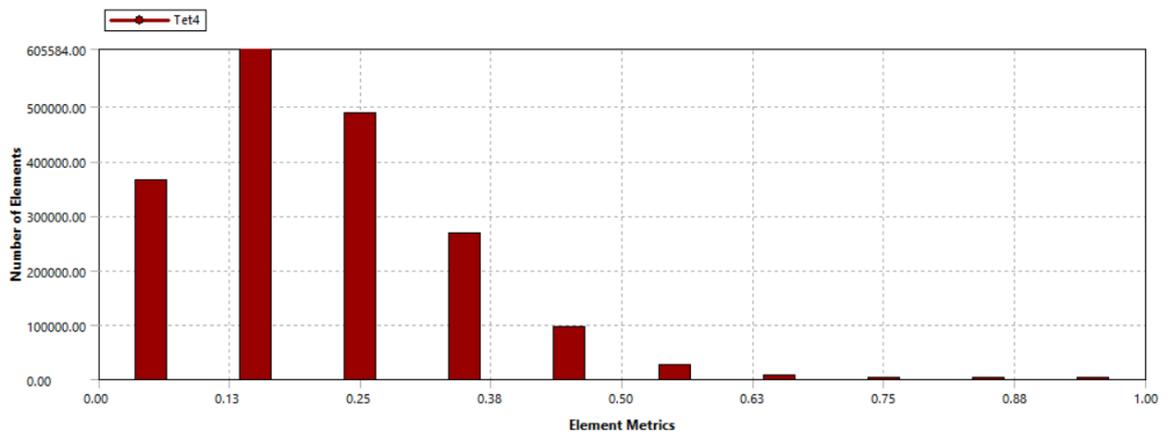


- h. Evaluación de la métrica de la malla por el método de oblicuidad (skewness). Dentro del menú DETALLE DE MALLA, en la opción CALIDAD, se selecciona en el submenú MÉTRICA DE MALLADO, la opción OBLICUIDAD



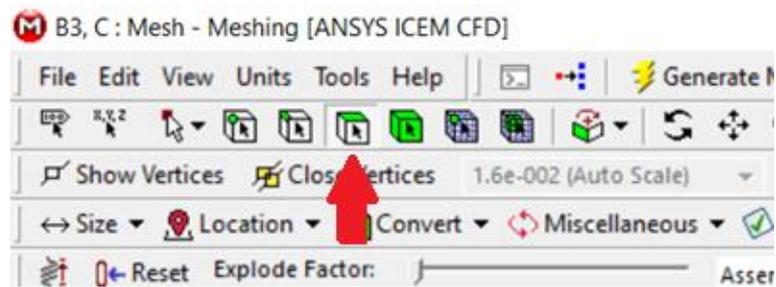
- i. Gráfica de la métrica de la malla.

Controls

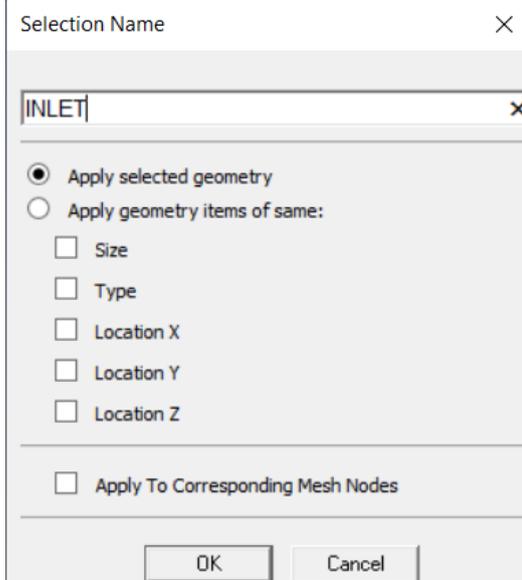
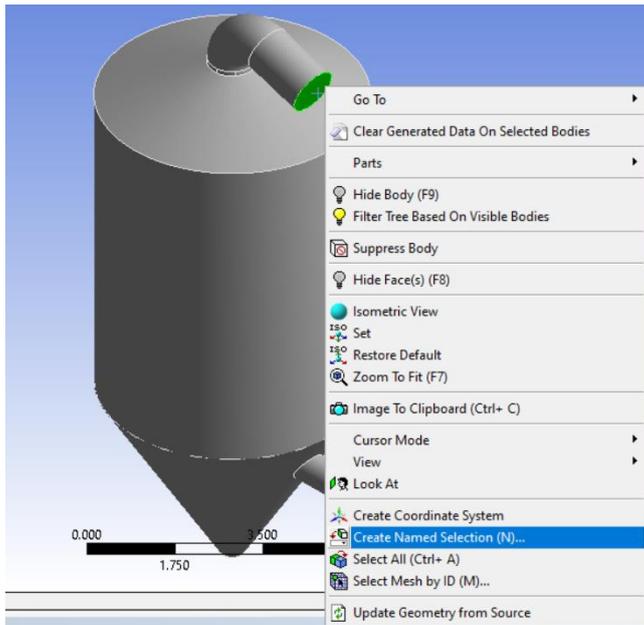


- j. Creación de superficies para usar como fronteras del volumen de control.

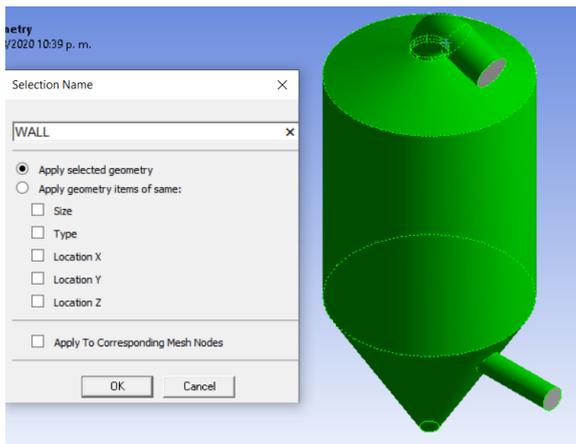
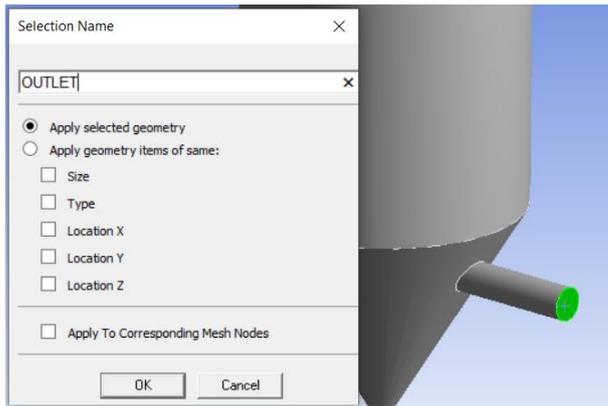
En la barra de menús, en la familia de MODOS DE SELECCIÓN, se escoge el ícono de SELECCIÓN DE SUPERFICIES:



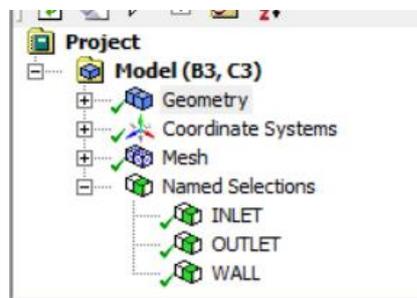
En el cuerpo se selecciona la superficie de ingreso del aire a la cámara de secado; se pulsa el botón derecho del mouse y aparecerá el menú de pantalla, de donde se escoge la opción CREAR SELECCIÓN CON NOMBRE, a cuya superficie se denominará “INLET”:



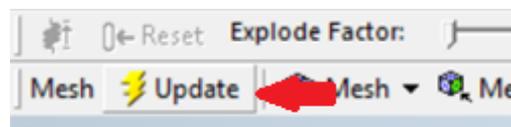
Se procede de manera similar con la superficie de salida del aire, denominándola “OUTLET”, así como con las paredes del cuerpo, a las cuales se denomina “WALL”:



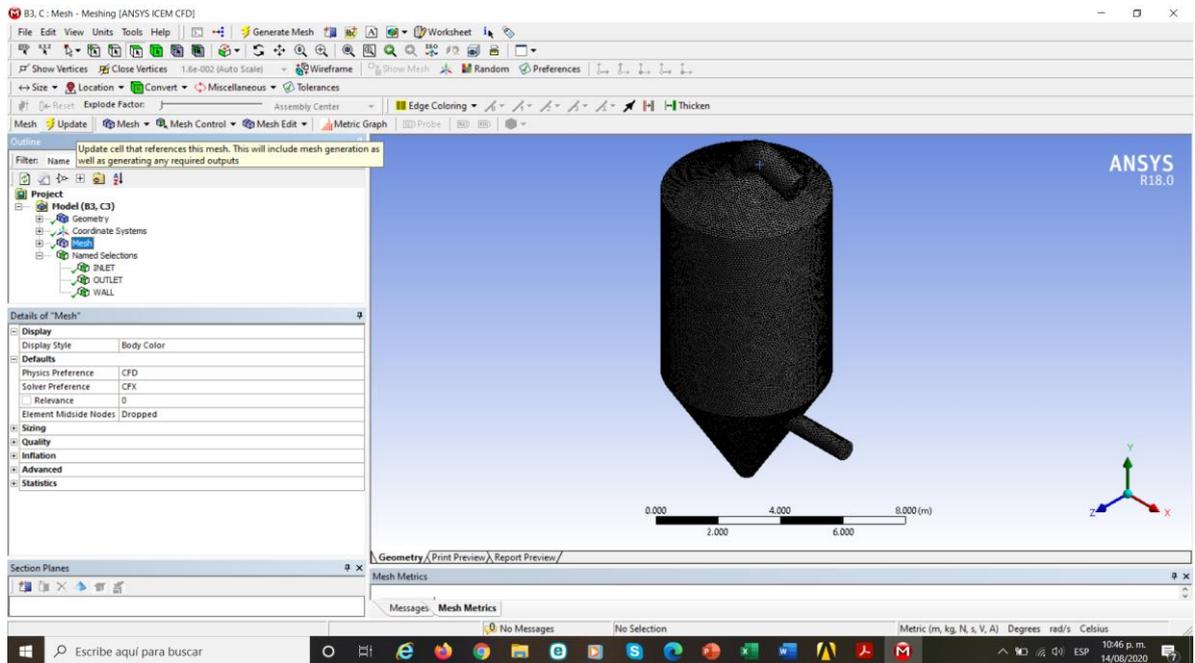
Puede observarse que aparecen en el menu de árbol de proceso las tres superficies:



Para concluir con la configuración del mallado, se actualiza:



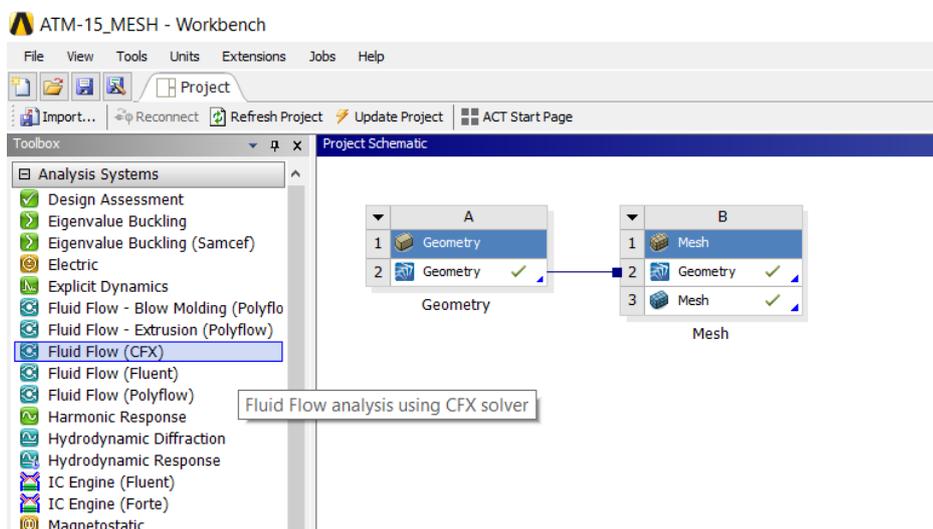
k. Mallado listo para la siguiente etapa.



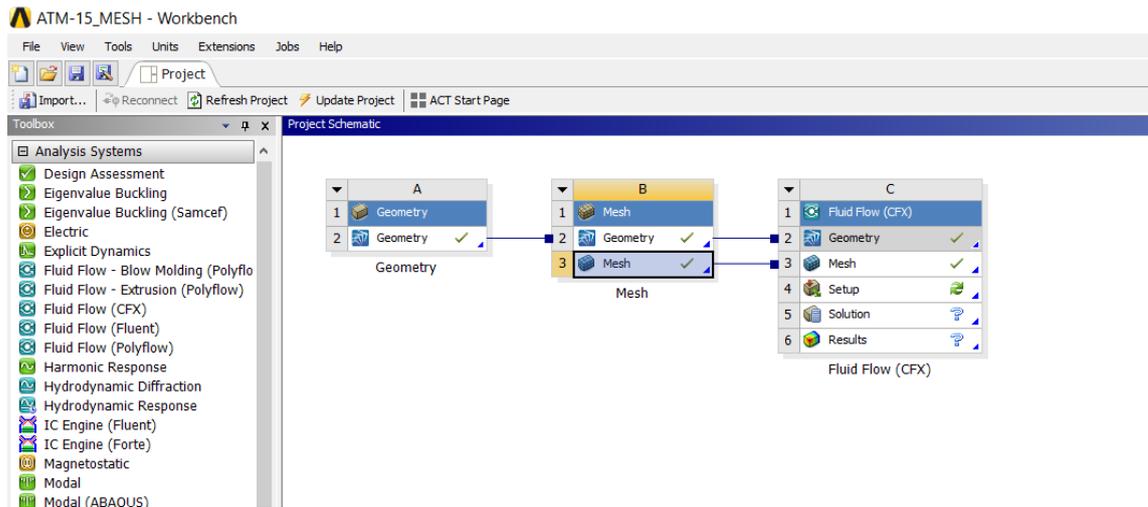
2.2 Configuración de las condiciones de frontera y el fluido a simular.

a. Creación del simulador en CFX.

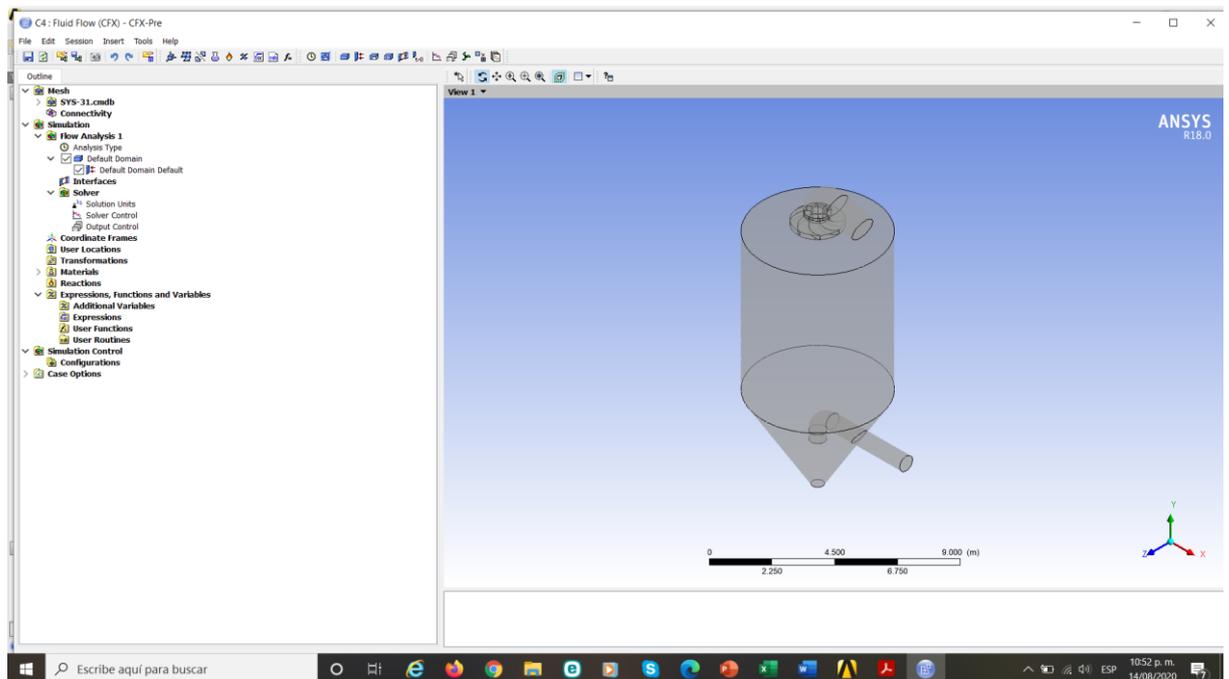
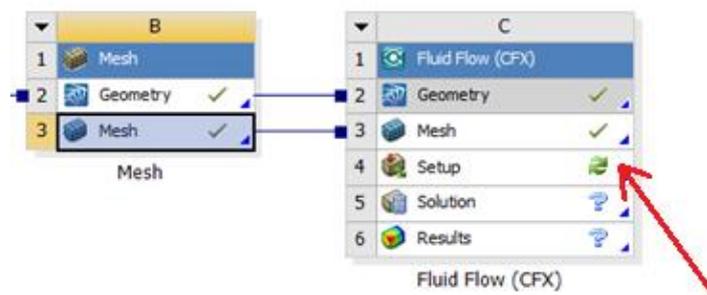
En el menu de HERRAMIENTAS, se selecciona FLUJO DE FLUIDOS (CFX), para generar el entorno de análisis de volúmenes finitos:



Se enlaza con la geometría y el mallado ya definidos:

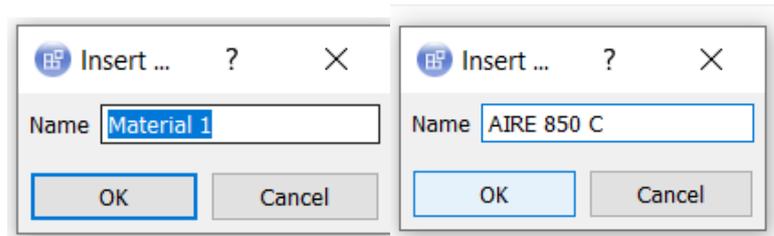
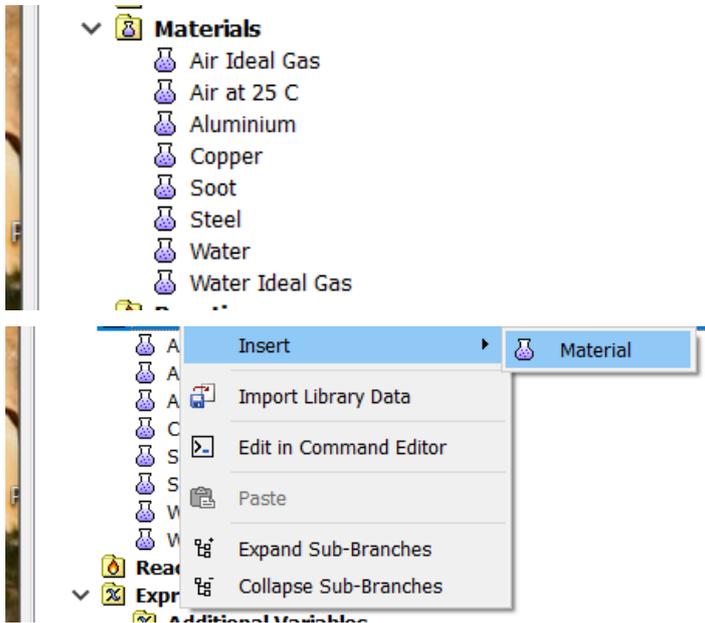


Se efectúa doble clic en CONFIGURACIÓN e inmediatamente aparece la visualización del volumen de control en el entorno de configuración:



b. Configuración del fluido y sus propiedades.

En el menú MATERIALES, se pulsa el botón derecho del mouse y aparecerá el menu de pantalla del cual se escojerá INSERTAR. Aparecerá una ventana en donde se ingresará el nombre del fluido a analizar, que se denominará AIRE 850 C.

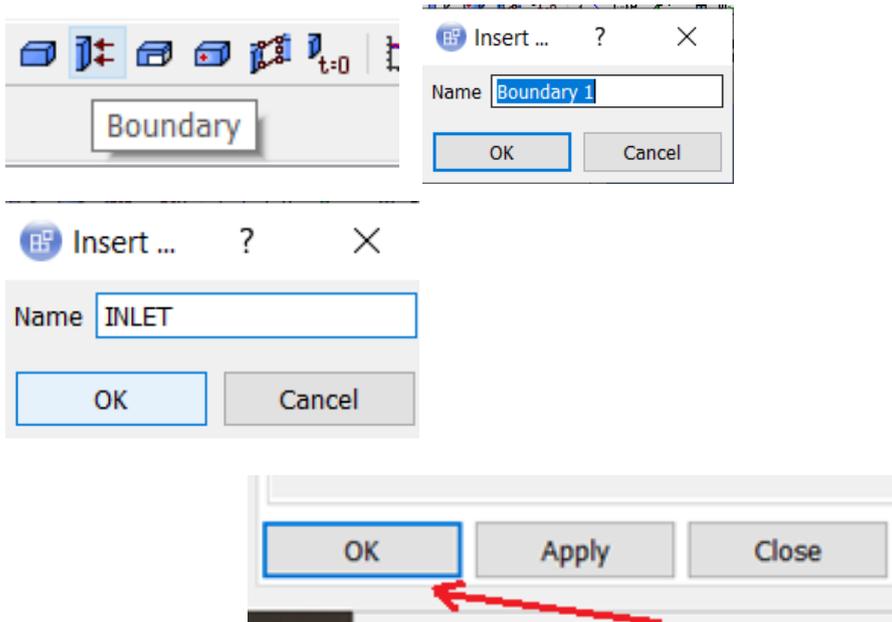


Se pulsar OK y aparecerá la ventana para ingresar las propiedades del fluido. Se pulsa OK y se concluye con la configuración de propiedades.

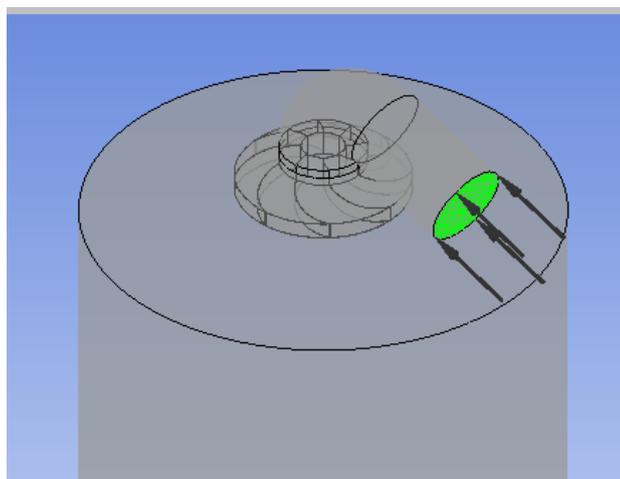
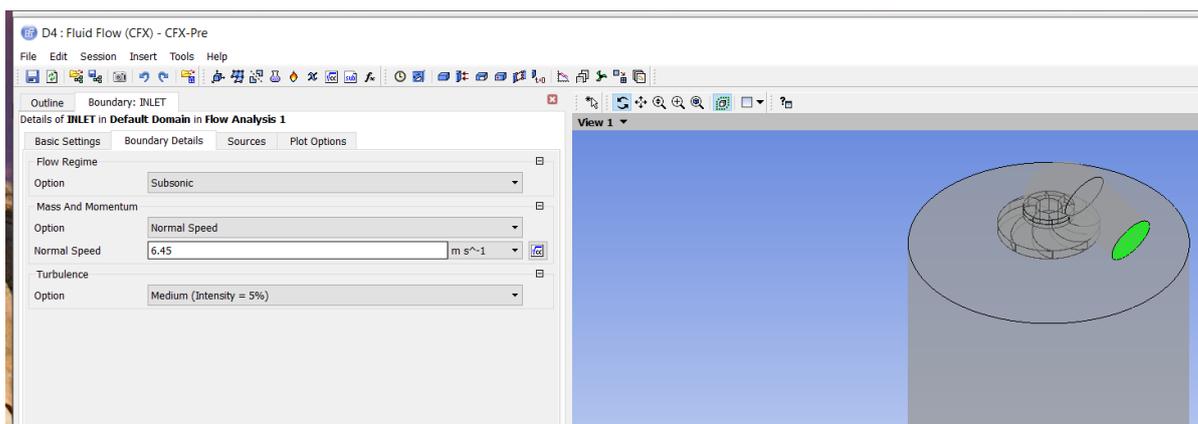


c. Determinación de las condiciones de frontera.

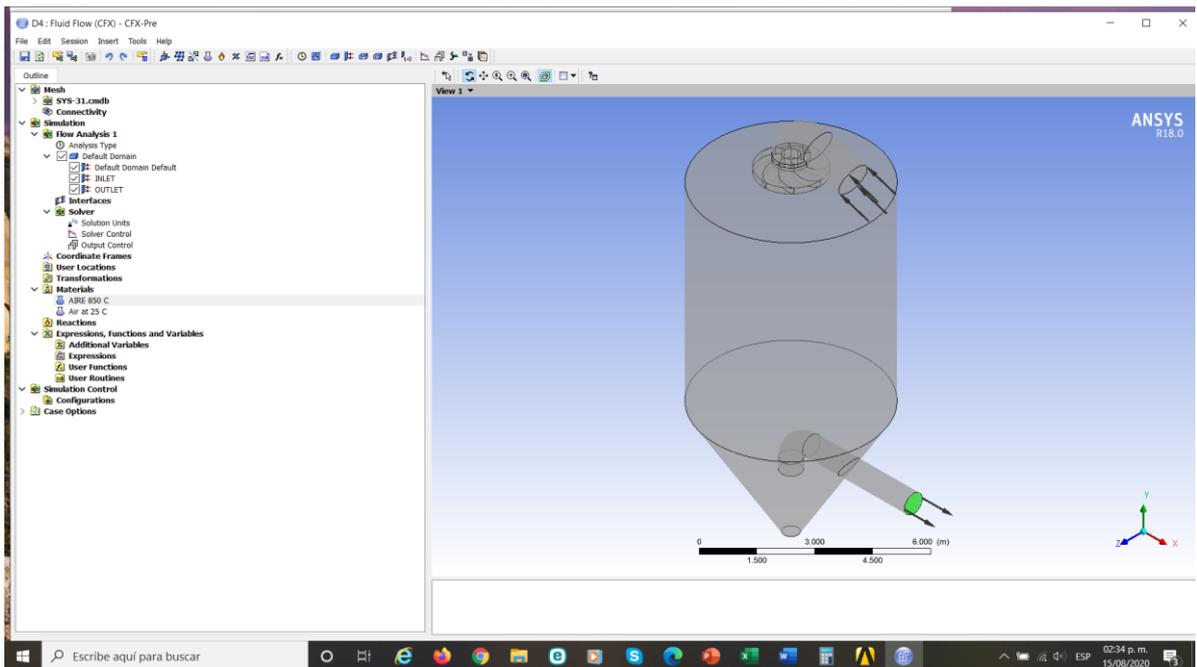
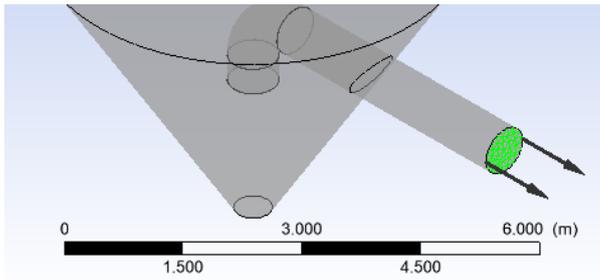
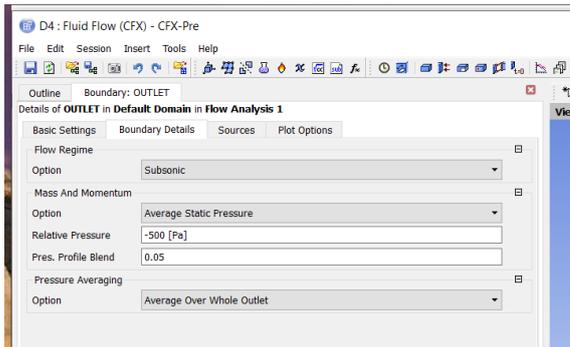
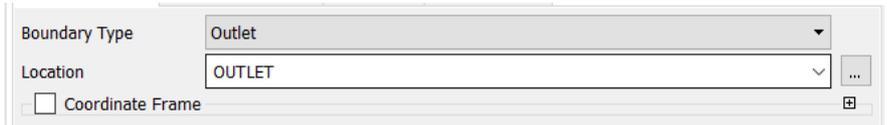
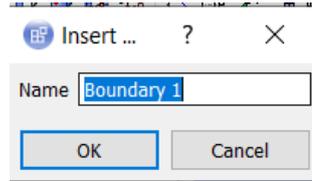
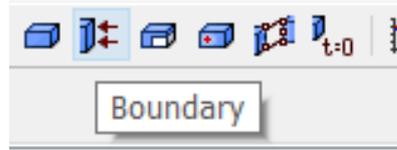
En los íconos de la barra de menús, se selecciona la opción FRONTERA. Inmediatamente aparece la ventana para ingresar el nombre de la superficie que va a configurarse. Se ingresará INLET que es el nombre asignado al ingreso de aire a la cámara de secado.

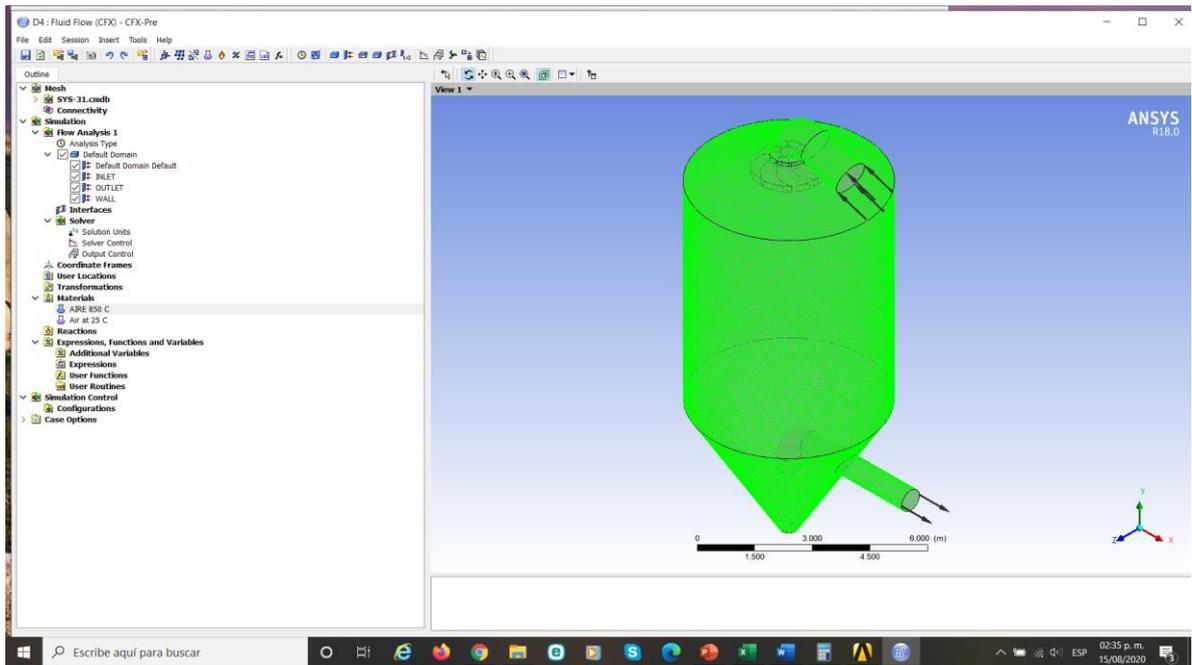
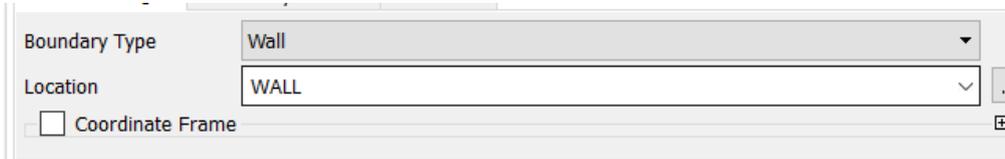
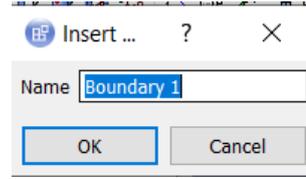
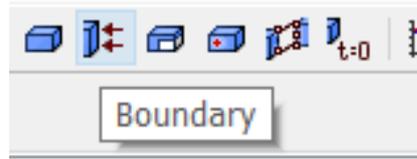


Aparece resaltada la sección de ingreso de aire y es necesario ingresar el tipo de variable y el valor:



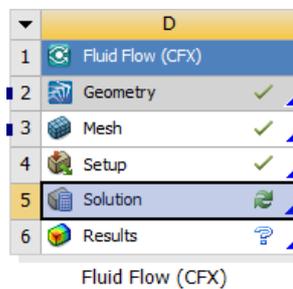
Se repiten las acciones para la superficie de salida del volume de control y para las paredes.

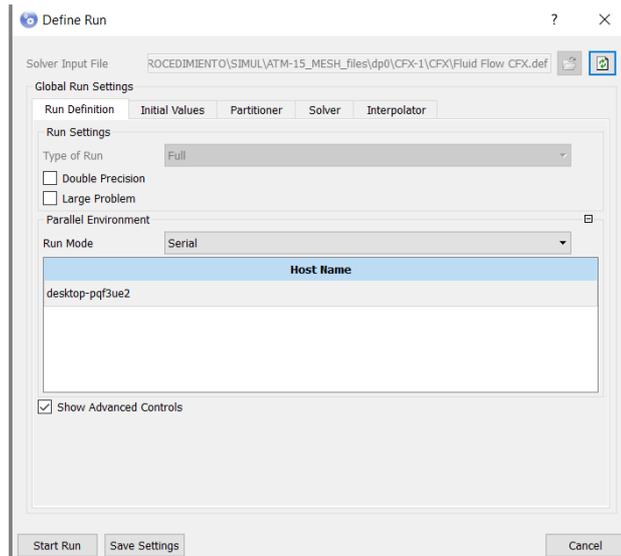




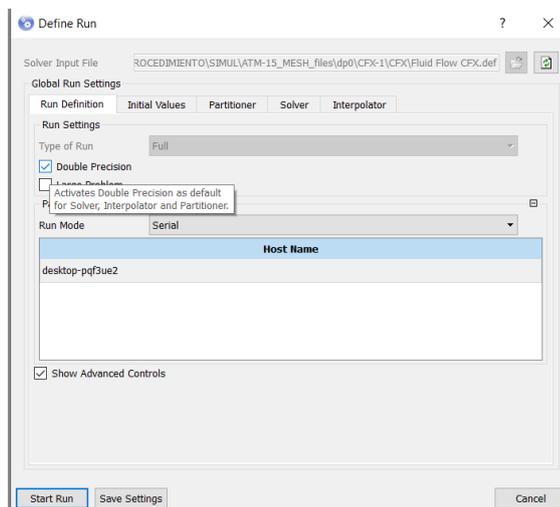
2.3 Corrida del software.

- a. Configuración del tipo de análisis. En la ventana de trabajo, se selecciona en SOLUCIÓN para configurar la precisión del análisis numérico.

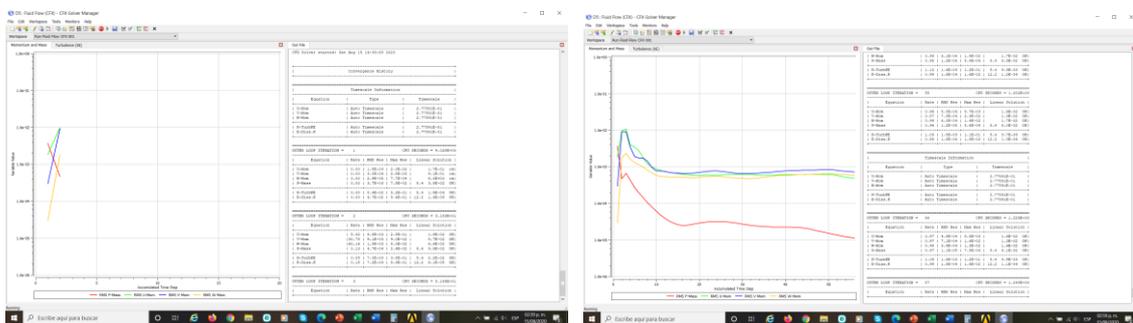


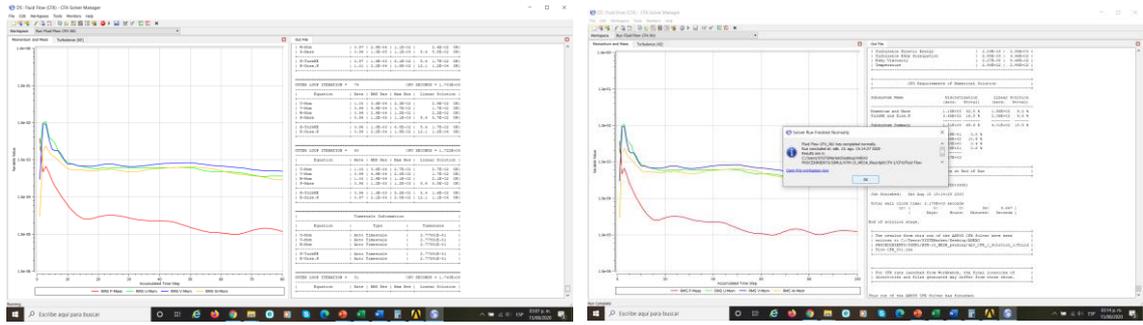


- b. Corrida del programa. Se selecciona la opción de doble precisión y se selecciona el botón de INICIO CORRER

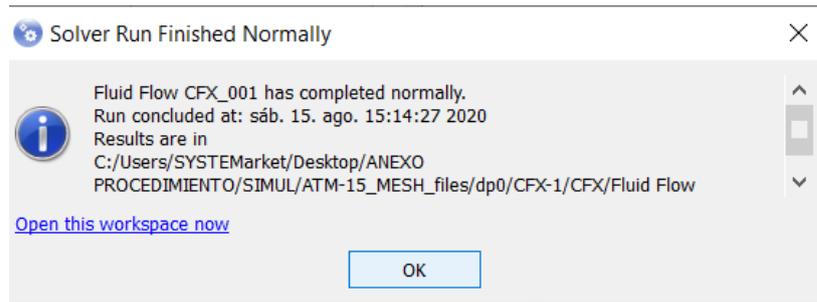


- c. Proceso durante la corrida del programa.

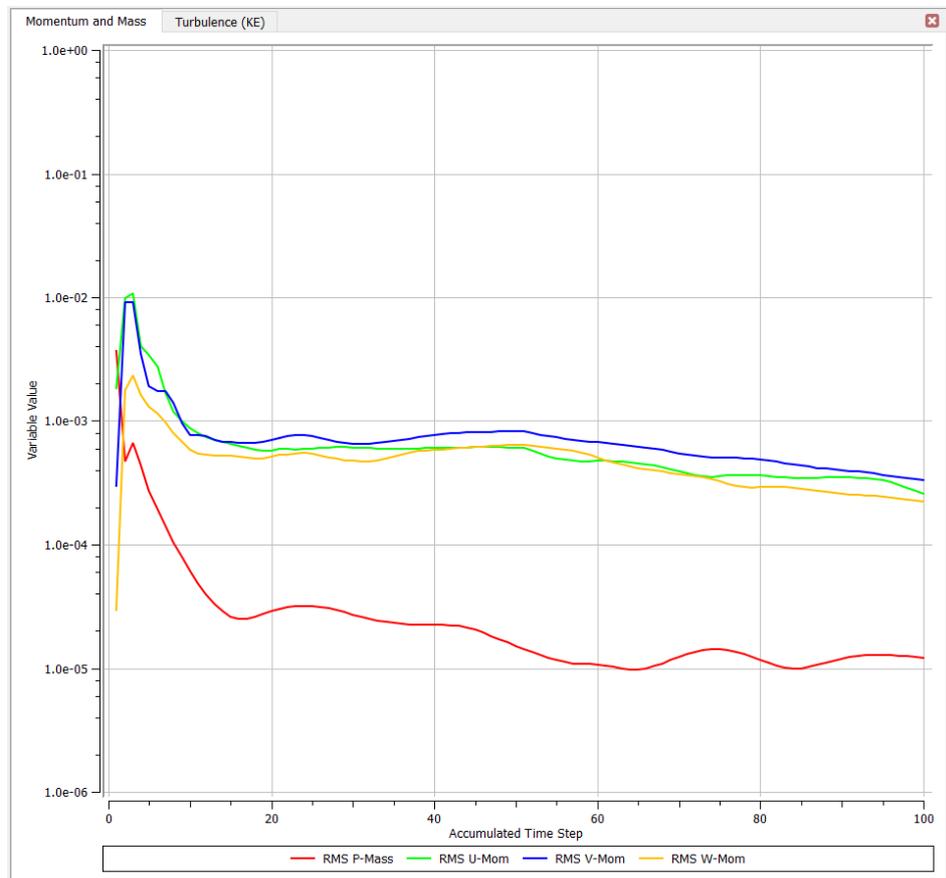




Al finalizar la corrida del programa, aparece el siguiente mensaje:

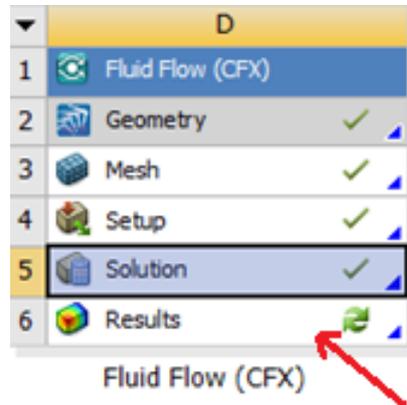


d. Gráfica de convergencia de resultados del análisis. Al concluir la corrida del programa, aparece la siguiente gráfica:

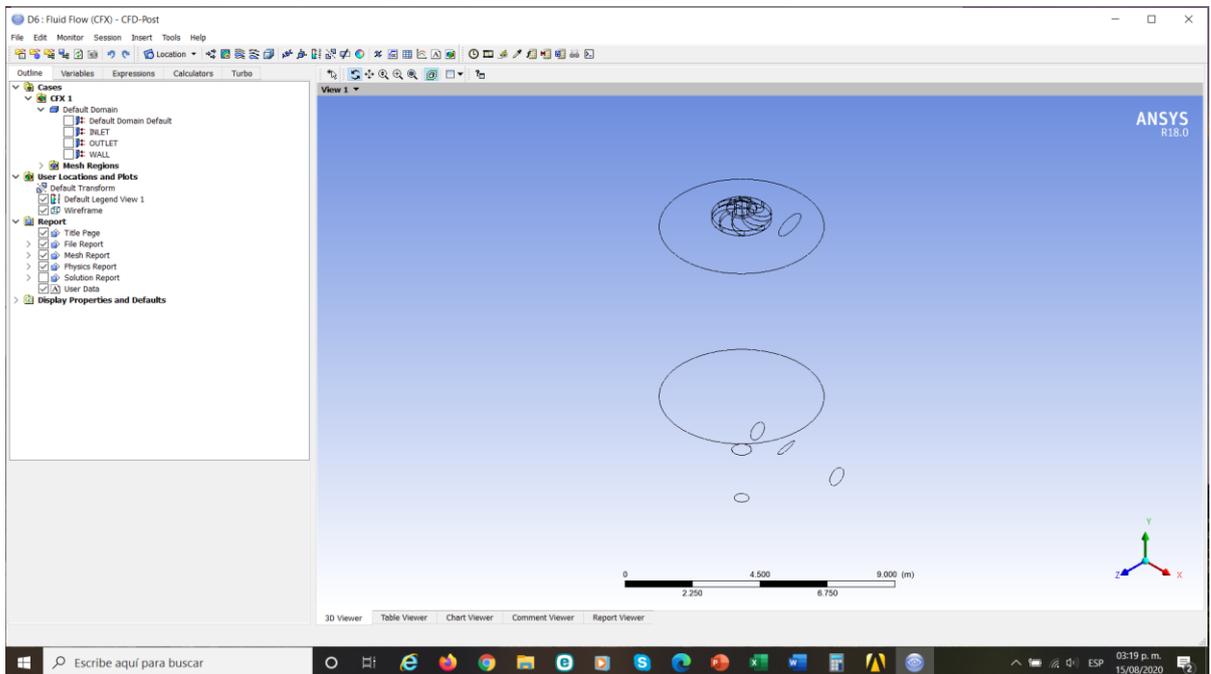


2.4 Postprocesamiento

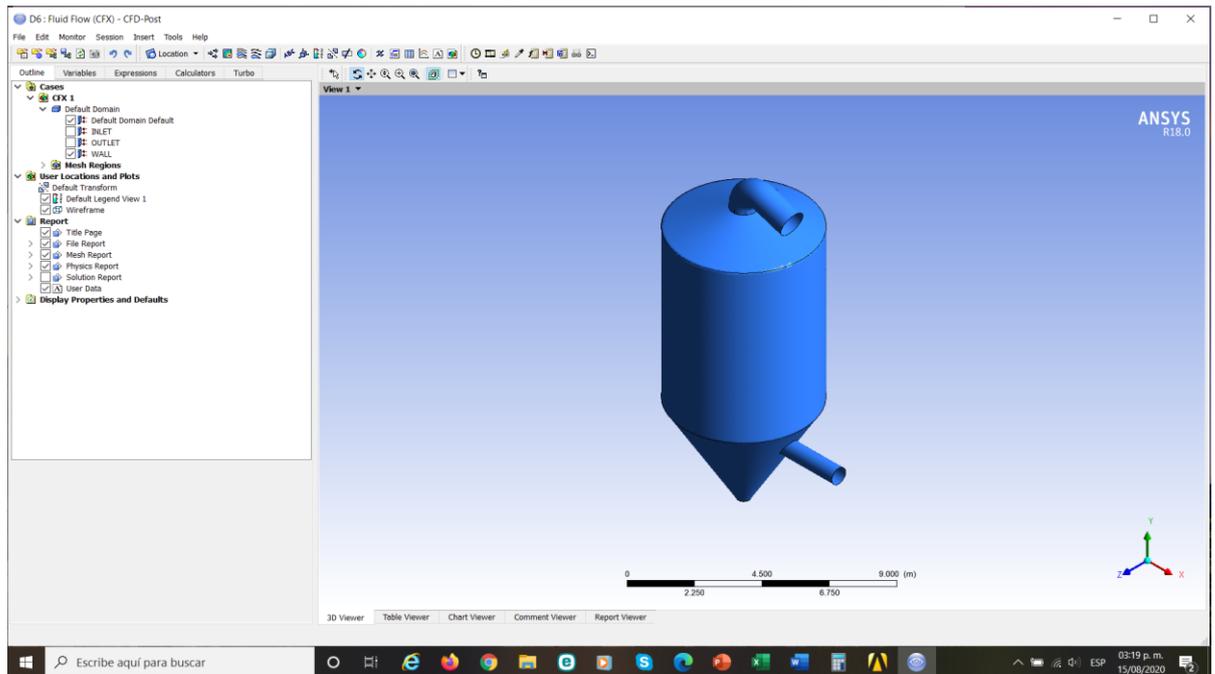
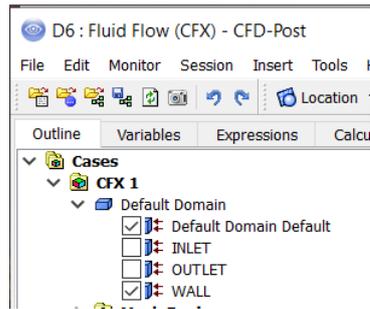
- a. Selección de la opción previa a la verificación de la finalización de la corrida.



- b. Pantallas de previsualización.

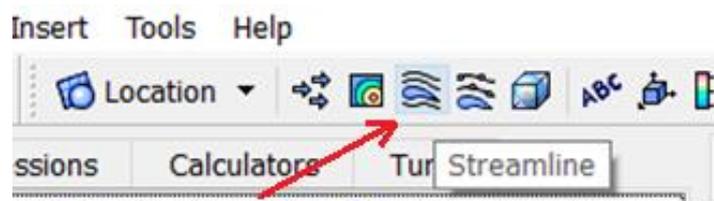


Para visualizar las superficies del volume de control, se puede activar en el menu de árbol de proceso:

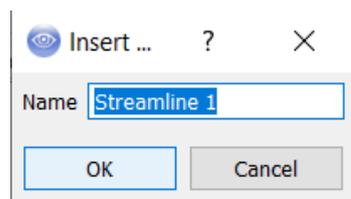


c. Configuración de las líneas de corriente para simulación del flujo de aire.

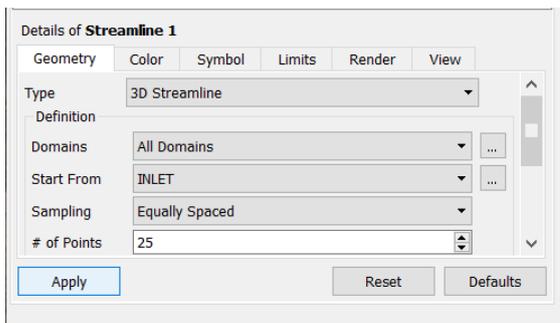
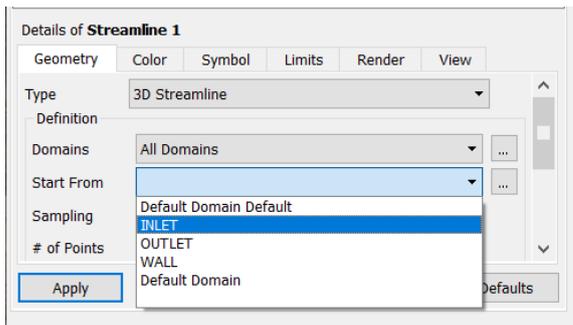
En el menú de la barra de tareas, se selecciona el botón de LÍNEA DE CORRIENTE:



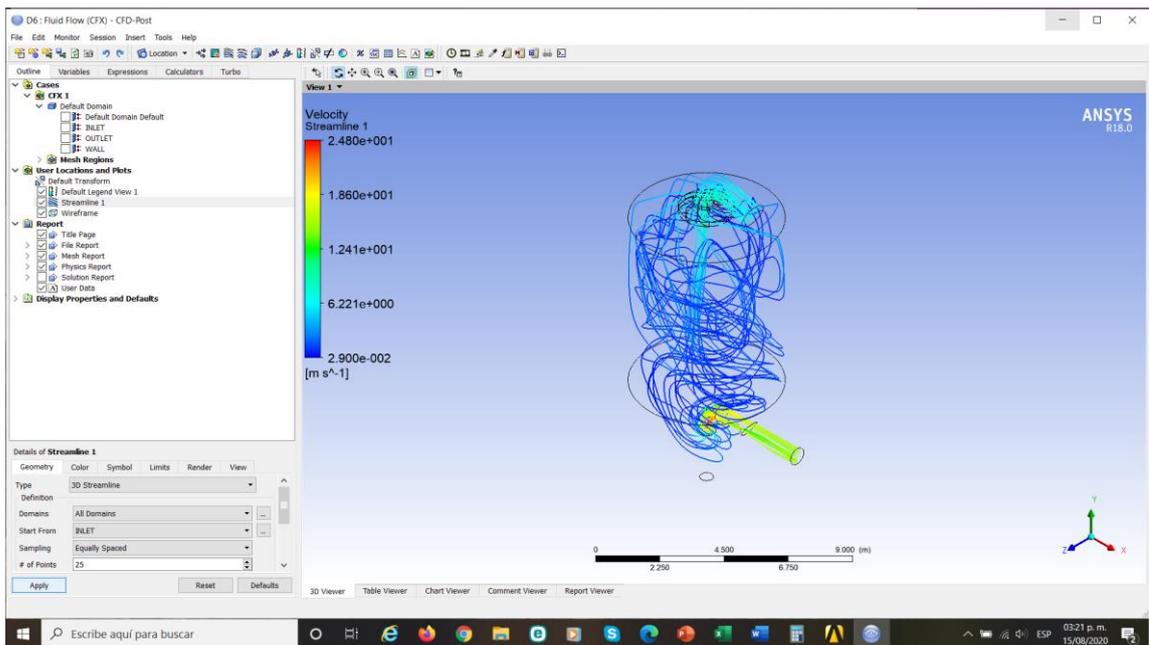
Si se desea se puede dar nombre a las líneas de corriente



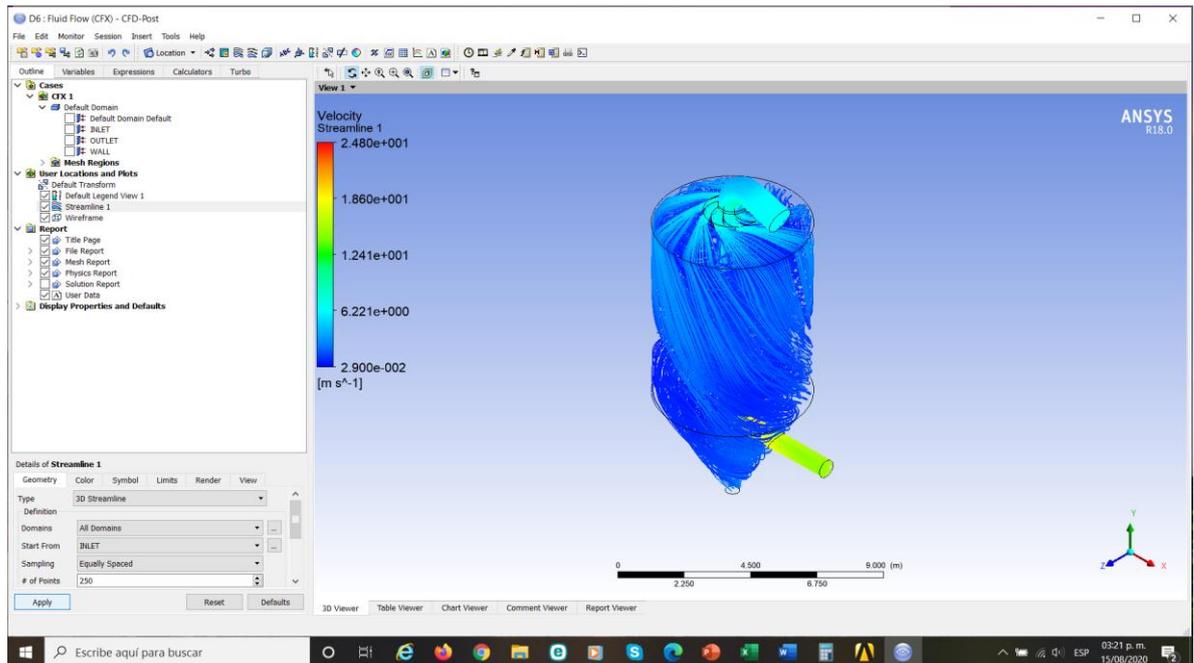
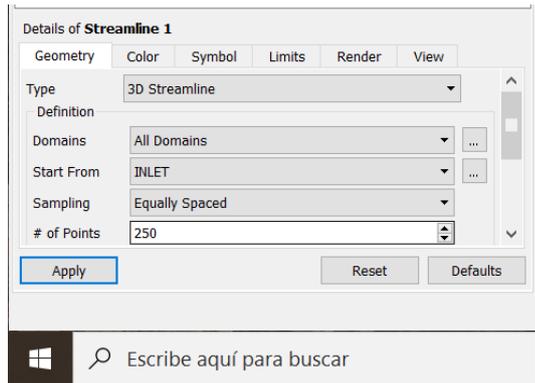
Se escoge el inicio del flujo para la representación y se pulsa el botón APLICAR.



Aparecerá la pantalla con la simulación del flujo:



- d. Mejoramiento de la resolución de la simulación del flujo de aire. Seleccionando en el menu de árbol, el nombre de las líneas de flujo, que en este caso se ha dejado como STREAMLINE 1, se accede al número de líneas para la simulación. Para mejorar la visualización el número seleccionado es 250. Se pulsa en APLICAR y puede visualizarse de mayor manera la corriente de aire en la cámara de secado.



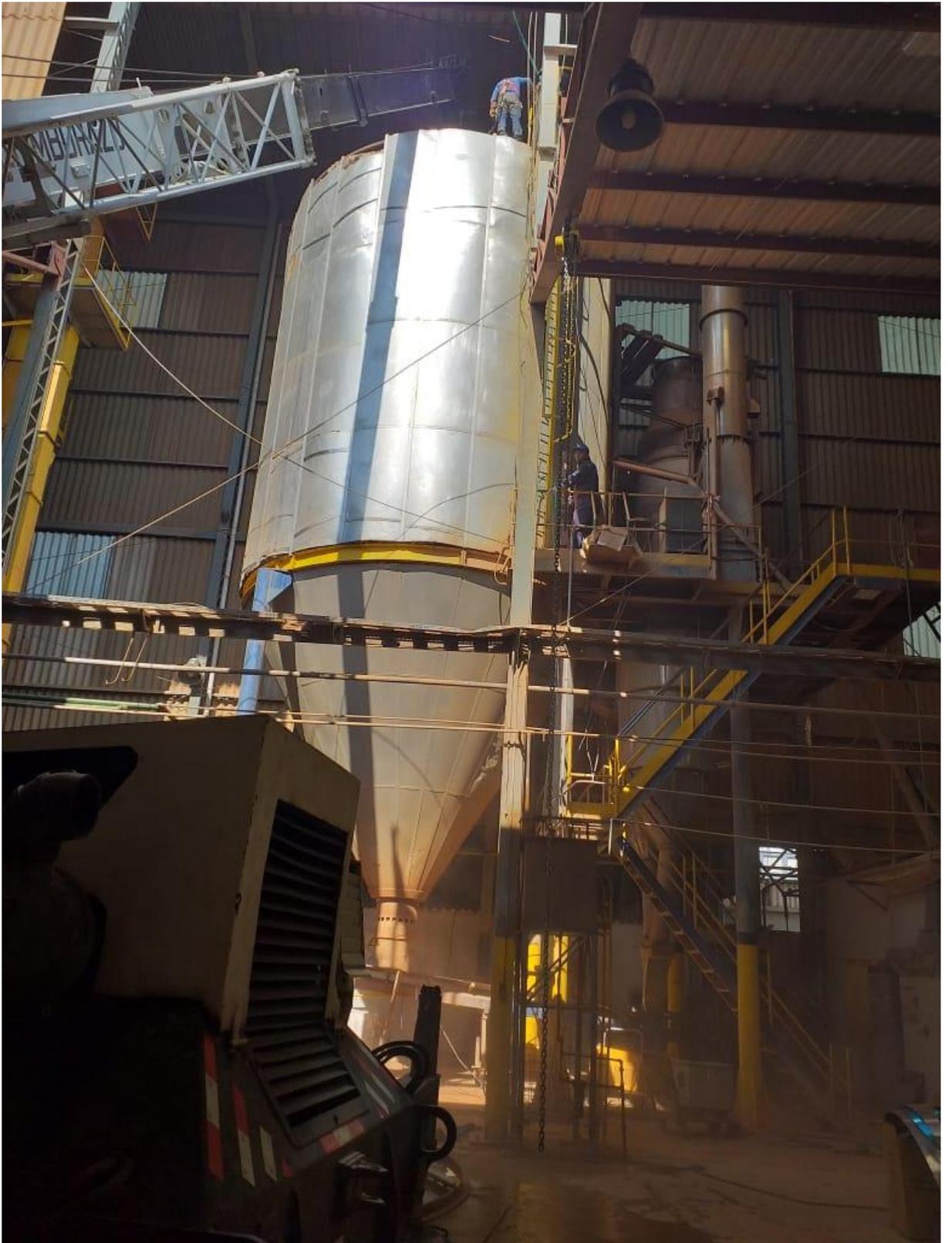
ANEXO B. FOTOS DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL DIFUSOR













ANEXO C. PLANOS DEL DIFUSOR