

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

Optimización termo-fluodinámica de una cavidad de secado de cacao por convección forzada con aire caliente, mediante CFD

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Daniel Fernando Carrillo Márquez  
Italo Mayuber Mendoza Velez

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**Año: 2022**

## **DEDICATORIA**

A mi madre, quien me acompañó durante la mayor parte de mi carrera con su apoyo incondicional y consejos, y quien celebraría como nadie mi titulación. A mi padre, que ha sido un soporte emocional a lo largo de mis años. A mis mentores académicos y jefes profesionales, quienes orientaron mi pasión por la carrera, y finalmente a mis amigos y colegas, con quienes construí un sinfín de recuerdos agradables.

**Daniel Carrillo Márquez**

A mi madre, Jenny Velez Molina, quien me apoyo desde el inicio a seguir mis sueños y por qué siempre deposito su confianza en mí y ser la persona que más quiero en la vida. Mis hermanas Katherine, Iveth y Brishit por siempre apoyarme y darme todo su apoyo y amor incondicional el cual fueron mi motivación durante todo este proceso universitario. A ESPOL por abrirme sus puertas y poder haberme brindado la oportunidad de conocer personas increíbles tanto de, FIMCP y de otras facultades.

**Italo Mendoza Velez.**

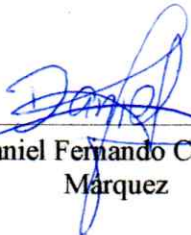
## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a nuestros tutores, PhD. Eduardo Castillo y al MSc. Oguier Garavito, y a nuestro docente de materia integradora, el PhD. Francis Loayza, por su constante supervisión y guía en el desarrollo de este proyecto. También, agradecemos el Sr. Edgar Mendoza, quien desinteresadamente compartió con nosotros su conocimiento de 40 años en el procesamiento de cacao, y nos obsequió mazorcas maduras para su degustación. Nos gustaría agradecer también al Ing. Daniel Contreras, quien compartió con nosotros su criterio técnico para mejorar nuestro proceso de secado. Finalmente, agradecemos a los diversos investigadores consultados, cuyos métodos y resultados fueron indispensables para nuestro diseño final.

**Daniel Carrillo Márquez e Italo  
Mendoza Velez**


## DECLARACIÓN EXPRESA.

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Daniel Fernando Carrillo Márquez* y *Italo Mayuber Mendoza Velez* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



---

Daniel Fernando Carrillo  
Márquez



---

Italo Mayuber Mendoza  
Velez

# EVALUADORES

.....  
**PhD. Francis Loayza Paredes**  
PROFESOR DE LA MATERIA

.....  
**PhD. Eduardo Castillo Orozco**  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

El cacao se constituye como el 5to producto de exportación no petrolera del Ecuador. El objetivo de este proyecto es la optimización termo-fluidodinámica de un secador de cacao por convección forzada mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para mejorar la calidad del grano de cacao, al entregar un producto con una humedad acorde con las normativas vigentes.

La optimización del diseño del secador considera una humedad inicial del producto de 50% y una humedad al final del secado de 7%, de acuerdo con la normativa NTE INEN 176. Se propusieron 3 alternativas de solución, y se simularon procesos isotérmicos a temperaturas de 55, 50, 45 y 40°C. Adicionalmente, se evaluó el efecto de la utilización de 2 ventiladores, y la variación de separación entre bandejas de 10, 9 y 8 cm. La mejor alternativa se seleccionó en base al coeficiente de variación del coeficiente de transferencia de calor convectivo sobre la superficie en las bandejas.

Los resultados de simulaciones sugieren que la alternativa con ventiladores superiores produce la menor variación con un 26.60%, y que una distancia de separación de 9 cm entre bandejas tiene la menor variación con 66.82% al ser comparados con los otros casos. Finalmente, se observa que la implementación de dos ventiladores en lugar de uno beneficia los resultados en un 10.89%.

Se concluye que el fenómeno de transferencia de calor del proyecto está gobernado por el coeficiente convectivo. Se recomienda futuras investigaciones considerando la transferencia de masa entre el grano de cacao húmedo y el aire, ya que únicamente transferencia de calor es considerada en este proyecto debido a limitación de recursos computacionales. Adicionalmente, se observa en los campos de velocidad que gran parte del aire caliente aún puede ser aprovechado, por lo cual se sugiere que la eficiencia del equipo aún puede ser mejorada.

Palabras clave: CFD, convección forzada, secador de cacao, coeficiente de transferencia de calor.

## **ABSTRACT**

*Cocoa is the Ecuador's 5th largest non-oil export product. The objective of this project was the thermo-fluid dynamic optimization of a forced convection cocoa dryer using Computational Fluid Dynamics (CFD) to improve the quality of the cocoa bean, by delivering a product with a moisture content in accordance with current regulations.*

*The design optimization considers an initial humidity of the product of 50% and a humidity at the end of the process of 7% in accordance with the NTE INEN 176 standard. Three alternative solutions were proposed, and isothermal processes were simulated at temperatures of 55, 50, 45 and 40°C. Also, the effect of using 2 fans and the variation of separation between trays of 10, 9 and 8 cm was evaluated. The best alternative was selected based on the coefficient of variation of the surface convective heat transfer coefficient on the trays.*

*The simulation results suggest that the alternative with top fans produces the lowest variation with 26.60%, and that a separation distance of 9 cm between trays has the lowest variation with 66.82% when compared to the other cases. Finally, it is observed that the implementation of two fans instead of one improves the benefits by 10.89%.*

*It is concluded that the heat transfer phenomenon of this project is governed by the convective coefficient, Future research is recommended considering the mass transfer between the wet cocoa bean and the air since only heat transfer is considered in this project due to limited computational resources. Additionally, it is observed in the velocity fields that most of the hot air can still be used, which suggest that the efficiency of the equipment can still be improved.*

*Keywords: CFD, forced convection, cocoa dryer, heat transfer coefficient.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
SIMBOLOGÍA.....	VI
ABREVIATURAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XII
CAPÍTULO 1.....	13
1. Introducción .....	13
1.1 Definición del Problema.....	13
1.2 Justificación del proyecto .....	14
1.3 Objetivos .....	15
1.3.1 Objetivo General.....	15
1.3.2 Objetivos Específicos.....	15
1.4 Marco teórico.....	16
1.4.1 Producción y exportación del cacao. ....	16
1.4.2 El cacao y sus características.....	16
1.4.3 Procesamiento del cacao.....	18
1.4.4 Requerimientos del secado .....	19
1.4.5 Definiciones de contenido de humedad.....	20
1.4.6 Métodos de secado.....	21
1.4.7 Temperatura de secado recomendada .....	21



1.4.8	Mecanismo de transferencia de calor .....	22
1.4.9	Placa limite y térmica .....	23
1.4.10	Modelos matemáticos para la simulación .....	25
CAPÍTULO 2.....		26
2.	Metodología .....	26
2.1	Mecanismo de secado.....	26
2.2	Geometría de bandejas .....	26
2.3	Geometría de la cavidad de secado .....	27
2.4	Alternativas de solución.....	27
2.4.1	Alternativa 1 .....	27
2.4.2	Alternativa 2 .....	28
2.4.3	Alternativa 3 .....	29
2.5	Justificación del diseño geométrico de las bandejas .....	30
2.6	Justificación del estudio bidimensional del fenómeno físico .....	31
2.7	Matriz de decisión.....	33
2.8	Parámetros iniciales para el diseño.....	33
2.9	Condiciones geográficas de secado.....	34
2.10	Curva de velocidad de grano de cacao .....	34
2.11	Metodología de diseño y simulación.....	35
2.11.1	Metodología para calcular las velocidades de flujo de aire.....	36
2.11.2	Metodología para la simulación .....	36
2.12	Memoria de Cálculo.....	38
2.12.1	Caracterización del grano de cacao.....	38
2.12.2	Cálculo del área de las bandejas .....	38
2.12.3	Cálculos de ganancia de calor en la cámara, transferencia de masa y calor.	39
2.12.4	Cálculos para el dimensionamiento de los ventiladores .....	42

2.12.5	Cálculo del coeficiente Convectivo de transferencia de calor para placa plana.	44
2.12.6	Cálculo de la razón de transferencia de calor .....	46
2.13	Proceso de simulación en Ansys Fluent.....	46
2.13.1	Modelos físicos ecuaciones de conservación involucradas .....	46
2.13.2	Flujo de procesos para la simulación.....	47
CAPÍTULO 3.....		50
3.	Resultados.....	50
3.1	Resultados de cálculos.....	50
3.2	Desarrollo de la metodología de simulación mediante Ansys Fluent. ....	53
3.3	Resultados de la temperatura y coeficiente convectivo, para las alternativas 1, 2 y 3 .....	66
3.4	Resultados de la temperatura y coeficiente convectivo, para alternativa 1, variando cantidad de entradas de aire y distancia entre bandejas.....	68
3.5	Análisis de costos.....	71
CAPÍTULO 4.....		74
4.	Análisis de Resultados, Conclusiones y Recomendaciones.....	74
4.1	Análisis de resultados.....	74
4.2	Conclusiones.....	76
4.3	Recomendaciones.....	78

## BIBLIOGRAFÍA

## APÉNDICES

## SIMBOLOGÍA

$T_{a,c}$	[°C, K]	Temperatura de aire caliente
$T_a$	[°C, K]	Temperatura inicial (ambiente)
$P$	[Pa]	Presión Absoluta
$A_b$	[m <sup>2</sup> ]	Área bandeja
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Aceleración de la gravedad
$b$	[m]	base
$L$	[m]	Longitud / Largo
$\delta$	[m]	Espesor bandeja
$a$	[m]	Altura
$C_{p,prod}$	[J/ (Kg · K)]	Calor específico del grano de cacao
$m$	[kg]	Masa
$w$	[g]	Masa de un grano de cacao húmedo
$m_w$	[Kg]	Masa de agua que se requiere evaporar
$\dot{m}$	[kg/s]	Flujo másico
$V$	[m/s]	Campo de Velocidad
$n$	-	Cantidad / Número de ...
$R$	[kg/s · m <sup>2</sup> ]	Velocidad de secado
$t$	[h, s]	Tiempo de secado
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Densidad
$k$	[W/m · K]	Conductividad Térmica
$\mu$	[Pa · s]	Viscosidad Dinámica
$h$	[W/m <sup>2</sup> · K]	Coefficiente de Transferencia de Calor por Convección
$q$	[W]	Calor
$Re$	-	Número de Reynolds

## **ABREVIATURAS**

AWS	Amazon Web Services
CFD	Mecánica computacional de fluidos
CAD	Diseño asistido por computadora
ICCO	Organización Internacional de Cocoa
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
INIAP	Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias
FVM	Método de volumen finito
MM	Millones
TM	Toneladas métricas
VCS	Volúmenes de control

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de flujo de cadena de comercialización del cacao.....	19
Figura 1.2 Capa límite de velocidad en una placa. Obtenido de: Cengel y Ghajar [12]	24
Figura 1.3 Capa límite térmica sobre una placa, Obtenido de Cengel y Ghajar [12]....	24
Figura 2.1 Modelo tridimensional de la alternativa 1. Cavity de secado (izquierda) y bandeja portadora del grano (derecha) .....	28
Figura 2.2 Modelo tridimensional de la alternativa 2. Cavity de secado (izquierda) y bandeja portadora del grano (derecha) .....	29
Figura 2.3 Modelo tridimensional de la alternativa 3. Cavity de secado (izquierda) y bandeja portadora del grano (derecha) .....	30
Figura 2.4 Superficies bidimensionales de las cavidades de secado con bandejas. De izquierda derecha, alternativas 1, 2 y 3. ....	32
Figura 2.5 Superficies bidimensionales de las cavidades de secado con bandejas variando número de entradas de aire y posición entre bandejas. De izquierda derecha, 2 entradas de aire, 1 entrada de aire con separación de 8 cm entre bandejas y 1 entrada de aire con separación de 9 cm entre bandejas. ....	32
Figura 2.6 Variación de la humedad en función del tiempo ( $T=50^{\circ}\text{C}$ , $V=4.6\text{ m/s}$ ). Ilustración obtenida de Agamez [17] .....	34
Figura 2.7 Variación de la humedad en función del tiempo ( $T=60^{\circ}\text{C}$ , $V=3.0\text{ m/s}$ ). Ilustración obtenida de Castro y Pincay [18].....	35
Figura 3.1 Ventana de trabajo de SpaceClaim.....	54
Figura 3.2 Identificación y nombramiento de las superficies de interés.....	55
Figura 3.3 Mallado de la cavity de secado. ....	55
Figura 3.4 Configuración del mallado de la cavity de secado.....	56
Figura 3.5 Verificación de calidad mediante métrica calidad ortogonal. ....	56
Figura 3.6 Verificación de calidad mediante métrica Skewness. ....	56
Figura 3.7 Configuración de los monitores de residuales.....	58
Figura 3.8 Reportes de variables de interés.....	58
Figura 3.9 Configuración de los contornos de velocidad y temperatura .....	59
Figura 3.10 Configuración de la ventana de inicialización.....	60
Figura 3.11 Parche de la temperatura del dominio.....	60

Figura 3.12 Promedio ponderado del área para la velocidad en el dominio de la cavidad. .....	61
Figura 3.13 Configuración de las condiciones térmicas de la bandeja 1. ....	63
Figura 3.14 Promedio de temperatura por cada bandeja. ....	64
Figura 3.15 Promedio del C. de transferencia de calor de superficie, por bandeja. ....	64
Figura 3.16 Contorno de temperaturas, alternativa 3. ....	65
Figura 3.17 Contorno de velocidades, alternativa 3. ....	65
Figura 3.18 Gráfica comparativa entre alternativas, del coeficiente de variación del coeficiente de transferencia de calor de superficie. ....	69
Figura 3.19 Gráfica comparativa del coeficiente de variación para la alternativa 1, variando la cantidad de entradas de aire y separación entre bandejas a $T= 55^{\circ}\text{C}$ , $V=3.6$ $\text{m/s}$ .....	70
Figura 3.20 Especificaciones de Hardware del EC2 instance type: m4. xlarge, de los AWS. [22] .....	72

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Dimensiones de granos de origen ecuatoriano y peruano. Datos obtenidos de: Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao ( <i>Theobroma cacao</i> L.) de Ecuador y Perú [4] .....	17
Tabla 1.2 Valores físicos de los cultivares de cacao. Tabla adaptada de: Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao ( <i>Theobroma cacao</i> L.) de Ecuador y Perú [4] .....	17
Tabla 1.3 Requisitos físicos y calidad para los granos de cacao. Datos obtenidos de la NTE INEN 176 [3].....	20
Tabla 1.4 Resultados de calidad comparando secado al sol y secado artificial a distintas temperaturas. Adaptado de Omotayo & Oke [10].....	22
Tabla 2.1 Ecuaciones de conservación utilizadas para método de Volumen finitos.....	47
Tabla 3.1 Datos de las características físicas del cacao. ....	50
Tabla 3.2 resultados para área requerida para bandeja .....	51
Tabla 3.3 Variables conocidas.....	51
Tabla 3.4 Resultados de datos necesarios para cálculos de calor y dimensionamiento de ventiladores. ....	52
Tabla 3.5 Factores de corrección de velocidad por alternativa.....	53
Tabla 3.6 Resultados de los cálculos a distintas temperaturas .....	53
Tabla 3.7 Propiedades del aire a la temperatura de película.....	57
Tabla 3.8 Velocidades promedio del aire para cada alternativa, a distintas temperaturas. ....	62
Tabla 3.9 Cálculo de coeficiente de transferencia de calor de las bandejas, alternativa 1. ....	62
Tabla 3.10 Cálculo de coeficiente de transferencia de calor de las bandejas, alternativa 2. ....	62
Tabla 3.11 Cálculo de coeficiente de transferencia de calor de las bandejas, alternativa 3. ....	63
Tabla 3.12 Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de la temperatura para cada alternativa, a distintas condiciones de operación. ....	66

Tabla 3.13 Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación del coeficiente de transferencia de calor de superficie para cada alternativa, a distintas condiciones de operación.....	67
Tabla 3.14 Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de la temperatura y del coeficiente de transferencia de calor de superficie para cada alternativa, a distintas condiciones de operación.....	68
Tabla 3.15 Comparación entre alternativas, del coeficiente de variación del coeficiente de transferencia de calor de superficie.....	69
Tabla 3.16 Comparación del coeficiente de variación para la alternativa 1, variando la cantidad de entradas de aire y separación entre bandejas a $T= 55^{\circ}\text{C}$ , $V=3.6\text{ m/s}$ .....	70
Tabla 3.17 Tiempo de configuración y simulación por alternativa .....	71
Tabla 3.18 Tiempo de configuración y simulación por alternativa .....	72
Tabla 3.19 Costo de alquiler de diversos equipos, mediante AWS.....	73
Tabla 3.20 Análisis de costos por servicio.....	73



## ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Cavidad de secado ventiladores traseros.....	110
PLANO 2 Bandeja Solida .....	111
PLANO 3 Plano de corte cavidad de secado con ventiladores traseros.....	112
PLANO 4 Cavidad de secado con ventiladores inferiores .....	113
PLANO 5 bandeja perforada .....	114
PLANO 6 Plano de corte cavidad de secado con ventiladores inferiores.....	115
PLANO 7 Cavidad de secado con ventiladores superiores .....	116
PLANO 8 Bandeja mallada.....	117
PLANO 9 Plano de corte cavidad de secado con ventiladores superiores.....	118
PLANO 10 Plano de corte cavidad de secado con dos ventiladores trasero.....	119
PLANO 11 Plano de corte de secado con ventiladores traseros, separación 9 cm.....	120
PLANO 12 Plano de corte cavidad de secado con ventiladores traseros, separación 8 cm .....	121

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

El boletín de cifras de comercio exterior del 2021 expone al cacao como el 5to producto de exportación no petrolera del Ecuador, con una recaudación de USD 266 MM, con 331.028,57 toneladas de cacao hacia 40 destinos internacionales, constituyéndolo en un producto esencial para economía de diversas familias ecuatorianas [1]. La Organización Internacional de Cocoa (ICCO) refleja datos que el Ecuador actualmente se encuentra entre los principales productores de granos de cacao, ocupa el tercer lugar a nivel mundial y representa el 7 % de la producción mundial total [2]. En base a la demanda de este producto se han desarrollado diferentes tecnologías para poder conservar su calidad y ser más atractivo para compradores extranjeros. Dentro de la producción del cacao tenemos los procesos de cosecha, escurrido, fermentación, secado y almacenamiento, esta penúltima etapa, el secado, se puede realizar de forma natural o artificial, proceso indispensable durante la producción, para conservar la calidad y propiedades organolépticas del grano y así cumplir con los estándares de calidad. El desarrollo de prototipos de secado mediante análisis computacional avanzado es un campo poco desarrollado localmente, este método antes del diseño de prototipo permite simular el proceso teóricamente, ajustando variables como la geometría, velocidad y temperatura para la optimización del modelo, mediante mecánica computacional de fluidos (CFD).

### 1.1 Definición del Problema

La optimización termo-fluodinámica de un secador de convección forzada de cacao surge de la necesidad de mantener la uniformidad de las variables de estado, temperatura y velocidad, dentro de secadores de granos y frutos, en respuesta a la deficiente distribución del campo de temperaturas en el interior de los equipos, lo cual repercute en la calidad del producto final a ser comercializado. El mercado establece que una calidad óptima para la venta local implica una humedad de hasta 7% en los granos [3].

El reto tecnológico implica necesariamente garantizar que el producto procesado tenga las mismas condiciones de temperatura sin importar su ubicación dentro del equipo,

mediante un proceso de diseño, iteración y simulación en CFD, basándonos en una geometría construida mediante diseño asistido por computadora (CAD).

Para la **salud pública** este proyecto es aplicable debido a que evita la proliferación de microorganismos siendo así un producto más confiable para el sector cacaotero. En referencia a la **seguridad y bienestar**, un producto de buena calidad se traduce en comerciantes y agricultores de cacao contentos con el producto, y también ayuda en la salud del consumidor por sus cualidades organolépticas como en el caso del cacao fino de aroma. Mencionando el aspecto **global**, al conservar la calidad del cacao este tendría un mejor valor en el mercado mundial por consiguiente se tendrían resultados positivos para la economía de los productores de estos cultivos y también para el país. La producción y consumo de cacao se ha desarrollado de forma paralela con la cultura ecuatoriana, donde tanto costeños como amazónicos han incorporado en su desarrollo **cultural** el estudio científico para mejorar la producción y cosecha. Dentro del aspecto **social**, se sabe que existe una deficiencia en el control de precios, donde los compradores asignan un precio arbitrario por quintal de cacao húmedo, perjudicando así el trabajo de las familias de agricultores. Dentro de los aspectos **económicos**, al tener un producto de mayor calidad, implica un mayor precio de venta y aumenta la posibilidad de acceder a mercados preferenciales. Dentro del **aspecto técnico**, para el proceso de secado del cacao se pretende realizar un análisis de distribución de temperatura y un diseño eficaz en la cámara de secado para que no afecte en la calidad del grano de cacao.

## 1.2 Justificación del proyecto

El estudio y validación basado en CFD aquí propuesto, es un paso imprescindible para poder desarrollar y construir equipos de secado de cacao a nivel nacional, en el que se considere la calidad y uniformidad del producto seco. Lograr esto por la vía experimental es realmente retador y muy costoso tanto en tiempo como en dinero. Por esta razón, la simulación CFD ha ido tomando un lugar importante en el campo de investigación y creación de equipos de secado. De esta forma se logran desarrollos tecnológicos altamente competitivos y optimizados en base a nuestras necesidades nacionales. Lo cual se consigue al determinar parámetros importantes como la temperatura óptima de operación, la velocidad del aire y el tiempo de secado, variables que garantizarán un

secado eficiente, mientras se conservan las propiedades organolépticas del grano de cacao. Se trata de un problema clásico en el diseño de sistemas térmicos y de necesaria solución en cuanto al procesamiento de alimentos.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Optimizar la configuración geométrica y termo-fluodinámica de una cámara de secado de cacao de convección forzada para maximizar la calidad de distribución de la temperatura.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Diseñar mediante formato CAD la geometría de la cavidad de secado con una sola entrada y bandejas para ser optimizado.
2. Modelar computacionalmente la geometría base variando la cantidad y posición de entradas de flujo de aire caliente en el interior de la cámara de secado para determinar la influencia de estos parámetros sobre la calidad de distribución de temperatura y transferencia de calor.
3. Diseñar distintos modelados para las bandejas portadoras del grano de cacao
4. Evaluar mediante CFD el impacto sobre la distribución de la temperatura, al variar la geometría y distancia de separación entre bandejas.
5. Seleccionar la mejor configuración geométrica y número de entradas que maximiza la calidad de distribución de velocidad y temperaturas dentro de la cámara, construyendo mapas de contorno y gráficos de comportamientos de las variables de estado del modelo de CFD.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Producción y exportación del cacao.**

La evolución de exportaciones de cacao aumenta cada año, en el año 2005, 119.000 Toneladas métricas (TM) y para el año 2021 360.800 TM, en la actualidad, la ICCO indica que Ecuador es el tercer mayor productor de cacao en el mundo. Mientras que el continente africano con el 73.3 % lidera la producción mundial, seguido por el continente americano con una participación del 16.7 % y Oceanía con el 10%. La comercialización de cacao se lleva a cabo a través de asociaciones de productores, intermediarios, comisionistas y exportadores.

### **1.4.2 El cacao y sus características**

El cacao es un cultivo de plantación tropical establecido en regiones cálidas y húmedas, puede alcanzar alturas de 8 a 20 metros dependiendo de las condiciones en las que se encuentra, destinado a producir granos o almendras como materia prima para la elaboración de chocolates y grasas para industrias cosmetológicas y alimentarias.

#### **1.4.2.1 Clasificación**

En el mercado local, existen dos variedades que se comercializan de forma extendida, el cacao fino de aroma y el cacao CCN51, y estos a su vez se clasifican, de acuerdo con la normativa Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN) NTE 176 [3] de la siguiente manera:

Cacao fino

- Arriba Superior Summer Selecto (A.S.S.S)
- Arriba Superior Selecto (A.S.S)
- Arriba Superior Época (A.S.E)

Cacao CCN51

- Cacao Superior Selecto (C.S.S)
- Cacao Superior Corriente (C.S.C)

## Dimensiones de la almendra de cacao

Estudios que se realizaron en la Universidad Técnica Equinoccial [4] sobre dimensiones que presenta el cacao ecuatoriano y de Perú y valores físicos del grano, se presentan en la Tabla 1.1 y Tabla 1.2 respectivamente.

**Tabla 1.1 Dimensiones de granos de origen ecuatoriano y peruano. Datos obtenidos de: Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.) de Ecuador y Perú [4]**

Cultivares de cacao	Variables		
	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
Nacional Ecuador	21.96 ± 0.13	12.32 ± 0.17	8.19 ± 0.09
CCN 51 Ecuador	22.45 ± 0.32	12.79 ± 0.16	8.24 ± 0.36
CCN 51 Perú	24.97 ± 0.40	13.80 ± 0.89	9.78 ± 0.94

## Valores físicos del grano de cacao

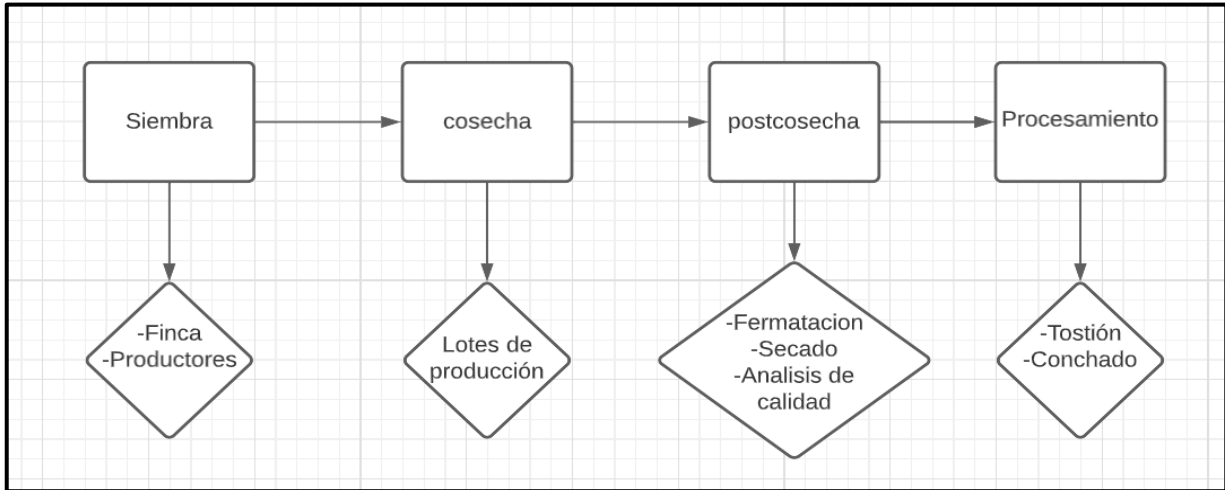
**Tabla 1.2 Valores físicos de los cultivares de cacao. Tabla adaptada de: Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.) de Ecuador y Perú [4]**

Tratamientos de cacao	Variables				
	IG (g)*	Testa (%) *	$\epsilon$ (%)*	IF (%) *	IB*
Nacional Ecuador	1.24 ± 0.03	16.19 ± 0.49	0.64 ± 0.04	77.66 ± 1.33	31.40 ± 0.22
CCN 51 Ecuador	1.50 ± 0.02	12.33 ± 0.34	0.54 ± 0.01	58.86 ± 1.45	31.40 ± 0.25
CCN 51 Perú	1.41 ± 0.06	10.05 ± 0.54	0.64 ± 0.01	80.68 ± 1.85	28.93 ± 0.39
ICS 6 Perú	1.30 ± 0.01	15.38 ± 0.37	0.64 ± 0.01	74.64 ± 2.64	25.87 ± 0.32

### 1.4.3 Procesamiento del cacao

El sabor, aroma y la calidad del cacao ecuatoriano, es el resultado de un proceso riguroso, que tiene detrás mucha dedicación y se ha desarrollado mediante conocimientos empíricos y parcialmente científicos, que se han transmitido de generación en generación entre las familias de los cacaoteros, las cuales el Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) [5] resume como:

1. **Cosecha:** En esta fase se seleccionan las mejores mazorcas, las cuales se toman basándose en su apariencia visual, y de estas se extrae el cacao en baba.
2. **Fermentación:** En el interior de las mazorcas, los granos de cacao son estériles, pero una vez abiertas, las almendras entran en contacto con microorganismos del ambiente, lo cual empieza un proceso de cambios químicos, que provocan la descomposición de la pulpa, aumento de la temperatura del grano, y producción de ácido acético.
3. **Remoción de la masa de almendras:** Se realiza al final de la fase alcohólica de la fermentación, lo cual favorece el ingreso de aire a la masa de producto, estimulando la reproducción de bacterias acéticas, las cuales producen el ácido acético a partir del alcohol que generan las levaduras. Este ácido tiene la función de contribuir con la muerte del embrión, penetrando la semilla a través de su cáscara, en conjunto con la acción de la alta temperatura (48°C a 50°C) que alcanza durante la fermentación lo cual incita a la formación de los precursores de las propiedades organolépticas del cacao.
4. **Secado de las almendras:** Al final del proceso de fermentación, las almendras conservan aproximadamente un 50% de humedad, y el propósito del proceso es reducir esta humedad hasta el 7%, para facilitar su almacenamiento, transporte, e impedir la proliferación de hongos y bacterias. Con la evaporación del agua del interior del grano, se elimina también parte del ácido acético lo cual reduce la acidez y mejora sus efectos sensoriales.
5. **Almacenamiento:** Para su almacenamiento, se requiere que las almendras estén fermentadas y secas. Por esto, es necesario destinar un espacio exclusivo para el almacenamiento del grano, que cumpla con ser cerrado, limpio y ventilado, evitando almacenarlo con otros productos de origen vegetal o mineral.



**Figura 1.1 Diagrama de flujo de cadena de comercialización del cacao.**

#### **1.4.4 Requerimientos del secado**

Dado que el objetivo de nuestro proyecto se centra en la optimización de un secador de cacao, nos enfocaremos en esta etapa del secado, que de acuerdo con la normativa INEN, para las distintas variantes de cacao que se recolecta en Ecuador, se requiere una humedad de hasta 7% [3] como se muestra en la tabla a continuación:



**Tabla 1.3 Requisitos físicos y calidad para los granos de cacao. Datos obtenidos de la NTE INEN 176 [3]**

Requisitos	Cacao Fino			Cacao CCN51		Método de ensayo
	A.S.S.S	A.S.S	A.S.E	C.S.S	C.S.C	
Humedad, máximo, %*	7	7	7	7	7	NTE INEN-ISO 2291
Peso de 100 granos, g	> 130	> 120 a 130	100 a 120	> 125	110-125	<sup>a</sup>
Granos fermentados, mínimo, %	75	65	53	68	55	NTE INEN-ISO 1114
Granos violetas, máximo, %	15	21	25	18	26	NTE INEN-ISO 1114
Granos pizarrosos, máximo, %	9	12	18	12	15	NTE INEN-ISO 1114
Granos mohosos, máximo, %	1	2	4	2	4	NTE INEN-ISO 1114
TOTALES (análisis sobre 100 granos), mínimo	100	100	100	100	100	
Granos defectuosos, máximo, %	0	1	3	1	3	<sup>b</sup>
Material relacionado al cacao, máximo, %	1	1	1	1	1	<sup>b</sup>
Material extraño, máximo, %	0	0	0	0	0	<sup>b</sup>

\* El símbolo % (por ciento) representa al número 0,01, que expresa a la fracción másica.

<sup>a</sup> masa determinada por medio de una balanza u otro instrumento equivalente.

<sup>b</sup> determinado en 500 g de muestra.

NOTA. Se permite la presencia de granza solo en el Cacao A.S.E y en el Cacao C.S.C en un máximo del 1,5 %

### 1.4.5 Definiciones de contenido de humedad

Delgado [6] en su investigación define los conceptos de distintas humedades vinculadas al secado de una masa húmeda de la siguiente forma:

Humedad en base húmeda: Se refiere al porcentaje en peso de agua que tiene el grano sobre unidad de peso del producto húmedo.

Humedad en base seca: Se refiere al porcentaje en peso de agua que tiene el grano sobre unidad de peso del producto totalmente seco.

Humedad de equilibrio: Se define como la humedad de la sustancia en equilibrio con el vapor en el agente de secado.

#### **1.4.6 Métodos de secado**

De acuerdo con las técnicas utilizadas se pueden clasificar en:

1. Método tradicional
  - 1.1. Secado al sol
  - 1.2. Secado a la sombra
2. Método moderno o secado artificial
  - 2.1. Secadores rotatorios
  - 2.2. Secadores de bandeja
  - 2.3. Secadores rectangulares

Nuestra propuesta de proyecto contempla la simulación de un secador de bandeja, por convección forzada de aire caliente, utilizando una resistencia eléctrica como fuente de calor.

#### **1.4.7 Temperatura de secado recomendada**

Ishaq y Jafri Ishaq y Jafri [7], Mandl [8] y HerbaZest [9] en sus investigaciones concluyen que los beneficios nutricionales del cacao y propiedades sensoriales se potencian al controlar los siguientes parámetros: Contenido de humedad (del 5.5% al 8%), pH (del 3.8 al 5.5), contenido de grasa (55% al 56%), almendra color marrón, libre de moho, alta actividad antioxidante, compuestos fenólicos, ocratoxina A, ácido acético, teobromina y cafeína, todas estas propiedades estrechamente relacionadas con el proceso de secado, donde la temperatura y tiempo de secado son las variables de mayor peso para un óptimo resultado.

Oke y Omotayo [10] en su investigación analizan el efecto de la temperatura sobre distintas propiedades de interés para la calidad del cacao. En la tabla 1-4 se pueden observar los resultados de la medición de las variables cantidad de ácido acético, pH,

color del grano, ácidos grasos libres y gusto, para granos secados en horno de convección forzada a 35°C, 40°C, 45°C, 50°C y 55°C y secado al sol.

**Tabla 1.4 Resultados de calidad comparando secado al sol y secado artificial a distintas temperaturas. Adaptado de Omotayo & Oke [10]**

Condición	Ácidos grasos libres (mg/g)	Ácido acético (mg/g)	pH	Sabor	Color
Secado al sol	0.40	3.50	5.30	Medianamente amargo	Café claro
Secador (35°C)	0.41	3.90	5.20	Medianamente amargo	Café pálido
Secador (40°C)	0.46	4.70	5.10	Medianamente amargo	Café claro
Secador (45°C)	0.48	6.50	5.00	Medianamente amargo	Café oscuro
Secador (50°C)	0.55	7.30	4.80	Amargo	Café oscuro
Secador (55°C)	0.61	8.70	4.70	Amargo	Café oscuro

#### 1.4.8 Mecanismo de transferencia de calor

Cengel y Ghajar [11] en sus textos hablan sobre los mecanismos de transferencia de calor, el calor específico, el coeficiente de calor específico y también mencionan los conceptos de capa límite y capa térmica, ellos establecen que el calor se transmite de un sistema a otro en forma de energía, en base al resultado a la diferencia de temperatura. Esta transferencia de energía en la dirección del medio de mayor temperatura hacia el medio de temperatura más baja, y este fenómeno de transferencia de calor se detiene solo cuando se alcanza un equilibrio térmico.

Indican que el calor se puede transferir de tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos estos modos dependen de una diferencia de temperatura. El modo de convección es la transferencia de energía entre la superficie sólida y el fluido que está en movimiento. Este de aquí tiene efecto de conducción y se puede dar de dos formas:

**Convección forzada:** Cuando el fluido es forzado a fluir sobre una superficie, mediante agentes externos que lo impulsen, como lo es un ventilador.

**Convección natural:** Donde el movimiento del fluido se da por la diferencia de densidades, vinculada al gradiente de temperatura.

El coeficiente de calor específico es un parámetro que se resuelve de forma experimental, mas no es una propiedad del fluido y que depende de algunos parámetros como son la naturaleza del movimiento del fluido, propiedades del fluido, configuración geométrica el cual sucede el fenómeno y la velocidad sobre este.

Para los fenómenos donde está implicado un cambio de la temperatura de una sustancia, es necesario reconocer el concepto de calor específico, que se define como la cantidad de calor necesaria, para una unidad de masa de una sustancia, para que esta eleve su temperatura en una unidad. Este concepto a su vez se ramifica en dos, dependiendo si el calor que recibe una sustancia provoca o no un cambio en su estructura molecular.

**Calor sensible:** Cantidad de calor que puede recibir una sustancia, por unidad de masa, para que esta eleve su temperatura, sin que haya un cambio de fase (sólida, líquida, gaseosa).

**Calor latente:** Es la cantidad de calor que se requiere suministrar a una sustancia para provocar un cambio de fase. Cuando la sustancia pasa de sólida a líquida, se denomina calor latente de fusión, y de líquida a gaseosa, calor latente de vaporización. Durante el cambio de fase, no hay un incremento de la temperatura.

#### 1.4.9 Placa limite y térmica

Cengel y Ghajar [12] indican que en donde los gradientes de velocidad son significativos y la región del flujo es contiguo a la superficie se conoce como capa limite.

Un fluido que fluye sobre una superficie estacionaria llega a detenerse por completo en la superficie a causa de la condición de no deslizamiento.

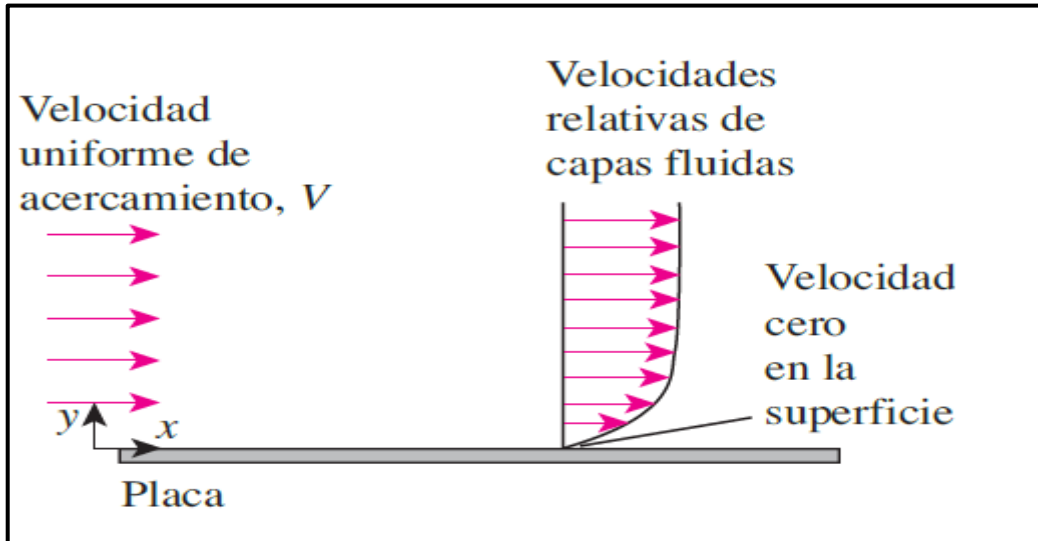


Figura 1.2 Capa límite de velocidad en una placa. Obtenido de: Cengel y Ghajar [12]

La zona del flujo sobre el área en la cual la alteración de la temperatura en la dirección común a el área es significativa es la capa límite térmica. Como resultado, se desarrolla un perfil de temperaturas en el campo de flujo que va desde  $T_s$ , en la superficie, hasta  $T_\infty$ , suficientemente lejos de ésta.

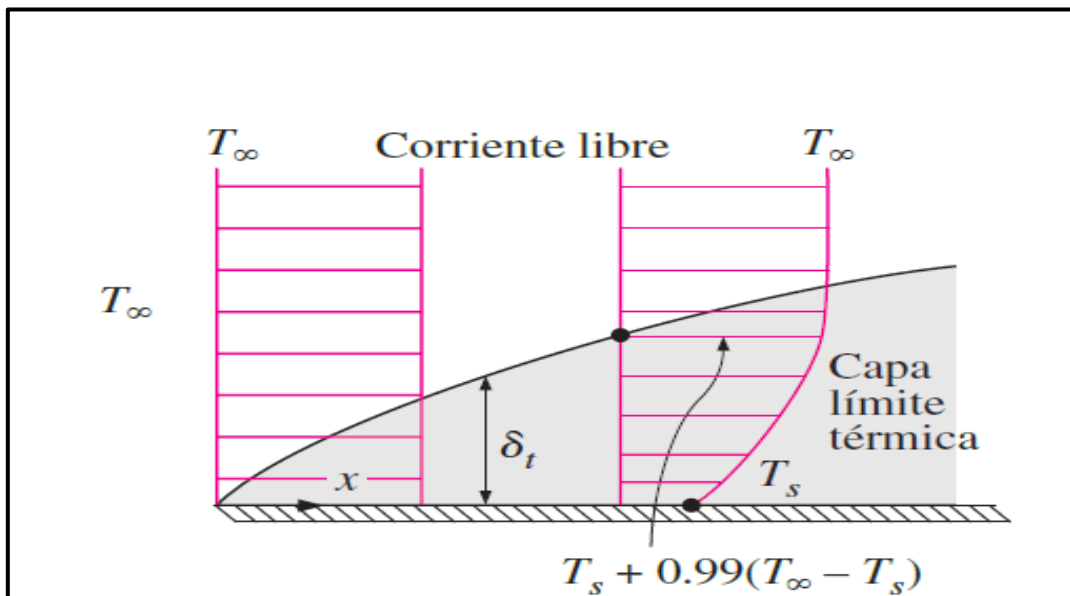


Figura 1.3 Capa límite térmica sobre una placa, Obtenido de Cengel y Ghajar [12]

#### 1.4.10 Modelos matemáticos para la simulación

ANSYS, Inc [13] comenta que la plataforma de Ansys Workbench permite integrar datos en simulaciones de ingeniería para crear modelos más precisos de manera más eficiente, por otro lado, Fluent que es parte de la plataforma permite simular fenómenos físicos que involucran fluidos. Su uso se basa en realizar modelos físicos complejos para posteriormente realizar el análisis de algunos fenómenos en los procesos de flujo de fluidos. Fluent utiliza el método del Método de volumen finito (FVM).

**Dinámica de fluidos computacional por sus siglas (CFD):** Integra las pruebas experimentales, ayuda a reducir el costo y el tiempo de respuesta para las iteraciones de diseño y se ha convertido en una herramienta indispensable siempre que se requiere un diseño práctico que involucre fluidos.

Osses, Juan [14] indica que el método de volumen finito utiliza los principios de las ecuaciones de conservación (masa, momento y energía) y son respetadas por ecuaciones discretas deducidas por método de volumen finito, este método desde el principio es la descomposición del dominio en pequeños volúmenes de control (VCS) donde estas variables son almacenadas en nodos definidos como malla, dentro de estos nodos se guardan las variables a resolver, las ecuaciones de conservación son descritas integralmente para cada volumen en donde se utiliza el teorema de la divergencia de Gauss para convertir integrales de volumen a integrales de superficie, finalmente estas ecuaciones son resueltas a través de métodos acoplados a la situación.

# CAPÍTULO 2

## METODOLOGIA

Dado que se requiere optimizar la distribución de temperatura de una cámara de secado, para la configuración geométrica se diseñó 3 alternativas de solución para su análisis por CFD, mediante Ansys Fluent, con el cual se simuló variando las condiciones de entrada del problema, para validar la configuración con mejores resultados. Las condiciones de entrada se seleccionaron mediante los cálculos teóricos realizados en base a la teoría de transferencia de calor por convección forzada, termodinámica y la teoría de cinética de secado del grano, aplicándose a las 3 alternativas de solución, para determinar aquella con la mejor distribución de temperaturas.

### 2.1 Mecanismo de secado

El método de secado utilizado para todas las alternativas de solución consiste en emplear una resistencia eléctrica colocada delante de los ventiladores, para alcanzar la temperatura requerida, es decir, se implementará un secado mediante convección forzada por aire caliente.

### 2.2 Geometría de bandejas

Se plantea implementar un total de 15 bandejas en el interior de la cavidad de secado, por lo tanto, cada bandeja deberá tener un área suficiente para acomodar 3.33 kg de cacao, distribuidos en una sola capa (thin layer). Para esto, se utilizarán los datos de las tablas 1-1 y 1-2, sobre las características físicas del cacao, y se aproximará la forma ovoide del cacao, para representarla como un paralelepípedo, para facilitar el cálculo del área que ocupa cada grano. Finalmente, se diseñó 3 bandejas cuadradas de 90 cm de ancho por 90 cm de largo

### **2.3 Geometría de la cavidad de secado**

Se implementará una geometría genérica como propuesta de la cavidad de secado, esto con la intención de que el diseño de la cavidad no varíe para las distintas configuraciones de bandejas, temperaturas y velocidades, de forma que esta no afecte los resultados al variar las condiciones en el interior.

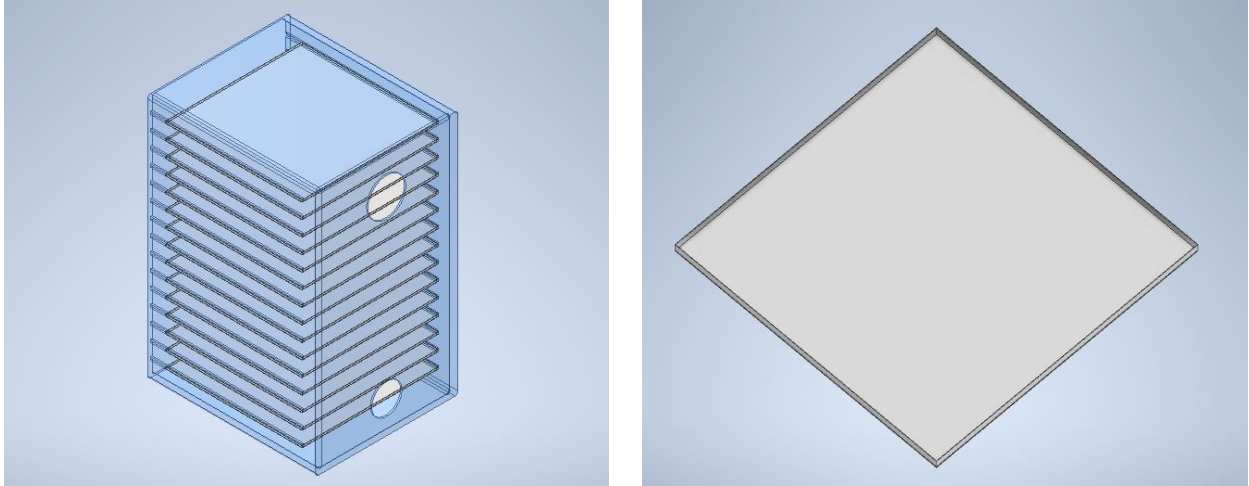
### **2.4 Alternativas de solución**

Las alternativas propuestas a continuación suponen una representación tridimensional de las distintas geometrías que proponemos para solucionar el problema de distribución de temperatura. Es necesario mencionar que, para facilidad de apreciación, se muestran los dibujos de las cavidades abiertas, para visualizar el armado del ensamble cavidad y bandeja, sin embargo, el modelo real sería completamente cerrado por el frente, simulando la presencia de una puerta que cierre el sistema.

#### **2.4.1 Alternativa 1**

Se propone modelar una cámara de secado con 1 ventilador de 25 cm de diámetro, colocado en la pared posterior de la cavidad, por delante de este se ubicará una resistencia eléctrica, que genere suficiente calor para que, al actuar la corriente de aire sobre esta, distribuya de manera uniforme la temperatura en la cámara de secado, además, en el interior se posicionarán 15 bandejas metálicas planas para colocar los granos de cacao. El aire caliente impulsado por los ventiladores se abrirá paso a través de la separación entre bandejas, la cual se propone en un inicio como 10 cm entre cada una de ellas. La salida de aire se ubicó en la parte inferior, con un diámetro de 20 cm.

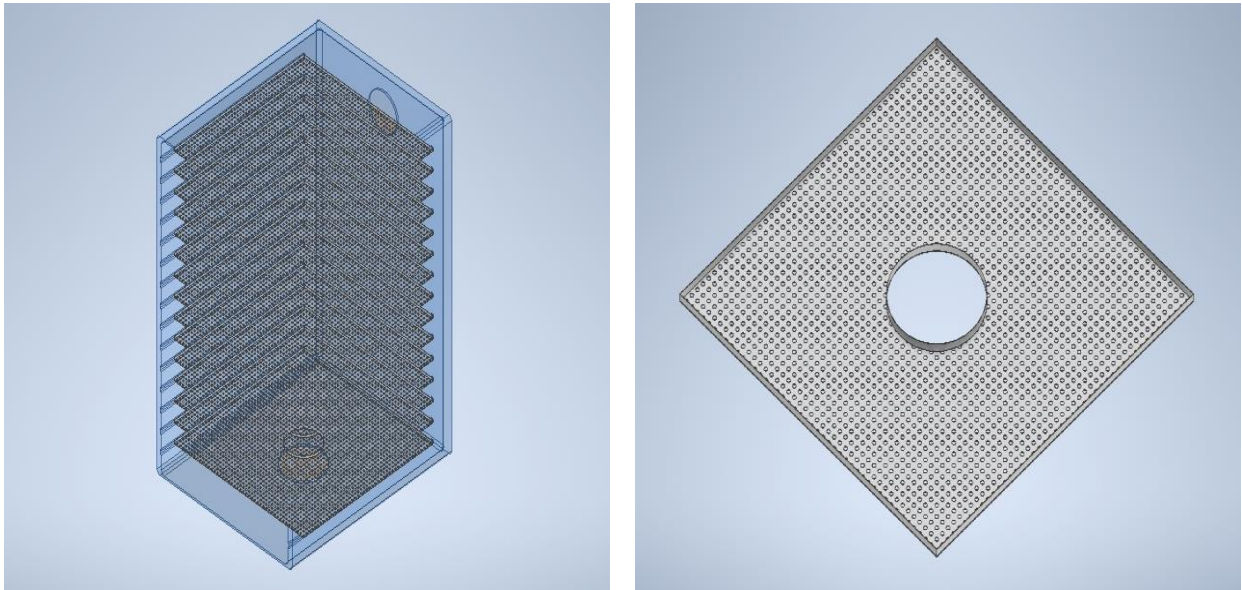




**Figura 2.1 Modelo tridimensional de la alternativa 1. Cavity de secado (izquierda) y bandeja portadora del grano (derecha)**

#### **2.4.2 Alternativa 2**

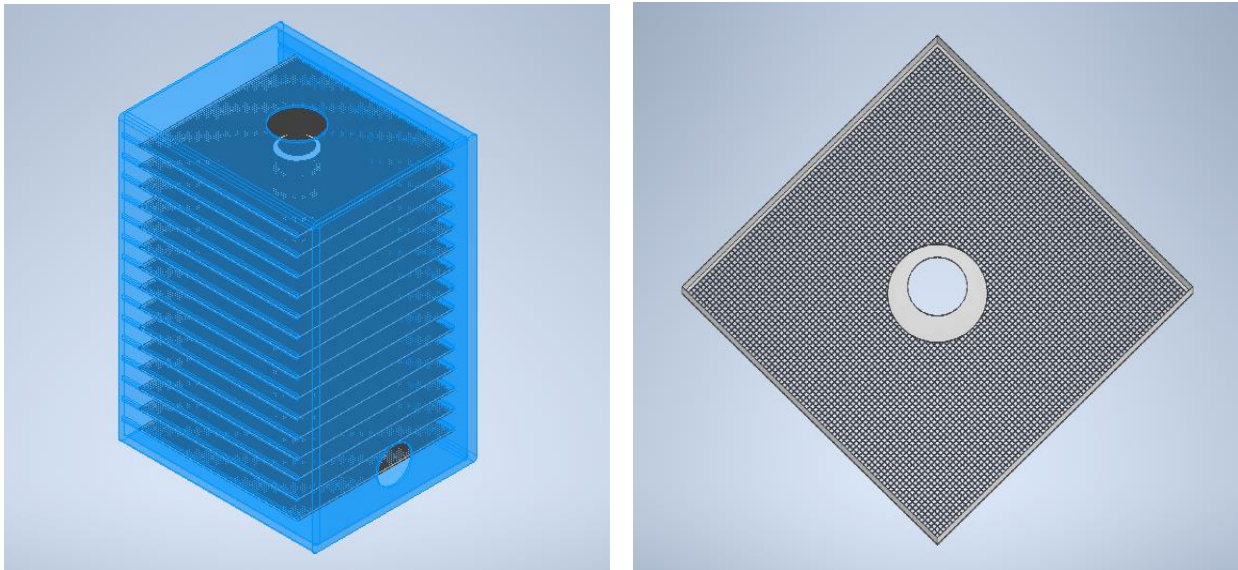
Se propone diseñar una cabina de secado que incorpore un ventilador de 25 cm de diámetro, ubicado en su parte inferior, delante del cual se instalará una resistencia eléctrica, encargada de generar el calor necesario para el secado. Dado que se dispuso a colocar el ventilador en la parte inferior de la cámara, se propone utilizar 15 bandejas perforadas, con agujeros de 1 cm de diámetro y un agujero centrado de 20 cm de diámetro, para permitir que el aire fluya a través de estas cavidades, garantizando que el calor se distribuya en toda la geometría. La salida de aire se ubicó en la parte superior, con un diámetro de 20 cm.



**Figura 2.2 Modelo tridimensional de la alternativa 2. Cavity de secado (izquierda) y bandeja portadora del grano (derecha)**

### **2.4.3 Alternativa 3**

Se propone diseñar una cavity de secado que incorpore un ventilador de 25 cm de diámetro, ubicado en la parte superior de la cavity de secado, delante del cual se instalará una resistencia eléctrica, encargada de generar el calor necesario para el secado. Dado que se dispuso a colocar el ventilador en la parte superior de la cámara, se propone utilizar 15 bandejas malladas, con un cono en el centro, cuyo diámetro menor es de 15 cm y su diámetro mayor de 20 cm, para funcionar como un difusor del aire que incide sobre las bandejas, para permitir que el aire fluya a través de estas cavidades, garantizando que el calor se distribuya en toda la geometría. La salida de aire se ubicó en la parte inferior, con un diámetro de 20 cm.



**Figura 2.3 Modelo tridimensional de la alternativa 3. Cavidad de secado (izquierda) y bandeja portadora del grano (derecha)**

## **2.5 Justificación del diseño geométrico de las bandejas**

En vista que deseamos diseñar un secador que optimice la distribución de la temperatura en el interior de la cavidad y el fenómeno de transferencia de calor, optamos por idear geometrías innovadoras para las bandejas que porten el grano de cacao para las alternativas 2 y 3.

Para la bandeja mallada, se propone el mallado para permitir una libre circulación de aire en forma vertical, lo cual facilitará la distribución del perfil de velocidades en el interior de la cámara, considerando el mismo análisis, se diseñó también las bandejas perforadas.

Por otro lado, es importante considerar que para el caso real, el cacao estaría distribuido en las bandejas de forma que forme un capa fina (thin layer) que actuaría como un obstáculo para el flujo de aire entre bandejas, es por esto que ideamos también colocar un agujero centrado en las bandejas para las alternativas previamente mencionadas, a través del cual el aire podrá circular libremente en dirección vertical, no obstante, durante una simulación de prueba, hallamos que al tener un diámetro de agujero igual al diámetro del ventilador, la mayor parte del flujo de aire se dirigía a la salida de la cavidad, por esta

razón, la distribución del campo de velocidades era pobre; Ante la problemática expuesta, proponemos un agujero de diámetro menor para la alternativa 2, de forma que el aire no pase completamente a las bandejas siguientes, y parte de este recircule en cada bandeja. Referente a la alternativa 3, se propuso un agujero de forma cónica que funcione como difusor del aire, para observar su efecto sobre el fenómeno termofluodinámico.

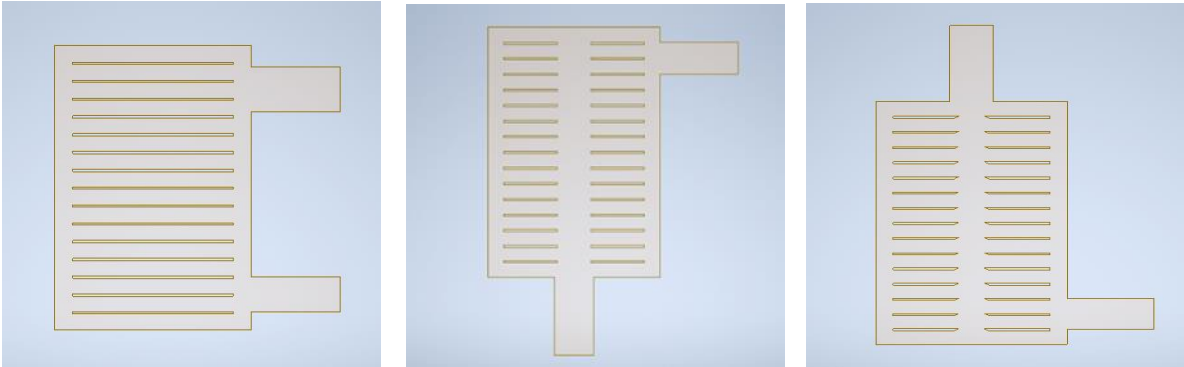
## **2.6 Justificación del estudio bidimensional del fenómeno físico**

Previo a la elaboración de la metodología de diseño detallada, se ejecutó el mallado del ensamble tridimensional de la alternativa 1, lo cual incluye la cavidad y las bandejas. La malla resultante tuvo 24 millones de elementos y 18 millones de nodos lo cual supuso una barrera debido a las limitaciones por recursos computacionales. Por un lado, la licencia estudiantil de Ansys Fluent, permite la simulación de problemas con hasta 512 mil celdas o nodos, y, por otro lado, la limitación de poder de cómputo, por la cantidad de elementos de la malla y número de configuraciones que buscamos simular. Expuesto lo anterior, optamos por realizar un análisis del fenómeno físico en estado estable, llevado a una geometría bidimensional.

García y Vakkilainen [15] exponen que, para que un modelo bidimensional de placa plana sometida a flujo externo sea válido, como aproximación del fenómeno físico tridimensional real, la relación de aspecto debe ser de al menos 1:50, dado que al ser la tercera dimensión mucho mayor a las demás, el efecto de vórtice y dirección del campo de velocidades no es significativo sobre la representación del fenómeno simulado.

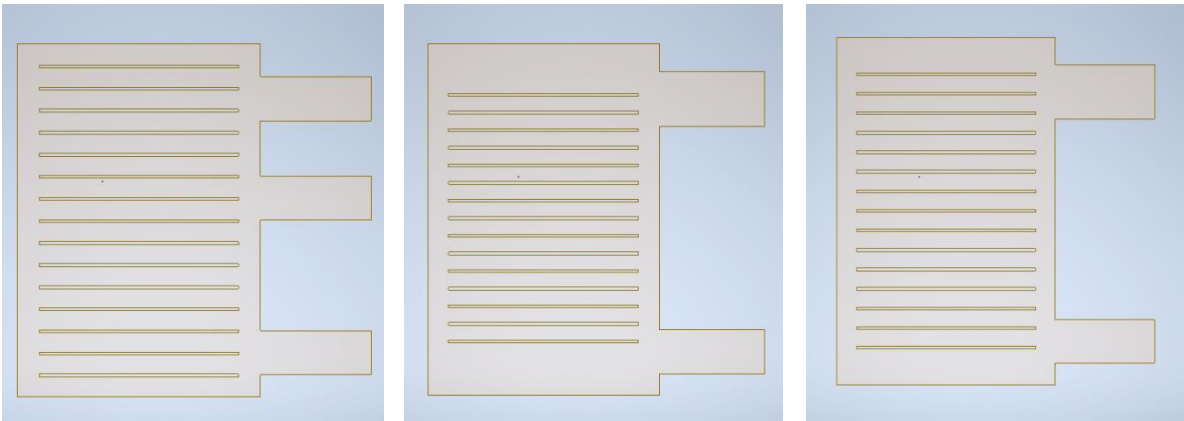
Para nuestro proyecto, la relación de aspecto es 1:1, por lo cual partimos sabiendo que los resultados obtenidos contarán con un margen de error alto; sin embargo, podemos intuir que la forma en que se distribuye la velocidad y la temperatura tendrá una proporcionalidad parecida al modelo bidimensional, esto quiere decir que a pesar de que el valor en magnitud de las propiedades calculadas difiere respecto al fenómeno real, aquellas áreas donde la velocidad o temperatura tengan mejor distribución en el fenómeno en 2D también se cumplirá para el fenómeno en 3D.

Por lo anterior expuesto, se presentan las superficies que representan un corte transversal de las diferentes alternativas, cuyos planos en detalle se encuentran en la sección de anexos. En estas superficies, se consideró modelar las bandejas asumiendo la condición de que el cacao se encuentra completamente disperso en la bandeja, formando una capa delgada, que asemeja la geometría de las bandejas cargadas con cacao a una placa plana.



**Figura 2.4 Superficies bidimensionales de las cavidades de secado con bandejas. De izquierda derecha, alternativas 1, 2 y 3.**

Adicionalmente, en los objetivos 2 y 5 se planteó evaluar el efecto que tiene variar la cantidad de ventiladores utilizados, así como la distancia de separación entre bandejas, por lo cual se presentan tres superficies adicionales.



**Figura 2.5 Superficies bidimensionales de las cavidades de secado con bandejas variando número de entradas de aire y posición entre bandejas. De izquierda derecha, 2 entradas de aire, 1 entrada de aire con separación de 8 cm entre bandejas y 1 entrada de aire con separación de 9 cm entre bandejas.**

Las comparaciones de los modelos propuestos en la ilustración 2-5 se harán con los resultados de la alternativa 1, la cual también tiene ventiladores en la pared posterior.

## **2.7 Matriz de decisión**

Dada la naturaleza de este proyecto de tesis, que es basado en la simulación computacional mediante CFD, no es factible elaborar una matriz de decisión, puesto que nuestra intención es que, mediante métodos iterativos y probando distintas combinaciones de arreglos geométricos se puedan obtener gráficos de distribución de temperatura a partir de los cuales se puedan implementar cambios en los parámetros de entrada, como velocidad del ventilador o temperatura, para así hallar la solución que presente la mayor uniformidad en la distribución de la temperatura en el interior de la cámara, con lo cual podríamos garantizar también un correcto secado, que nos permita controlar de forma precisa la humedad presente en los granos.

## **2.8 Parámetros iniciales para el diseño**

Previo al diseño del secador es necesario conocer los parámetros necesarios a considerar en el proceso de secado, y se describen a continuación:

- Estado del aire caliente: En base a la tabla 1-4, se toma un rango adecuado de temperaturas para el secado por convección forzada de 40°C, 45°C, 50°C y 55°C
- Dimensiones del cacao: Se tomaron dimensiones promedio para granos de cacao.
- Estado inicial del cacao: La INIAP reporta que al final del proceso de fermentación, la humedad del cacao oscila entre el 50% y 60%.
- Estado final del cacao: De acuerdo con la normativa INEN NTE 176 [3] y sus resultados expuestos en la tabla 1-3, se tiene que, para las distintas variedades de cacao producidas en el Ecuador, la humedad al final del secado debe ser de 7%



## 2.9 Condiciones geográficas de secado

El proyecto INEDITA [16] sobre las condiciones climáticas promedio en el país, expone que Ecuador cuenta con dos estaciones, la estación lluviosa y húmeda, que abarca de diciembre a mayo, y la estación seca, de junio hasta noviembre, donde las precipitaciones anuales son de aproximadamente 1506.5 mm. En la costa, durante la estación seca (junio a noviembre) las temperaturas promedio oscilan entre 21.65 [°C] hasta 30.8 [°C], con una humedad relativa [HR] del 45% al 60%, mientras que durante la estación lluviosa (diciembre a mayo), la temperatura promedio es 30.65 [°C], con una HR del 70% al 99%.

## 2.10 Curva de velocidad de grano de cacao

Según indica Agamez [17] de forma experimental logran obtener una gráfica de la cinética de secado del grano de cacao Ilustración 2-3, donde relacionan el contenido de humedad del cacao con el tiempo de secado, en un ambiente controlado, con una temperatura de  $50 \pm 5$  [°C], y una velocidad de ventilador de 4.6 m/s. La función es por tramos, donde el primer tramo se aproxima a una función polinomial de grado tres, el segundo tramo, se aproxima a una función lineal y el tercer tramo tiene una tendencia logarítmica. Finalmente, se concluyó que para disminuir la humedad de la almendra de cacao desde 60% hasta 8%, se necesitaron 8.87 horas de secado continuo.

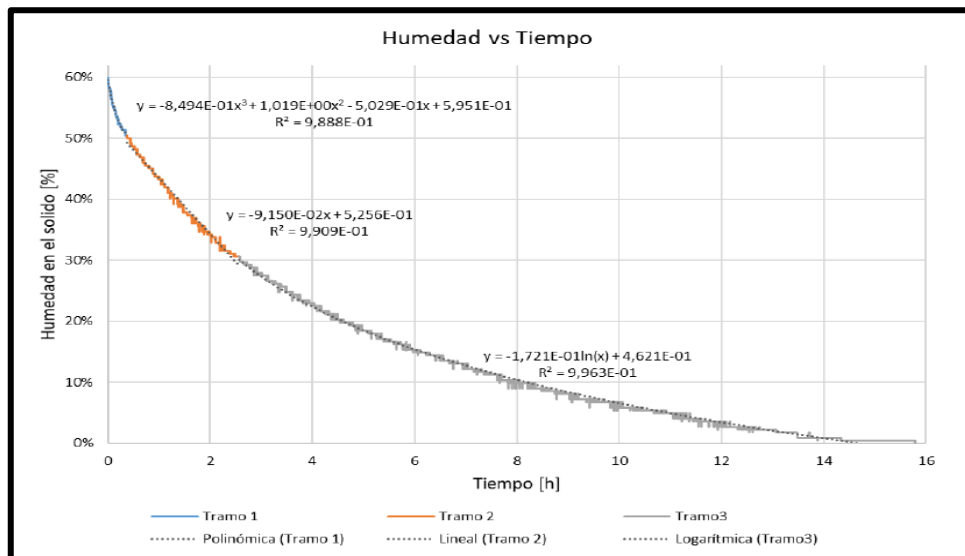


Figura 2.6 Variación de la humedad en función del tiempo ( $T=50^{\circ}\text{C}$ ,  $V=4.6$  m/s). Ilustración obtenida de Agamez [17]

Castro y Pincay [18], muestran también la variación de la humedad en función del tiempo para condiciones de secado distintas, donde la temperatura se mantuvo uniforme a 60°C y para una velocidad de ventilador de 3.0 m/s, de donde podemos observar que el tiempo de secado para una almendra con humedad inicial de 60% y humedad final de 8% es aproximadamente 8.5 horas.

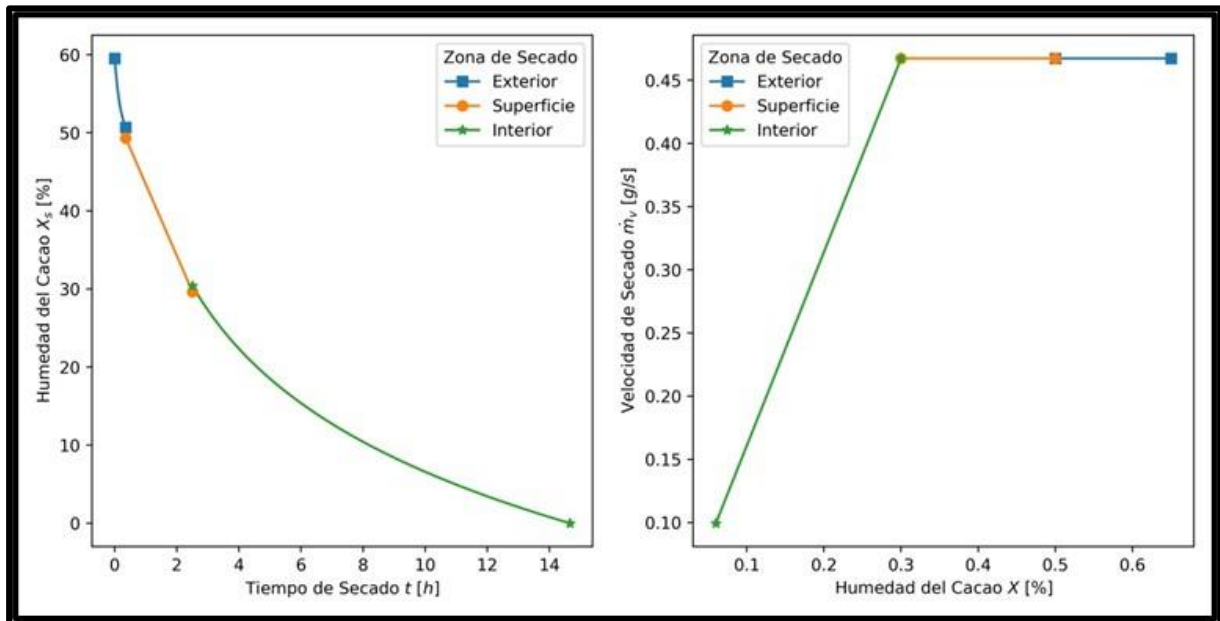


Figura 2.7 Variación de la humedad en función del tiempo ( $T=60^{\circ}\text{C}$ ,  $V=3.0$  m/s).

Ilustración obtenida de Castro y Pincay [18]

## 2.11 Metodología de diseño y simulación

El proceso de creación de un prototipo es complejo, debido a que los cálculos a veces simplifican en sobremanera el fenómeno físico, razón por la cual los resultados obtenidos experimentalmente difieren con los teóricos. Por lo anteriormente mencionado, el análisis mediante CFD se convierte en una excelente herramienta por la cual se puede iterar haciendo ajustes en los parámetros de la simulación, de forma que los resultados obtenidos sean acordes a lo que se buscaba con los cálculos teóricos. A continuación, se describirá el proceso que se pretende seguir para determinar las velocidades al ingreso y en el interior de la cavidad de secado.



### **2.11.1 Metodología para calcular las velocidades de flujo de aire.**

1. Calcular el calor total necesario para cumplir con los requerimientos del sistema.
2. Considerando un tiempo de secado de 8 horas, determinar flujos máxicos.
3. Escoger un diámetro de ventilador, y a partir de su área, determinar el caudal necesario.
4. Dado que se sabe que la distribución de velocidad en el interior de la cavidad de secado será menor a la velocidad a la entrada de la cavidad (velocidad del ventilador) se impondrá como velocidad de entrada 3.5 m/s en cada una de las alternativas.
5. Se debe ejecutar una primera simulación, para las tres alternativas de solución, manteniendo la velocidad y temperatura al mismo valor, 3.5 m/s y 55°C respectivamente.
6. Mediante los resultados de la simulación observar cómo se distribuye la velocidad en la vecindad de las bandejas, y con esto determinar un factor de corrección por el cual multiplicar la velocidad de entrada, de forma que la velocidad en la vecindad de las bandejas se encuentre entre 1 y 2.5 m/s.
7. Con los factores de corrección, modificar la velocidad a la entrada de la cavidad y simular, posteriormente verificar que la velocidad en la vecindad de las bandejas se encuentre en el rango anteriormente mencionado.
8. Fijando el tiempo de secado en 8 horas, calcular el caudal necesario para cada alternativa, al variar la temperatura de secado.

### **2.11.2 Metodología para la simulación**

Es de interés concluir acerca de la alternativa con mejor distribución de velocidad y temperatura en su interior. Para poder vincular ambas variables mediante un solo parámetro es necesario calcular el coeficiente convectivo de transferencia de calor. Dado que las simulaciones se harán en estado estable, es necesario dar como condición de borde a las bandejas de cacao, el modelo de convección, donde el programa requiere un coeficiente de transferencia de calor y la temperatura en corriente libre.

Para el cálculo de coeficiente de transferencia de calor, se asumió que las bandejas al llenarse de cacao en una capa fina se comportan como una placa plana, por tanto, se realizan los cálculos de este modelo, para hallar el coeficiente convectivo, considerando velocidad constante en la cavidad.

En esta sección se describirá de forma generalizada el proceso de iteración que se siguió para obtener los contornos de velocidad y temperatura de la cavidad, magnitud de la velocidad promedio en el dominio, temperatura en la superficie de las bandejas, y coeficiente de transferencia de calor en superficie. Las selecciones específicas de cada parámetro se mostrarán en el capítulo 3.

Se hizo dos simulaciones en estado estable para cada alternativa evaluada. La primera iteración fue para hallar la velocidad promedio en el interior de la cavidad, y la segunda, para determinar los demás resultados. Los pasos descritos a continuación consideran únicamente el módulo de Setup de Ansys Fluent.

### **Primera simulación**

1. Se ejecuta una primera simulación, donde los parámetros más importantes a configurar serán la temperatura y velocidad de cada alternativa de solución.
2. De la solución de la primera iteración, en los reportes de resultados, en la opción de integrales de superficie, nos ubicamos en la opción de promedio ponderado del área (Area weighted average) y seleccionamos medir la velocidad promedio en el dominio.
3. Se calcula el coeficiente convectivo asumiendo el modelo de placa plana para las bandejas con cacao.

### **Segunda simulación**

4. En condiciones de borde se trata a las placas como paredes, cuyo fenómeno térmico es de convección, y se ingresa la temperatura de corriente libre y el coeficiente convectivo hallado en el paso 3.

5. Se ejecutan los cálculos en Ansys Fluent y mediante los reportes por promedio ponderado del área se obtienen las temperaturas y el coeficiente convectivo de superficie en cada bandeja.

## 2.12 Memoria de Cálculo

### 2.12.1 Caracterización del grano de cacao

Para simplificar el cálculo del área requerida, se aproximó la proyección de la geometría del grano de cacao a una forma rectangular con una altura de 25 mm y de ancho de 12 mm con peso de 1,3 g.

### 2.12.2 Cálculo del área de las bandejas

Considerando las dimensiones del grano del cacao en forma rectangular y con las medidas con referencia de la tabla 1-1, se determina el área necesaria para las bandejas a partir de las siguientes ecuaciones:

#### Número de granos

$$granos_{total} = m_{prod} * w \quad (2.1)$$

Sea:

$granos_{total}$ : Cantidad total de granos de cacao.

$m_{prod}$ : Masa total de granos de cacao húmedos [kg]

w: Masa de un grano de cacao húmedo. [g]

#### Área del grano de cacao

Por geometría, se calcula el área de un grano de cacao, aproximando al área de un rectángulo que es el producto de la base por la altura.

$$A_{grano} = b * a \quad (2.2)$$

### **Área mínima necesaria para colocar cacao distribuidos en una sola capa**

Se pretende colocar los granos de cacao de forma que, al estar tendidos, no se encuentren amontonados ni formando capas unos sobre otros, para lo cual el área requerida de las bandejas es la multiplicación de la cantidad de granos para tener 50kg por el área de cada grano.

$$A_{necesaria} = granos_{total} * A_{grano} \quad (2.3)$$

### **Cálculo del área útil de la bandeja**

Como se presentó en las alternativas de solución, se diseñó 3 bandejas, una cuadrada completamente sólida, una bandeja perforada y una bandeja mallada. En estas dos últimas se colocó un agujero en el centro, con diámetro 25 cm, lo cual restará el área útil para colocar cacao, por tanto, para comprobar que las bandejas cuentan con la suficiente área, se muestra el cálculo a continuación.

$$A_b = base_{ban} * Altura_{ban} - (\pi r^2) \quad (2.4)$$

### **2.12.3 Cálculos de ganancia de calor en la cámara, transferencia de masa y calor.**

Zamorodian [19], establece que la energía necesaria para secar una masa húmeda se obtiene a partir de la sumatoria de las pérdidas de energía por paredes, consumo energético para elevar la temperatura del interior de la cámara hasta la temperatura de operación, energía para evaporar el agua de la masa húmeda y energía vinculada a la renovación de aire, el cual ingresa al equipo con una temperatura baja, que se debe elevar rápidamente para alcanzar la temperatura de operación del secador.

El autor enuncia que el calor total necesario para secar la masa húmeda se calcula mediante de suma de 6 calores. Para nuestro modelo matemático omitiremos los calores relacionados con las pérdidas del sistema, esto debido a que, durante la simulación, se consideró el caso donde las paredes son adiabáticas, por lo tanto, no existe pérdidas hacia el exterior de la cavidad de secado.

$$Q_T = \sum Q_{1-4} \quad (2.5)$$

### Calentamiento inicial del equipo

Puesto que la masa que ingresa al equipo de secado se encuentra a temperatura ambiente, será necesario elevar primero su temperatura hasta la temperatura de operación, la energía necesaria para esto se describe como:

$$Q_1 = m_{prod} * x_{inicial} * C_{P,prod} (T_{a,c} - T_a) \quad (2.6)$$

En el cálculo del calor necesario para el calentamiento inicial del equipo se presenta el calor específico del producto, en este caso cacao, y se refiere a la capacidad del material para almacenar energía térmica.

Kamenan, Ekoun y Gbaha [20] presentan una ecuación para calcular el calor específico del cacao en función de las humedades iniciales y finales, como se muestra.

$$C_{P,prod} = 2623.35 \left( \frac{x_{final}}{x_{inicial}} \right)^{0.33} \left[ \frac{J}{Kg \cdot K} \right] \quad (2.7)$$

Donde:

$x_{inicial}$  : Humedad inicial del grano de cacao

$C_{P,prod}$  : Calor específico del grano de cacao  $[\frac{J}{Kg \cdot K}]$

$T_{a,c}$  : Temperatura de aire caliente [°C]

$T_a$  : Temperatura inicial (ambiente) [°C]

$x_{final}$ : humedad inicial del grano de cacao

### **Calor necesario para elevar la temperatura del aire en el interior**

De manera similar al calor anterior, esta es la energía necesaria para elevar la temperatura del aire desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación.

$$Q_2 = V_{aire} * \rho_{aire} * C_{P,aire} * (T_{a,c} - T_a) \quad (2.8)$$

Donde:

$V_{aire}$ : Volumen del aire [ $m^3$ ]

$\rho_{aire}$ : Densidad del aire  $[\frac{kg}{m^3}]$

$C_{P,aire}$ : Calor específico del aire  $[\frac{kcal}{kg * ^\circ C}]$

### **Calor necesario para la evaporación del agua**

El cálculo de la energía requerida para evaporar la masa de agua del grano de cacao es nuestro punto principal de enfoque, puesto que este calor está vinculado directamente con el proceso de secado, ya que el resultado es la cantidad de energía que se debe aportar para disminuir la humedad desde 50% hasta 7%. Para determinar el calor requerido, se debe primero calcular la masa de agua a secar, que depende de la humedad inicial y final, como se muestra a continuación:

$$m_w = \frac{m_{prod}(x_{inicial} - x_{final})}{(1 - x_{final})} \quad (2.9)$$

A partir de la masa de agua que se debe evaporar y utilizando el concepto de calor latente de vaporización, calculamos el calor requerido.

$$Q_3 = m_w * l \quad (2.10)$$

Donde:

$m_w$ : Masa de agua que se requiere evaporar [Kg]

$l$ : Calor latente de vaporización del agua [ $\frac{kcal}{kg}$ ]

### **Calor necesario para la recirculación de aire**

El aire que ingresa a la cámara con una humedad relativa que depende de las condiciones ambientales, al estar en contacto con el cacao se satura y sale de la cavidad de secado, es decir, este aire se renueva constantemente, y el nuevo aire frío pasará a través de las resistencias eléctricas, elevando así su temperatura.

$$Q_4 = m_{prod} * (x_{inicial} - x_{final}) * C_{P,aire} (T_{a,c} - T_a) \quad (2.11)$$

#### **2.12.4 Cálculos para el dimensionamiento de los ventiladores**

Habiendo calculado el calor total que se requiere para el secado del grano de cacao, podemos realizar un balance de energía, igualando la transferencia de calor total con la ecuación de calor sensible del aire, para despejar la masa y obtener los kilogramos de aire que deben ingresar a la cámara de secado para lograr nuestro objetivo.

$$Q_T = m_{aire} * C_{P,aire} * (T_{a,c} - T_a) \quad (2.12)$$

Despejando la masa, tenemos que:

$$m_{aire} = \frac{Q_T}{C_{P,aire} * (T_{a,c} - T_a)} \quad (2.13)$$

De las ilustraciones 2-3 y 2-4 podemos concluir que un tiempo óptimo para el secado de cacao se encuentra entre 7 y 9 horas de secado por convección forzada, tomamos un tiempo promedio de 8 horas, para calcular el flujo másico de aire.

$$\dot{m}_a = \frac{m_{aire}}{t * 3600} \quad (2.13)$$

Donde:

t: Tiempo de secado [horas]

Se obtiene también el caudal de aire necesario para el requerimiento, dividiendo el flujo másico para la densidad del fluido (aire).

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{m}_a}{\rho_{aire}} \quad (2.14)$$

Donde:

$\dot{V}_a$ : Caudal total de aire necesario para el secado [ $\frac{m^3}{s}$ ]

Dado que la cantidad de ventiladores varía de acuerdo con la alternativa de solución propuesta, para el caso que corresponda, se requiere hallar el caudal de cada ventilador, en función del caudal total necesario.

$$V_{individual} = \frac{\dot{V}_a}{n} \quad (2.15)$$

Sea:

$V_{individual}$ : Caudal de aire por ventilador, necesario para el secado [ $\frac{m^3}{s}$ ]



$n$ : Número de ventiladores

Finalmente, es requerimiento del Software ANSYS Fluent determinar la velocidad del flujo a través de la entrada, por tanto, se requiere hallar la velocidad en cada ventilador. Se decidió diseñar para un ventilador de 25 cm de diámetro, y su área se calcula mediante la ecuación:

$$A = \pi r^2 \quad (2.16)$$

Sea:

A: Área del ventilador [ $m^2$ ]

r: Radio del ventilador [m]

Por último, se obtiene la velocidad del ventilador a partir de la fórmula de caudal, despejando para la incógnita de velocidad.

$$\dot{V}_{\text{individual}} = V * A \quad (2.17)$$

$$V = \frac{\dot{V}_{\text{individual}}}{A} \quad (2.18)$$

Con esto finalmente se obtiene la velocidad del flujo de aire a través de los ventiladores, valor necesario para ajustar las condiciones de entrada del fluido.

### **2.12.5 Cálculo del coeficiente Convectivo de transferencia de calor para placa plana.**

El flujo paralelo de un fluido sobre una placa plana el fluido va aproximándose a la placa con una temperatura del aire y una velocidad constante, el flujo del fluido al inicio va como laminar después de cierto tiempo y distancia el flujo se vuelve turbulento el lapso donde el flujo pasa de laminar a turbulento se llama zona de transición con el número de Reynolds crítico se puede determinar si el régimen está en zona laminar o turbulenta

este valor es de  $Re_{cr} = 5 \times 10^5$ , para el cálculo de coeficiente de transferencia de calor para una placa plana se puede obtener de la siguiente ecuación :

- Coeficiente de transferencia de calor por convección

$$h = \frac{Nu * k}{L} \quad (2.19)$$

El número de Nusselt para una placa se determina de la siguiente manera y condiciones

Régimen laminar:

- Nusselt

$$Nu = 0.664 * Re_L^{0.5} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{donde: } Re_L < 5 \times 10^5, Pr > 0.6 \quad (2.20)$$

Régimen Turbulento:

$$Nu = 0.037 * Re_L^{0.8} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{donde: } 5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7; 0.6 \leq Pr \leq 60 \quad (2.21)$$

Ecuación para el cálculo de numero Reynolds

- Numero de Reynolds

$$Re_L = \frac{V * L}{\nu} \quad (2.22)$$

Este coeficiente de convección va a depender de algunos parámetros relacionado a la dinámica del movimiento del fluido de la transferencia por convección entre los cuales están la velocidad del fluido, la temperatura del fluido, régimen del fluido (laminar, transición, turbulento), densidad del fluido, conductiva termina del fluido, calor específico del fluido, coeficiente de dilatación del fluido, la rugosidad de la superficie, entre otros.

### 2.12.6 Cálculo de la razón de transferencia de calor

Flujo de calor entre una superficie y un fluido en este caso el aire

$$Q = h * A(T_S - T_{\infty}) \quad (2.23)$$

Donde:

$Nu$ : Número de Nusselt

$Re_L$ : Número de Reynolds

$V$ : Velocidad del fluido [ $\frac{m}{s}$ ]

$L$ : Longitud de la placa plana [m]

$\nu$ : Viscosidad cinemática [ $\frac{m^2}{s}$ ]

$k$ : Conductividad térmica del fluido [W/ m K]

$h$ : coeficiente de transferencia de calor por convección [W/  $m^2K$ ] (superficie-aire)

$A$ : Área superficial [ $m^2$ ]

$T_S$ : Temperatura de superficie placa plana [°C]

$T_{\infty}$  : Temperatura del fluido suficientemente alejado de la superficie (Aire) [°C]

## 2.13 Proceso de simulación en Ansys Fluent

### 2.13.1 Modelos físicos ecuaciones de conservación involucradas

Este estudio se realizó usando el software Ansys Fluent el cual utiliza distintos modelos matemáticos implicados en la solución de problemas físicos. Las simulaciones se rigen por las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía interna por medio de método de volumen finito para dinámica de fluidos.

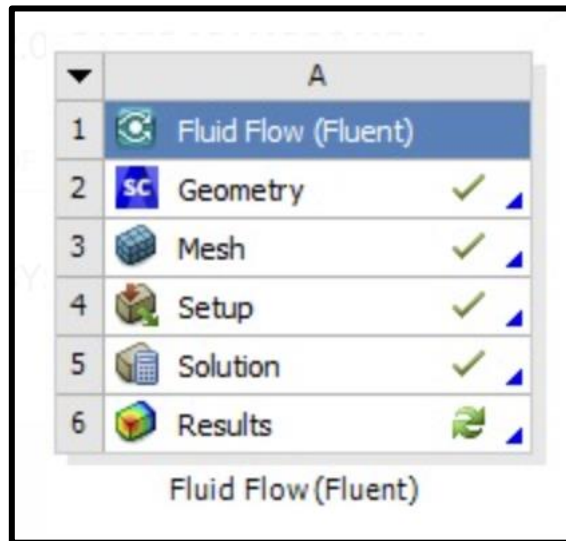
**Tabla 2.1 Ecuaciones de conservación utilizadas para método de Volumen finitos**

Ecuación conservativa	Modelo Matemático
Masa	$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu_i)}{\partial x_i} = 0$
Momentum-x	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x_j} \right) + F_x + S_x$
Momentum-y	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j v)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x_j} \right) + F_y + S_y$
Momentum-z	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j w)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) + F_z + S_z$
Energía interna	$\frac{\partial(\rho e_{int})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j e_{int})}{\partial x_j} = -P \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \Phi + S_E$
Especies Químicas k	$\frac{\partial(\rho C_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j C_k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D \frac{\partial C_k}{\partial x_j} \right) + S_k$

En la tabla 2-1 se presentan de forma conservativa, el sistema de ecuaciones diferenciales en tres dimensiones y dependiente del tiempo, para un fluido Newtoniano y compresible. Las ecuaciones de la tabla forman el conjunto de ecuaciones diferenciales parciales para la solución de flujo de fluidos, transferencia de calor y masa. [21]

### 2.13.2 Flujo de procesos para la simulación

Para la simulación en el módulo de ANSYS Fluent, se tiene una ventana con 5 procesos, los cuales permiten dar todos los parámetros necesarios para llevar el fenómeno físico hacia la simulación por CFD.



**Figura 2.8 Módulos de Ansys Fluent**

1. Se ingresa al módulo **Geometry** en el cual se abre la herramienta SpaceClaim de Ansys, para importar nuestra geometría bidimensional.
2. En el módulo **Mesh** se debe nombrar a las entradas, salidas, las paredes y el dominio del fluido, seguidamente se debe ajustar las condiciones del mallado. Dada la simplicidad de nuestra geometría, se dejó los valores del mallado por defecto, modificando únicamente el tamaño de los elementos, para que sea de 7 mm, de forma que Ansys asignó elementos prismáticos para la malla.
3. Se midió la calidad de la malla en base a las métricas de calidad ortogonal, y asimetría, tomando en consideración que, para la primera en mención, el valor debe estar entre 0.5 y 1, donde un valor cercano a 1 indica un mejor mallado, y para la segunda métrica, este valor debe ser entre 0 y 0.25 para asegurar un mallado óptimo, donde valores cercanos a 0 son preferibles.
4. El módulo **Setup** es aquel donde se establecen todas las condiciones de simulación. Primero, se define al fenómeno como estado estable. Se seleccionó el modelo de viscosidad K-epsilon y se activó el modelo de energía, también se configuran las condiciones en el interior, y se asigna velocidad y temperatura a la entrada, temperatura del dominio y presión a la salida. Además, se crean monitores de convergencia, contornos de velocidad y temperatura, que se abordarán a detalle en el capítulo 3.

5. En el módulo **Results** se puede obtener las gráficas de velocidad y temperatura, además que nos permite conocer el comportamiento de las variables de interés en cada elemento del mallado, y también obtener los promedios ponderados de área, útiles para calcular promedios de variables en secciones definidas.

# CAPÍTULO 3

## RESULTADOS

Durante el desarrollo de este documento se han expuesto los modelos matemáticos que aplican para el análisis de fenómenos físicos mediante volúmenes finitos. Esta tecnología surge de la necesidad de implementar métodos para desarrollo de equipos que eviten la construcción de múltiples prototipos. Como veremos a continuación, a través del modelado de geometrías y fenómenos físicos podemos tener una representación muy fiel a la realidad, con lo cual podemos sacar conclusiones previas a la elaboración de un prototipo. Esto impacta directamente sobre el costo de los equipos, ya que la simulación supone un ahorro para los fabricantes, desde el punto de vista de la inversión en Investigación y Desarrollo.

En este capítulo se expondrán los parámetros de simulación, mallado utilizado, y las iteraciones y correcciones que se implementaron en los diseños, para conseguir una distribución uniforme de temperatura.

### 3.1 Resultados de cálculos

El desarrollo de ejemplo de las ecuaciones expuestas en el capítulo 2 se encuentra en el apéndice C. A continuación, se mostrarán los resultados.

**Tabla 3.1 Datos de las características físicas del cacao.**

Datos	Valor	Unidades
Altura	25	mm
Base	12	mm
$m_{prod}$	50	kg
$peso_{grano}$	1.3	g

**Tabla 3.2 resultados para área requerida para bandeja**

Datos	Valores	Unidades
Numero de granos total	38462	-
Área del grano de cacao	0.0003	$\left[\frac{m^2}{grano}\right]$
Área necesaria	11.54	$m^2$
Área de la bandeja	11.679	$m^2$

## Resultados y Tablas de ganancia de calor en la cámara, transferencia de masa y calor

### Valores conocidos

La humedad inicial del cacao es del 50% al final del proceso de fermentación, y por normativa se requiere una humedad de hasta 7% el grano seco. Se toma una temperatura del aire como un promedio de las temperaturas durante la estación seca, y se define el tiempo de secado en 8 horas, lo cual es recomendado para preservar las propiedades de la almendra. Las demás variables conocidas se resumen en la tabla3-2.

**Tabla 3.3 Variables conocidas**

Parámetro	Variable	Valor
Masa del producto	$m_{prod}$	50 kg
Porcentaje de humedad inicial	$x_{inicial}$	50 %
Porcentaje de humedad final	$x_{final}$	7%
Temperatura del aire ambiental	$T_a$	26.225 °C
Temperatura del aire caliente	$T_{a,c}$	55°C, 50°C, 45°C, 40°C
Calor específico del aire a 26°C y 50% de HR	$C_{p,aire}$	$0.24 \frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C}$
Densidad del aire	$\rho_{aire}$	$1.17 \frac{kg}{m^3}$
Calor latente de vaporización del agua	$l$	$540 \frac{kcal}{kg}$
Tiempo de secado	$t$	8 h, 28800 s



**Tabla 3.4 Resultados de datos necesarios para cálculos de calor y dimensionamiento de ventiladores.**

Parámetro	Variable	Valor
Calor específico del cacao	$C_{p,prod}$	$0.328 \frac{kcal}{kg * ^\circ C}$
Masa de agua del cacao	$m_w$	23.12 kg
Caudal de aire para el caso de 2 ventiladores	$V_{individual}$	$0.028 \frac{m^3}{s}$
Área el ventilador	A	0.049 m <sup>2</sup>

### **Factores de multiplicación para la velocidad de entrada**

Como se describió en capítulos anteriores, el proceso de diseño por simulación es un proceso iterativo en el cual se pueden modificar las variables de estado, de forma que los resultados sean acordes con lo requerido para nuestro diseño. Durante una primera iteración, se simuló la alternativa 1, para una temperatura de 55°C y una velocidad de ventilador de 1.14 m/s en la entrada. En el análisis de resultados se observó que la distribución de temperatura en la cavidad era casi uniforme, sin embargo, las velocidades en la vecindad de las bandejas eran muy bajas, lo cual implicaría un coeficiente convectivo bajo. De la revisión literaria se obtuvo que las velocidades deseadas para el secado deben ser entre 1 m/s y 2.5 m/s. Para lograr conseguir una mayor velocidad en el interior de la cámara, se debe aumentar la velocidad a la entrada, y para determinar la razón en que se debería aumentar dicha velocidad, se realizó una simulación para cada alternativa, con temperatura de 55°C y velocidad 3.5 m/s. En los resultados, se midió la velocidad de 10 puntos en la vecindad de las bandejas, se sacó un promedio de la velocidad y se dividió la velocidad de entrada sobre el promedio de velocidad en las bandejas, para obtener un factor de corrección que nos permitiera obtener la velocidad necesaria a la entrada, para conseguir velocidades entre 1 y 2.5 m/s en el interior de la cámara de secado.

**Tabla 3.5 Factores de corrección de velocidad por alternativa.**

Alternativas	Factor de corrección
Ventiladores traseros	3.18
Ventiladores superiores	2.5
Ventiladores inferiores	2.97

**Tabla 3.6 Resultados de los cálculos a distintas temperaturas**

Resultado de calores y velocidades a distintas temperaturas					
Variables	Unidades	Temperaturas [ grados C]			
		55.00	50.00	45.00	40.00
$Q_1$	<i>kcal</i>	236	195	154	113
$Q_2$	<i>kcal</i>	13	11	8	6
$Q_3$	<i>kcal</i>	12484	12484	12484	12484
$Q_4$	<i>kcal</i>	148	123	97	71
$Q_T$	<i>kcal</i>	12881	12812	12743	12674
$m_{aire}$	<i>kg</i>	1865	2245	2828	3834
$\dot{m}_a$	$\frac{kg}{s}$	0.065	0.078	0.098	0.133
$\dot{V}_a$	$\frac{m^3}{s}$	0.055	0.067	0.084	0.114
V	$\frac{m}{s}$	1.13	1.36	1.71	2.32
Vc, ventiladores superiores	$\frac{m}{s}$	2.82	3.39	4.27	5.79
Vc, ventiladores inferiores	$\frac{m}{s}$	3.35	4.04	5.08	6.89
Vc, ventiladores traseros	$\frac{m}{s}$	3.59	4.32	5.44	7.37

De los cálculos expuestos en la tabla 3-7, nuestras variables de interés son las velocidades corregidas (Vc) para cada alternativa y las distintas temperaturas de operación. Estos dos parámetros se colocarán en las condiciones de entrada de aire.

### 3.2 Desarrollo de la metodología de simulación mediante Ansys Fluent.

A continuación, se expone una simulación de ejemplo, para mostrar la configuración del problema para su análisis en CFD. Para cada caso, fue necesario simular dos veces, la

primera vez, para hallar la velocidad promedio en el interior de la cavidad y calcular el coeficiente de transferencia de calor de las bandejas, que fueron consideradas como placas planas, y la segunda vez, para obtener los contornos de velocidad, temperatura del dominio, temperatura de cada bandeja y el coeficiente convectivo de superficie.

Alternativa simulada: Alternativa 3, ventiladores superiores:

Temperatura 55 C, Velocidad 2.82 m/s

## Primera simulación

### Módulo Geometry

Mediante el programa **SpaceClaim**, se importa la geometría bidimensional para análisis, y se prueban las opciones de la ventana **Repair**, en busca de fallos en la geometría, como podrían ser espacios, caras perdidas, filos adicionales o geometrías duplicadas.

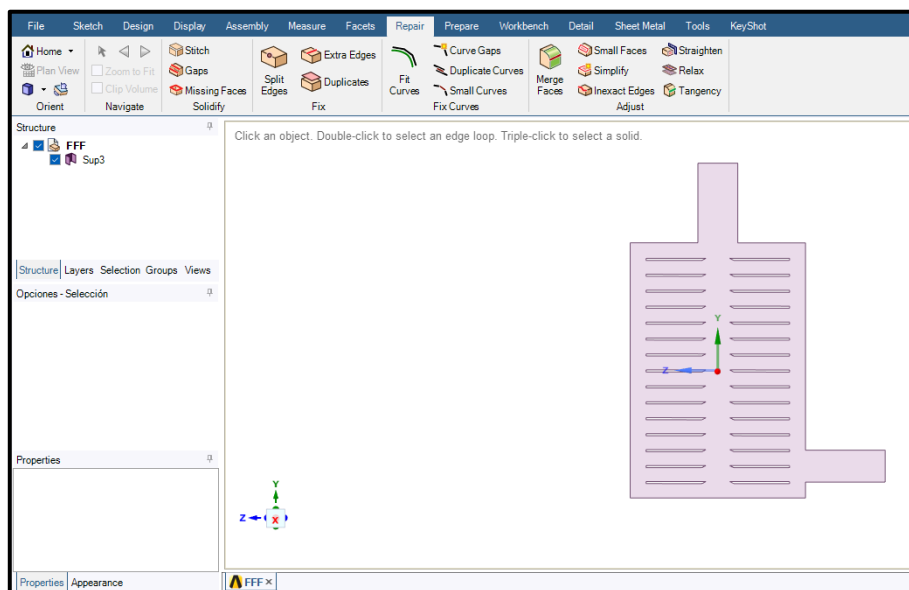


Figura 3.1 Ventana de trabajo de SpaceClaim

## Módulo Mesh

En el módulo de mallado, procederemos a nombrar las entradas, salidas, paredes, dominio y bandejas de la superficie bidimensional, para facilitar su identificación al momento de emitir los resultados de la simulación.

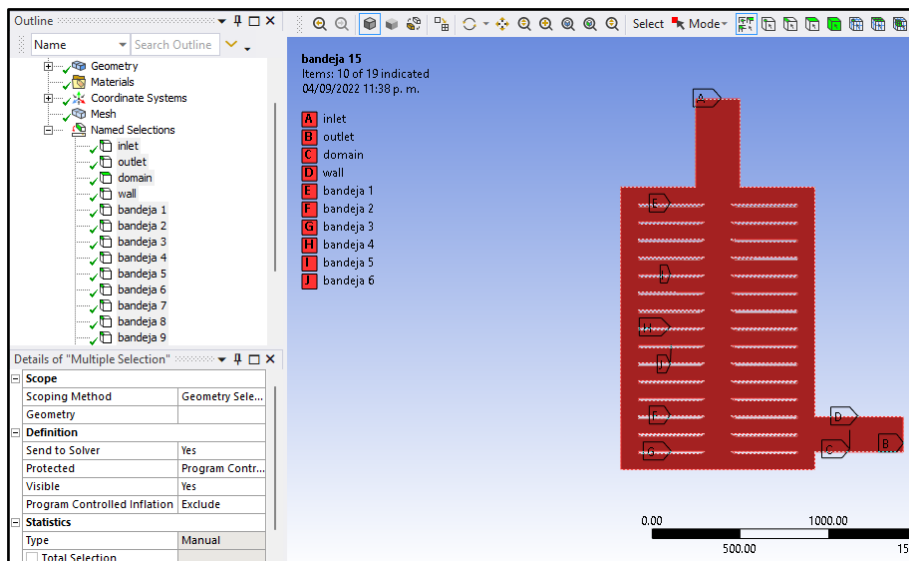


Figura 3.2 Identificación y nombramiento de las superficies de interés.

Lo siguiente configuración será para generar la malla, a través de la opción Mesh. Dada la simplicidad de nuestras geometrías, se optó por mantener las configuraciones predeterminadas para la malla, solo se modificó el parámetro de Element Sizing en 7 mm, que define el tamaño de cada elemento.

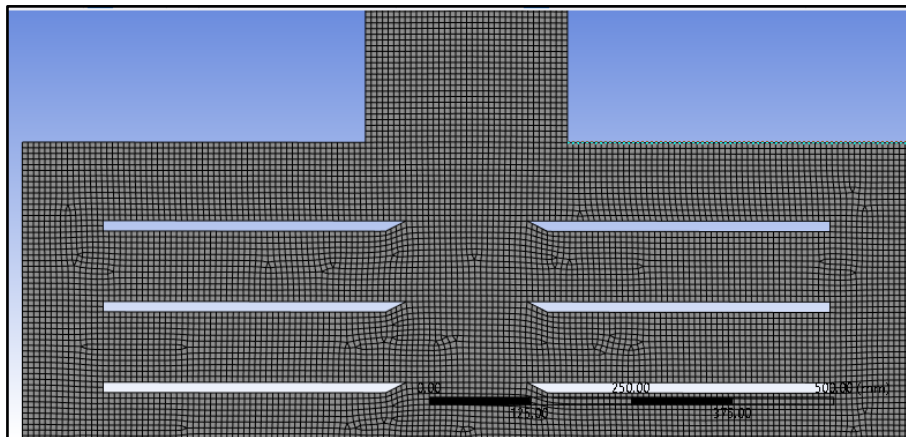


Figura 3.3 Mallado de la cavidad de secado.

Display	
Display Style	Use Geometry ...
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	7.0 mm
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No

Figura 3.4 Configuración del mallado de la cavidad de secado.

Como se indicó en la sección 2.13.2, literal 3; es necesario comprobar la calidad de la malla a través de las métricas **Orthogonal Quality** y **Skewness**.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.9)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Orthogonal... ▾
<input type="checkbox"/> Min	0.87679
<input type="checkbox"/> Max	1.
<input type="checkbox"/> Average	0.99827
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	7.4376e-003

Figura 3.5 Verificación de calidad mediante métrica calidad ortogonal.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.9)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness ▾
<input type="checkbox"/> Min	5.3961e-005
<input type="checkbox"/> Max	0.38457
<input type="checkbox"/> Average	2.0545e-002
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	3.5379e-002

Figura 3.6 Verificación de calidad mediante métrica Skewness.

## Módulo Setup

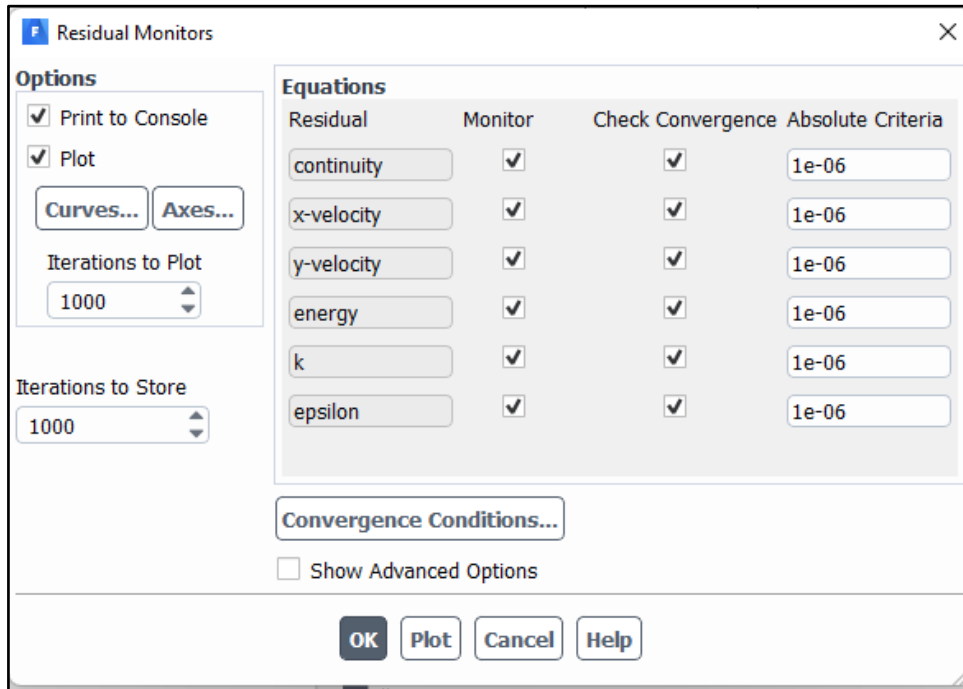
Para las condiciones de simulación, se adaptó al fenómeno de estado estable, se activó el modelo de energía, y se seleccionó al k-epsilon como modelo viscoso, que es recomendado para cuando requerimos analizar el fenómeno físico en el dominio (aire). En la sección de materiales se modificaron las propiedades del aire, para corresponder con la densidad, viscosidad cinemática, número de Prandtl y coeficiente de conductividad térmica, a la temperatura de operación del aire. A continuación, se exponen las propiedades del aire a la temperatura de película, que es el promedio de temperatura entre la bandeja (26.225°C) y la temperatura de corriente libre (55°C)

**Tabla 3.7 Propiedades del aire a la temperatura de película**

Propiedades del aire a T película				
Variables	Temperatura			
	55	50	45	40
Pr	0.7049	0.70546	0.70573	0.70616
Viscosidad	1.74E-05	1.70E-05	1.68E-05	1.65E-05
K	2.74E-02	2.71E-02	2.70E-02	2.67E-02

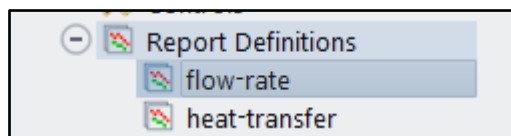
Respecto a las condiciones de borde, se colocó como condiciones a la entrada, una velocidad de 2.82 m/s y una temperatura de 55°C, la inicial del dominio se ajustó a 22°C y la presión a la salida igual a la presión atmosférica.

Para los monitores de convergencia, de forma predeterminada, el criterio utilizado para el cálculo de la energía está configurado para un residual de 1e-06, y se optó por tomar este valor para los demás parámetros, dado que mientras menor sea el residual, menor es el error asociado al cálculo de cada parámetro.



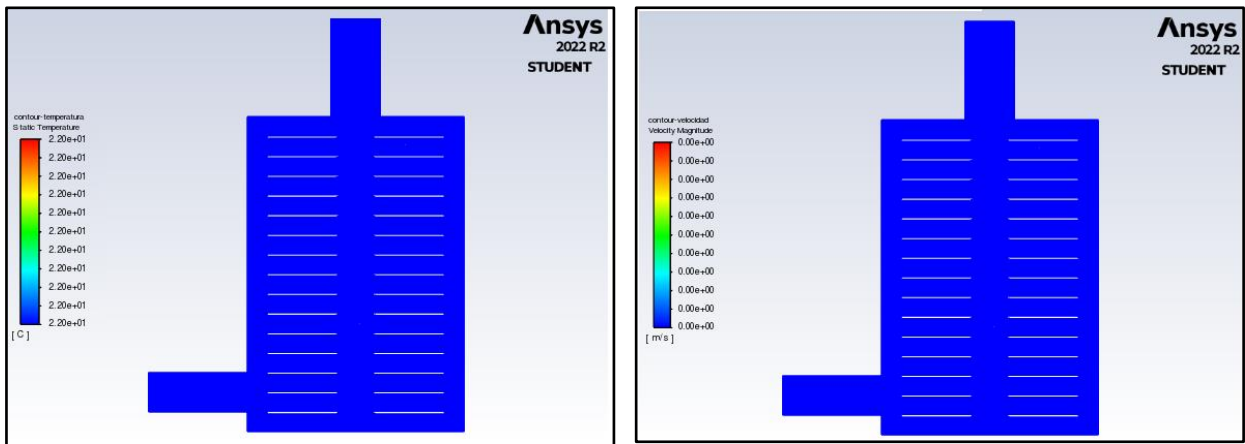
**Figura 3.7 Configuración de los monitores de residuales.**

Se utilizó también reportes de transferencia de calor y flujo másico entre la entrada y salida del sistema. Por ley de conservación de masa, se debe demostrar en los gráficos que la diferencia entre estos dos es de 0.



**Figura 3.8 Reportes de variables de interés.**

Finalmente, es de nuestro interés el gráfico de contornos de velocidad y temperatura, por lo cual se indicó al sistema el registro de estos parámetros.



**Figura 3.9 Configuración de los contornos de velocidad y temperatura**

Con este último punto, debemos inicializar el sistema a través de la opción **Initialization**, donde se computó las variables desde todas las zonas, y se parchó la temperatura, para indicar que el interior de la cavidad estará inicialmente a una temperatura de 22°C.



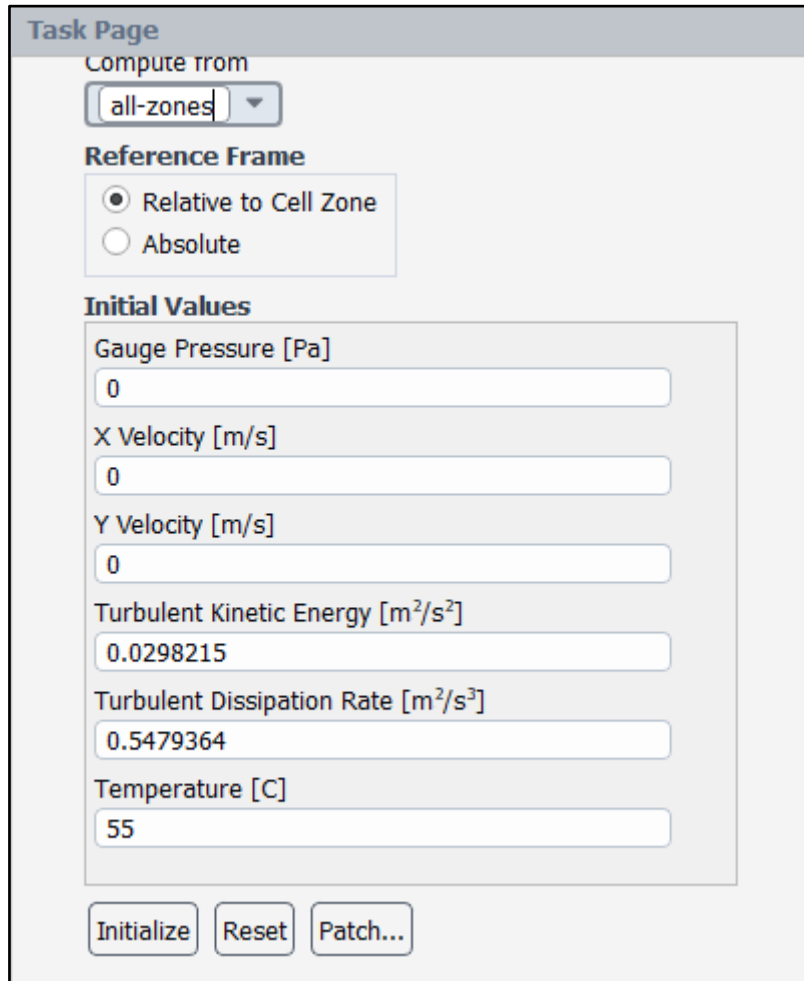


Figura 3.10 Configuración de la ventana de inicialización.

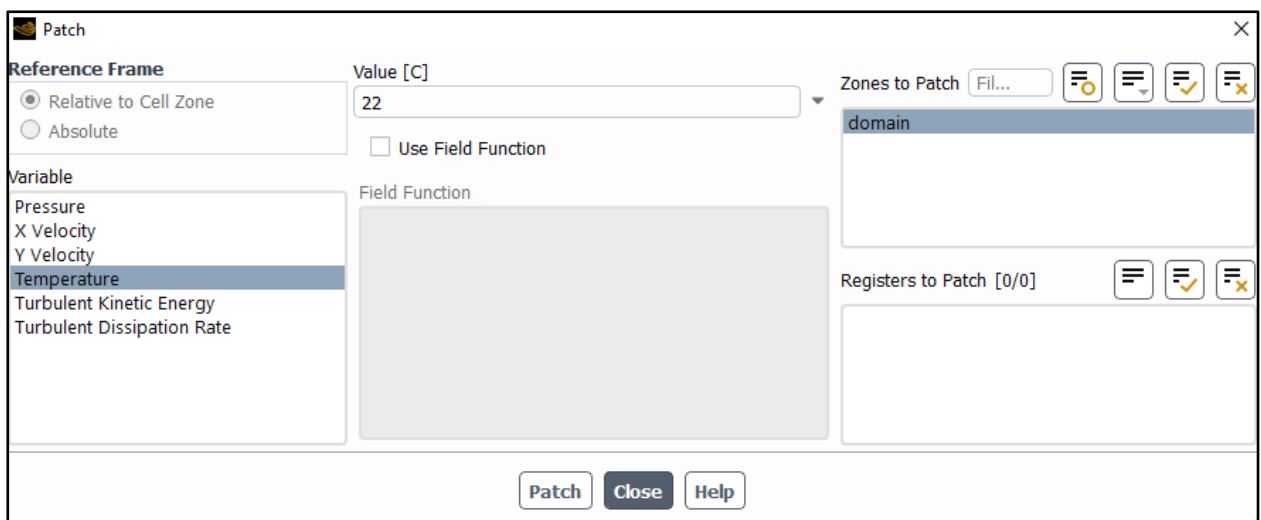


Figura 3.11 Parche de la temperatura del dominio.

Finalmente, en la ventana de cálculos se indicó realizar la simulación para 1000 iteraciones, y se observó que el sistema convergió antes de lo indicado, aproximadamente a las 450 iteraciones.

### Módulo de solución

En este módulo se generó el reporte del promedio ponderado del área para el dominio de la cavidad, con el cual se obtuvo la velocidad promedio del aire, necesario para calcular un coeficiente de transferencia de calor teórico para las bandejas.

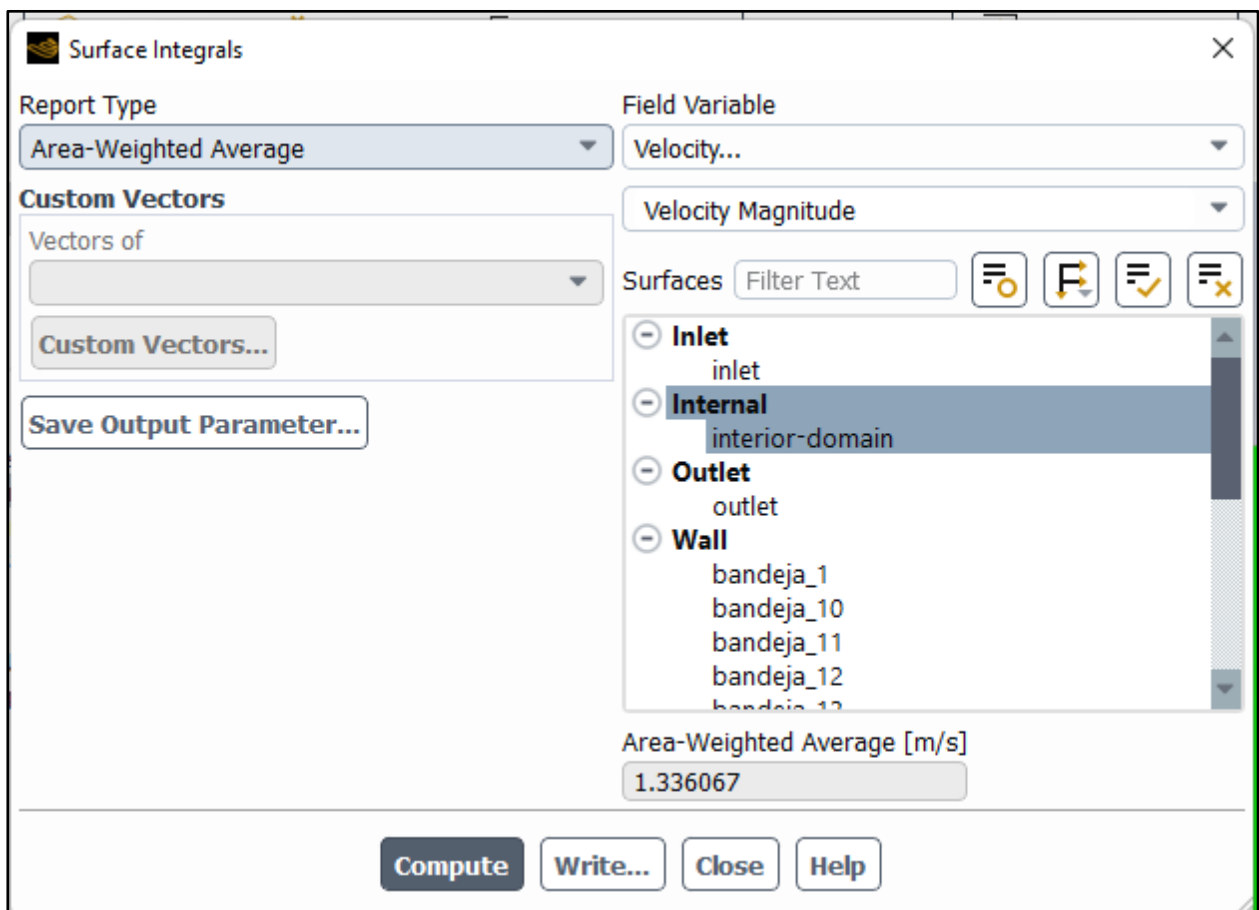


Figura 3.12 Promedio ponderado del área para la velocidad en el dominio de la cavidad.

**Tabla 3.8 Velocidades promedio del aire para cada alternativa, a distintas temperaturas.**

Velocidad promedio a distintas temperaturas				
Alternativas evaluadas	Temperaturas de operación			
	T=55°C	T=50°C	T=45°C	T=40°C
Alternativa 1, ventiladores traseros	1.95	2.34	2.95	4.66
Alternativa 2, ventiladores inferiores	1.47	1.76	2.24	3.03
Alternativa 3, ventiladores superiores	1.33	1.59	2.08	2.73

Este valor de velocidad para cada alternativa se utilizó para calcular el coeficiente convectivo de las bandejas en cada simulación, y sus resultados se muestran a continuación. Además, se calculó la tasa de transferencia de calor, considerando el área de la bandeja y la diferencia de temperatura.

**Tabla 3.9 Cálculo de coeficiente de transferencia de calor de las bandejas, alternativa 1.**

Cálculos de coeficiente convectivo de bandejas				
Variables	Alternativa 1 (v. traseros)			
	55	50	45	40
Reynolds	1.01E+05	1.24E+05	1.58E+05	2.54E+05
Nusselt	187.68	207.92	234.96	298.17
Coeficiente convectivo	5.72	6.26	7.04	8.86
Q	133.23	120.63	107.06	98.86

**Tabla 3.10 Cálculo de coeficiente de transferencia de calor de las bandejas, alternativa 2.**

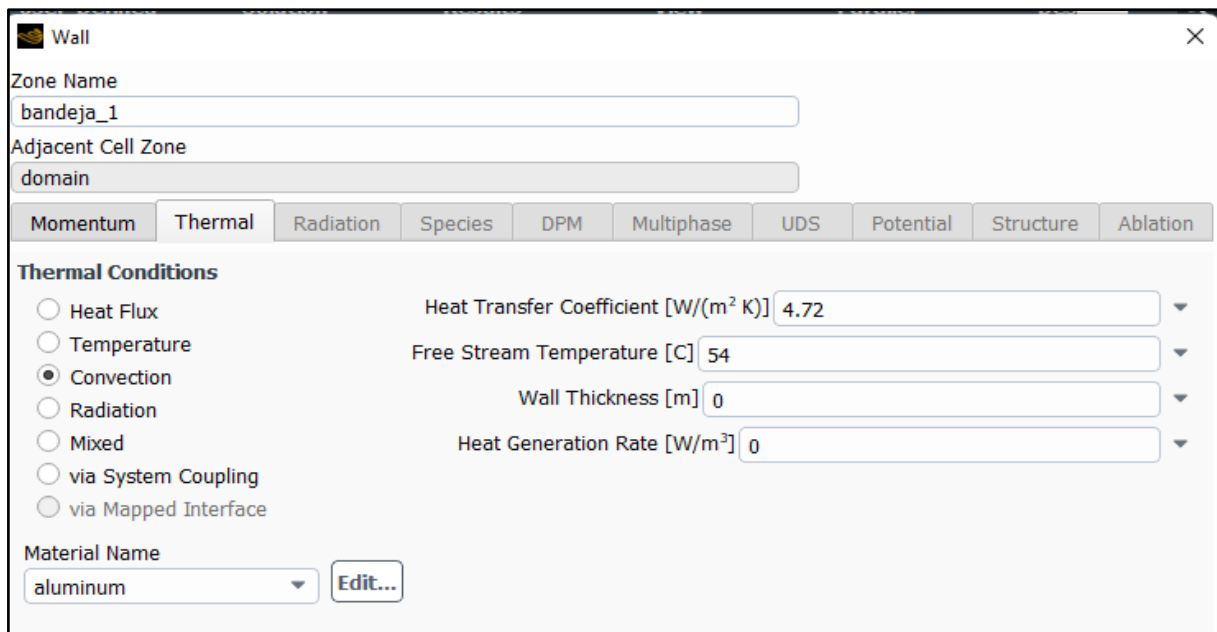
Cálculos de coeficiente convectivo de bandejas				
Variables	Alternativa 2 (v. inferiores)			
	55	50	45	40
Reynolds	7.61E+04	9.30E+04	1.20E+05	1.65E+05
Nusselt	163.01	180.24	204.82	240.43
Coeficiente convectivo	4.96	5.43	6.14	7.14
Q	115.71	104.57	93.33	79.72

**Tabla 3.11 Cálculo de coeficiente de transferencia de calor de las bandejas, alternativa 3.**

Cálculos de coeficiente convectivo de bandejas				
Variables	Alternativa 3 (v. superiores)			
	55	50	45	40
Reynolds	6.88E+04	8.42E+04	1.11E+05	1.49E+05
Nusselt	155.00	171.51	197.37	228.22
Coeficiente convectivo	4.72	5.17	5.91	6.78
Q	110.03	99.51	89.93	75.67

### Segunda simulación

Con los resultados de los coeficientes convectivos para cada alternativa, seguiremos el mismo procedimiento mencionado, con la diferencia que se configuró las condiciones de borde de cada bandeja, indicando como condiciones térmicas, el fenómeno de convección, cuyas variables necesarias para su definición son el coeficiente de transferencia de calor (coeficiente convectivo de las bandejas) y la temperatura de corriente libre.



**Figura 3.13 Configuración de las condiciones térmicas de la bandeja 1.**

Ejecutamos la simulación, y en la sección de reportes, obtenemos el promedio ponderado del área, respecto a las variables de temperatura y coeficiente de transferencia de calor en la superficie, para cada bandeja.

Area-Weighted Average Static Temperature	[C]
bandeja_1	54.777957
bandeja_10	54.599933
bandeja_11	54.60979
bandeja_12	54.638023
bandeja_13	54.679652
bandeja_14	54.706625
bandeja_15	54.720864
bandeja_2	54.490015
bandeja_3	54.573512
bandeja_4	54.616077
bandeja_5	54.631446
bandeja_6	54.633764
bandeja_7	54.619237
bandeja_8	54.606857
bandeja_9	54.600945
Net	54.633646

Figura 3.14 Promedio de temperatura por cada bandeja.

Area-Weighted Average Surface Heat Transfer Coef.	[W/ (m <sup>2</sup> K) ]
bandeja_1	16.826256
bandeja_10	8.1531413
bandeja_11	8.4233982
bandeja_12	9.4768693
bandeja_13	12.381163
bandeja_14	15.640633
bandeja_15	14.745193
bandeja_2	4.8904734
bandeja_3	7.0142928
bandeja_4	8.5255059
bandeja_5	9.2167123
bandeja_6	9.2416442
bandeja_7	8.7873089
bandeja_8	8.4154739
bandeja_9	8.2149819
Net	9.9968698

Figura 3.15 Promedio del C. de transferencia de calor de superficie, por bandeja.

## Módulo Results

Después de ejecutar las dos simulaciones mencionadas anteriormente, en el módulo de resultados procedemos a obtener los contornos de velocidad y temperatura, cuyos resultados para cada alternativa se encuentran en el apéndice D.

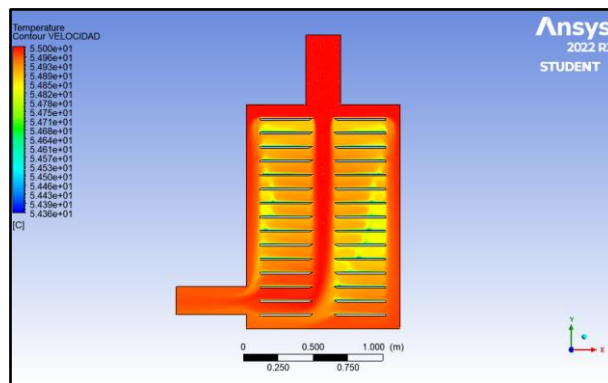


Figura 3.16 Contorno de temperaturas, alternativa 3.

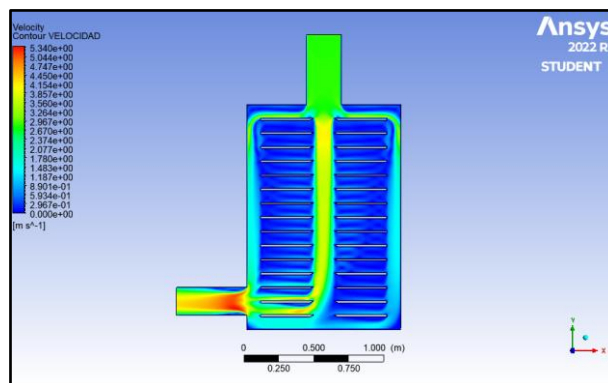


Figura 3.17 Contorno de velocidades, alternativa 3.

En la siguiente sección se expondrán los resultados de las simulaciones, así como el promedio de la variable de interés, desviación estándar y coeficiente de variación.

Sea:

$\bar{X}$ : Valor promedio de la variable de interés

$\sigma$ : Desviación estándar de la variable de interés

$cv$ : Coeficiente de variación de la variable de interés

### 3.3 Resultados de la temperatura y coeficiente convectivo, para las alternativas 1, 2 y 3

**Tabla 3.12 Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de la temperatura para cada alternativa, a distintas condiciones de operación.**

Resultados del promedio de temperatura por bandeja (°C)												
Bandeja	Alternativa 1				Alternativa 2				Alternativa 3			
	T 55 V 3.59	T 50 V 4.32	T 45 V 5.44	T 40 V 7.37	T 55 V 3.35	T 50 V 4.0	T 45 V 5.08	T 40 V 6.89	T 55 V 2.82	T 50 V 3.39	T 45 V 4.27	T 40 V 5.79
1	54.17	49.23	44.24	39.32	54.00	48.52	43.75	39.25	54.78	49.78	44.80	39.98
2	54.34	49.44	44.48	39.58	54.28	49.27	44.36	39.42	54.49	49.49	44.64	39.86
3	54.42	49.47	44.48	39.51	54.24	49.24	44.33	39.39	54.57	49.58	44.64	39.84
4	54.51	49.52	44.53	39.53	54.26	49.23	44.32	39.39	54.62	49.62	44.63	39.84
5	54.50	49.52	44.53	39.56	54.32	49.28	44.34	39.41	54.63	49.64	44.64	39.84
6	54.40	49.46	44.48	39.54	54.37	49.31	44.36	39.43	54.63	49.65	44.66	39.87
7	54.47	49.49	44.50	39.55	54.38	49.33	44.39	39.46	54.62	49.63	44.69	39.90
8	54.60	49.61	44.62	39.66	54.37	49.31	44.37	39.44	54.61	49.62	44.73	39.92
9	54.76	49.78	44.79	39.96	54.42	49.36	44.40	39.45	54.60	49.61	44.74	39.92
10	54.60	49.63	44.65	39.70	54.54	49.52	44.53	39.55	54.60	49.61	44.62	39.76
11	54.70	49.71	44.72	39.73	54.51	49.47	44.49	39.51	54.61	49.62	44.65	39.83
12	54.80	49.81	44.82	39.82	54.46	49.43	44.46	39.51	54.64	49.65	44.67	39.85
13	54.82	49.83	44.85	39.87	54.41	49.38	44.42	39.48	54.68	49.69	44.67	39.87
14	54.50	49.50	44.50	39.62	54.34	49.31	44.38	39.45	54.71	49.71	44.66	39.88
15	54.52	49.54	44.55	39.56	54.30	49.28	44.37	39.43	54.72	49.73	44.65	39.87
$\bar{X}$	54.54	49.57	44.58	39.64	54.35	49.28	44.35	39.44	54.63	49.64	44.67	39.87
$\sigma$	0.18	0.16	0.16	0.16	0.13	0.23	0.18	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05
CV	0.33	0.33	0.36	0.41	0.24	0.46	0.40	0.17	0.12	0.14	0.11	0.13

**Tabla 3.13 Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación del coeficiente de transferencia de calor de superficie para cada alternativa, a distintas condiciones de operación.**

Resultados del promedio del coeficiente de transferencia de calor de superficie, por bandeja (W/m <sup>2</sup> K)												
Bandeja	Alternativa 1				Alternativa 2				Alternativa 3			
	T 55 V 3.59	T 50 V 4.32	T 45 V 5.44	T 40 V 7.37	T 55 V 3.35	T 50 V 4.0	T 45 V 5.08	T 40 V 6.89	T 55 V 2.82	T 50 V 3.39	T 45 V 4.27	T 40 V 5.79
1	1.13	1.85	2.19	4.21	4.35	3.99	6.61	11.40	16.83	19.04	23.72	27.33
2	5.42	7.33	9.36	16.53	2.23	2.27	3.70	5.57	4.89	5.43	12.44	13.30
3	6.24	7.71	9.14	13.08	1.84	1.88	3.16	4.88	7.01	8.06	12.20	12.57
4	7.57	8.92	10.62	14.28	1.91	1.78	3.03	4.74	8.53	9.63	12.07	12.35
5	7.05	8.54	10.30	15.61	2.40	2.12	3.24	5.01	9.22	10.51	12.21	13.00
6	5.23	6.87	8.09	13.89	2.90	2.49	3.58	5.54	9.24	10.60	13.29	15.31
7	6.14	7.50	8.78	14.58	3.04	2.69	4.03	6.13	8.79	10.05	16.21	20.48
8	10.16	11.94	14.32	21.44	3.01	2.52	3.75	5.76	8.42	9.60	22.32	26.60
9	18.72	22.44	27.29	41.53	3.61	3.14	4.31	6.24	8.21	9.34	19.32	23.11
10	9.23	11.33	13.96	20.68	10.38	11.89	14.48	18.78	8.15	9.29	11.09	6.41
11	13.57	15.66	18.79	24.98	8.87	9.96	12.28	15.91	8.42	9.67	12.93	10.41
12	23.22	26.94	32.47	42.10	6.77	7.49	9.45	12.80	9.48	11.00	13.67	12.24
13	29.07	34.37	42.37	63.40	5.00	5.39	7.18	10.07	12.38	14.38	13.53	14.19
14	7.66	8.87	10.33	23.11	3.49	3.69	5.28	7.92	15.64	17.97	13.08	14.64
15	7.77	9.16	11.10	14.96	2.64	2.72	4.27	6.30	14.75	17.07	12.71	14.13
$\bar{X}$	10.55	12.63	15.27	22.96	4.16	4.27	5.89	8.47	10.00	11.44	14.72	15.74
$\sigma$	7.56	8.74	10.74	15.11	2.58	3.11	3.54	4.39	3.36	3.88	3.92	5.96
CV	71.67	69.21	70.32	65.79	61.89	72.87	60.17	51.86	33.64	33.91	26.60	37.90



### 3.4 Resultados de la temperatura y coeficiente convectivo, para alternativa 1, variando cantidad de entradas de aire y distancia entre bandejas.

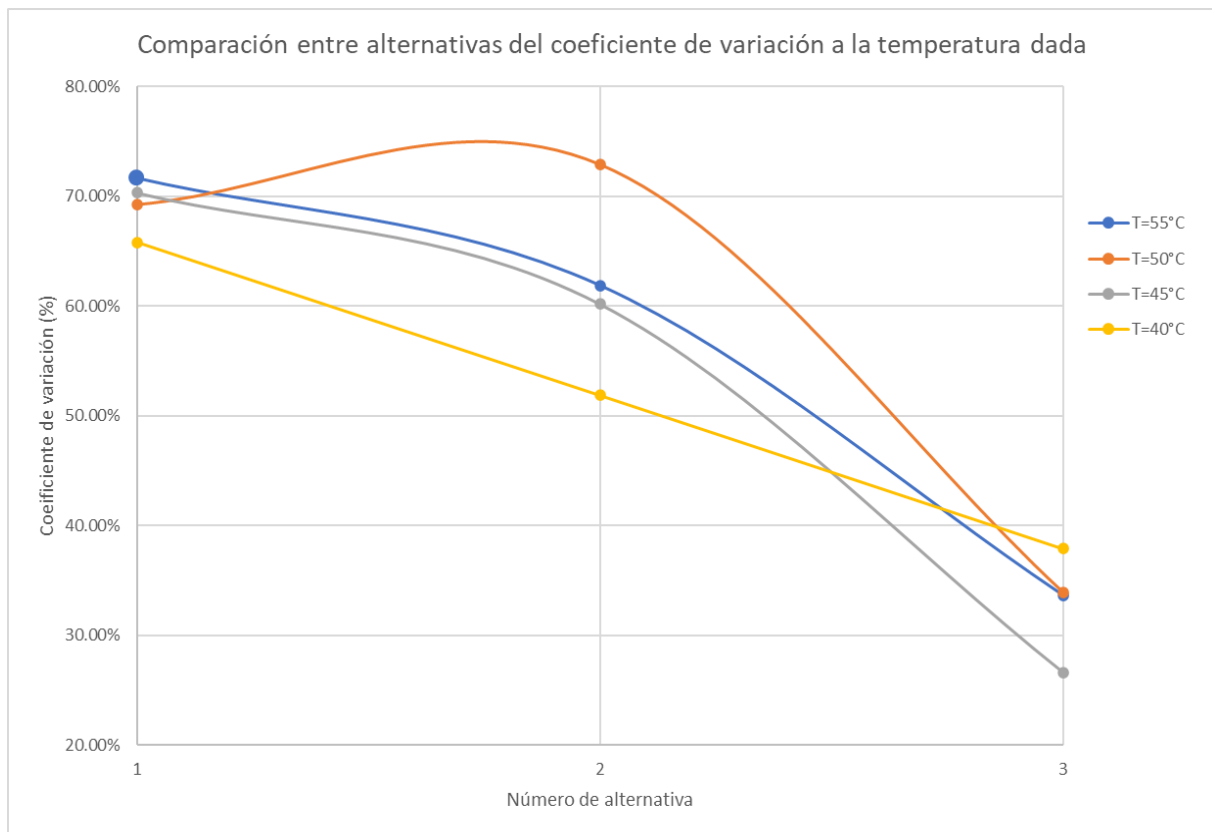
Tabla 3.14 Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de la temperatura y del coeficiente de transferencia de calor de superficie para cada alternativa, a distintas condiciones de operación.

Bandeja	Ventiladores traseros					
	Dos ventiladores		Bandejas separadas 9 cm		Bandejas separadas 8 cm	
	4.74		5.66		5.66	
	T	H	T	H	T	H
1	54.17	0.95	54.34	3.18	54.68	12.06
2	54.35	2.76	54.68	12.53	54.73	15.78
3	54.63	8.14	54.76	18.14	54.80	23.40
4	54.74	13.53	54.83	27.63	54.81	27.45
5	54.70	13.10	54.75	21.44	54.55	10.46
6	54.39	3.90	54.49	6.52	54.39	5.06
7	54.70	12.65	54.52	7.43	54.49	6.54
8	54.76	16.66	54.48	6.69	54.46	5.95
9	54.76	17.35	54.43	5.89	54.39	4.84
10	54.50	5.85	54.48	6.85	54.43	5.52
11	54.49	5.52	54.50	7.14	54.46	6.14
12	54.46	5.02	54.46	6.41	54.44	5.91
13	54.45	4.90	54.46	6.25	54.40	5.16
14	54.55	6.77	54.49	6.84	54.44	5.85
15	54.76	15.66	54.63	11.63	54.12	2.62
$\bar{X}$	54.56	8.85	54.55	10.31	54.51	9.52
$\sigma$	0.18	5.43	0.14	6.89	0.18	7.29
CV	0.33	61.38	0.26	66.82	0.34	76.64

Dado que nuestro objetivo final es seleccionar la alternativa que nos garantice la mayor uniformidad en el proceso de secado, se debe focalizar la atención en las variables de temperatura y velocidad. Para vincular las variables previamente mencionadas, se calculó el coeficiente convectivo, y luego se utilizó el coeficiente de variación, como medida estadística de dispersión, donde, mientras menor sea su valor, indica una mayor uniformidad en la variable evaluada.

**Tabla 3.15 Comparación entre alternativas, del coeficiente de variación del coeficiente de transferencia de calor de superficie.**

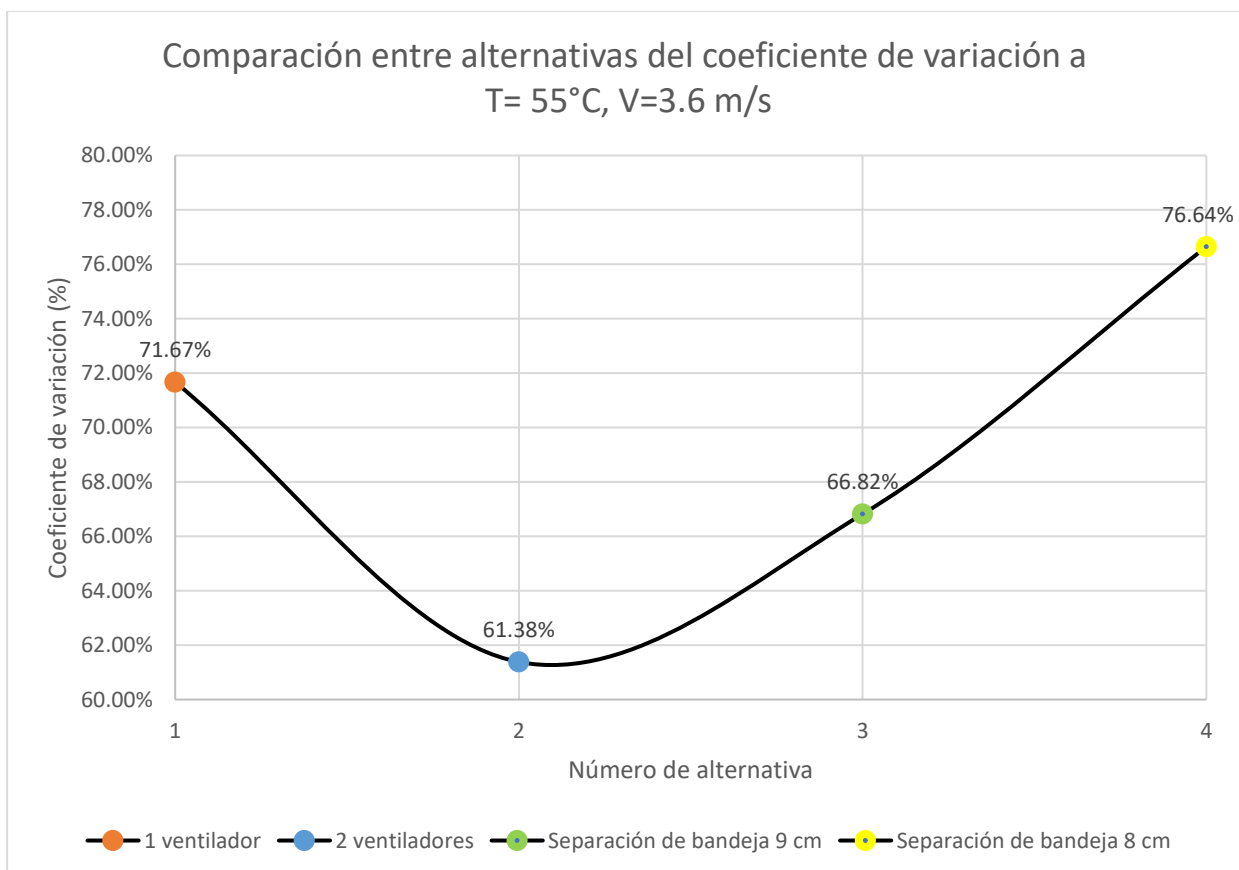
Comparación entre alternativas del coeficiente de variación a la temperatura dada					
Posición de ventiladores	Alternativa evaluada	Temperatura de operación			
		55	50	45	40
Ventiladores traseros	1	71.67%	69.21%	70.32%	65.79%
Ventiladores inferiores	2	61.89%	72.87%	60.17%	51.86%
Ventiladores superiores	3	33.64%	33.91%	26.60%	37.90%



**Figura 3.18 Gráfica comparativa entre alternativas, del coeficiente de variación del coeficiente de transferencia de calor de superficie.**

**Tabla 3.16 Comparación del coeficiente de variación para la alternativa 1, variando la cantidad de entradas de aire y separación entre bandejas a T= 55°C, V=3.6 m/s.**

Comparación entre alternativas del coeficiente de variación a T= 55°C, V=3.6 m/s		
Ventiladores traseros	Alternativa evaluada	Coeficiente de variación (%)
1 ventilador	1	71.67%
2 ventiladores	2	61.38%
Separación de bandeja 9 cm	3	66.82%
Separación de bandeja 8 cm	4	76.64%



**Figura 3.19 Gráfica comparativa del coeficiente de variación para la alternativa 1, variando la cantidad de entradas de aire y separación entre bandejas a T= 55°C, V=3.6 m/s.**

**Tabla 3.17 Tiempo de configuración y simulación por alternativa**

Tiempos de simulación por alternativa			
Alternativa	Condiciones de operación	Tiempo de configuración	Tiempo de simulación
Alternativa 1	T 55 V 3.59	1500	0:31:55
	T 50 V 4.32	1500	0:31:25
	T 45 V 5.44	1500	0:30:20
	T 40 V 7.37	1500	0:30:10
Alternativa 2	T 55 V 3.35	1500	0:31:15
	T 50 V 4.0	1500	0:30:21
	T 45 V 5.08	1500	0:29:47
	T 40 V 6.89	1500	0:28:55
Alternativa 3	T 55 V 2.82	1500	0:30:40
	T 50 V 3.39	1500	0:30:13
	T 45 V 4.27	1500	0:29:58
	T 40 V 5.79	1500	0:28:45
Dos ventiladores	T 55 V 3.6	1500	0:30:55
Separación de bandejas 9 cm	T 55 V 3.6	1500	0:29:15
Separación de bandejas 8 cm	T 55 V 3.6	1500	0:28:35
Tiempo total			7:32:29

### 3.5 Análisis de costos

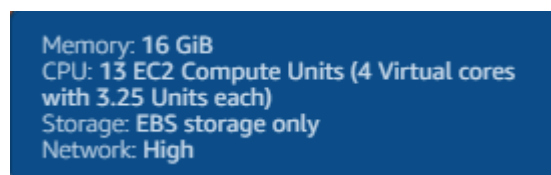
En vista de que nuestro proyecto es enfocado en la simulación de equipos de secado, el análisis de costos será para detallar el precio asociado a la contratación de servicios profesionales y de alquiler de equipos de cómputo, los cuales deberán diseñar y simular todas las alternativas.

Considerando lo anteriormente mencionado, se determinó el tiempo de cada simulación, el cual se dividió en un tiempo de configuración, que se tomó como constante, de 25 minutos por alternativa, y el tiempo de solución, que dependía de cada problema individual. Las mediciones se presentan en la tabla 3-17.

**Tabla 3.18 Tiempo de configuración y simulación por alternativa**

Tiempos de simulación por alternativa			
Alternativa	Condiciones de operación	Tiempo de configuración	Tiempo de simulación
Alternativa 1	T 55 V 3.59	1500	0:31:55
	T 50 V 4.32	1500	0:31:25
	T 45 V 5.44	1500	0:30:20
	T 40 V 7.37	1500	0:30:10
Alternativa 2	T 55 V 3.35	1500	0:31:15
	T 50 V 4.0	1500	0:30:21
	T 45 V 5.08	1500	0:29:47
	T 40 V 6.89	1500	0:28:55
Alternativa 3	T 55 V 2.82	1500	0:30:40
	T 50 V 3.39	1500	0:30:13
	T 45 V 4.27	1500	0:29:58
	T 40 V 5.79	1500	0:28:45
Dos ventiladores	T 55 V 3.6	1500	0:30:55
Separación de bandejas 9 cm	T 55 V 3.6	1500	0:29:15
Separación de bandejas 8 cm	T 55 V 3.6	1500	0:28:35
		Tiempo total	7:32:29

Para el alquiler del equipo de cómputo, junto con el software Ansys Fluent, para el análisis mediante CFD, se seleccionó a los Amazon Web Services (AWS). De las alternativas que presenta la plataforma, se eligió aquella que asemeja el poder de cómputo utilizado durante el desarrollo de este proceso, que corresponde al servicio m4.xlarge, cuyas especificaciones se muestra en la ilustración a continuación.



**Figura 3.20 Especificaciones de Hardware del EC2 instance type: m4. xlarge, de los AWS.**

[22]

**Tabla 3.19 Costo de alquiler de diversos equipos, mediante AWS.**

Costo de alquiler de servicios de Amazon Web Services			
EC2 INSTANCE TYPE	SOFTWARE/HR	EC2/HR	TOTAL/HR
t2. micro	\$0	\$0.012	\$0.012
m4. large	\$0.021	\$0.10	\$0.121
m4. xlarge	\$0.042	\$0.20	\$0.242
m4.2xlarge	\$0.084	\$0.40	\$0.484
m4.4xlarge	\$0.168	\$0.80	\$0.968
m4. xlarge	\$0.42	\$2.00	\$2.42

Habiendo definido los costos vinculados al alquiler de los equipos, también se realizó una investigación sobre costos por hora referenciales, para profesionales dedicados al modelamiento en CAD, y simulación mediante CFD en el mercado local, no obstante, ante la falta de una base de datos confiable, se optó por tomar precios referenciales de profesionales que residen en Estados Unidos.

**Tabla 3.20 Análisis de costos por servicio.**

Análisis de costos del proyecto				
Servicio	Descripción	Costo por hora	Horas de trabajo	Precio total del servicio
Servicios en la nube	Alquiler de Software (m4.xlarge)	\$0.042	7.54	\$0.317
	Alquiler de equipo EC2	\$0.20	7.54	\$1.508
Modelador CAD	Diseño de geometría 3D	\$7.50	1.58	\$11.875
	Elaboración de planos	\$5.00	2	\$10.000
	Superficies 2D	\$2.50	0.5	\$1.250
	Costo base	\$20.00	4.08	\$81.667
Alquiler de servicios, especialista en CFD	Simulación mediante CFD	\$45	7.54	\$339.363
			Total	\$445.98

Es importante destacar que el precio total para la simulación de 15 equipos, variando las condiciones de entrada, posición de ventiladores, geometría y distancias entre bandejas supone un resultado interesante para las industrias encargadas de la manufactura de equipos de ingeniería, dado que es mucho más rentable la simulación del fenómeno físico, que la construcción de cada uno de los prototipos analizados mediante CFD. Por ello, el uso de herramientas computacionales avanzadas supone un gran avance en el sector industrial, permitiendo así disminuir los costos asociados con los departamentos de desarrollo e innovación.

# CAPÍTULO 4

## Análisis de Resultados, Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1 Análisis de resultados

Si bien es cierto que, para la definición de este proyecto de grado, se recopiló información referente al cacao y su proceso de secado, el alcance de la investigación es para la optimización del horno, puesto que hemos caracterizado su rendimiento térmico mediante CFD, sin considerar la biomasa que se requiere secar, esto implicaría que se podría secar otros alimentos que cumplan con la condición de distribuirse uniformemente en las bandejas, formando una capa fina.

La implementación de las características del cacao para el proceso de diseño, se encuentran implícitas en los cálculos de calor necesario y velocidades de ventilador, así como también en el tiempo y temperatura de operación.

Las debilidades del proyecto se encuentran alrededor de las simplificaciones que se debieron realizar, para lograr las simulaciones sin incurrir en las limitaciones de potencia de cómputo. Por lo expuesto anteriormente, en la simulación por CFD, se omitió el fenómeno de transferencia de masa entre el grano de cacao húmedo y el aire, razón por la cual el coeficiente de variación de la temperatura tuvo un máximo de 0.46% para la simulación de la alternativa 2, en las condiciones de temperatura a 50 °C y velocidad 4 m/s, dado que el sistema simulado alcanza rápidamente el equilibrio térmico. Los resultados de la variación de la temperatura demuestran que la distribución es estable en el interior del secador, por lo cual, para determinar la mejor alternativa, fue necesario analizar con mayor profundidad el fenómeno de transferencia de calor. Este último se simplificó, realizando la suposición de que el cacao estará completamente distribuido en las bandejas, formando una capa fina; con ello, se optó por modelar el cacao y las bandejas como una placa plana, para hallar el coeficiente convectivo de transferencia de calor entre las bandejas y el medio circundante.

En vista de que se planteó optimizar termo-fluido dinámicamente la cavidad de secado, fue necesario obtener una variable que vincule tanto la temperatura como la velocidad en las regiones aledañas a las bandejas, de forma que se calculó mediante CFD el coeficiente de transferencia de calor en las superficies de cada bandeja, como se muestra en las tablas 3-13 y 3-14, y son los resultados de las tablas mencionadas los cuales denotan una de las principales fortalezas de este proyecto de simulación, y es que se probaron 15 geometrías distintas.

En las tablas 3-15 y 3-16 se realiza la comparación entre alternativas del coeficiente de variación a distintas condiciones y geometrías de operación. Referente a la primera tabla, donde se comparan las alternativas 1, 2 y 3, observamos que los mejores resultados se obtienen para la alternativa 3, con un coeficiente de variación del 26.60%, cuando las condiciones de operación fueron de 45 °C para la temperatura, a una velocidad de ventilador de 4.27 m/s. Además, para cada una de las condiciones de operación, la alternativa 3 también mostró mejores resultados, con lo cual, durante su operación, esta será la que tendrá un secado más uniforme para la biomasa. La alternativa 2 es la siguiente respecto a la distribución del proceso de secado, y por último lugar se encuentra la alternativa 1, de ventiladores traseros. Se puede observar que en términos generales, los mejores resultados se obtuvieron para las temperaturas más bajas, esto es debido a que, como se expuso en la metodología, las velocidades a la entrada se aumentaron a medida que disminuía la temperatura, esto para mantener el tiempo de secado constante; como sabemos, el fenómeno de transferencia de calor es dependiente, entre otras variables, de la temperatura y la velocidad, por lo cual, al aumentar la velocidad, se esperaría tener una mejor transferencia de calor.

En la tabla 3-16 se exponen los resultados para distintas configuraciones probadas para la alternativa 1, bajo las mismas condiciones de operación, de 55°C y 3.6 m/s, con la cual se postuló aumentar un ventilador, y cambiar la separación entre bandejas. De los resultados se halló que se obtuvo un mejor coeficiente de variación para la alternativa con dos ventiladores, obteniéndose un 61.38% de variación. Respecto al impacto sobre la distribución del coeficiente convectivo, al variar la separación de bandejas, notamos que una separación de 9 cm, con variación del 66.82% muestra mejores resultados frente



a la separación de 10 y 8 cm, con coeficiente de variación de 71.67% y 76.64% respectivamente.

Durante la redacción de este documento, se presentó las diversas simplificaciones utilizadas para la representación del fenómeno físico, esto implica que los resultados obtenidos tendrán un alto porcentaje de error frente al fenómeno real, no obstante, existirá una proporcionalidad entre nuestro cálculos y el caso real, esto quiere decir que para futuras investigaciones, se podrá partir de las alternativas con menor coeficiente de variación, para su refinación mediante un análisis tridimensional, para obtener resultados con un menor error asociado.

## 4.2 Conclusiones

- Se tomó a la alternativa 1 como base para evaluar la influencia que tiene en la distribución del fenómeno de transferencia de calor, el variar la cantidad y posición de entradas de flujo de aire. Se simuló bajo las condiciones de operación de 55°C y un flujo másico de 1865 kg/m<sup>3</sup>, por tanto, la velocidad para una entrada de aire fue de 3.6 m/s, y para dos entradas fue de 1.8 m/s, para conservar el mismo flujo. De la tabla 3-16 obtenemos un coeficiente de variación de 71.67% y 61.38% para las alternativas con una y dos entradas de aire respectivamente, por lo tanto, se concluye que tener dos entradas de aire mejora la uniformidad en el proceso de secado en un 10.29%
- Con base a la alternativa 1, también se postuló determinar la influencia que tiene en la distribución del fenómeno de transferencia de calor, el variar la distancia entre bandejas. Considerando una entrada de aire, se simuló bajo las condiciones de operación de 55°C y una velocidad de aire de 3.6 m/s. De la tabla 3-16 obtenemos un coeficiente de variación de 71.67% y 66.82% y 76.64% para las alternativas con distancia de separación entre bandejas de 10, 9 y 8 centímetros respectivamente. Por lo tanto, se concluye que, para las condiciones de operación dadas, una distancia de 9 cm entre bandejas implica una menor variación respecto al coeficiente convectivo, con 66.82%

- Dado que se evaluaron 15 alternativas, donde se varió la geometría de bandejas, condiciones de operación, cantidad de ventiladores y posición de estos, se concluye que, la alternativa 3 con ventiladores en la parte superior de la cavidad, a las condiciones de temperatura a 45°C y una velocidad de entrada de 4.27 m/s se presenta como la mejor configuración, dado que el coeficiente de variación del coeficiente convectivo es el menor, con 26.60%, como se detalla en la tabla 3.15. Esto implica que se tendrá un secado más uniforme frente a las demás alternativas, esto se debe a que la velocidad se distribuyó de manera más uniforme entre cada bandeja, gracias a la implementación de la geometría cónica en el centro de las bandejas, que funcionó como un difusor del flujo de aire a la entrada.
- Dado que no se consideró el fenómeno de transferencia de calor y masa entre los granos de cacao y el aire, se obtuvo que el coeficiente de variación de la temperatura fue de máximo 0.46%, para la alternativa 2. Este resultado tiene un alto margen de error asociado, ya que el fenómeno físico real implica un gradiente de temperatura más complejo, producto de la temperatura inicial de los granos de cacao, y la transferencia de calor entre la masa de agua evaporada y el aire.
- De los contornos de velocidad expuestos en el Apéndice C se concluye que la mayor parte del flujo de aire caliente se desperdicia, dado que este circular libremente hasta la salida. Esto implica que hay un margen de mejora para utilizar de mejor manera el calor generado, con lo cual incrementaría la eficiencia del secador, y disminuiría el consumo de energía.

### 4.3 Recomendaciones

- Debido a las limitaciones computacionales, como se expuso en la sección 2.6, optamos por realizar una simulación bidimensional del fenómeno físico. Sin embargo, esta suposición es solo válida para casos donde la relación de aspecto de la placa plana sea mayor a 1:50, condición que no se cumple para nuestro dominio. Esto implica que nuestros resultados para el cálculo del coeficiente convectivo mantienen un margen de error alto, pero nos permiten conocer cualitativamente el comportamiento del fenómeno de transferencia de calor por cada bandeja. Sugerimos a futuros investigadores que requieran optimizar cavidades de secado, la simulación tridimensional del fenómeno, para obtener resultados cuantitativos con un menor margen de error, de las variables de velocidad, temperatura y coeficiente convectivo.
- A pesar de que bajo las asunciones descritas en la 2.11.2, se efectuaron las simulaciones, considerando únicamente transferencia de calor desde el flujo de aire forzado hacia la capa uniforme de producto, se recomienda incluir el fenómeno de transferencia de humedad desde el producto hacia el aire.
- En vista de las múltiples simulaciones que se realizaron para la selección de la mejor configuración geométrica, no se creó un mallado estructurado y matemáticamente planificado. Sugerimos optimizar el mallado de la cavidad de secado de la alternativa 3, que mostró los mejores resultados, haciendo hincapié en el cálculo del espacio teórico para el mallado en pared, y+ para mejorar el análisis en las paredes, dado que el punto principal de interés para el análisis es del fenómeno de transferencia de calor entre el grano de cacao y el medio circundante, lo cual se puede simplificar analizando la transferencia de calor entre el medio y las paredes de las bandejas.
- El modelo de turbulencia utilizado fue el de k-epsilon, el cual garantiza buenos resultados sobre el fenómeno que ocurre en el dominio; sin embargo, en base a la recomendación anterior, sugerimos también la implementación del modelo de

turbulencia k-omega, que, de acuerdo con Menter y Lechner y Matyushenko [23] desarrolla mejores modelos matemáticos cuando los resultados de interés se encuentran en las paredes o celdas adyacentes.

- Para explorar el fenómeno de transferencia de calor entre las bandejas y el aire circundante, sin tener que calcular un coeficiente de transferencia de calor previamente, recomendamos realizar la simulación en estado transitorio. Esto permitirá que el software calcule de forma automática nuestra variable de interés, considerando velocidad, temperatura y geometría, con lo que se tendrá un resultado numérico más preciso respecto al valor real.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. E. I. y. P. Ministerio de Producción, «Boletín de cifras, comercio exterior, diciembre 2021,» Estadísticas del Sector Externo Banco Central del Ecuador (BCE), Quito, 2021.
- [2] Anecacao, «Sector Exportador de Cacao,» Guayaquil, 2019.
- [3] N. T. Ecuatoriana, «NTE INEN 176,» Servicio Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2018.
- [4] A. Almeida, R. García, C. Fajardo y U. Peralta, «Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.) de Ecuador y Perú,» *Enfoque UTE*, vol. 10, nº 4, pp. 1-12, 2019.
- [5] J. Jimenez y A. Freddy, «Buenas prácticas para el beneficio del cacao,» Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, Mocache, 2008.
- [6] E. Delgado Plaza, Artist, *Diseño , Modelo Matemático y construcción de un secadero optimizado con energías Limpias*. [Art]. Universidad de Santiago de compostela, 2014.
- [7] S. Ishaq y J. Laila, «Biomedical Importance of Cocoa (*Theobroma cacao*): Significance and Potential for the Maintenance of Human Health,» *Matrix Science Pharma*, vol. 1, nº 1, pp. 1-5, 2017.
- [8] E. Mandl, «Healthline,» 9 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.healthline.com/nutrition/cocoa-powder-nutrition-benefits>. [Último acceso: 13 Agosto 2022].
- [9] Cacao, «HerbaZest,» 8 Junio 2022. [En línea]. Available: <https://www.herbazest.com/herbs/cacao>. [Último acceso: 13 Agosto 2022].
- [10] D. O. Oke y K. F. Omotayo, «Effect of forced-air artificial intermittent drying on cocoa beans in South-Western Nigeria,» Department of Agricultural and Bio-Environmental Engineering, School of Engineering, Federal Polytechnic, P. M. B 5351, Ado – Ekiti, Ekiti State, Nigeria., 2012.
- [11] Y. Cengel y A. Ghajar, *Mecanismo de transferencia de Calor*, Mexico: 17-30, 2011, pp. 17-30.
- [12] Y. Cengel y A. Ghajar, *Transferencia de calor y masa*, México: Mc Graw Hill, 2011, pp. 6-7.
- [13] I. ANSYS, «Ansys,» ANSYS, Inc, 18 06 2022. [En línea]. Available: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>. [Último acceso: 18 06 2022].
- [14] J. Osses, «ESSS,» Engineering Simulation And Scientific Software, 08 Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://www.esss.co/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>. [Último acceso: 28 Agosto 2022].
- [15] M. Garcia y E. Vakkilainen, «A comparison of turbulence models and two and three dimensional meshes,» Lappeenranta University of Technology, Finlandia, 2018.
- [16] E. Delgado, J. Jaramillo, M. Quilambaqui, o. Gonzalez, J. Tigre, A. Arevalo y M. Arancibia, «Delgado,Emérita ; Jaramillo,Juan ; Quilambaqui,Miguel ; Gonzalez,olga ; Tigre,José ; Arevalo,Anthony ; Arancibia,Mirari,» *MDPI*, vol. IX, nº 9, pp. 1-15, 2019.
- [17] A. J. Agamez Parias, «Diseño de un secador convectivo para el secado del grano de cacao,» Universidad de Antioquía, Medellín, 2020.

- [18] R. A. Castro Nunez y K. A. Pincay Avilés, «Diseño, simulación y evaluación energética de un prototipo de secador solar para el cacao con colector en lecho de rocas,» Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2021.
- [19] A. Zomorodian, «Optimization and evaluation of a semi continuous solar dryer for cereals,» ScienceDirec, 2007.
- [20] B. Kamenan Koua, P. Ekoun Koffi y P. Gbaha, «Evolution of shrinkage, real density, porosity, heat and mass transfer coefficients during indirect solar drying of cocoa bean,» Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, Cote d'Ivoire, 2017.
- [21] J. Xamán y Rivera-Gijón, «Dinámica de fluidos Computacional para ingenieros,» de *Ecuación de masa*, Bloomington, Palibrio, 2015, pp. 75-85.
- [22] Amazon, «Amazon Web Services,» Amazon Market Place, 2022. [En línea]. Available: <https://aws.amazon.com/marketplace/pp/prodview-ojxm4wfrodtj4>. [Último acceso: 5 Septiembre 2022].
- [23] F. R. Menter, R. Lechner y A. Matyushenko, «Best Practice: RANS Turbulence Modeling,» Ansys, St. Petersburg, 2018.

# APÉNDICES

## APÉNDICE A

### Ecuaciones de conservación

Ecuación de conservación de masa representada en forma tensorial, el lado izquierdo indica la variación de, la densidad con respecto al tiempo y el lado derecho de la igualdad indica el flujo neto de masa saliendo del volumen de control a través de las fronteras [21].

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu_i)}{\partial x_i} = 0 \quad \text{donde } i = x, y, z \quad (\text{B.1})$$

Ecuaciones de Navier Stokes se basan en los principios de discretización en la cual son aplicables en las fórmulas de cantidad de movimiento y continuidad.

Se tiene las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho * \mu_i * dV + \int_S \rho \mu_i v * n dS = \int_S t_i * n * dS + \int_V \rho * b_i * dV \quad (\text{B.2})$$

**Conservación de masa:**

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho * dV + \int_S \rho v * n dS = 0 \quad (\text{B.3})$$

Sabiendo que  $t_i = \tau_{ij} \mathbf{i}_j - p \mathbf{i}_i$  se da una forma diferencial:

$$\frac{\partial(\rho \mu_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu_j \mu_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho b_i \quad (\text{B.4})$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * (\rho v) = 0 \quad (\text{B.5})$$

Las ecuaciones de Navier – Stokes, se encargan de modelar el movimiento de un fluido viscoso newtoniano. Son representadas vectorialmente mediante.

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho g - \nabla P + \mu \nabla^2 * v \quad (\text{B.6})$$

Se dice que los flujos compresibles en el cual la masa específica varia en el dominio a partir de variaciones en el volumen, es decir, variaciones en el campo de presión, variación de densidad, producidas por cambios de temperatura, presión o grandes velocidades, para flujos compresibles se tiene la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho * T * dV + \int_S \rho T v * n dS = \int_S \frac{u}{P_r} * \nabla T * n * dS \quad (\text{B.7})$$

$u = \text{viscosidad dinámica}$

La ecuación representa fluido con calor específico constante y relación convección /difusión.

Si se tiene la ecuación (1.2) de conservación de masa para flujo compresible si se hace incompresible entonces la ecuación se reduce a:

$$\nabla * v = 0 \quad (\text{B.8})$$

Lo mismo sucede en forma diferencial en conservación de momento, se tiene para un flujo compresible:

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial t} + \nabla * (\rho \mu_i v) = \nabla * t_i + P b_i \quad (\text{B.9})$$

Por otro lado, para flujo incompresible la ecuación es:

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial t} + \nabla * (\mu_i v) = \nabla * (\vartheta \nabla \mu_i) - \frac{1}{\rho} \nabla (P i_i) + b_i \quad (\text{B.10})$$

DONDE:

$$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

$\rho$ : densidad del fluido  $\frac{g}{m^3}$

$t$ : tiempo

$S$ : Superficie

Donde  $\vartheta$  es la viscosidad cinemática

- Modelo de Flujo turbulento trabaja para las ecuaciones de Navier Stokes.

Continuidad



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * (\rho v) = 0 \quad (\text{B.11})$$

Momento

Las ecuaciones de Navier – Stokes, se encargan de modelar el movimiento de un fluido viscoso newtoniano. Son representadas vectorialmente mediante

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho g - \nabla P + \mu \nabla^2 * v \quad (\text{B.12})$$

- Ecuaciones de transporte de conservación de masa y energía cinética turbulenta y disipación.

$\frac{\partial \rho \kappa}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \mu_i \kappa) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right) + S_k$	(B.13)
---	--------

$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \mu_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon$	(B.14)
--	--------

$S_K$  Y  $S_\varepsilon$  son los términos de las fuentes

- A manera general la ecuación que gobierna la **transferencia de calor** está dada por [21]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u * \nabla T = \nabla * (\kappa * \nabla T) \quad (\text{B.15})$$

Donde:

$$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

$\rho$ : Densidad del fluido  $\frac{g}{m^3}$

$t$ : Tiempo

$v$ : Velocidad (m/s)

$V$ : Campo de velocidad (m/s)

$g$ : Gravedad ( $m/s^2$ )

$\mu$ : Viscosidad del fluido ( $g/m*s$ )

$\kappa$ : Conductividad térmica ( $\frac{W}{m * K}$ )

$P$ : Presión ( $N/m^2$ )

$c_p$ : Constante de calor específico del fluido ( $\frac{J}{mol * K}$ )

## APÉNDICE B

### Resolución de memoria de calculo

Se desarrolla un ejemplo de cálculo para el caso de la alternativa 3, ventiladores superiores, a 55°C como temperatura de operación.

### Cálculo para el área de las bandejas

De la tabla 1-1 y 1-2 se toman las características físicas del cacao.

Primero calculamos la cantidad de granos necesarios para tener 50 kg de producto.

$$\begin{aligned} \text{granos}_{total} &= \frac{m_{prod}}{\text{peso}_{grano}} \\ \text{granos}_{total} &= \frac{50}{\frac{1,3}{1000}} = 38462 \end{aligned}$$

### Área del grano de cacao

Se aproxima la geometría del cacao a un rectángulo, y se utiliza la longitud del cacao como la altura, y el ancho como la base.

$$\begin{aligned} A_{grano} &= \text{altura} * \text{base} \\ A_{grano} &= 0,025 * 0,012 = 0.0003 \\ A_{grano} &= 0.0003 \left[ \frac{m^2}{grano} \right] \end{aligned}$$

### Área requerida para tener 50 kg de producto.

$$\begin{aligned} A_{necesaria} &= \text{granos}_{total} * A_{grano} \\ A_{necesaria} &= 38462[grano] * 0.0003 \left[ \frac{m^2}{grano} \right] \\ A_{nec} &= 38462[grano] * 0.0003 \left[ \frac{m^2}{grano} \right] \\ A_{necesaria} &= 11.54 m^2 \end{aligned}$$

### **Cálculo del área de la bandeja**

Para nuestra propuesta de solución, tenemos una bandeja sólida, una bandeja cuadrículada con un cono hueco en el centro y una bandeja perforada con un agujero central de 20 cm. Como propuesta inicial pretendemos diseñar bandejas cuadradas de 0.9 m de lado, y comprobaremos si el área útil es igual o mayor al área requerida.

$$A_b = base_{ban} * Altura_{ban} - (\pi(r_{agujero}^2))$$

$$A_b = 0,9 * 0,9 - (\pi(0,1^2))$$

$$A_b = 0.7785$$

$$A_{total} = A_b * \text{Número de Bandejas}$$

$$A_{total} = 0.7785 * 15$$

$$A_{total} = 11.679$$

$$A_{nec} = 11.54 \text{ m}^2 < A_{total} = 11.679$$

### **Cálculos de ganancia de calor en la cámara, transferencia de masa y calor**

#### **Calculamos el calor total mediante la suma de los calores individuales**

Se tiene de la ecuación 2-5 los siguiente:

$$Q_T = \sum Q_{1-4}$$

### Calor específico del cacao en función de la temperatura

$$C_{P,prod} = 2623.35 \left( \frac{x_{final}}{x_{inicial}} \right)^{0.33}$$

$$C_{P,prod} = 2623.35 \left( \frac{0.07}{0.5} \right)^{0.33} = 1.371 \frac{kJ}{kg * ^\circ C}$$

$$C_{P,prod} = 0.328 \frac{kcal}{kg * ^\circ C}$$

### Calentamiento inicial del equipo

$$Q_1 = m_{prod} * x_{inicial} * C_{P,prod} (T_{a,c} - T_a)$$

$$Q_1 = 50 \text{ kg} * 0.5 * 0.328 * (55 - 26.225)$$

$$Q_1 = 235.97 \text{ kcal}$$

### Calor necesario para elevar la temperatura del aire en el interior

$$Q_2 = V_{aire} * \rho_{aire} * C_{P,aire} * (T_{a,c} - T_a)$$

El dominio de aire circulará en el interior de la cavidad de secado, cuyas dimensiones se resumen a continuación.

Conociendo las dimensiones del interior de la cavidad de secado, obtener Q2

$$V_{aire} = 1.6 * 0.9 * 1.1 = 1.584 \text{ m}^3$$

$$Q_2 = 1.584 * 1.17 * 0.24 * (55 - 26.225)$$

$$Q_2 = 12.80 \text{ kcal}$$

**Masa de agua contenida en el grano de cacao**

$$m_w = \frac{m_{prod}(x_{inicial} - x_{final})}{(1 - x_{final})}$$

$$m_w = \frac{50 * (0.5 - 0.07)}{(1 - 0.07)}$$

$$m_w = 23.12 \text{ kg}$$

**Calor necesario para la evaporación del agua**

$$Q_3 = m_w * l$$

$$Q_3 = 23.13 * 540$$

$$Q_3 = 12483.87 \text{ kcal}$$

**Calor necesario para la recirculación de aire**

$$Q_4 = m_{prod} * (x_{inicial} - x_{final}) * C_{P,aire} (T_{a,c} - T_a)$$

$$Q_4 = 50 * (0.5 - 0.07) * 0.24 * (55 - 26.225)$$

$$Q_4 = 148.48 \text{ kcal}$$

**Calor total para la ganancia de calor en la cámara de secado**

$$Q_T = \sum Q_{1-4}$$

$$Q_T = 235.97 + 12.80 + 12483.87 + 148.48$$

$$Q_T = 12881.12 \text{ kcal}$$

## Cálculos para el dimensionamiento de los ventiladores

### Determinación de la masa de aire necesaria para el secado

$$m_{aire} = \frac{Q_T}{C_{p,aire} * (T_{a,c} - T_a)}$$

$$m_{aire} = \frac{12881.12}{0.24 * (55 - 26.225)}$$

$$m_{aire} = 1865.21 \text{ kg aire seco}$$

### Flujo másico de aire

$$\dot{m}_a = \frac{m_{aire}}{t * 3600}$$

$$\dot{m}_a = \frac{1865.21}{28800}$$

$$\dot{m}_a = 0.065 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

### Caudal de aire

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{m}_a}{\rho_{aire}}$$

$$\dot{V}_a = \frac{0.065}{1.17}$$

$$\dot{V}_a = 0.056 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Para el caso cuando se tiene más de un ventilador, se debe dividir el caudal de aire entre el número de ventiladores

$$V_{individual} = \frac{\dot{V}_a}{n}$$

Tomamos el caso donde se tienen 2 ventiladores

$$V_{individual} = \frac{0.056}{2} = 0.028 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

### **Velocidad del flujo**

Se calcula primero el área, tomando en cuenta ventiladores de 25 cm de diámetro.

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi * 0.125^2$$

$$A = 0.049 \text{ m}^2$$

### **Cálculo de la velocidad del flujo, conociendo el caudal y el área del ventilador**

$$\dot{V}_a = V * A$$

$$V = \frac{\dot{V}_a}{A}$$

$$V = \frac{0.056}{0.049}$$

$$V = 1.13 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Una vez obtenida la velocidad se realizó un factor de corrección debido a que se requiere una velocidad de entrada mucho mayor de los ventiladores, sabiendo que dentro del dominio de la cavidad de secado las velocidades son mucho menores.

Considerando la alternativa 3, ha T55 la velocidad es 1,13 m/s

Se procedió a realizar el cálculo de factor de corrección:

$$V \text{ corrección} = 1,13 * 2,5 = 2,82 \text{ m/s}$$

Ese factor de corrección de 2,5 m/s se consideró también para las demás temperaturas de la alternativa 3 ventiladores superiores, los resultados para las demás alternativas se puede visualizar en resultados tabla 3-17.

### **Cálculo del coeficiente Convectivo de transferencia de calor para placa plana.**

Considerando una temperatura de 55 °C y una de superficie y después de realizar una primera simulación con las velocidades de factor de corrección se procedió a sacar un promedio de velocidad para cada temperatura y cada alternativa de la alternativa 3 para 55 °C la velocidad promedio fue de  $1,33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  .

### **Propiedades del aire a la temperatura película.**

$$T_f = \frac{T_\infty + T_s}{2}$$
$$T_f = \frac{55 + 26,22}{2}$$
$$T_f = 313 \text{ [K]}$$

Se calculó el número de Reynolds considerando el largo de la placa L=0,9 m este número de Reynolds depende de la velocidad del fluido, la velocidad que se considera es la velocidad promedio en dominio del sistema.



$$Re = \frac{V * L}{\nu}$$

$$Re = \frac{1.33 \left[ \frac{m}{s} \right] * 0.9[m]}{17.39 \times 10^{-6} [m^2/s]}$$

$$Re = 68,832.662$$

### Cálculo de Nusselt

$$Nu = 0.664 * Re_L^{0.5} * Pr^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 155$$

### Cálculo de coeficiente de convección

$$h = \frac{Nu * k}{L}$$

$$h = \frac{(155) * 27.41 \times 10^{-3} \left[ \frac{W}{m * k} \right]}{0.9 [m]}$$

$$h = 4.722 \left[ \frac{W}{m^2 * k} \right]$$

### Cálculo de la tasa de transferencia de calor por convección

$$\dot{Q} = h * A_{bandeja} * (T_{a,c} - T_a)$$

Se considera la geometría de la bandeja como la superficie de un rectángulo, por lo cual es área se calcular de la siguiente forma.

$$A_{bandeja} = base_{ban} * Altura_{ban}$$

$$A_{bandeja} = 0,9 [m] * 0,9 [m]$$

$$A_{bandeja} = 0,81 m^2$$

Donde  $base_{ban}$  y  $Altura_{ban}$  corresponden a la base y altura de la bandeja respectivamente. Entonces:

$$\dot{Q} = 4.722 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] * 0,81[\text{m}^2] * ((55 + 273) - (26.225 + 273))$$

$$\dot{Q} = 110 \text{ W}$$

### **Cálculo de promedio, desviación estándar y coeficiente de variación**

Para el caso de la alternativa 3 a una  $T_{55} \text{ } ^\circ\text{C}$  , V2.82 promedio se calculó de la siguiente manera:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$$

Para  $n=15$  y para diferentes 15 diferentes temperaturas  $a=T$  se puede ver en la tabla 3-12 el valor promedio fue de

$$\bar{X} = 54.63$$

Para el cálculo de desviación estándar se calculó con:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{N}}$$

En la tabla 3-12 se puede observar que el valor de desviación estándar fue de 0,07 para esas condiciones de esa alternativa 3.

Y para el cálculo de coeficiente de variación se calculó de la siguiente manera:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}}$$

$$CV = \frac{0,07}{54.63}$$

$$CV = \frac{0,07}{54.63} * 100$$

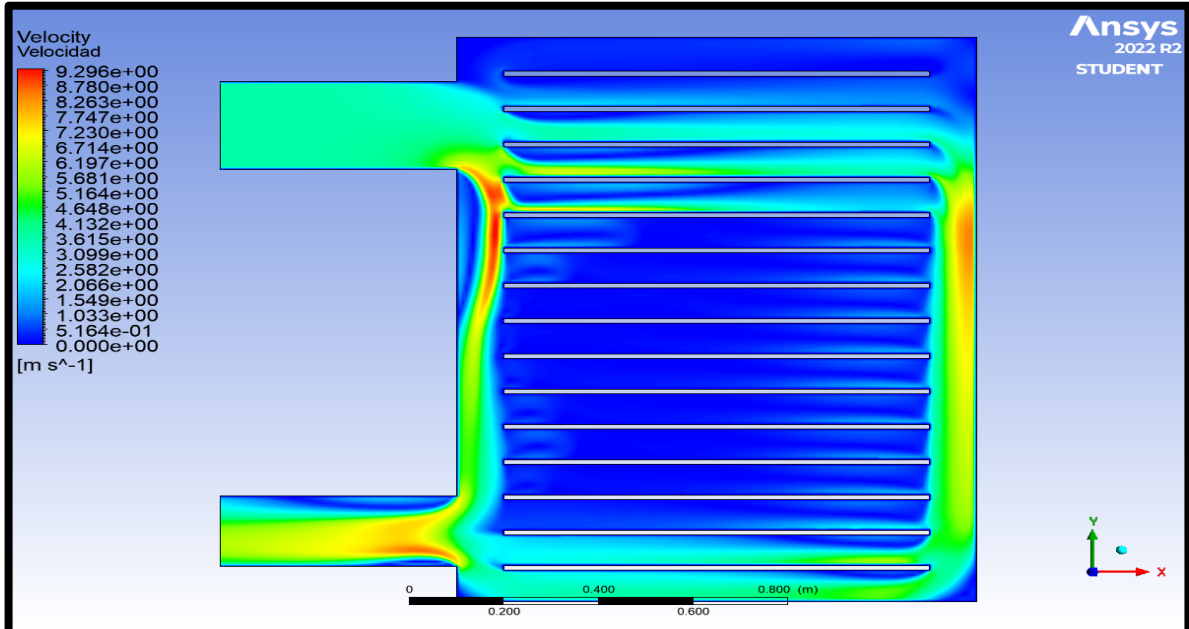
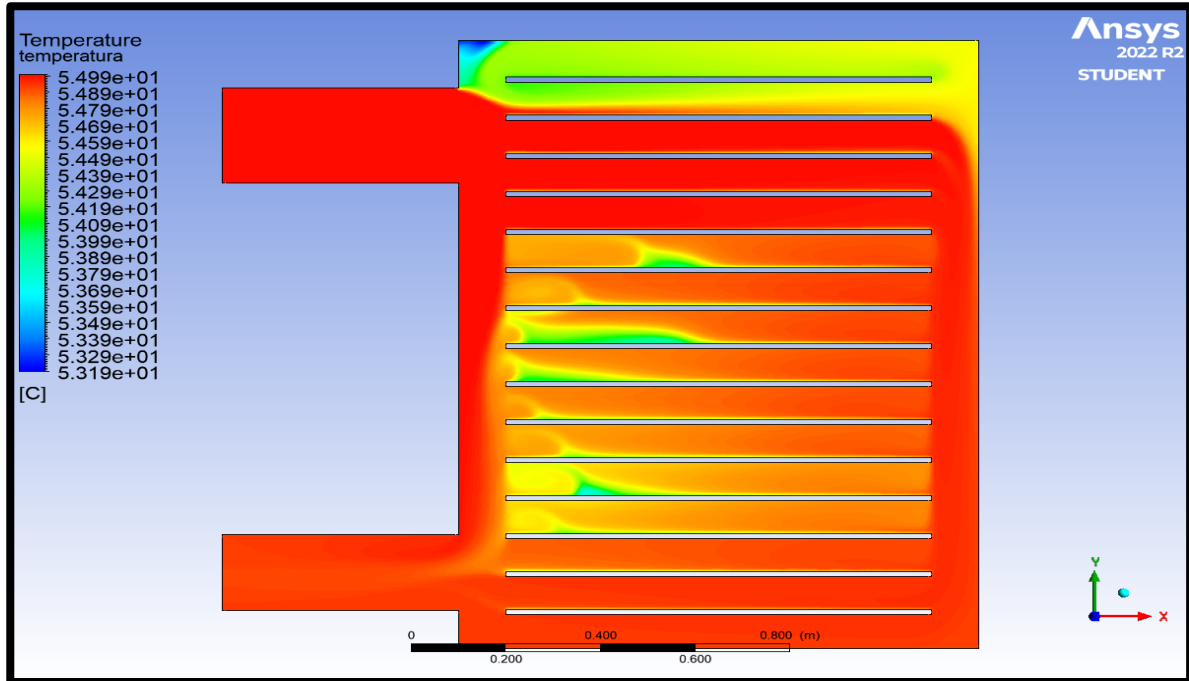
$$CV = 0,128$$

El valor de coeficiente de variación se puede ver en la tabla 3-12

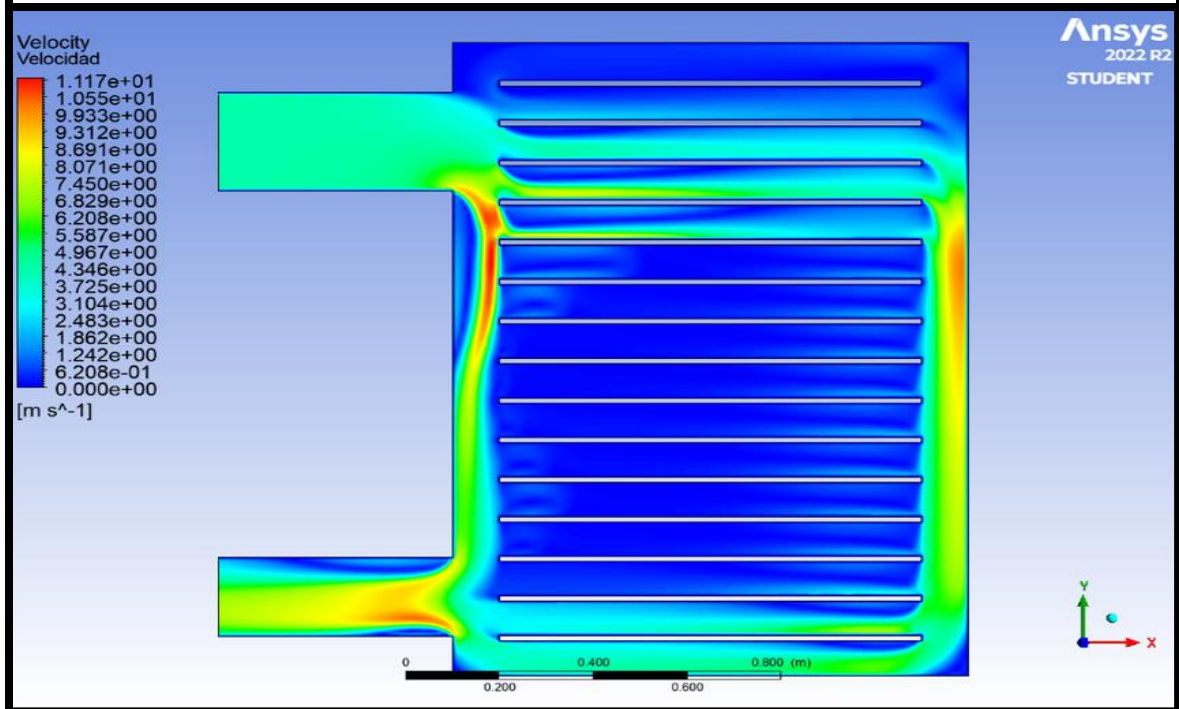
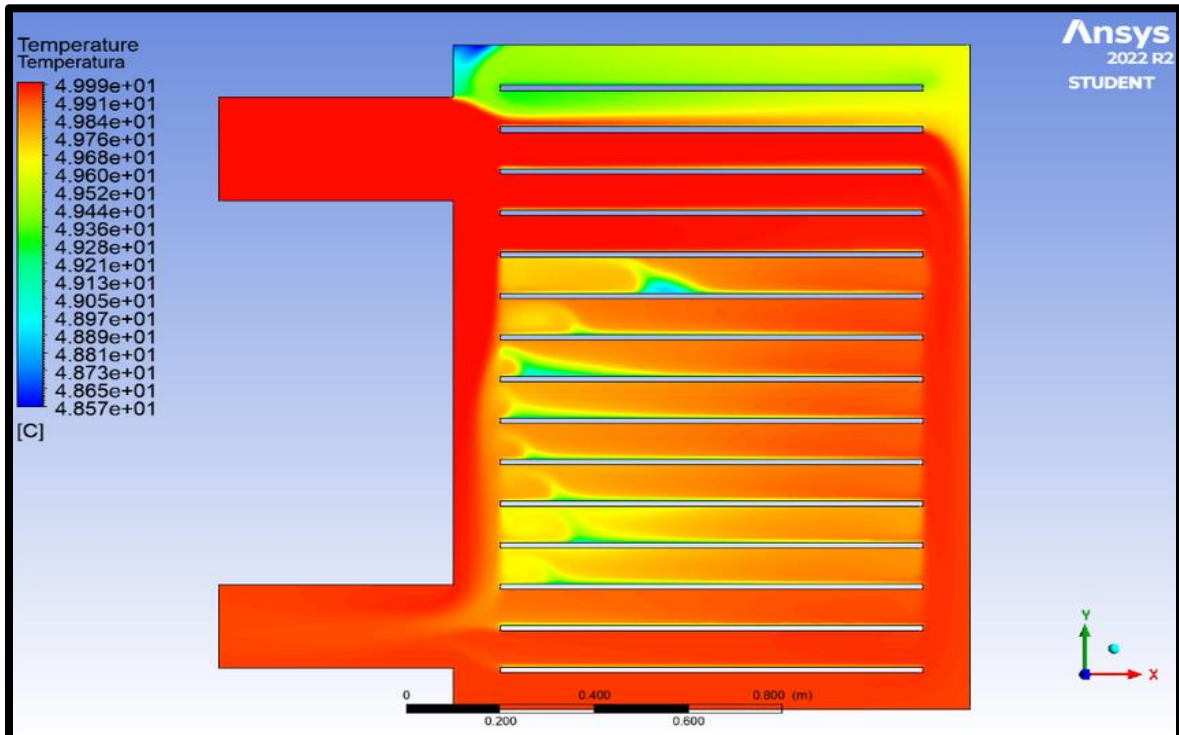
# APÉNDICE C

## Perfiles de velocidad y temperatura graficas

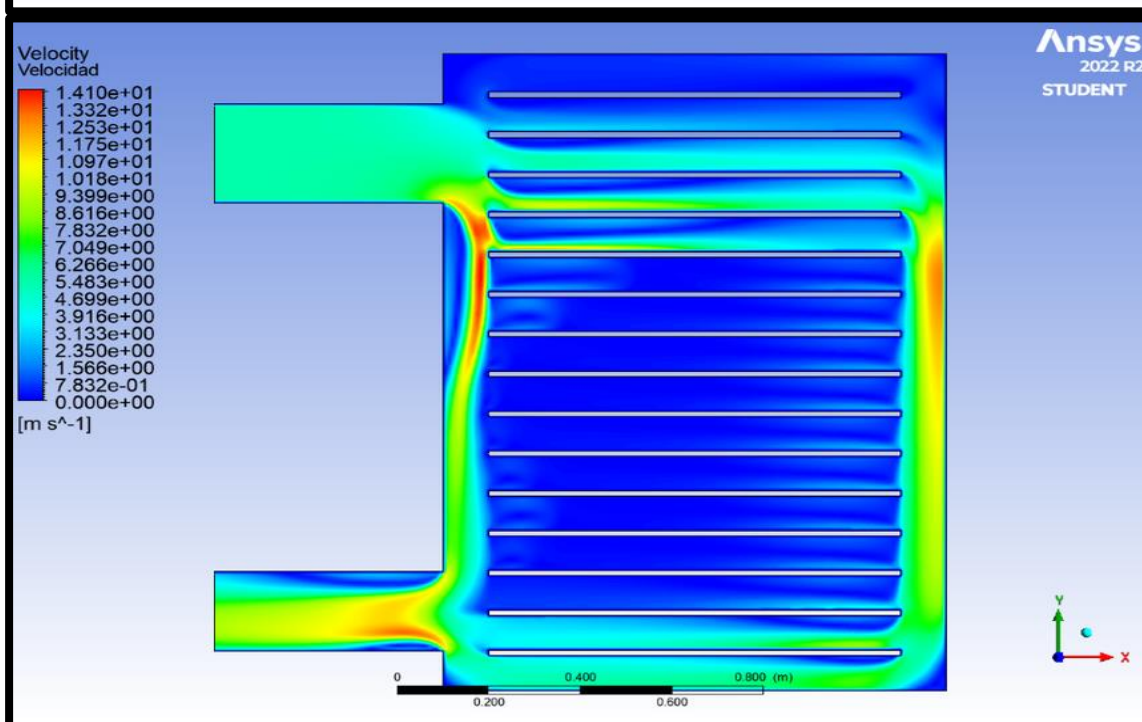
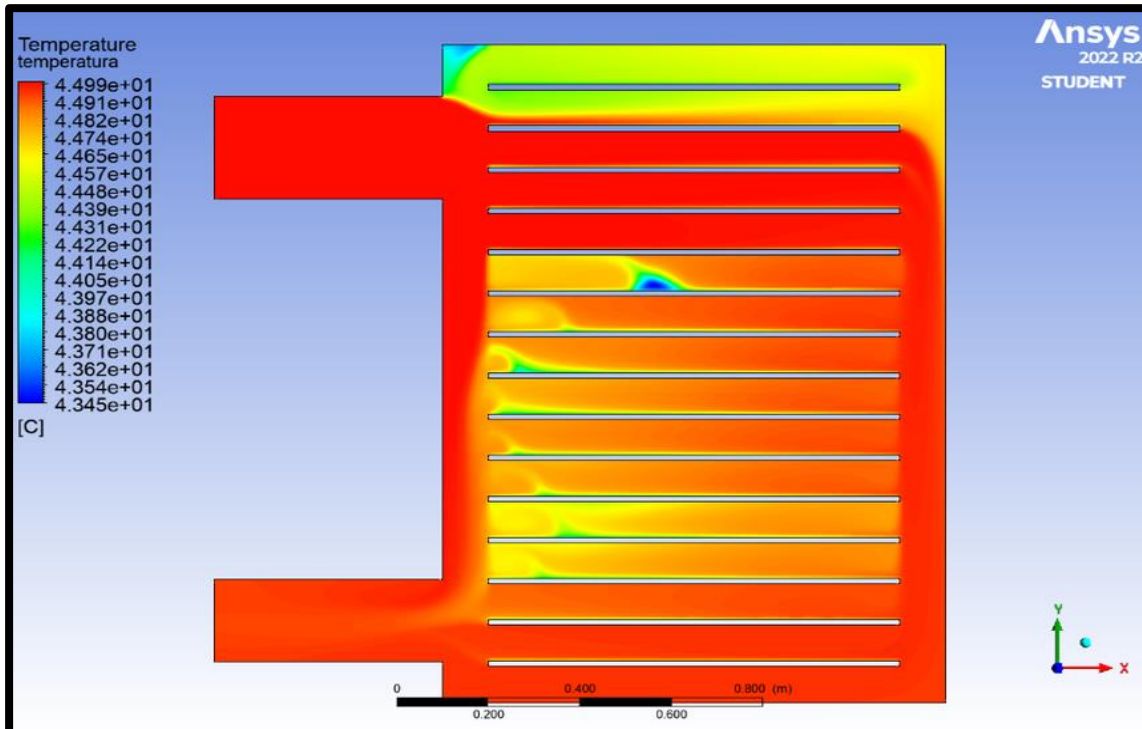
### Alternativa 1: ventiladores traseros



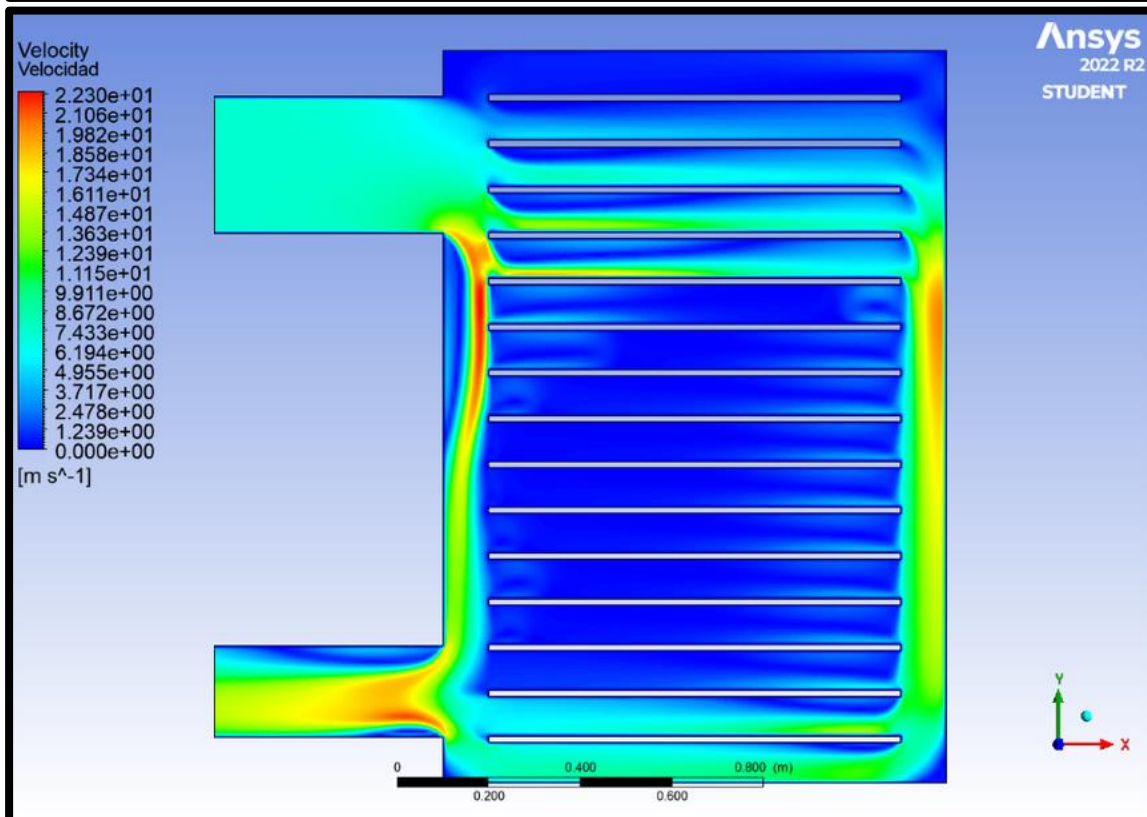
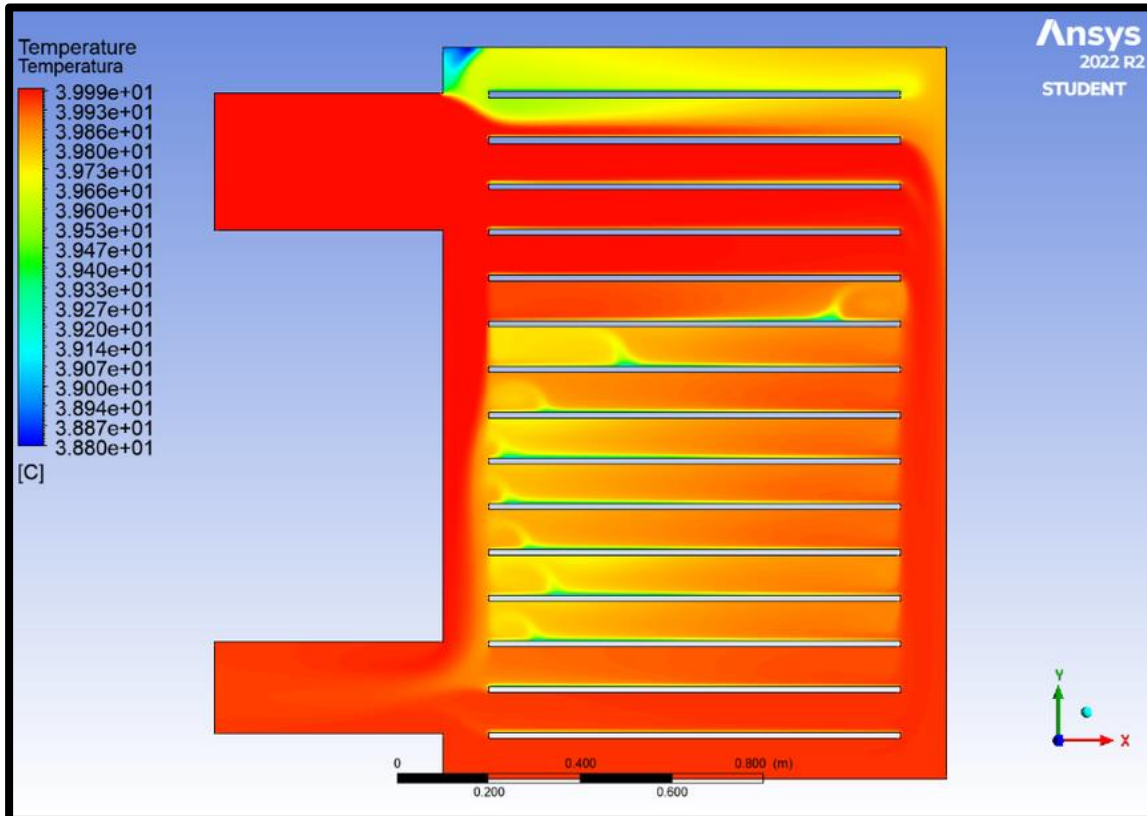
C 1 Alternativa 1: T55 | V 3.6



C 2 Alternativa 1: T50 | V 4.32



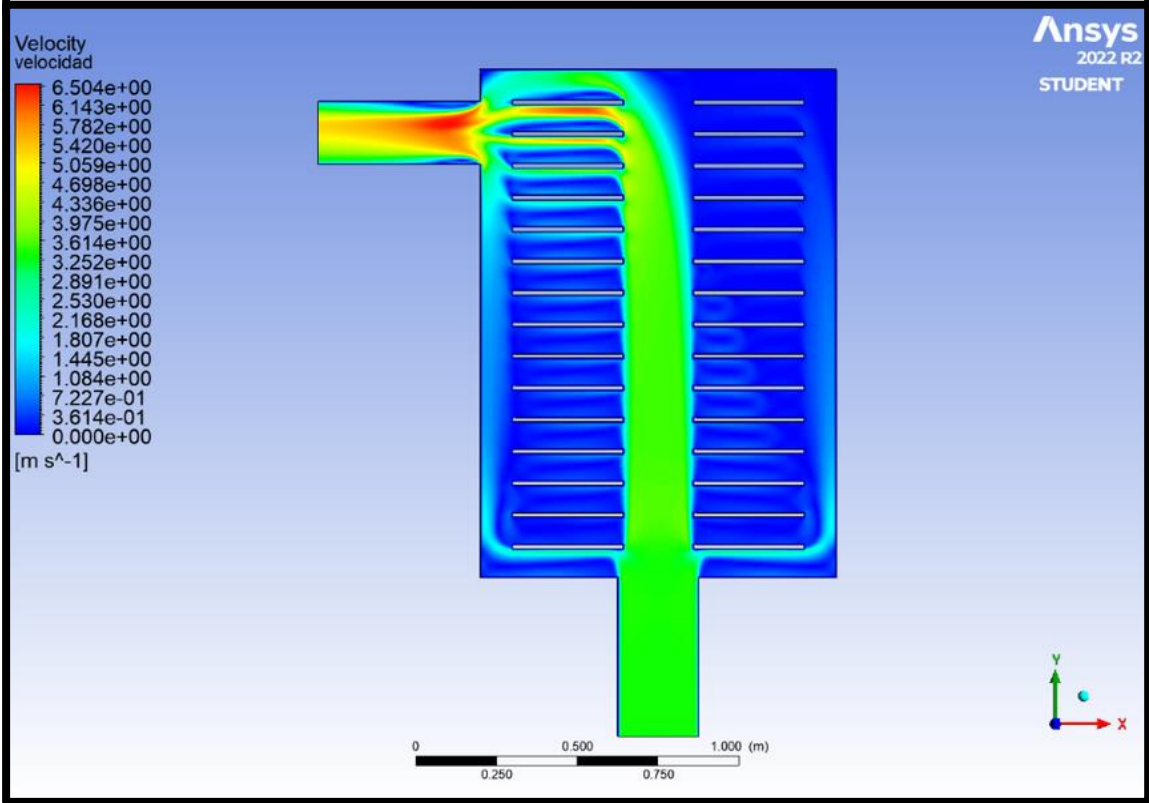
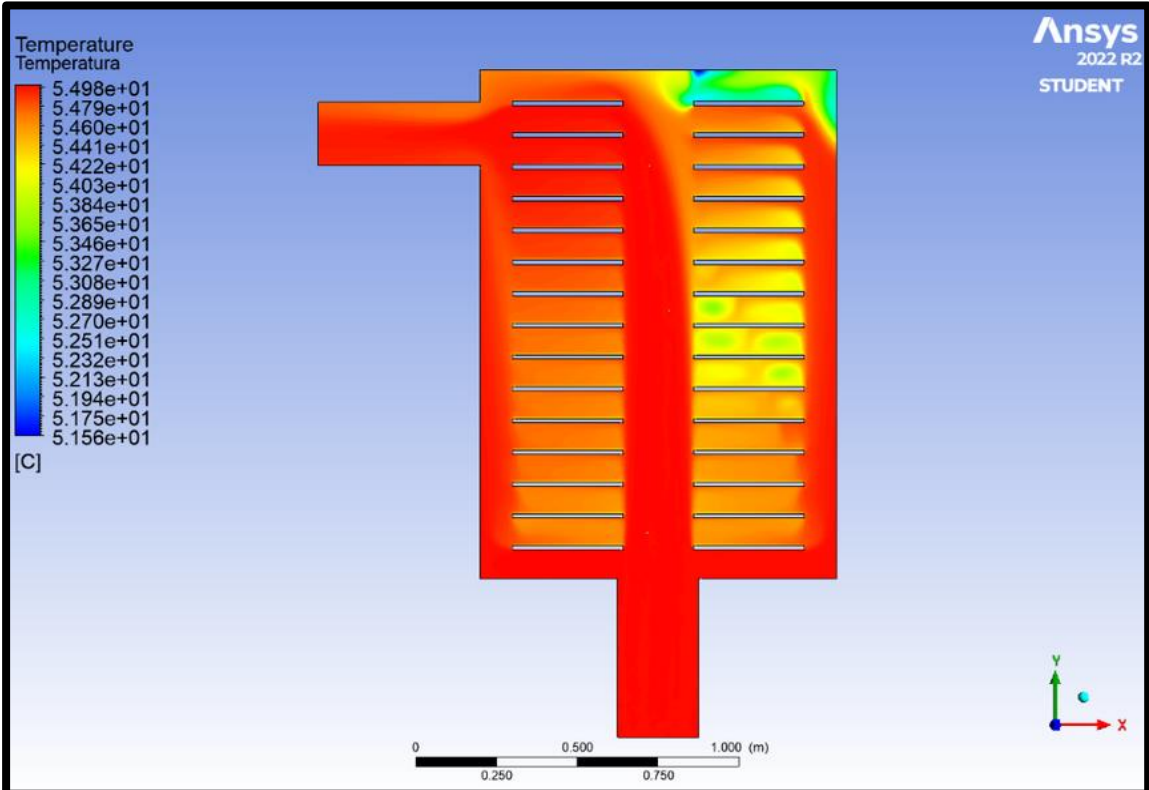
C 3 Alternativa 1: T45 | V 5.44



C 4 Alternativa 1: T40 | V 7.37

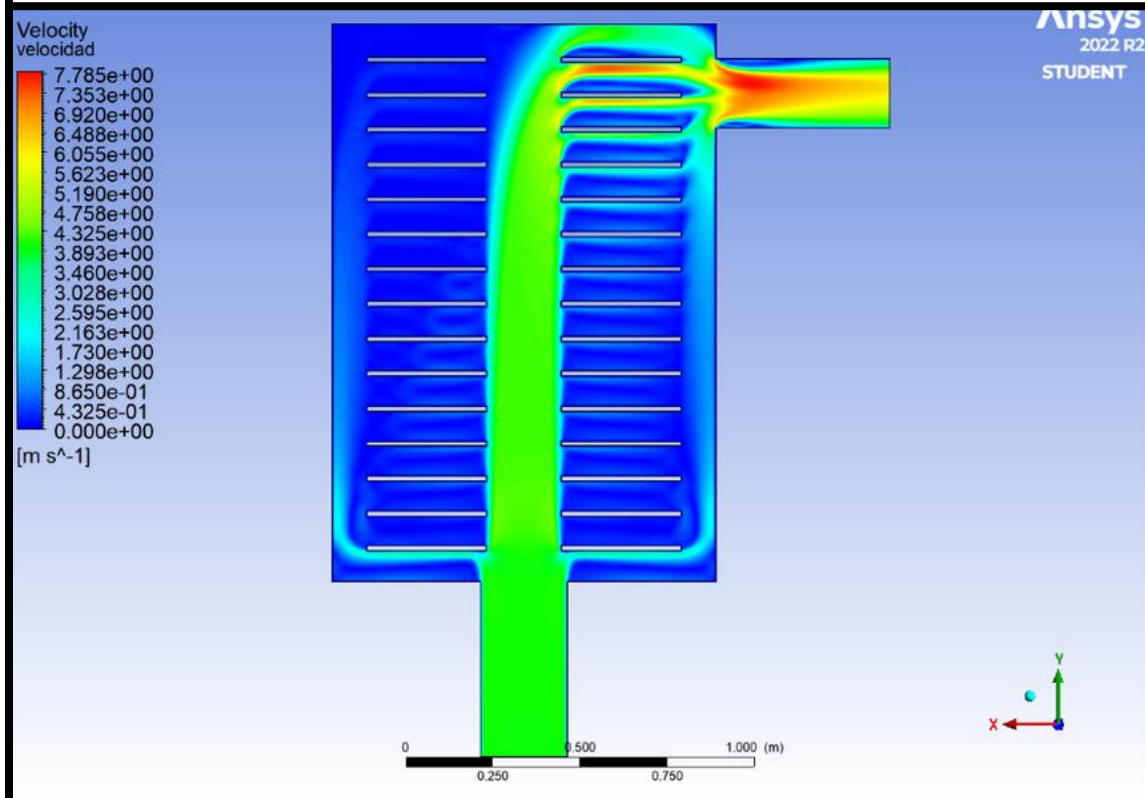
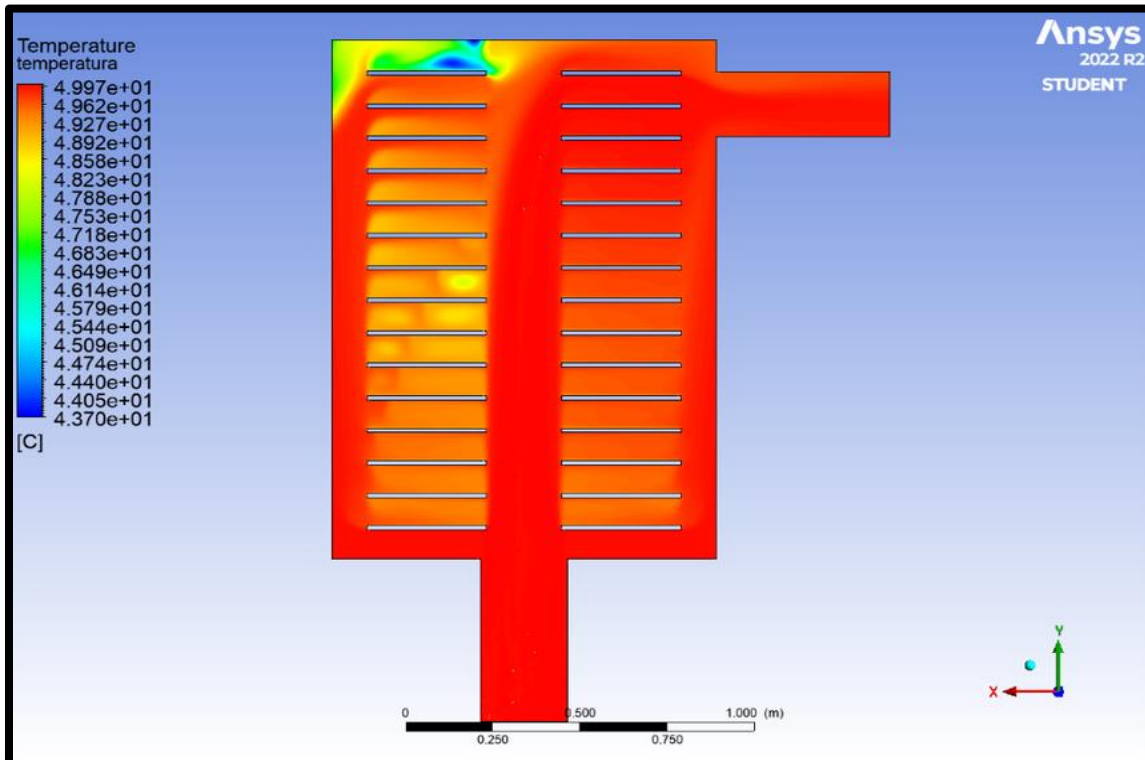


# Alternativa 2: ventiladores inferiores

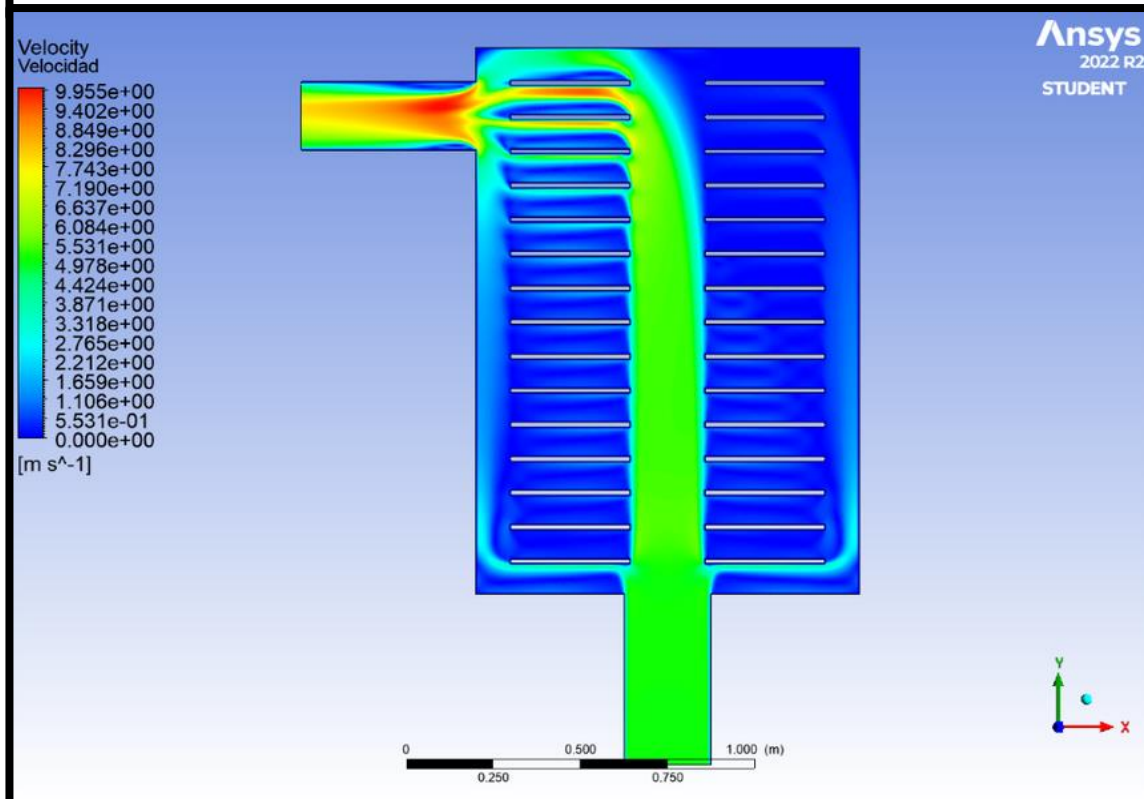
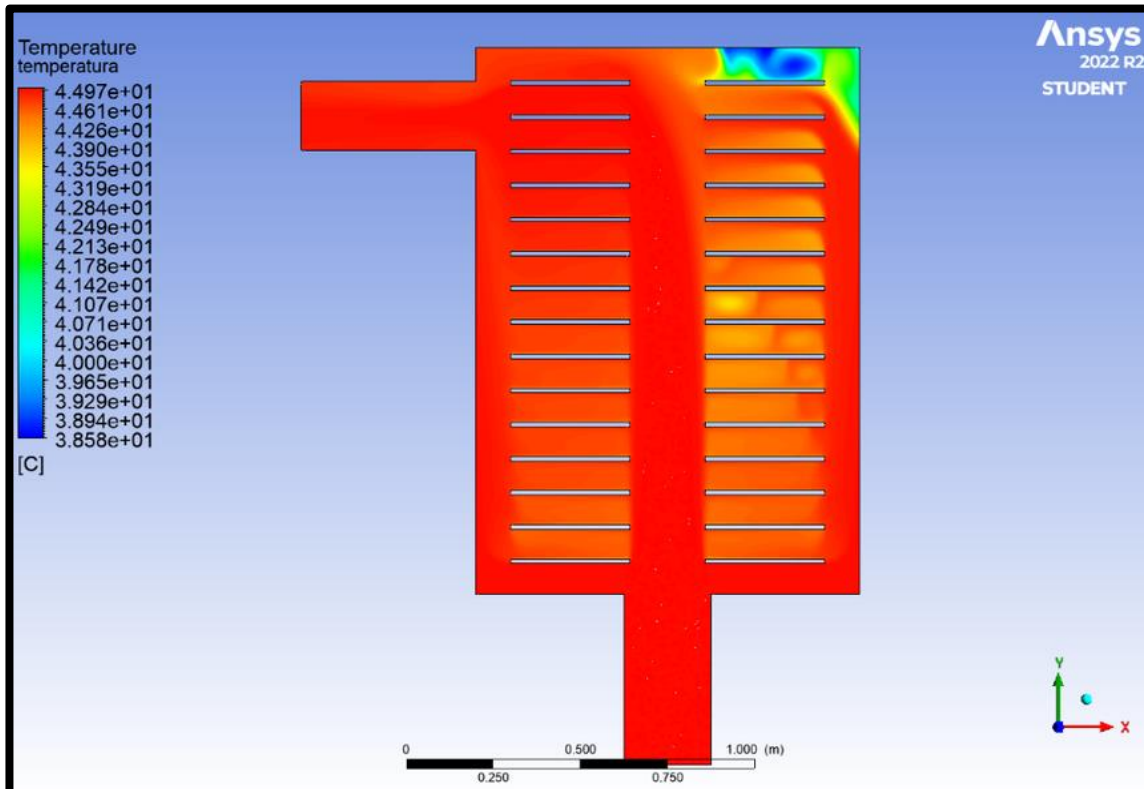


C 5 Alternativa 2: T55 | V 3.35

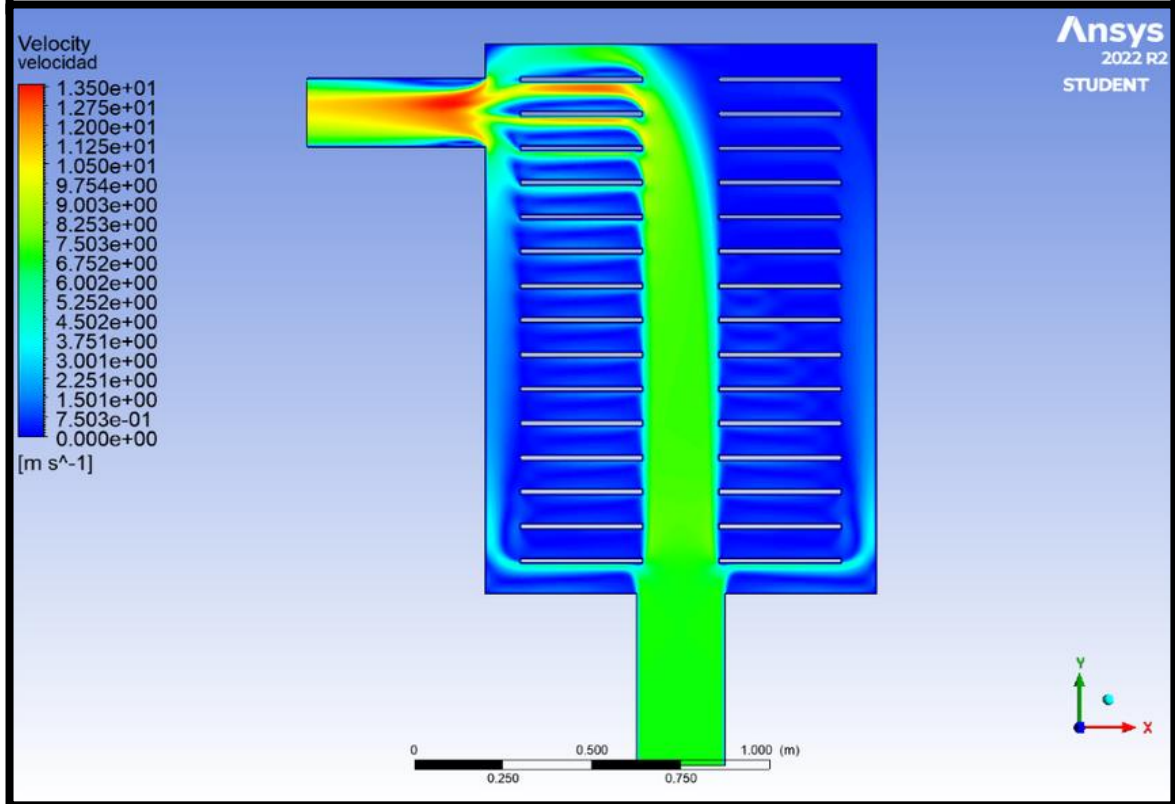
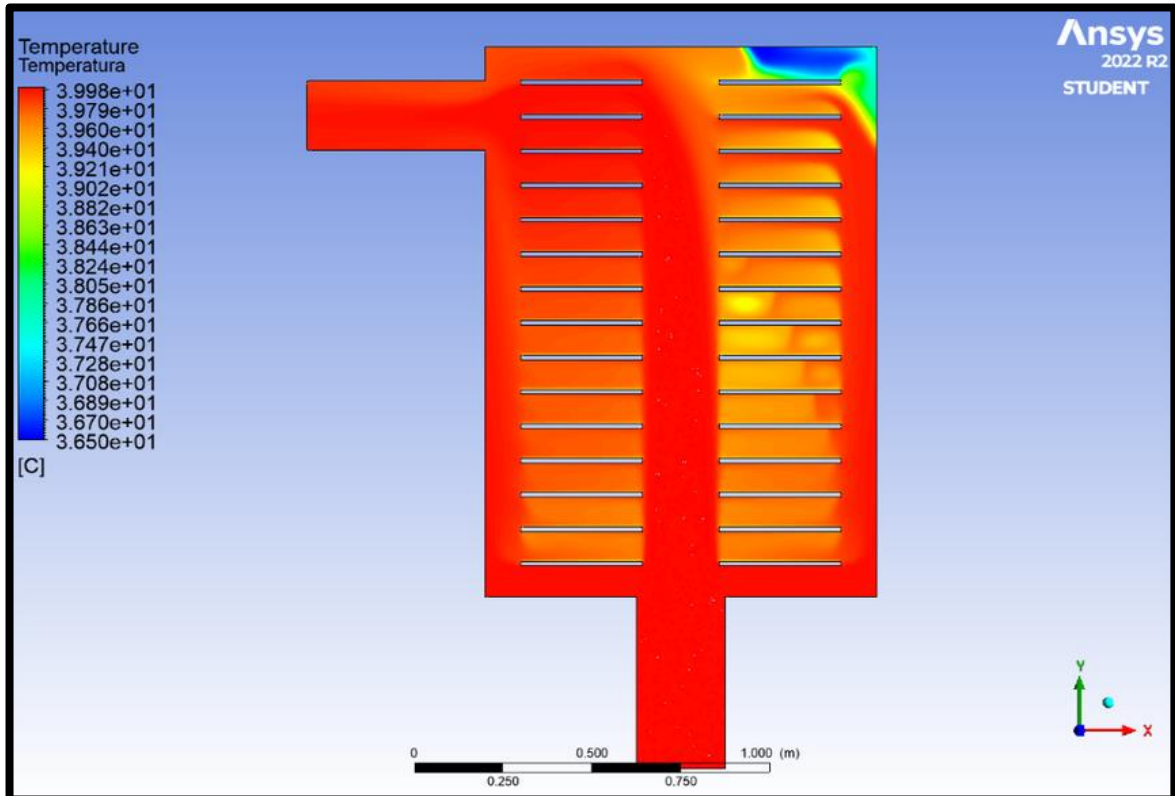




C 6 Alternativa 2: T50 | V 4

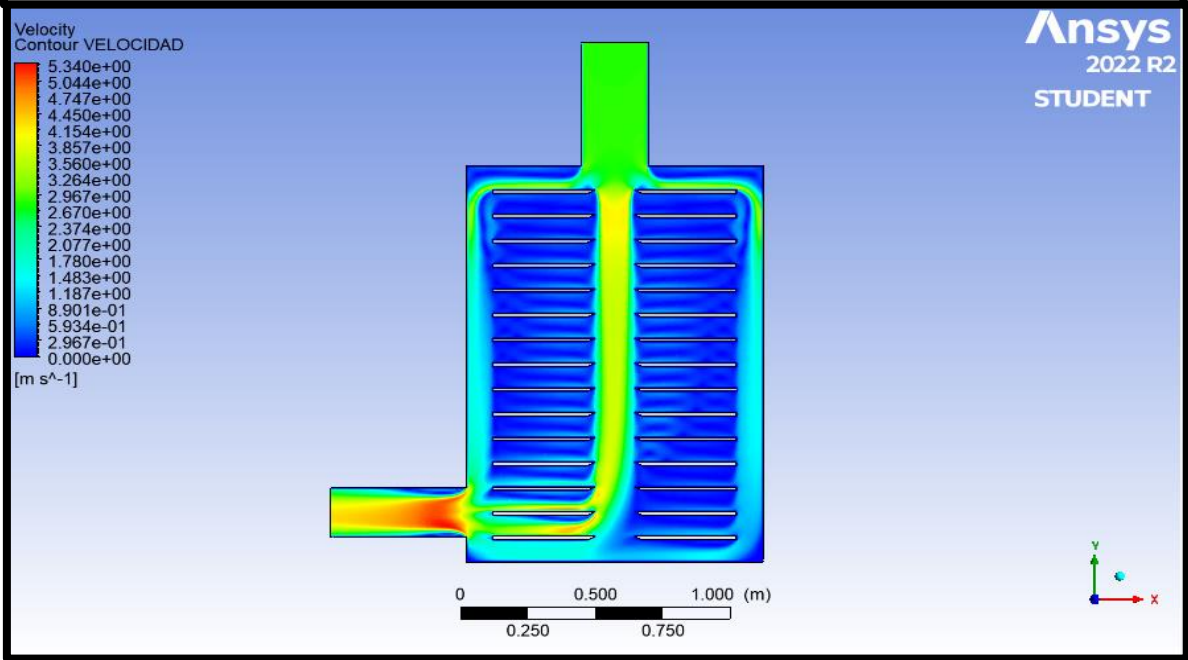
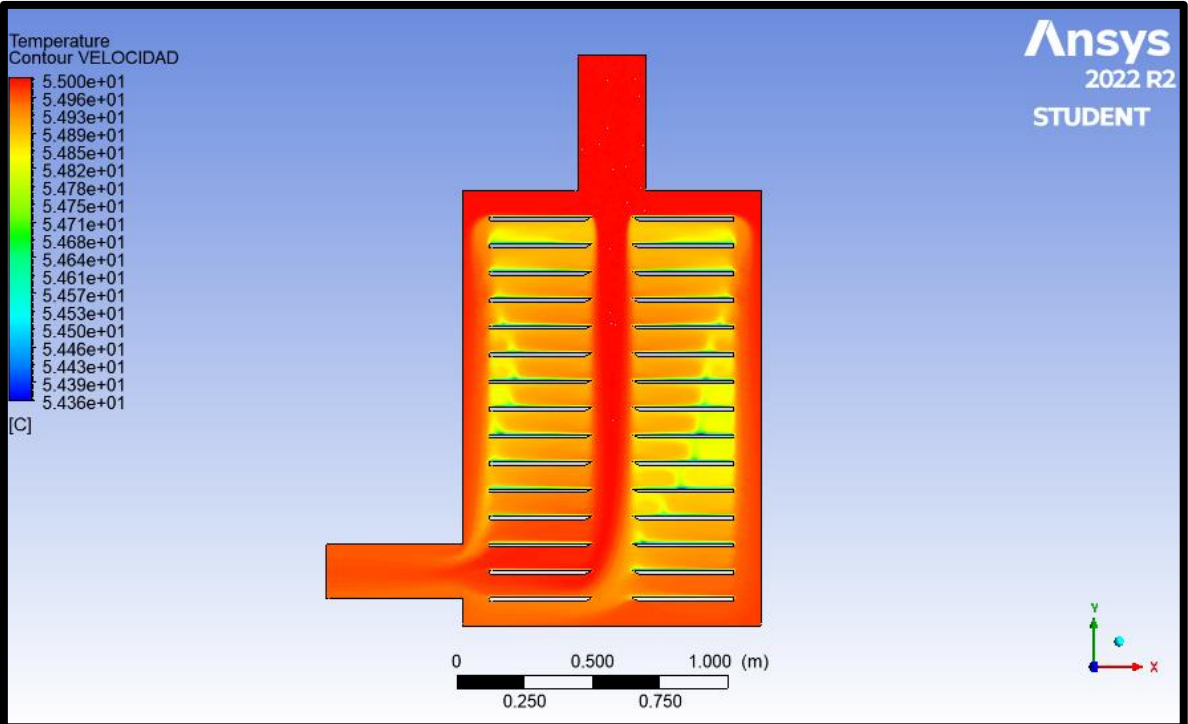


C 7 Alternativa 2: T45 | V5

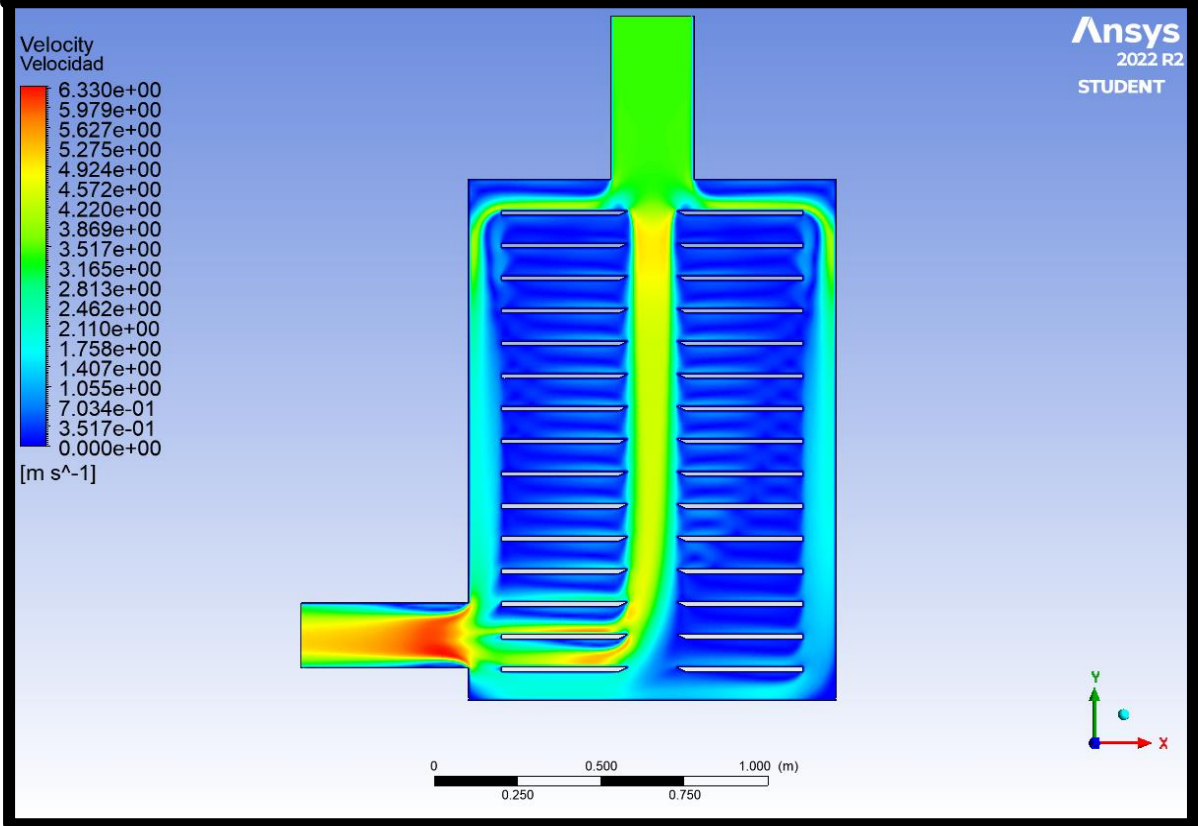
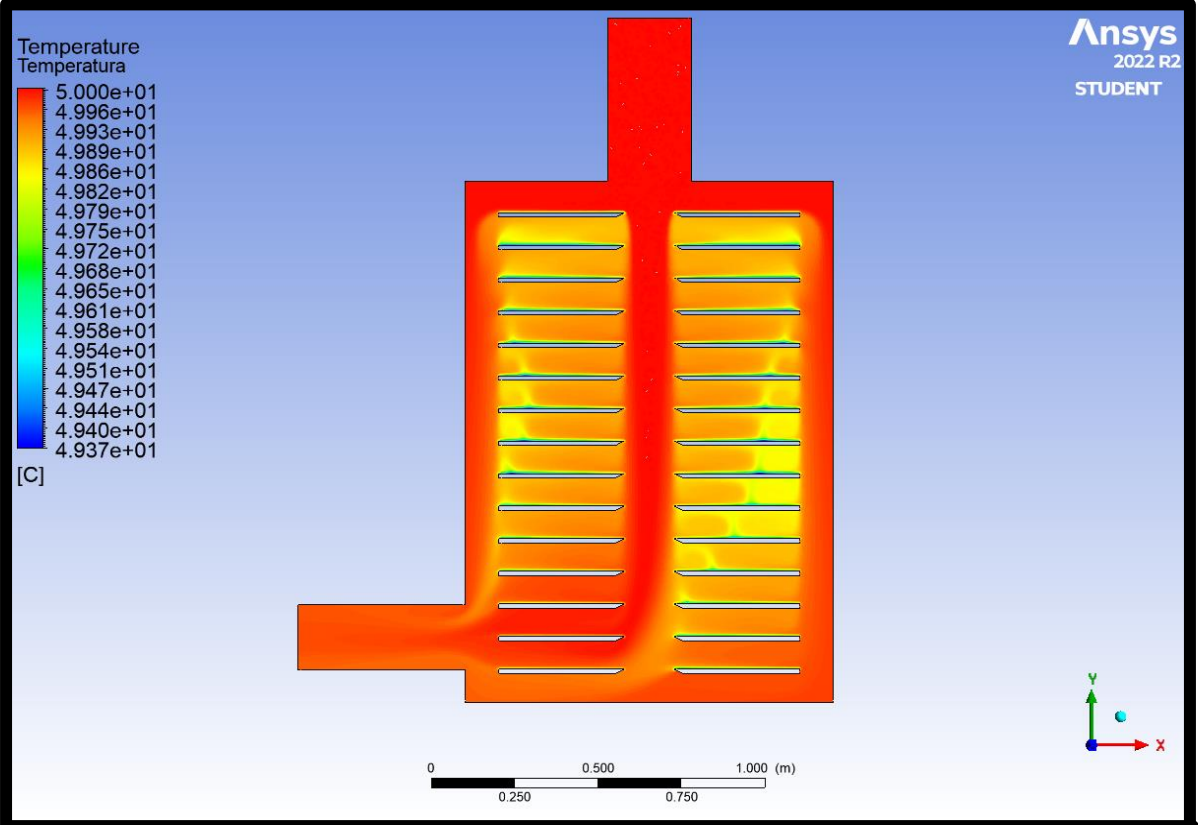


C 8 Alternativa 2: T40 | V6,9

### Alternativa 3: ventiladores superiores

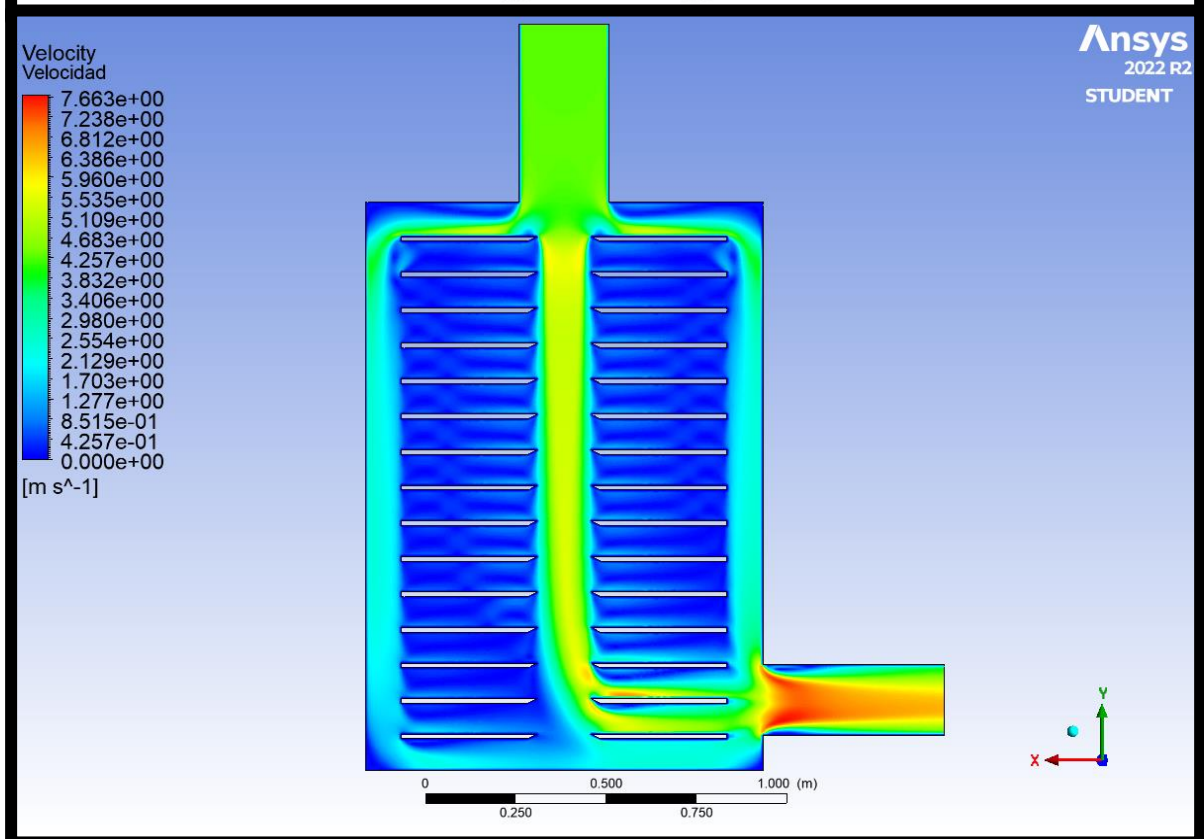
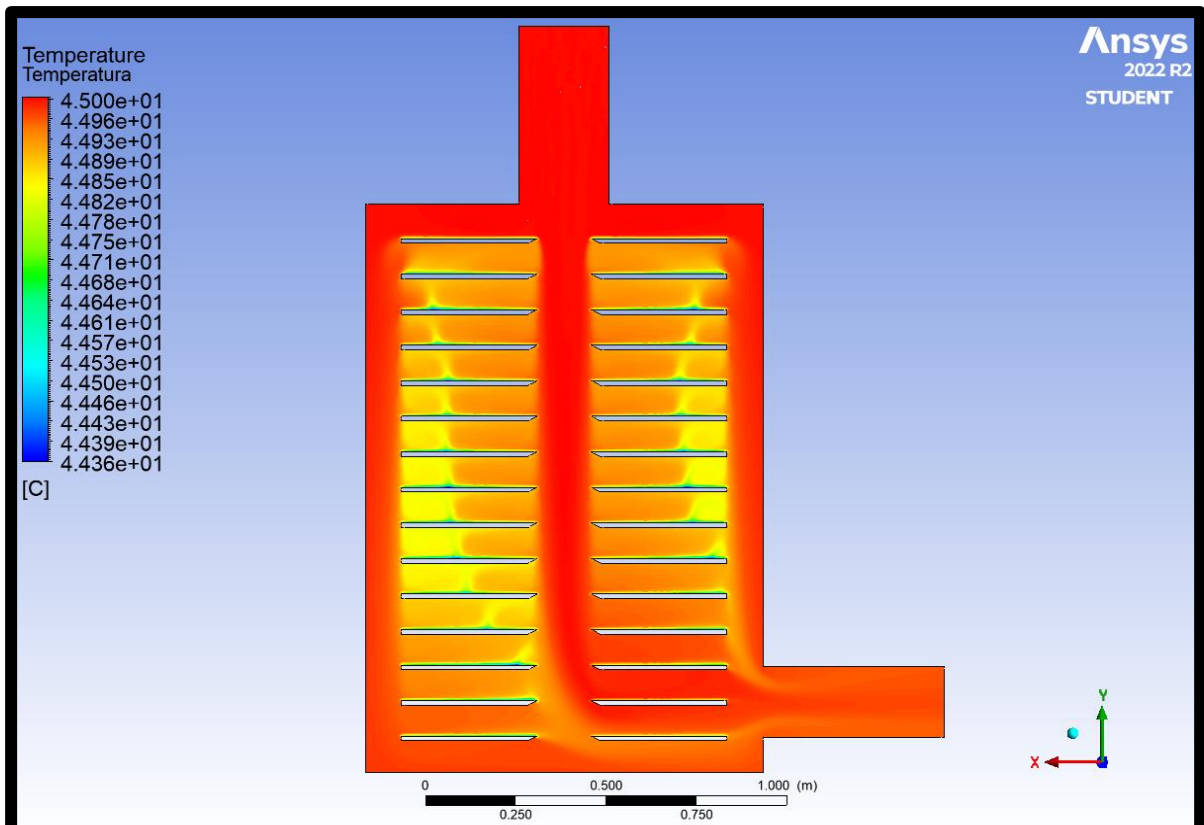


C 9 Alternativa 3: T55 | V2.82

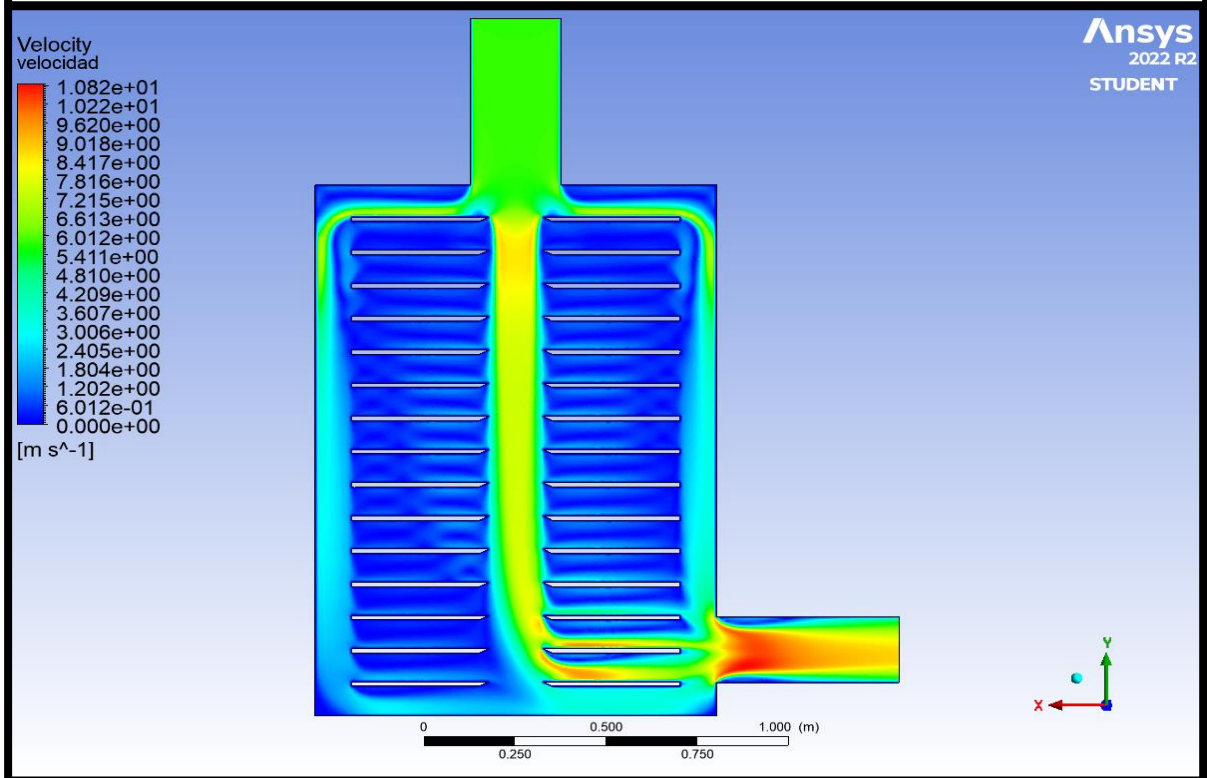
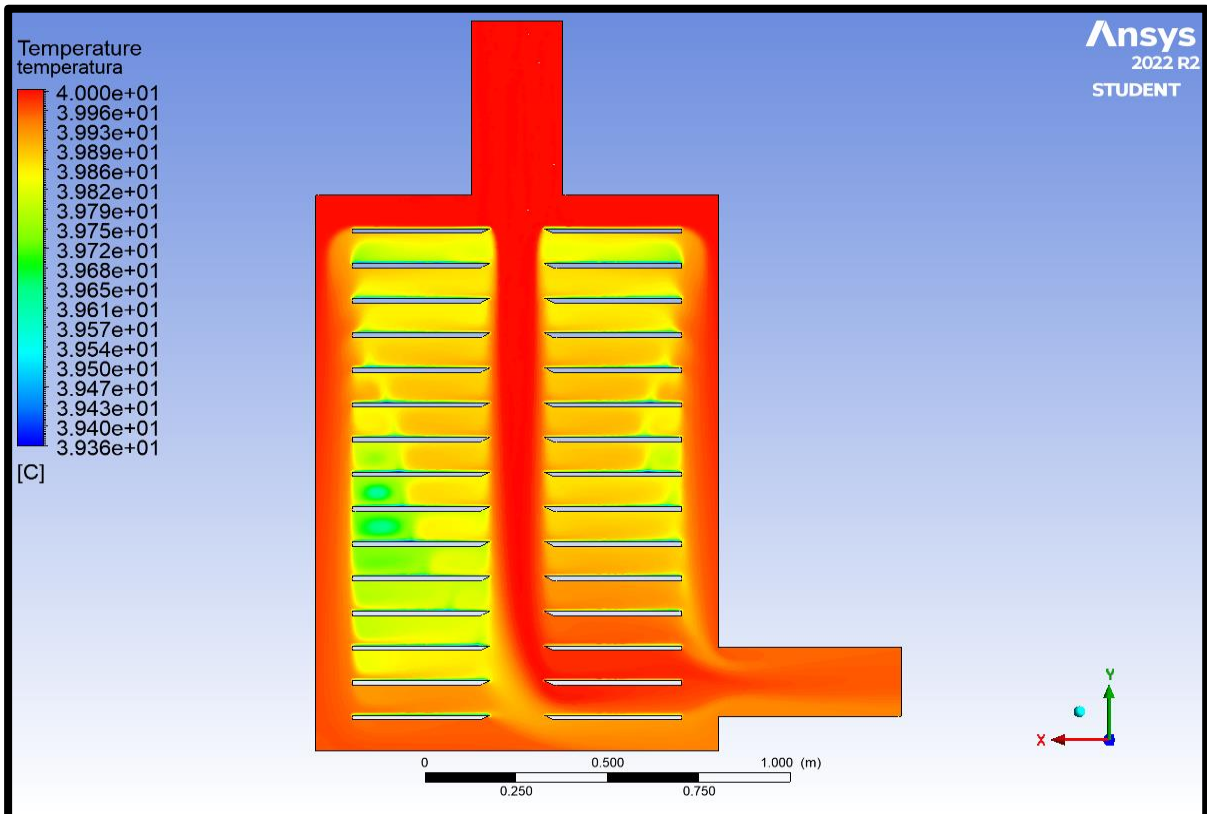


C 10 Alternativa 3: T50 | V 3.39



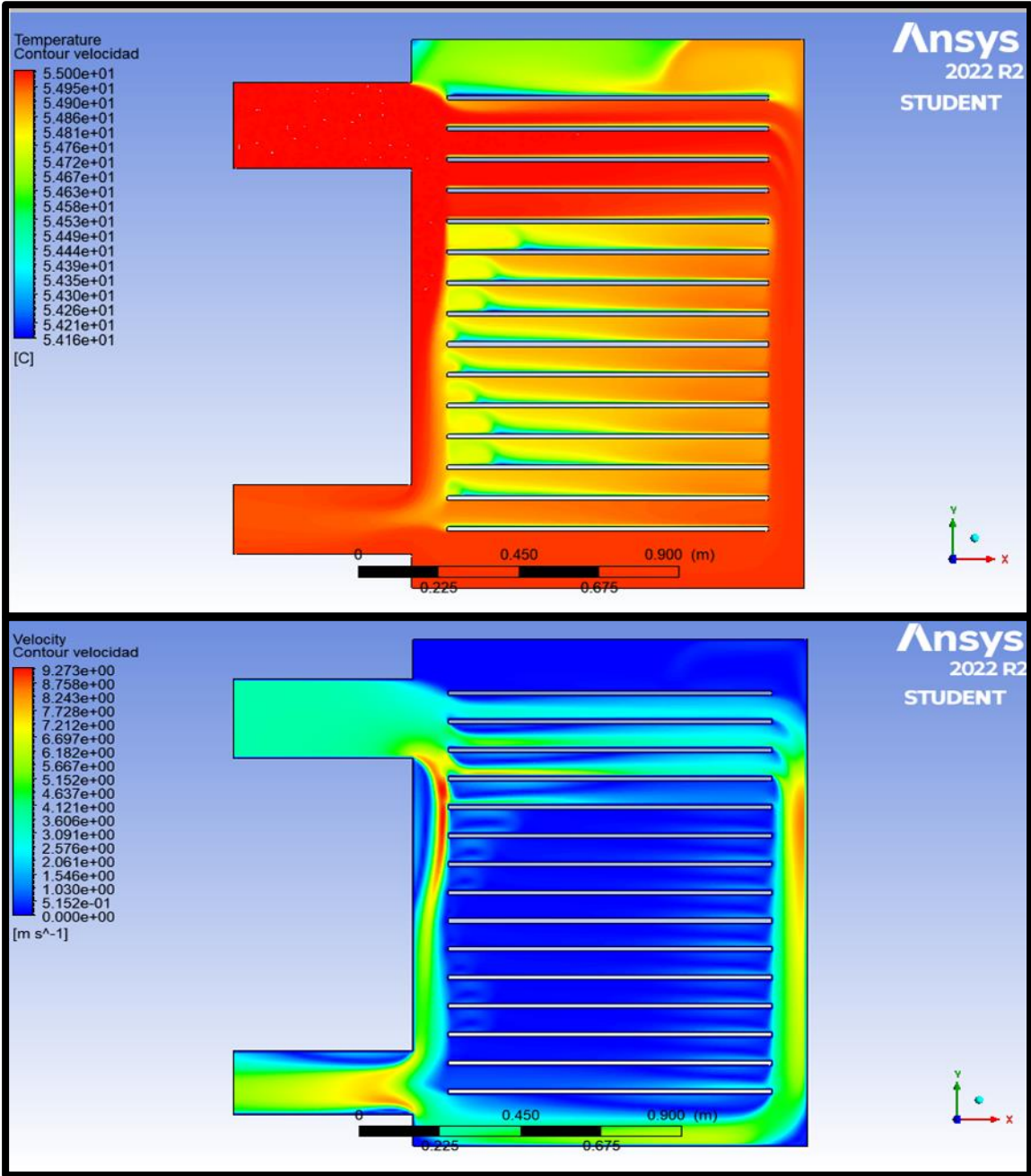


C 11 Alternativa 3: T40 | V4.27



C 12 Alternativa 3: T40 | V4.27

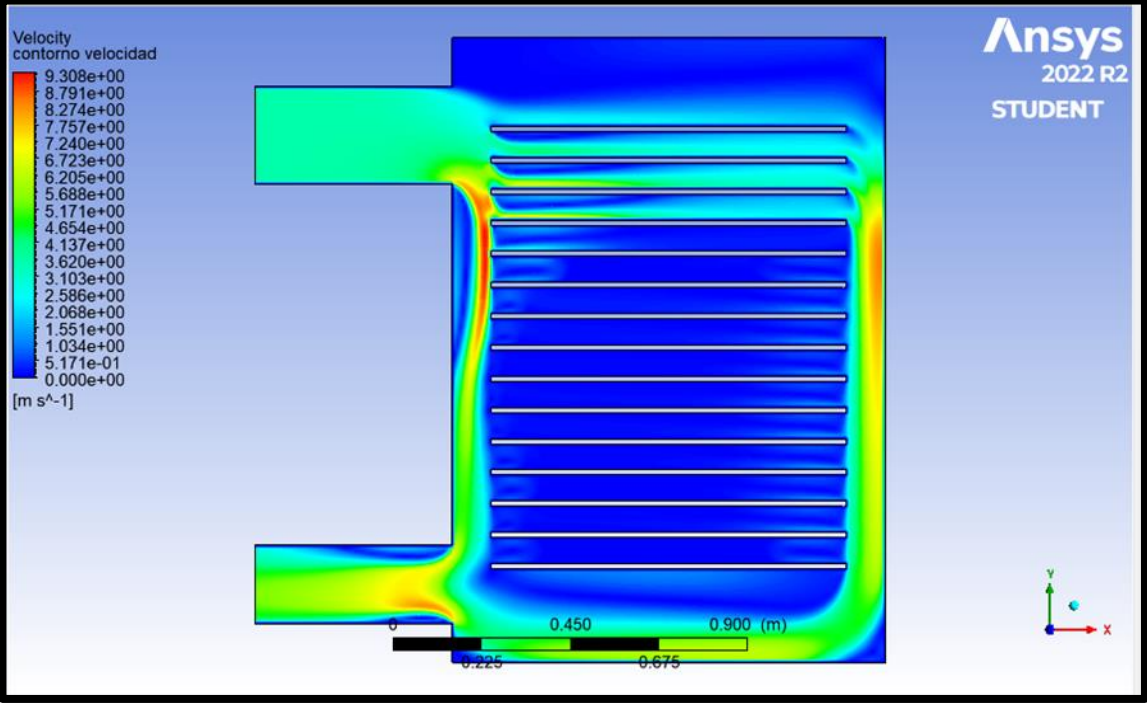
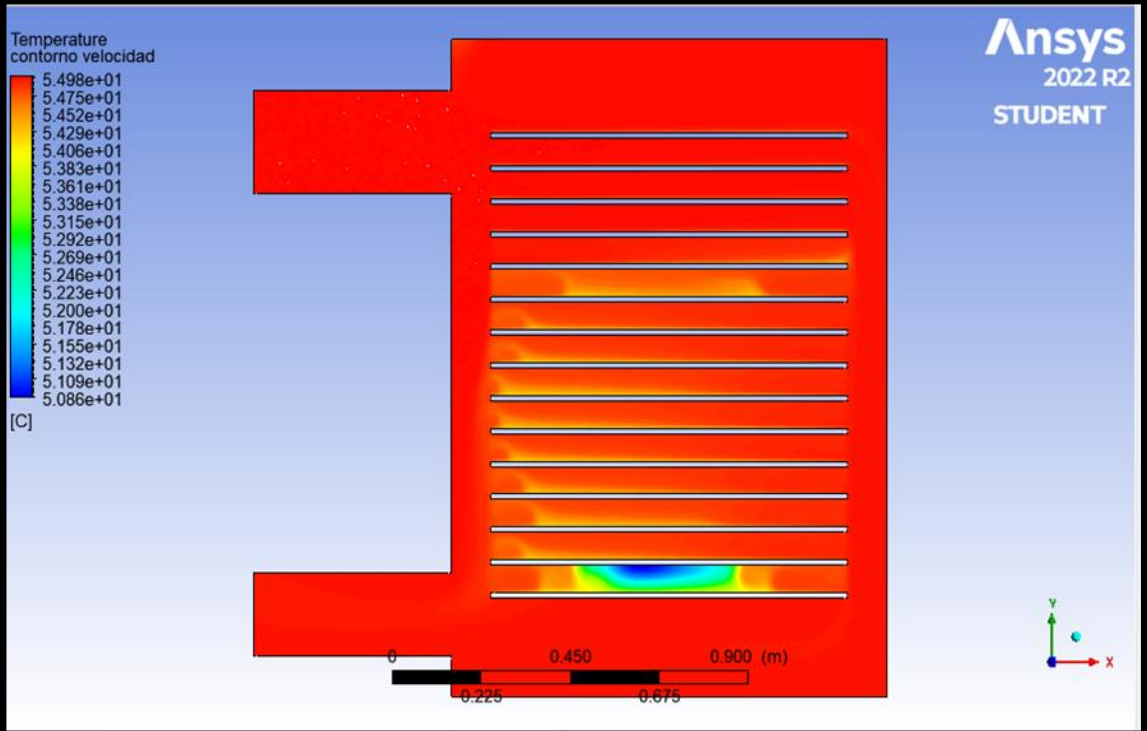
Alternativa: ventiladores traseros separación 9 cm



C 13 Ventiladores traseros separación 9 cm: T55 | V3.6

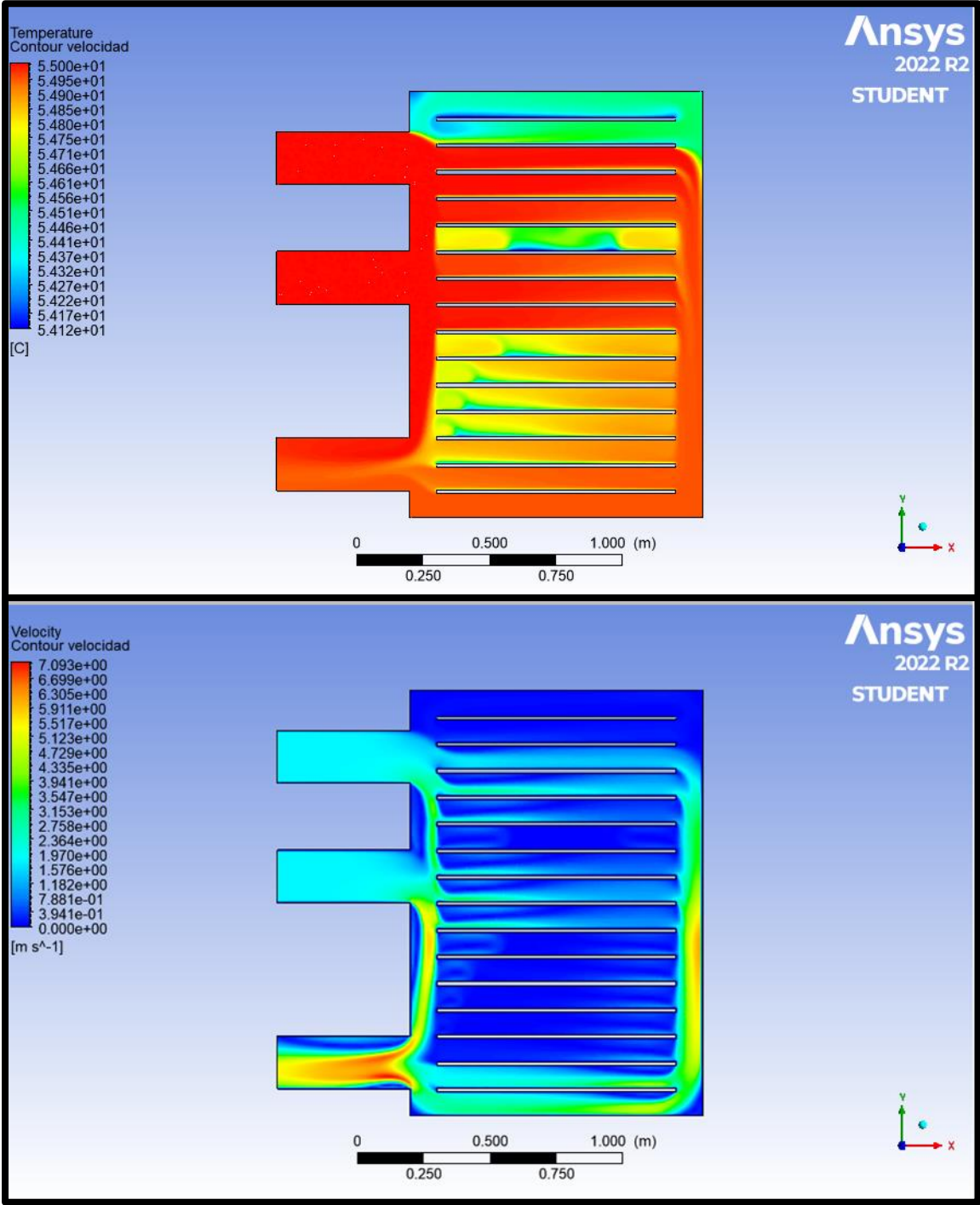


Alternativa: ventiladores traseros separación 8 cm



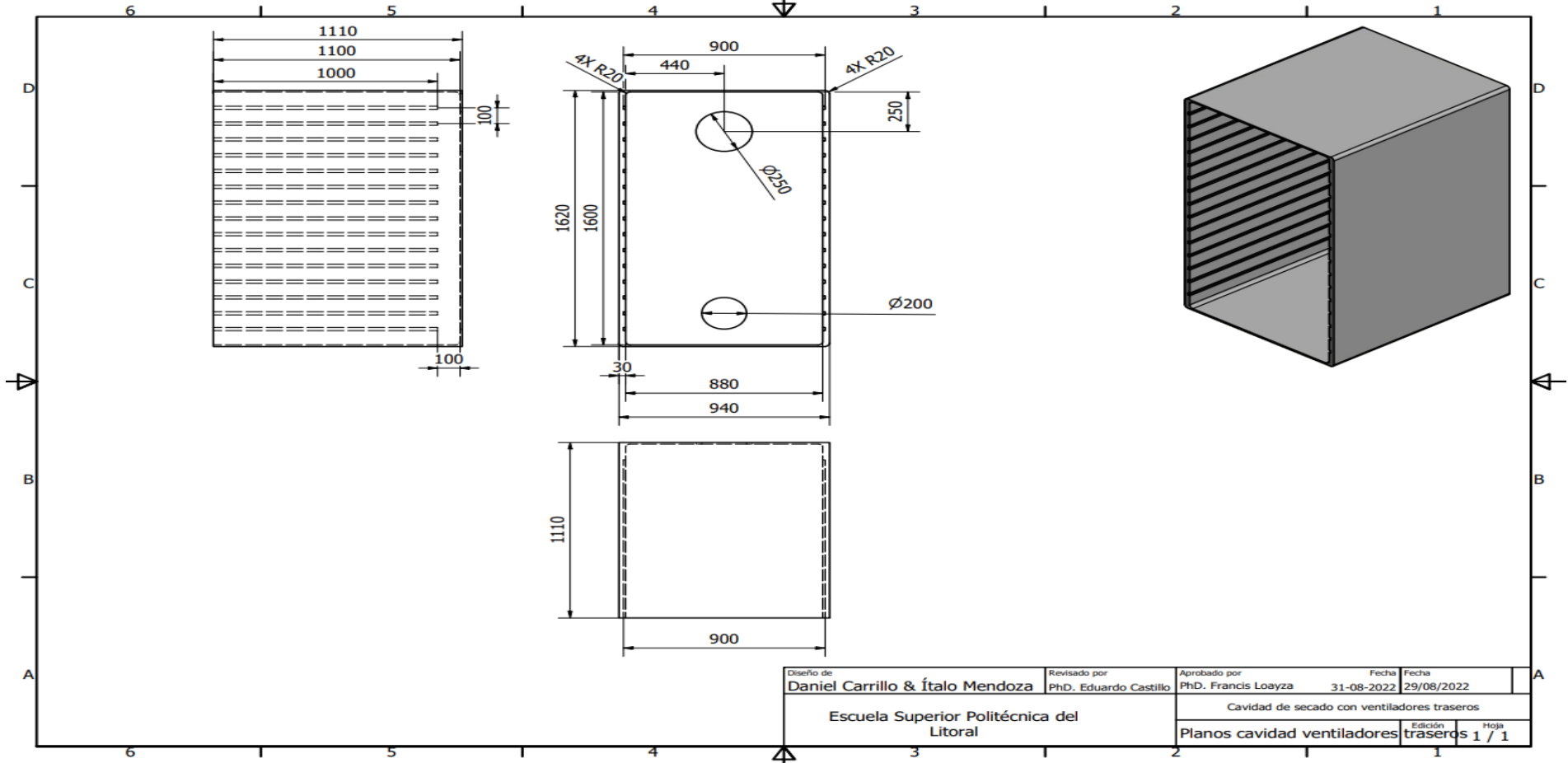
C 14 Ventiladores traseros separación 8 cm: T55 | V3,6

# Alternativa dos ventiladores: ventiladores traseros



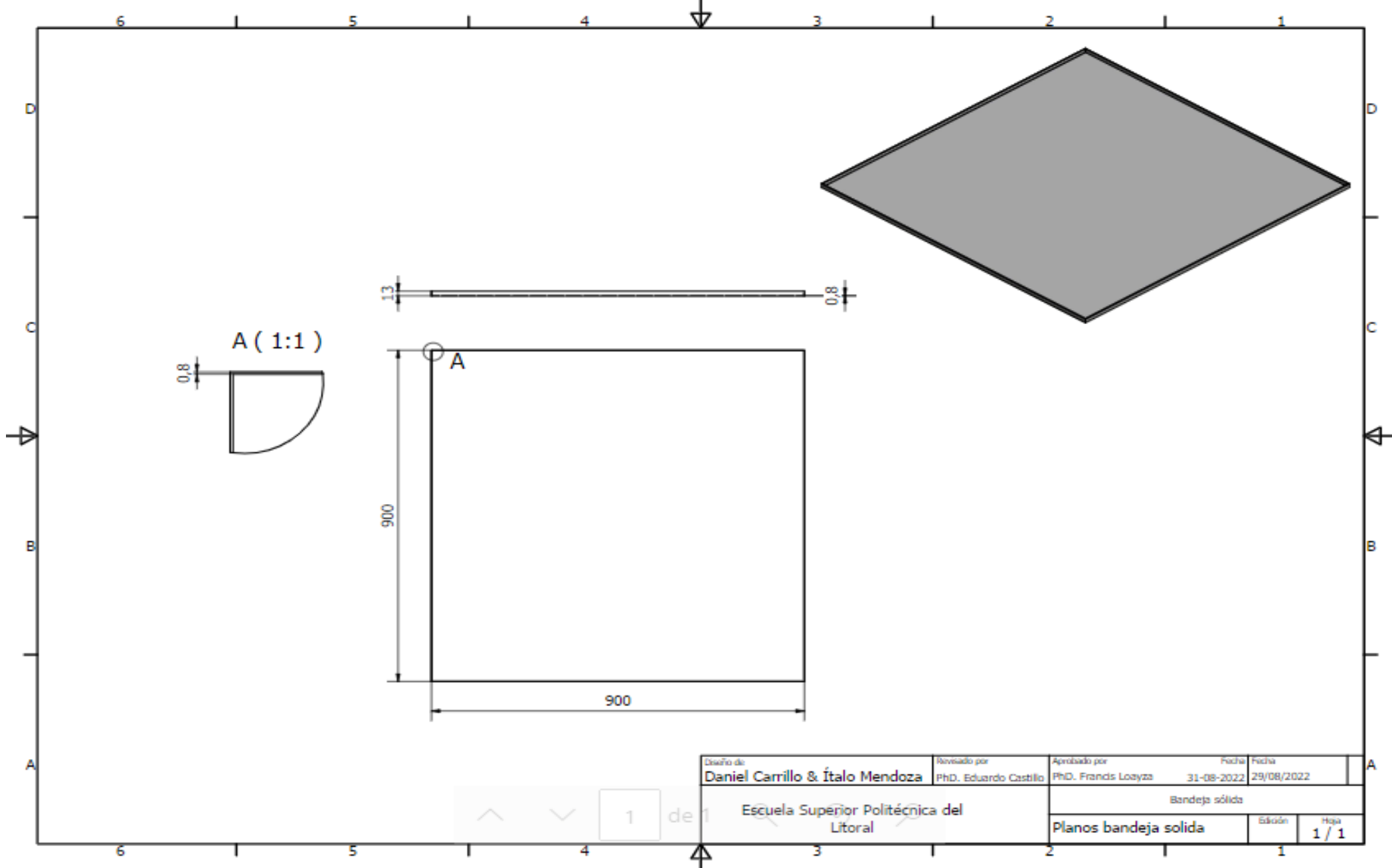
C 15 Dos ventiladores traseros: T55 | V1.8

# APÉNDICE D



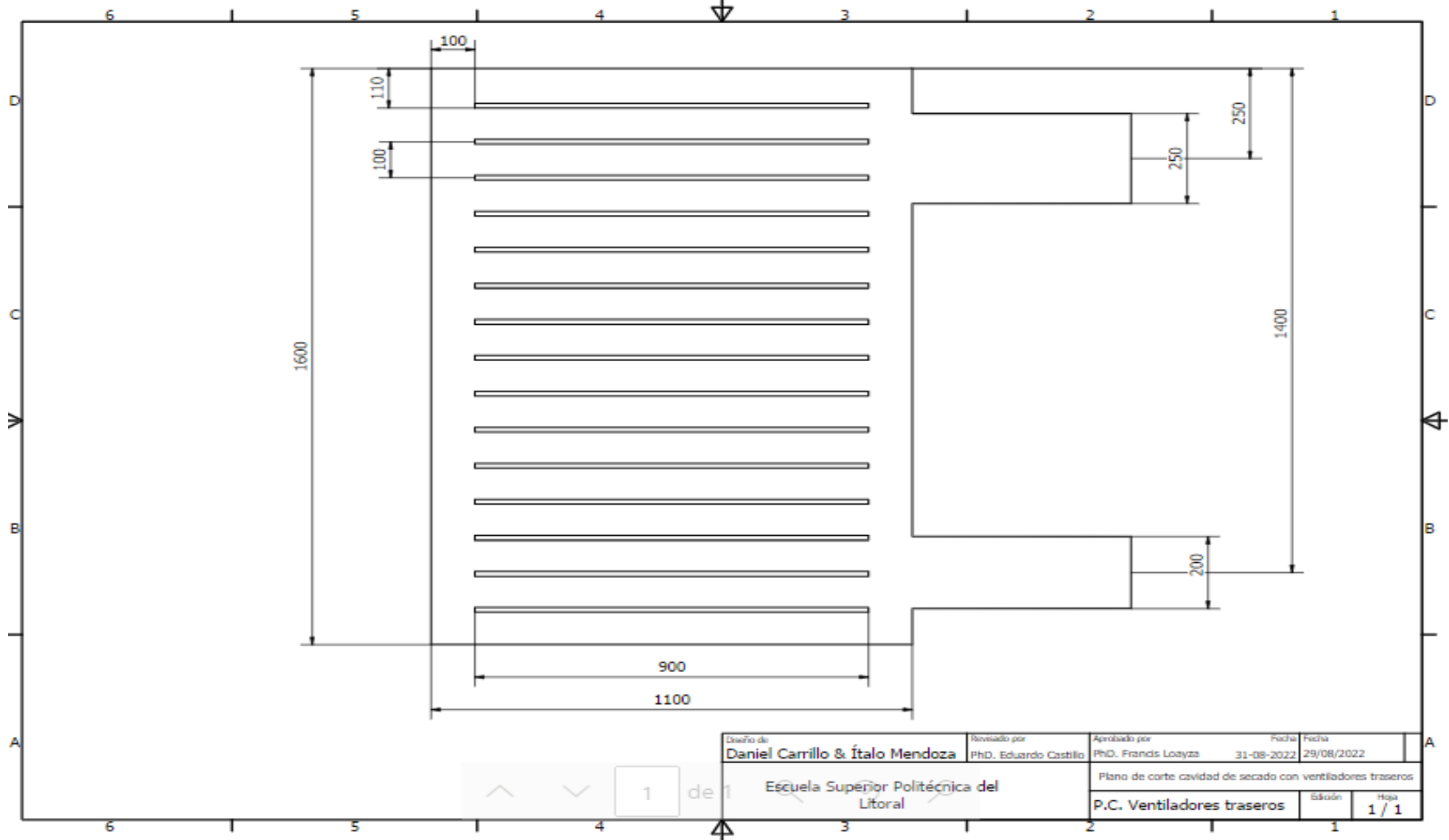
Diseño de <b>Daniel Carrillo &amp; Ítalo Mendoza</b>	Revisado por PhD. Eduardo Castillo	Aprobado por PhD. Francis Loayza	Fecha 31-08-2022	Fecha 29/08/2022
Escuela Superior Politécnica del Litoral		Cavidad de secado con ventiladores traseros		
		Planos cavidad ventiladores traseros	Edición	Hoja

PLANO 1 Cavidad de secado ventiladores traseros

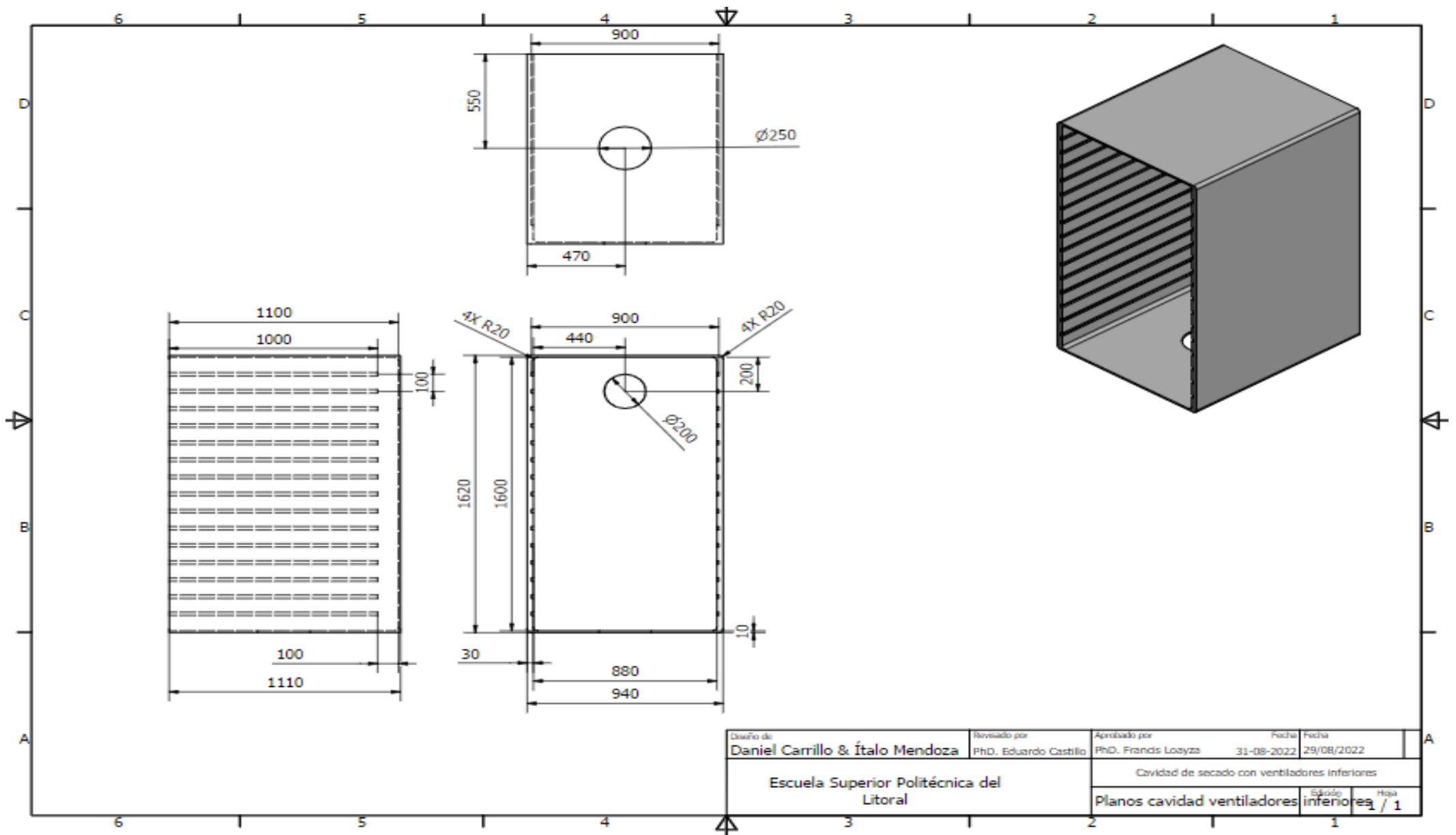


Diseño de <b>Daniel Carrillo &amp; Ítalo Mendoza</b>	Revisado por PhD. Eduardo Castillo	Aprobado por PhD. Francis Loayza	Fecha 31-08-2022	Fecha 29/08/2022
Bandeja sólida				
Escuela Superior Politécnica del Litoral			Edición	Hoja 1 / 1
Planos bandeja solida				

**PLANO 2 Bandeja Solida**

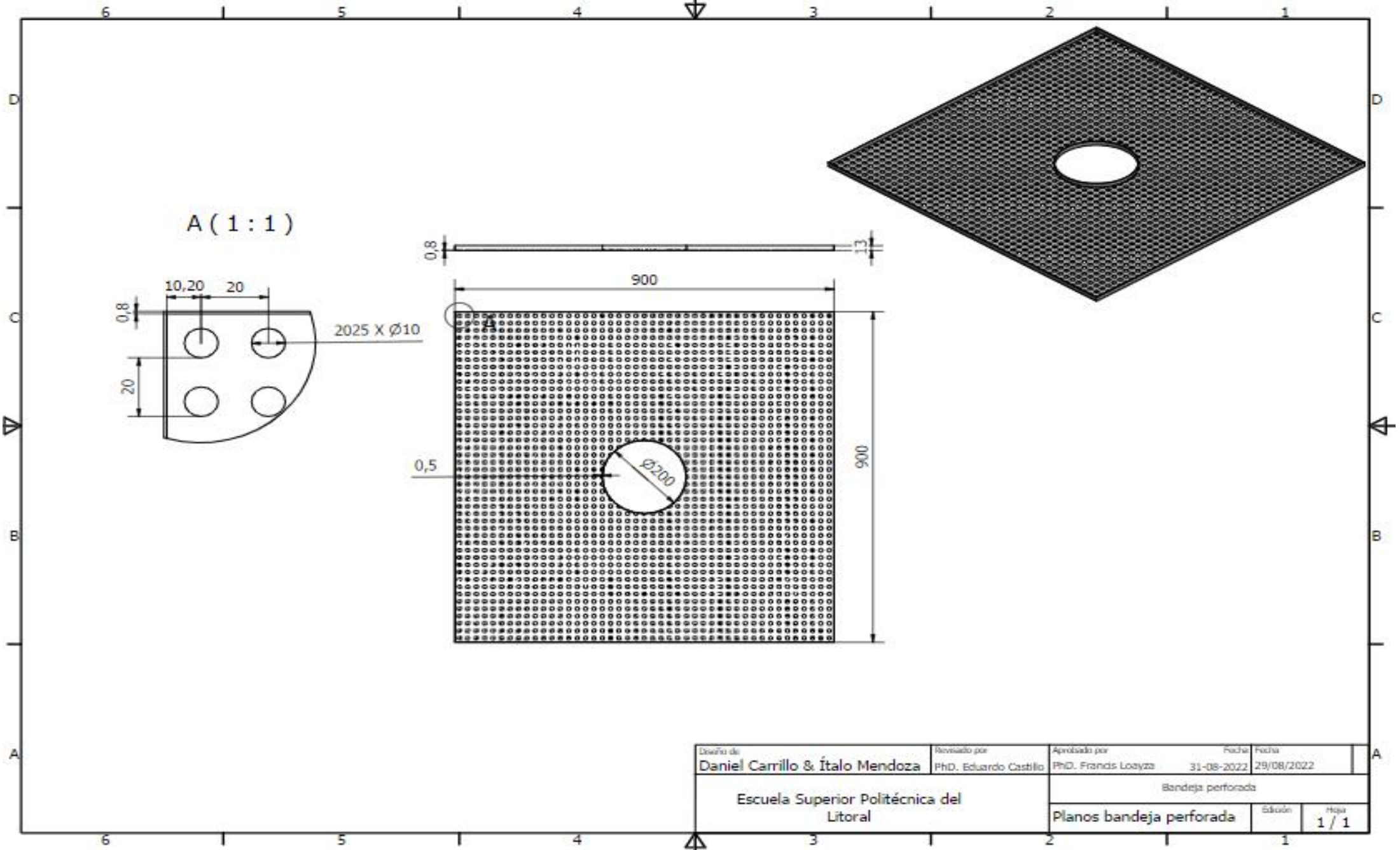


PLANO 3 Plano de corte cavidad de secado con ventiladores traseros



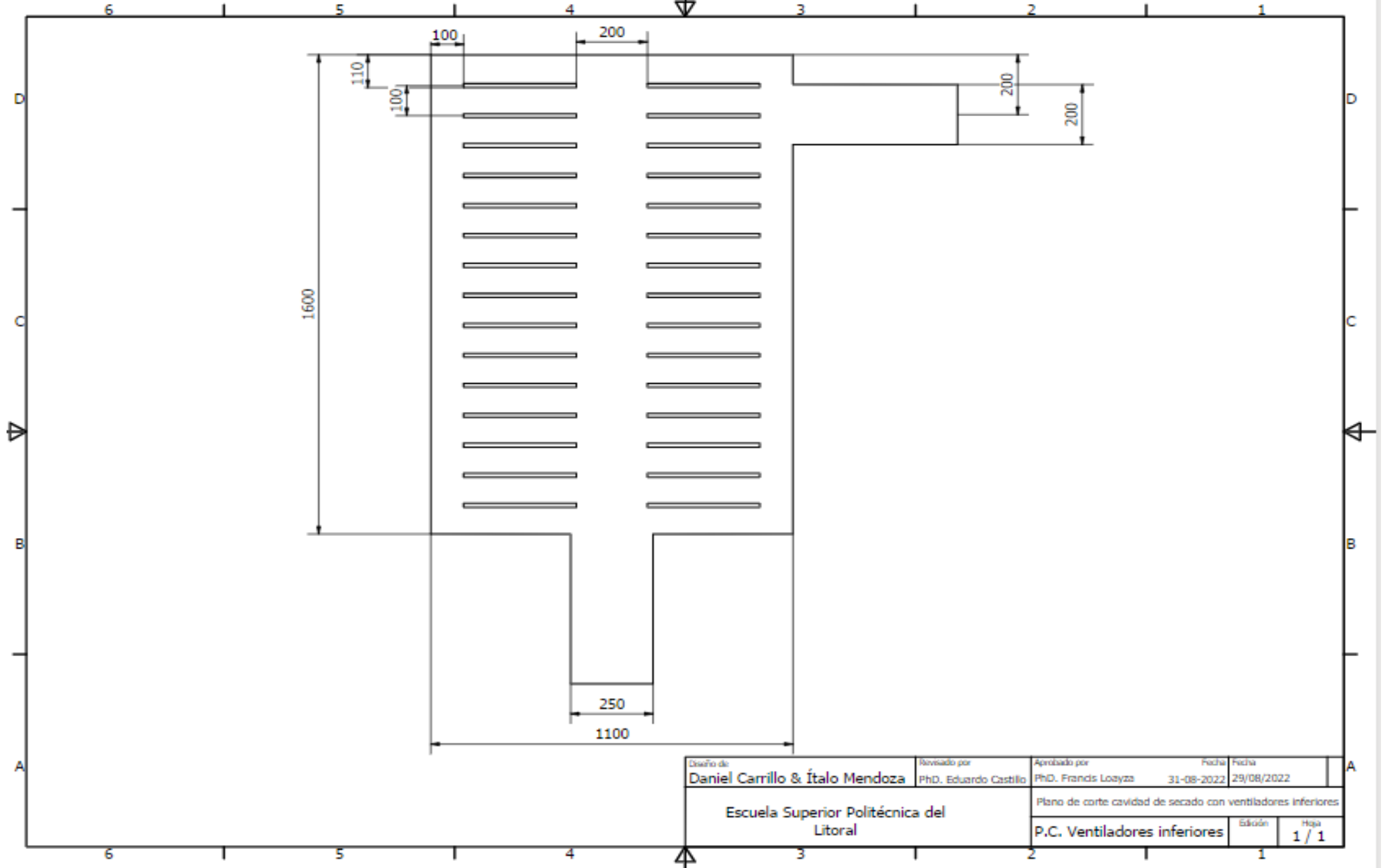
Diseño de <b>Daniel Carrillo &amp; Ítalo Mendoza</b>	Revisado por PHD. Eduardo Castillo	Aprobado por PHD. Francis Loayza	Fecha 31-08-2022	Fecha 29/08/2022
Escuela Superior Politécnica del Litoral		Cavidad de secado con ventiladores inferiores		
		Planos cavidad ventiladores inferiores	Edición	Hoja 1 / 1

**PLANO 4 Cavidad de secado con ventiladores inferiores**



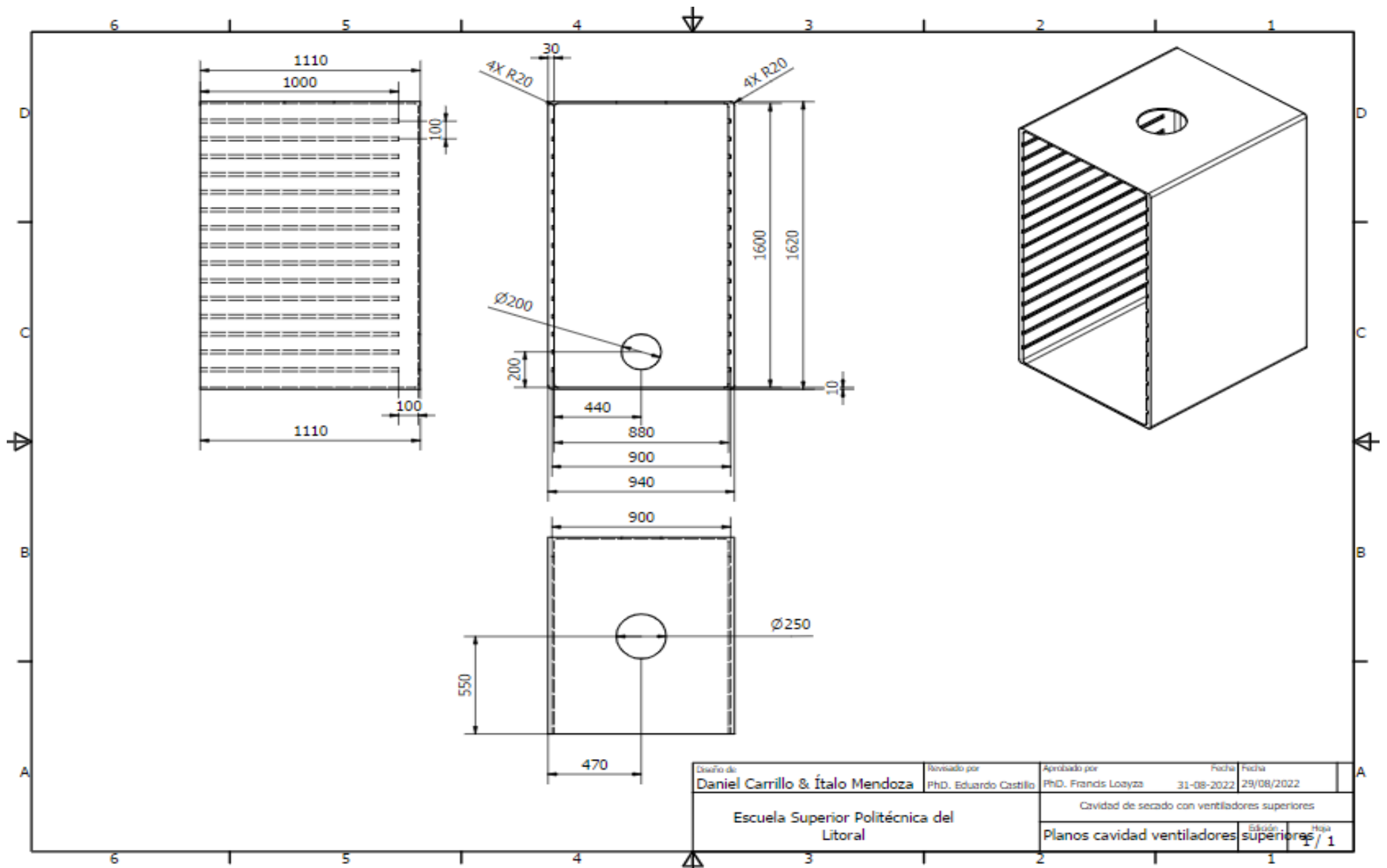
Diseño de <b>Daniel Carrillo &amp; Ítalo Mendoza</b>	Revisado por PhD. Eduardo Castillo	Aprobado por PhD. Francis Loayza	Fecha 31-08-2022	Fecha 29/08/2022
Escuela Superior Politécnica del Litoral		Bandeja perforada		
		Planos bandeja perforada	Edición	Hoja 1 / 1

PLANO 5 bandeja perforada

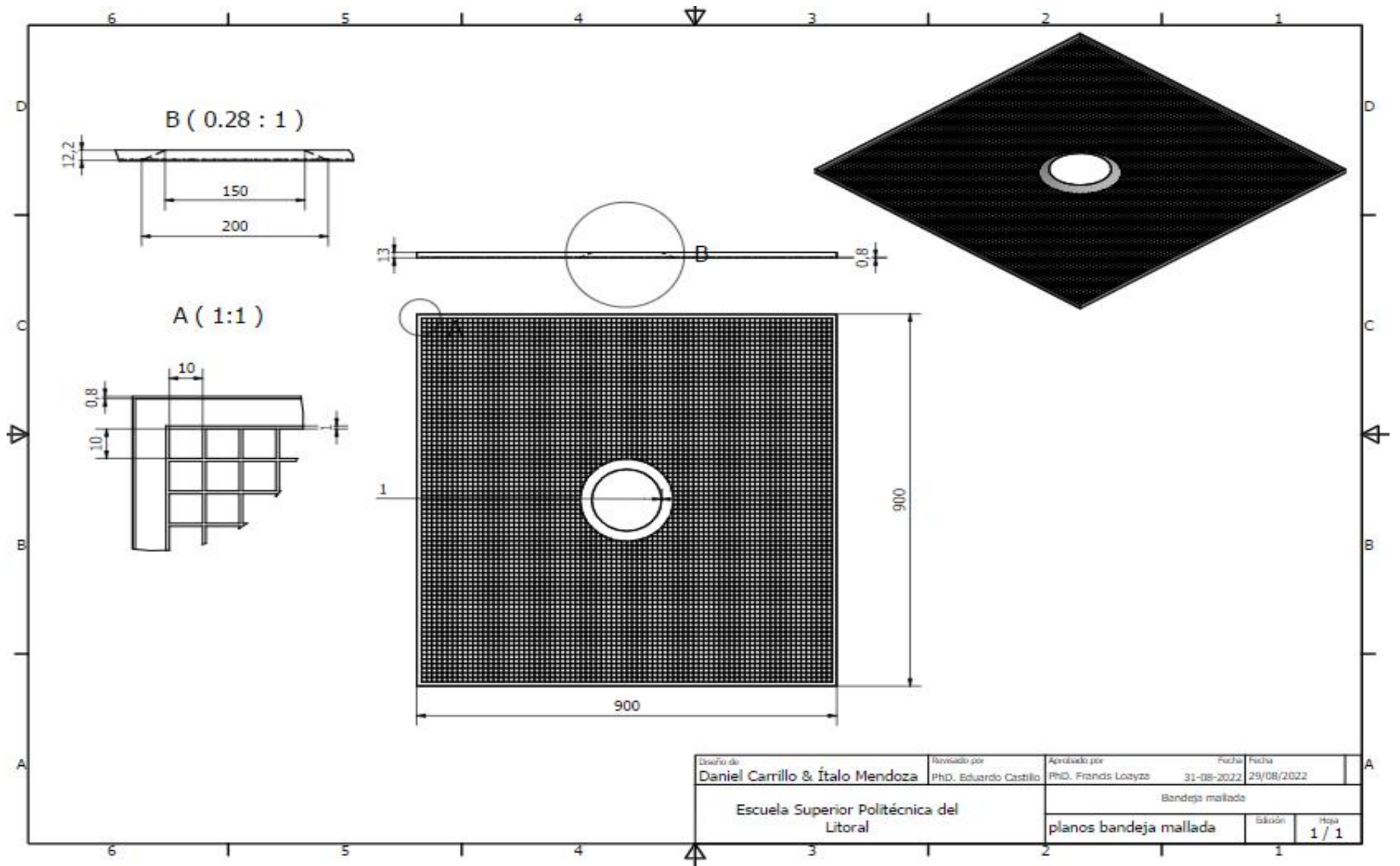


PLANO 6 Plano de corte cavidad de secado con ventiladores inferiores

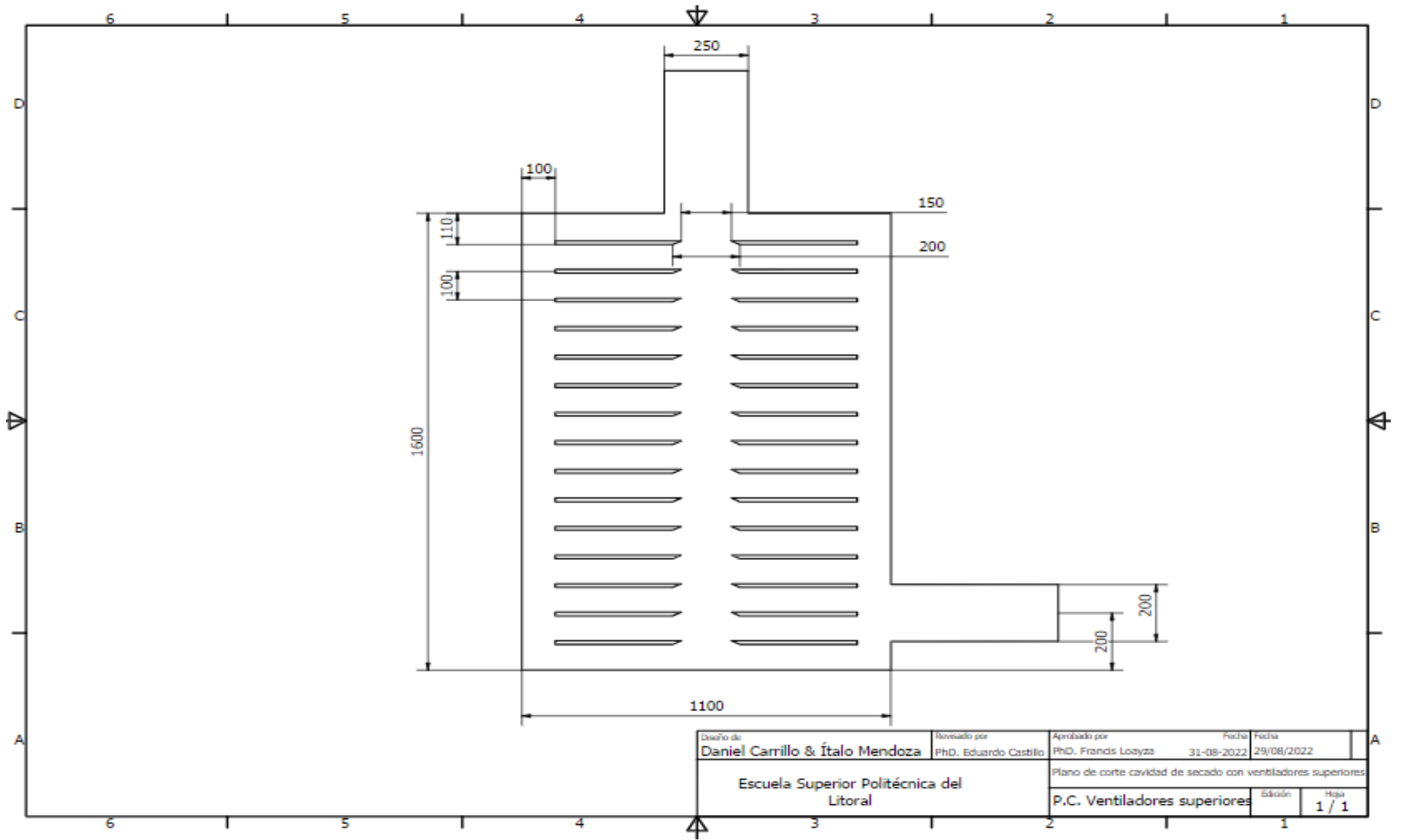




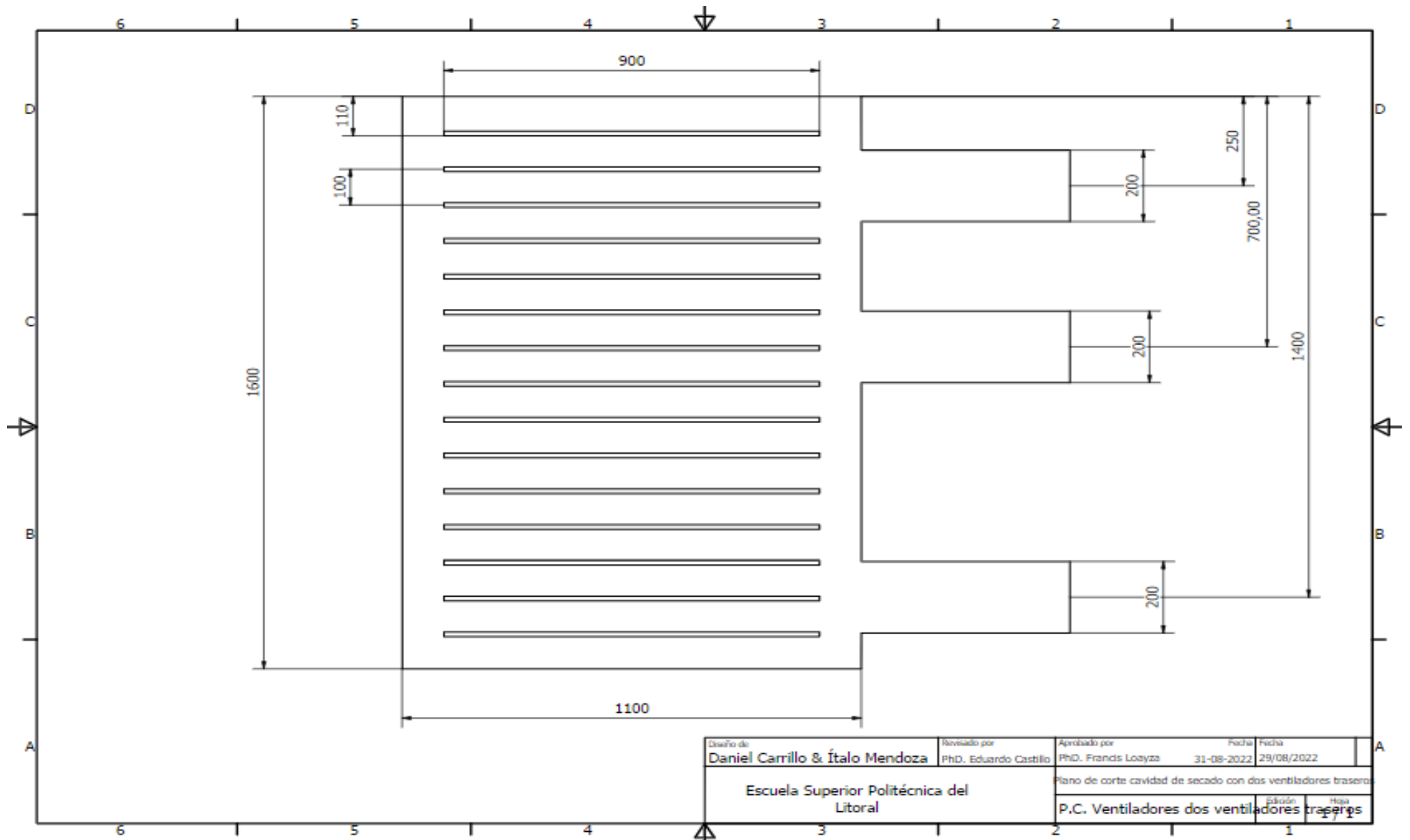
PLANO 7 Cavidad de secado con ventiladores superiores



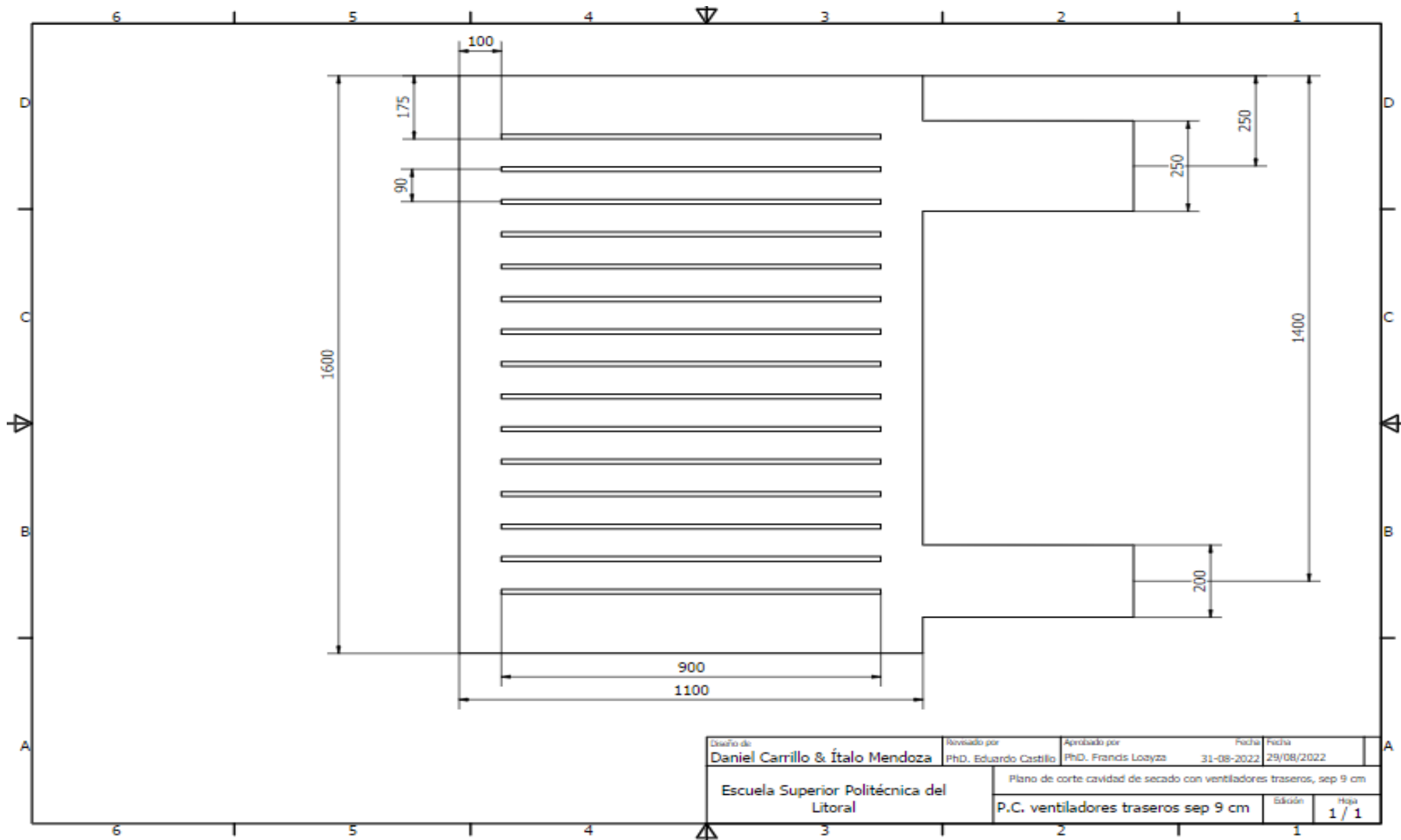
**PLANO 8 Bandeja mallada**



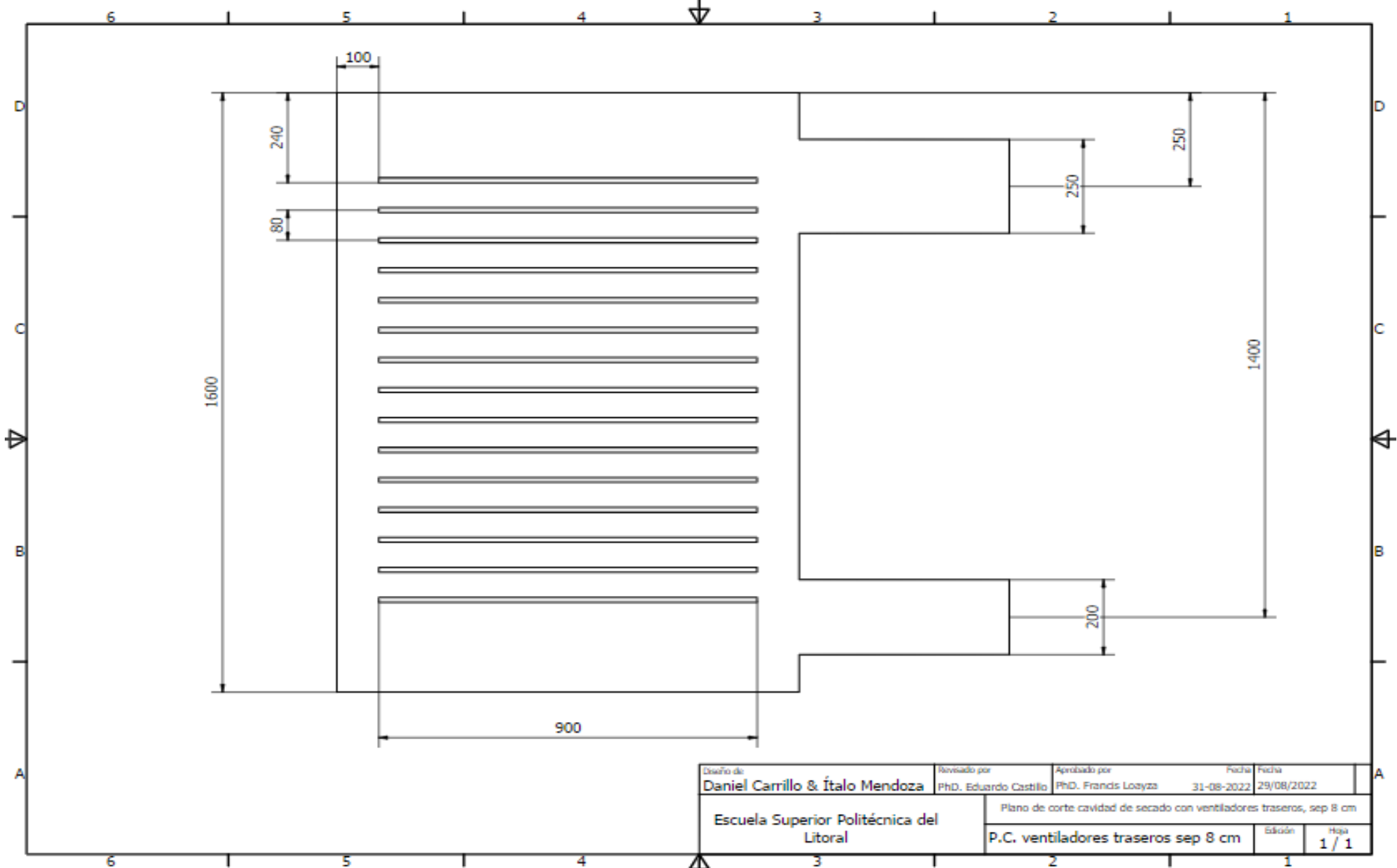
**PLANO 9** Plano de corte cavidad de secado con ventiladores superiores



PLANO 10 Plano de corte cavidad de secado con dos ventiladores trasero



**PLANO 11 Plano de corte de secado con ventiladores traseros, separación 9 cm**



PLANO 12 Plano de corte cavidad de secado con ventiladores traseros, separación 8 cm