



POSGRADOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA CON MENCIÓN EN DISEÑO DE SISTEMAS MECÁNICOS, HIDRÁULICOS Y TÉRMICOS

RPC-SO-24-NO.540-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

PROPUESTA DE MEJORA DE LA DISTRIBUCIÓN
DE CALOR EN EL CUARTO DE SECADO DE
PIEZAS CERÁMICAS DE LA EMPRESA MESTIZA
CUENCA-ECUADOR, APLICANDO ANÁLISIS
CFD

AUTOR:

PAUL BENJAMÍN MURILLO QUITO

DIRECTOR:

FRAN ZHOVANI REINOSO AVECILLAS

CUENCA – ECUADOR
2026

Autor:**Paul Benjamín Murillo Quito**

Ingeniero Mecánico Industrial.

Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica con mención en Diseño De Sistemas Mecánicos, Hidráulicos Y Térmicos por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

pmurilloq@est.ups.edu.ec

Dirigido por:**Fran Zhovani Reinoso Avecillas**

Ingeniero Mecánico.

Máster Universitario en Investigación en Tecnologías Industriales.

Doctor en Ingeniería.

freinoso@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2026 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

MURILLO QUITO PAUL BENJAMÍN

Propuesta de mejora de la distribución de calor en el cuarto de secado de piezas cerámicas de la empresa Mestiza Cuenca-Ecuador, aplicando análisis CFD

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación está dedicado a mi familia, quienes me han brindado su apoyo durante el desarrollo de estos estudios y la realización de esta maestría, acompañándome y respaldando incondicionalmente cada uno de mis proyectos.

MURILLO QUITO PAUL BENJAMIN

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana por brindarme la oportunidad de actualizar y fortalecer mis conocimientos a través de esta maestría. Expreso también un reconocimiento especial al Dr. Fran Reinoso, por su guía y por impulsar el desarrollo de este proyecto.

MURILLO QUITO PAUL BENJAMIN

TABLA DE CONTENIDO

Dedicatoria	3
Agradecimiento	4
Tabla de Contenido.....	5
Lista de figuras.....	8
Lista de tablas	10
Lista de acrónimos.....	11
Nomenclatura	12
Resumen	14
Abstract	15
1. Introducción	16
2. Determinación del problema	17
3. Marco teórico referencial.....	18
3.1 Proceso de fabricación de cerámica decorativa.....	18
3.1.1 Materia Prima	19
3.1.2 Mezcla y homogenización	19
3.1.3 Prensado y extrusión	20
3.1.4 Secado.....	21
3.1.4.1 Secado natural o ambiente	22
3.1.4.2 Secado por convección forzada.....	22
3.1.4.3 Secado por microondas	25
3.1.5 Quemado de piezas cerámicas	26
3.2 Dinámica de fluidos	27
3.2.1 Ecuaciones de conservación	28
3.2.1.1 Conservación de la masa	28
3.2.1.2 Conservación del movimiento.....	29
3.2.1.3 Conservación de la energía	29
3.2.2 Flujos turbulentos k-ε.....	29
4. Metodología y simulación	31
4.1 Características del caso de estudio	32
4.1.1 Materia prima para fabricación de cerámicas.	32
4.1.2 Mezcla.....	33
4.1.3 Extrusión	33

4.1.4 Conformado.....	33
4.1.5 Secado.....	34
4.1.5.1 Secado a temperatura ambiente.....	34
4.1.5.2 Secado por convención forzada dentro de cámara.	35
4.1.6 Quemado de piezas cerámicas.....	39
4.2 Características del problema a validar	40
4.2.1 Datos iniciales proceso de secado.....	40
4.3 Modelado del problema	42
4.3.1 Software utilizado.....	42
4.3.2 Modelo físico	42
4.3.3 Calculo de las variables de entrada	43
4.4 Calibración del modelo de simulación	45
4.4.1 Modelo físico del caso de simulación.....	45
4.4.2 Mallado del dominio computacional cámara vacía	46
4.4.3 Condiciones de frontera dominio computacional-cámara vacía.	47
4.4.3.1 Modelado por turbulencia.	48
4.4.4 Simulación de la cámara de secado vacía	48
4.5 Simulación del escenario caso base (E0).....	52
4.5.1 Mallado del dominio computacional caso base E0.....	52
4.5.2 Condiciones de frontera dominio computacional caso base E0.....	53
4.5.3 Resultados de la simulación del caso base E0.....	54
4.6 Simulación escenario modificado-1 E1.....	58
4.6.1 Mallado del dominio computacional caso E1	59
4.6.2 Condiciones de frontera dominio computacional caso E1.....	59
4.6.3 Resultados de la simulación del caso E1	60
4.7 Simulación escenario modificado-2 E2.....	63
4.7.1 Mallado del dominio computacional caso E2.	64
4.7.2 Condiciones de frontera dominio computacional caso E2.....	65
4.7.3 Resultados de la simulación del caso E2	65
5. Análisis de resultados y discusión	69
5.1 Comparación de la variable de temperatura	70
5.2 Comparación de la variable velocidad.....	72
6. Conclusiones.....	74
7. Estudios futuros.....	76

Referencias 77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del Proceso de fabricación de piezas cerámicas	19
Figura 2. Comportamiento de la humedad en piezas cerámicas	26
Figura 3. Área de moldeo Mestiza® S.A-Cuenca Ecuador, cortesía Gonzalo Clavijo.....	33
Figura 4. Proceso de conformado de Mestiza® S.A. Cuenca-Ecuador, cortesía Gonzalo Clavijo.	34
Figura 5. Racks de secado de piezas conformadas planta Mestiza® S.A.....	35
Figura 6. Rack de acomodamiento en cámara planta Mestiza® S.A.	36
Figura 7. Esquema de instalación horno y cámara de secado planta Mestiza® S.A.	36
Figura 8. Ubicación de ventiladores de succión temperatura ambiente instalados en la cámara planta Mestiza® S.A.	37
Figura 9. Disposición de la Cámara de recuperación de aire caliente sobre el horno planta Mestiza® S.A.	37
Figura 10. Esquema de instalación del ventilador centrífugo sobre el horno, de la planta Mestiza® S.A.	38
Figura 11. Ubicación ventiladores de recirculación dentro de la cámara 1 de la planta Mestiza® S.A.	39
Figura 12. Ubicación cámara de recuperación de gases hacia las chimeneas planta Mestiza® S.A.	40
Figura 13. Modelo físico de la cámara de secado. ANSYS.....	41
Figura 14. Modelo físico cámara de secado desarrollado en Ansys.	43
Figura 15. Modelo físico de la cámara de secado vacía.	46
Figura 16. Mallado del dominio computacional cámara de secado vacía.	47
Figura 17. Mallado del dominio computacional cámara de secado vacía. A: ducto de ingreso y ventiladores de circulación aire ambiente B: ventiladores internos.	47
Figura 18. Contornos de temperatura de cámara de secado vacía, planos 1,2,3.....	49
Figura 19. Contorno de temperatura, cámara de secado vacía. Ducto de entrada.....	49
Figura 20. Contorno de temperatura, cámara de secado vacía. Plano -1.....	50
Figura 21. Contorno de temperatura, cámara de secado vacía. Plano -2.....	50
Figura 22. Contorno de temperatura, cámara de secado vacía. Ducto de entrada.....	51
Figura 23. Modelo físico de la cámara de secado del caso base , E0.....	52
Figura 24. Mallado del dominio computacional caso base E0.	53
Figura 25. Contornos, resultados numéricos de la simulación E0, ducto de entrada: A: Temperatura; B: Velocidad.....	55
Figura 26. Contornos, resultados numéricos de la simulación E0, Plano 1. A: Temperatura; B: Velocidad.....	56
Figura 27. Contornos, resultados numéricos de la simulación E0, Plano 2: A: Temperatura; B: Velocidad.....	56
Figura 28. Contornos, resultados numéricos de la simulación E0, Plano 3: A: Temperatura; B: Velocidad.....	57
Figura 29, Modelo físico de la cámara de secado del caso E1.	58
Figura 30. Mallado del dominio computacional caso E1.....	59

Figura 31. Contornos, resultados numéricos de la simulación E1, ducto de entrada. A: Temperatura; B: Velocidad.....	61
Figura 32. Contornos, resultados numéricos de la simulación E1, Plano . A: Temperatura; B: Velocidad.....	61
Figura 33. Contornos, resultados numéricos de la simulación E1, Plano 2. A: Temperatura; B: Velocidad.....	62
Figura 34. .Contornos, resultados numéricos de la simulación E1, Plano 3. A: Temperatura; B: Velocidad.....	63
Figura 35. Modelo físico de la cámara de secado del caso E2..	64
Figura 36. Mallado del dominio computacional caso E1.....	65
Figura 37. Contornos, resultados numéricos de la simulación E2, ducto de entrada. A: Temperatura; B: Velocidad.....	66
Figura 38. Contornos, resultados numéricos de la simulación E2, Plano 1. A: Temperatura; B: Velocidad.....	67
Figura 39. Contornos, resultados numéricos de la simulación E2, Plano 2. A: Temperatura; B: Velocidad.....	68
Figura 40. Contornos, resultados numéricos de la simulación E2, Plano 3. A: Temperatura; B: Velocidad.....	69
Figura 41 Pathlines de flujo de temperatura caso base E0.	71
Figura 42. Pathlines de flujo de temperatura. A: E1; B: E2	72
Figura 43. Líneas de trayectoria del flujo y magnitud de velocidad, caso E0.....	72
Figura 44. Líneas de trayectoria del flujo y magnitud de velocidad. A: E1; B: E2	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Humedad típica después de la mezcla, generada de [9], [10].....	20
Tabla 2. Humedad porcentual de acuerdo al proceso de fabricación, adaptado de [1], [9].....	21
Tabla 3. Condiciones de frontera del dominio computacional cámara vacía.....	48
Tabla 4. Valores numéricos, simulación cámara de secado vacía. Ducto, plano 1,2,3.	51
Tabla 5. Condiciones de frontera del dominio computacional Coso base E0.....	53
Tabla 6. Resultados numéricos de la simulación del caso base E0.	54
Tabla 7. Resultados numéricos de la simulación del caso E1.....	60
Tabla 8. Condiciones de frontera del dominio computacional Coso E2.	65
Tabla 9. Resultados numéricos de la simulación del caso E2.....	66
Tabla 10. Análisis de uniformidad térmica y estabilidad de flujo en los escenarios E0, E1, ES -2.	70

LISTA DE ACRÓNIMOS

- CFD: Dinámica de Fluidos Computacional.
- ANSYS: Analysis System
- Fluet: Módulo de ANSYS
- K- ϵ : Modelo k-épsilon
- E0/E1/E2: Escenarios de simulación.

NOMENCLATURA

- ρ : densidad del aire.
- μ : viscosidad dinámica del aire.
- c_p : calor específico a presión constante.
- V : velocidad del flujo.
- T : temperatura.
- V_p : velocidad promedio.
- T_p : temperatura promedio.
- Q : caudal volumétrico.
- m : caudal másico.
- P : presión.
- L : longitud.
- A : área transversal.
- Re : número de Reynolds.
- $T_{\text{máx}}$: temperatura máxima
- $T_{\text{mín}}$: temperatura mínima.

PROPUESTA DE MEJORA DE LA
DISTRIBUCIÓN DE CALOR EN EL
CUARTO DE SECADO DE PIEZAS
CERÁMICAS DE LA EMPRESA MESTIZA
CUENCA-ECUADOR, APLICANDO
ANÁLISIS CFD.

AUTOR:

PAUL BENJAMÍN MURILLO QUITO

RESUMEN

El presente estudio tiene como objeto, realizar una propuesta de mejora a la distribución energética y la ampliación de las medidas físicas a la cámara de secado de cerámica artesanal y decorativa que se encuentra emplazada dentro de la fábrica Mestiza S.A. en Paute - Ecuador. Para este fin se empleó la metodología de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para estudiar el comportamiento de la temperatura y velocidad de la cámara.

En primera instancia se determinó los datos experimentales del sistema actualmente en planta. Basado en esta información se desarrolló dos escenarios que corresponde a propuestas de mejoras. En primer lugar, se caracterizó un caso base, bajo los parámetros medidos en planta. A partir de los resultados obtenidos en esta simulación inicial, se plantearon dos recomendaciones orientadas a optimizar el desempeño del sistema.

Como primera esta previo a las simulaciones se determinaron las geometrías o modelos físicos, los mismos que fueron mallados mediante el módulo propio de ANSYS. Se estableció las condiciones de entrada y salida del fluido, así como las propiedades térmicas y de velocidad asociadas al sistema. Se verificó mediante CFD, resultados de gradientes de temperatura y velocidad que permita mantener la homogeneidad cámara.

Se realizaron las comparaciones de los resultados numéricos obtenidos de las diferentes simulaciones. Los resultados demostraron que la geometría final propuesta elimina las principales deficiencias del caso base. La nueva configuración logra una mezcla más eficiente del aire caliente. Esto contribuye directamente a mejorar la calidad final de las piezas cerámicas.

Palabras clave:

Secado, cerámica, CFD, Mestiza, calor.

ABSTRACT

The purpose of this study is to propose improvements to the energy distribution and physical measures of the artisanal and decorative ceramic drying chamber located within the Mestiza S.A. factory in Paute, Ecuador. To this end, Computational Fluid Dynamics (CFD) methodology was used to study the temperature and velocity behavior of the chamber.

First, the experimental data of the system currently in place at the plant was determined. Based on this information, two scenarios were developed that correspond to improvement proposals. First, a base case was characterized under the parameters measured at the plant. Based on the results obtained in this initial simulation, two recommendations were made to optimize the system's performance.

First, prior to the simulations, the geometries or physical models were determined, which were meshed using the ANSYS module. The fluid inlet and outlet conditions were established, as well as the thermal and velocity properties associated with the system. The results of temperature and velocity gradients were verified using CFD, allowing the chamber to maintain homogeneity.

Comparisons were made between the numerical results obtained from the different simulations. The results showed that the final proposed geometry eliminates the main deficiencies of the base case. The new configuration achieves a more efficient mixing of hot air. This contributes directly to improving the final quality of the ceramic pieces.

Keywords:

Drying, ceramics, CFD, Mestiza, heat.

1. Introducción

La presente investigación se enmarca en ámbito del estudio de la transferencia de calor mediante flujos térmicos, analizando su comportamiento y efectos dentro de procesos de secado. Actualmente, la reutilización de energía y la implementación de estrategias de eficiencia energética cumplen un papel fundamental en los procesos de fabricación de diversos sectores industriales, especialmente en la elaboración de piezas cerámicas decorativas, constituyéndose en un pilar esencial para la optimización operativa y la reducción de los costos de producción. El proceso de secado cumple un papel primordial, ya que de él depende en gran medida la calidad del producto final cuyo fin será el mercado nacional e internacional, el proceso suele convertirse en un cuello de botella dentro de la cadena productiva de la cerámica.

El enfoque de este trabajo se centró en la aplicación de CFD para simular y analizar diversos cambios térmicos y volumétricos que permiten mejorar el sistema de secado de cerámica sin comprometer la eficiencia térmica.

Para cumplir este objetivo, se desarrollaron simulaciones de diferentes escenarios operativos, en las cuales resultó indispensable el uso de herramientas CFD. Mediante el software ANalysis SYStems (ANSYS) bajo el módulo de Fluent Student se modelaron los fenómenos térmicos presentes en el interior de la cámara, considerando su configuración actual y las posibles modificaciones geométricas.

El documento se encuentra estructurado en 3 tres capítulos o apartados que se enfocan en. En el primer apartado se detalla un marco teórico conceptual referente al secado y los fenómenos físicos que describe el proceso de secado de piezas cerámicas. En el segundo apartado se caracterizan los casos de estudios los mismos que fueron simulados y analizados en diferentes planos para la obtención de resultados numéricas. Por último, se realizó un análisis comparativo de los diferentes casos, desarrollando conclusiones y recomendaciones de mejora a los sistemas bajo este estudio.

2. Determinación del problema

Dentro del proceso de fabricación de piezas cerámicas decorativas, el secado previo al ingreso al horno de quemado cumple un papel fundamental en la cadena de producción. Un proceso de secado de piezas cerámicas, puede tomar un largo tiempo dependiendo del volumen y de las condiciones climáticas del lugar de emplazamiento de la fábrica, se requiere entre 16 y 48 horas hasta llegar al valor de humedad requeridos previo el ingreso al horno de quemado.[1]

Dentro de la fábrica Mestiza® ubicada en el cantón Paute, perteneciente a la provincia del Azuay, ubicada a 2200 msnm, donde la temperatura ambiente fluctúa entre 20 y 23 grados centígrados (°C)[2] Se encuentra emplazada una cámara de secado, conformada de paredes de aislamiento de 6 centímetros (cm) de espesor, con las dimensiones de 6, 4 y 3 metros (m) de largo, ancho y alto, respectivamente. En un extremo consta con un ingreso de aire caliente el mismo que es tomado mediante un sistema de recolección de calor residual proveniente del horno de quemado, el aire es inyectado mediante un ventilador centrífugo ubicado en la parte posterior de la cámara, la temperatura del aire de ingreso a la cámara oscila entre los 320 y 380 °C.[1]

Mediante CFD, se busca optimizar los perfiles de temperatura para de esta manera lograr mayor homogeneidad en la cámara, obteniendo una temperatura optima de desempeño de entre 80 y 100 °C. Se plantió también la modificación de las dimensiones geométricas de la cámara con el objetivo de incrementar su capacidad productiva, sin comprometer la eficiencia del proceso ni requerir un mayor consumo de energía, más allá del aire caliente de recirculación proveniente del horno de quemado ubicado en la parte lateral de la cámara.

3. Marco teórico referencial

En este apartado se profundizó en el proceso de fabricación de cerámica decorativa, con el propósito de contextualizar las etapas vinculadas al secado industrial. Se describieron los sistemas utilizados para el secado de piezas cerámicas conformadas y se detalló los mecanismos de transferencia de calor considerados en el presente estudio.

Asimismo, se explicó la Dinámica de Fluidos Computacional y su aplicación como herramienta de simulación, mediante la cual se modelan los fenómenos térmicos y de movimiento de flujo que intervienen en los procesos de secado.

3.1 Proceso de fabricación de cerámica decorativa

En la industria de la cerámica, la producción de piezas decorativas ha adquirido un notable auge en los últimos años. El término “cerámica” proviene del griego *keramos*, que significa “arcilla” o “tierra de alfareros” conformada o formada. [3], [4]

En este apartado se describen los principales aspectos que intervienen en el proceso de fabricación de cerámica decorativa.

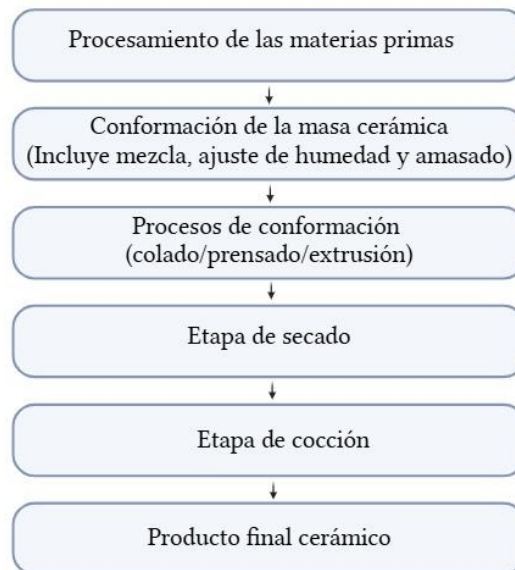


Figura 1. Diagrama de flujo del Proceso de fabricación de piezas cerámicas modificada. [5]

3.1.1 Materia Prima

Las principales materias primas para la elaboración de cerámica decorativa son las arcillas, específicamente las arcillas blancas y las arcillas caolínicas[6], que se emplean por su plasticidad, color y capacidad de vitrificación a temperaturas inferiores a 1100°C. Además de las arcillas, se incorporan a las mezclas otros materiales como: feldespatos, cuarzo, óxidos de hierro y pigmentos.[7]

Los mismos que proveerán a las piezas las diferentes propiedades mecánicas y efectos decorativos. La elección de estos materiales (mineral de roca, arcillas rojas, arenas, magnesita) depende de las características deseadas en términos de color, textura y resistencia. [5]

3.1.2 Mezcla y homogenización

La mezcla y homogenización es un proceso fundamental en la fabricación de la cerámica, ya que aseguran la uniformidad del material en sus propiedades y composición [4], [8]. Esto implica la dispersión uniforme de las partículas de la materia prima en toda la masa de arcilla, garantizando la adecuada distribución de los componentes, incluidos los aditivos y demás elementos de la mezcla.[5]

De este modo, los procesos de mezcla y homogenización permiten obtener una microestructura estable, homogénea y controlada, condición indispensable para alcanzar la calidad y el acabado deseado en las piezas cerámicas. Los porcentajes de agua que presenta la mezcla luego del proceso está en relación del 20 – 25 % de agua en referencia a la mezcla en polvo [1], [5], de esta manera se obtiene mezclas plásticas y fáciles de moldear.[3]

Tabla 1. Humedad típica después de la mezcla, generada de [9], [10]

Método de conformado	Humedad típica después de la mezcla	Observaciones técnicas
Extrusión (al vacío o sin vacío)	20 – 25 %	Pasta altamente plástica, adecuada para ladrillos y piezas huecas.

3.1.3 Prensado y extrusión

Una vez preparada y homogenizada la mezcla, se procede a la etapa de extrusión o prensado, en las cuales el porcentaje de agua resulta fundamental para garantizar la eficiencia del proceso de conformado y la calidad final de las piezas.[9], [11]. El prensado húmedo que es uno de los métodos más utilizados, en donde se busca una consistencia plástica idónea que permita la conformación de las piezas sin presentar deformaciones, buscando generalmente espesores homogéneos y paredes lisas en su totalidad.[12]

El contenido de agua dentro del conformado es fundamental, en este proceso la humedad esta entre el 15-25 % del peso en polvo del material.[9]. El control de la humedad dentro de estos procesos es indispensable para evitar burbujas, defectos y garantizar la densidad y propiedades mecánicas del producto final.

El exceso de humedad sobre el 25 % presentaría problemas en el secado y propiedades mecánicas como resistencia por la presencia de poros internos [1], [5]

Tabla 2. Humedad porcentual de acuerdo al proceso de fabricación, adaptado de [1], [9]

Etapa del proceso	Tipo de material o estado	Contenido de humedad típico (% en peso)	Objetivo del proceso
Preparación y mezcla de materias primas	Pasta plástica (arcilla + agua + aditivos)	25 – 35 %	Aumentar la plasticidad y homogeneidad para el moldeo.
Moldeo o conformado	Piezas recién moldeadas	20 – 25 %	Mantener suficiente humedad para conservar la forma sin grietas.
Secado inicial (velocidad constante)	Eliminación de agua libre superficial	10 – 15 %	Evaporar el agua superficial sin deformar la pieza.
Secado final (velocidad decreciente)	Piezas semisecas	1 – 2 %	Eliminar el agua capilar e intersticial antes de la cocción.
Cocción (deshidratación y sinterización)	Cerámica ya endurecida	< 0.5 % (agua estructural)	Eliminar el agua combinada y consolidar la estructura cristalina.

3.1.4 Secado

El secado de piezas cerámicas con un contenido de humedad cercano al 25 % [9] constituye una etapa crítica del proceso productivo, ya que influye de manera significativa en la densidad final y en las propiedades mecánicas del material. Para cerámicas decorativas, la temperatura óptima de secado se sitúa generalmente entre 80 y 120 °C. [13]

Un proceso de secado adecuado permite eliminar el agua contenida en los poros y fisuras internas, evitando defectos que puedan comprometer la calidad, la estética y la resistencia del producto final. Este proceso suele desarrollarse en varias etapas progresivas de remoción de humedad, cada una con condiciones específicas de temperatura y velocidad del aire. Por esta razón es fundamental que el secado de piezas cerámicas sea llevado de manera controlada sin afectar las propiedades mecánicas del producto final. [1]

Dentro de los métodos más utilizados para el secado de piezas cerámicas encontramos: [5]

3.1.4.1 Secado natural o ambiente

El secado natural o al ambiente es uno de los métodos más comunes y antiguos dentro del campo de la industria de la cerámica artesanal y decorativa, consiste en exponer las piezas conformadas a condiciones ambientales en la zona[1].

En el secado natural se presentan dos procesos físicos definidos claramente:

- Evaporación Superficial
- Evaporación Interna

Dentro del secado natural podemos encontrar las siguientes ventajas y desventajas, que marcan el proceso de secado [9]

Ventajas

- Bajo costo energético.
- No requiere equipos adicionales más que cubiertas.

Desventajas

- Depende del clima o de la zona de emplazamiento.
- Secado lento y no controlado, duración de 2 a 10 días, dependiente de la masa del producto.
- Riesgo de deformaciones.
- Dificulta el control de propiedades físicas.[4]

3.1.4.2 Secado por convección forzada

Uno de los sistemas más utilizados dentro de la industria cerámica es el secado por convección forzada de aire caliente. El secado por convección forzada es un proceso en el que se acelera la eliminación de la humedad de las piezas cerámicas mediante la circulación de aire a temperatura y velocidad controlada.[3]. El sistema se basa en la implementación de ventiladores o mecanismos de recirculación de aire, cuyo objetivo principal es incrementar la tasa de transferencia de calor y masa dentro de

la cámara. Esto permite reducir de manera considerable el tiempo de secado. Asimismo, la recirculación contribuye a disminuir las tensiones internas del material, evitando la aparición de grietas o fisuras asociadas a la presencia de humedad residual.[13]

Durante este proceso, es posible introducir aire caliente con temperatura controlada, lo que acelera significativamente la remoción de humedad. El aire caliente que ingresa al sistema debe cumplir, por lo general, con las siguientes especificaciones.[14]

- a. Temperatura controlada: el aire que ingresa al sistema debe mantenerse entre 80 °C y 130 °C, dependiente del tipo de cerámica y grado de humedad inicial.[15]
- b. Humedad relativa: se busca ingresar un aire con la humedad relativa más baja, esto facilitará y acelerará la evaporación de las piezas cerámicas.[10]
- c. Velocidad del aire: mediante el uso de ventiladores es posible generar velocidades de aire en el rango de *1.5 a 2.5 m/s*, valores que favorecen la remoción eficiente de humedad desde las superficies de las piezas. El control de la velocidad del flujo resulta fundamental para optimizar el proceso de secado, y puede ajustarse mediante la implementación de difusores, los cuales permiten uniformar y dirigir el aire antes de que este entre en contacto con las piezas cerámicas.[9]
- d. Aire limpio: el aire debe estar libre de partículas o de contaminantes que afecten el producto dentro del sistema.[13]
- e. Extracción de aire: la extracción de aire saturado cumple un papel fundamental, ya que evitará aire saturado en puntos de baja circulación. [9]

El aire caliente se lo puede obtener de diferentes tipos de fuentes de energía térmica siendo las más utilizadas: [16]

- a. Combustión directa e indirecta: el aire circula por intercambiador de calor, o es calentado directamente obteniendo temperaturas entre 120°C - 300°C.

- b. Resistencias térmicas: el aire es calentado mediante resistencias eléctricas la temperatura obtenida bordea de los 50 °C a 150 °C, ideal para secadores de laboratorio.
- c. Energía solar: uno de los sistemas menos utilizado por su bajo rendimiento y elevado costo de implementación, con temperaturas que no sobrepasan los 100 °C.
- d. Recuperación de calor: generalmente se recupera o aprovecha el aire caliente proveniente del proceso de cocción, alcanzando temperaturas de hasta 400 °C.

Dentro de los sistemas de secado para piezas cerámicas mediante convención forzada podemos encontrar varios equipos de secado, según su utilización.

- a. Túneles de secado continuo: ideal para piezas pequeñas y de espesor inferior a los 10mm, generalmente consta de ventiladores y resistencias eléctricas o quemadores de combustión directa como fuente de energía calorífica.[14]
- b. Cámaras de secado adiabáticas: utilizadas en piezas cerámicas de espesores considerables y que requieren mayor tiempo de exposición a temperaturas controladas. Trabajan mediante ingreso de aire forzado mismo que es calentado o usa como fuente de energía calórica directa o indirecta.[13]
- c. Energía directa: consta de equipos que generan calor instalados internamente en la cámara [14], como quemadores de flama interna. Y resistencias caloríficas.
- d. Energía Indirecta: nos referimos a sistemas de re circulación de aire caliente.[14] Generalmente el aire de calentamiento, es tomada de una fuente calórica externa o de reinyección de flujo se lo puede hacer mediante ventiladores externos.

En la actualidad es uno de los métodos más utilizados para el secado de cerámicas, ya que toda fábrica independiente de su producción, tamaño o los volúmenes de producción, consta de un horno para vitrificación de la cerámica.[12]

El proceso de secado mediante aire forzado o reinyección de flujo de masa se lo puede definir con la siguiente ecuación (1). [16]

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (\text{Ecuación 1})$$

- ρ densidad del aire húmedo $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- v velocidad de ingreso del flujo en $\left[\frac{m}{s}\right]$
- t tiempo [s]

3.1.4.3 Secado por microondas

El secado por microondas constituye una técnica de secado volumétrico mediante la cual la energía electromagnética, normalmente a una frecuencia de 2,5GHz, se convierte directamente en energía térmica dentro del material, facilitada por la interacción del campo eléctrico con las moléculas de agua presentes dentro de las piezas cerámicas.

A diferencia de los métodos de secado tradicionales, que se basan en la transferencia de calor del exterior al interior, este enfoque permite calentar simultáneamente todo el volumen, lo que resulta en una evaporación rápida y uniforme.

Aunque en la actualidad no se utiliza a gran escala, este método de secado es utilizado a nivel de laboratorio por su rapidez y eficacia.[4]

Independientemente del proceso de secado que se utilice, el objetivo fundamental del proceso de secado, es la reducción de la humedad de las piezas previo el ingreso al horno. [14]

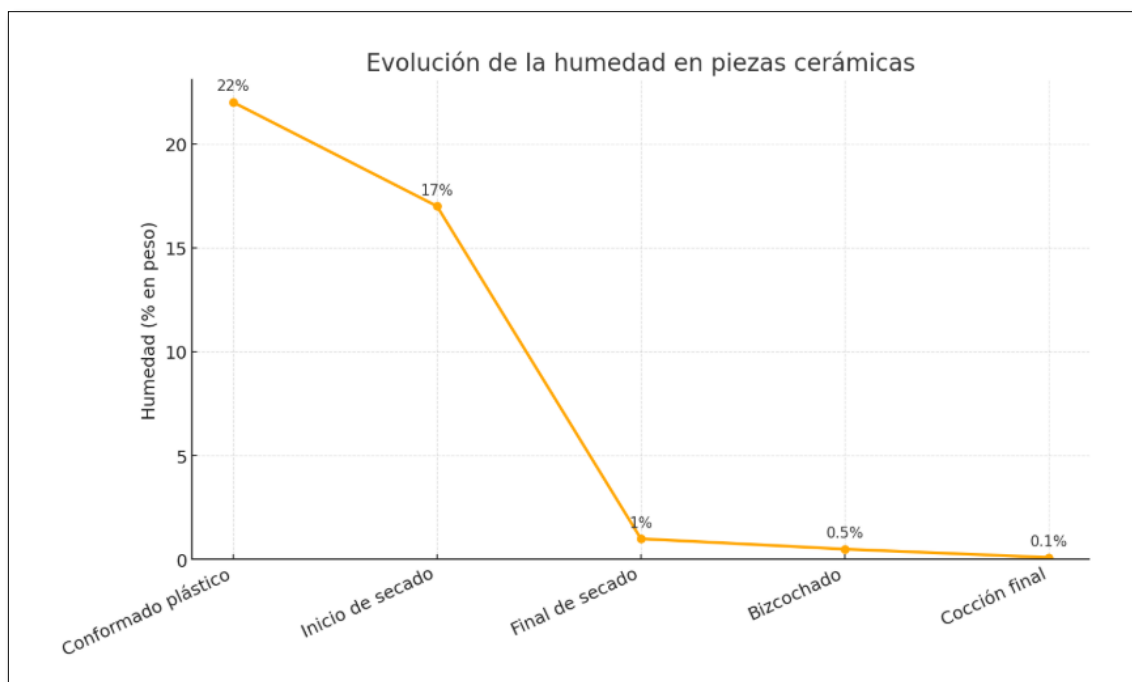


Figura 2. Comportamiento de la humedad en piezas cerámicas [9]

Una vez terminado el proceso de secado las piezas cerámicas deben presentar una humedad promedio del 1% del peso total del material en polvo utilizado para fabricar esa pieza. [5]

3.1.5 Quemado de piezas cerámicas

El proceso de cocción de la cerámica, también conocido como quemado, constituye la etapa final y una de las más importantes dentro de la producción cerámica, ya que durante esta fase se desarrollan las propiedades mecánicas, la resistencia y la dureza final de las piezas. [17]

Este proceso se realiza en hornos especializados capaces de alcanzar temperaturas comprendidas entre 900 °C y 1000 °C, dependiendo del tipo de arcilla y de las características requeridas en el producto terminado. [14]

Para alcanzar estas temperaturas se puede utilizar varios tipos de combustibles que permitan desarrollar la transformación calórica requerida para la quema de los biscochos. [16]

Existen varios tipos de hornos, que se puede utilizar en la fabricación de cerámica:[18]

- Hornos eléctricos.
- Hornos a base de fuel oil.
- Hornos de leña.
- Hornos a base de gas licuado de petróleo (GLP).

La mayoría de estos hornos genera gases de combustión interna que contienen energía calórica muy significativa.

La mayoría de esta energía es desechada al medio ambiente por sus cámaras, paredes y chimeneas hacia la parte externa, esta energía puede ser recuperable mediante extractores y sistemas de recuperación, la misma es trasladada y utilizada para procesos de secado dependiendo de la calidad de aire requerido.[1], [9]

3.2 Dinámica de fluidos

En un sistema de secado de piezas cerámicas podemos encontrar ciertos fenómenos que dominan el proceso acoplado entre sí; flujo de aire turbulento, transferencia de calor, transferencia de masa. [16]Dentro de cámaras de secado industriales se presenta siempre un flujo de aire caliente turbulento con Reynolds (Re) $>10^4$, donde la turbulencia controlara los coeficientes convectivos y de trasferencias.[14]

Para un análisis más confiable mediante CFD, con fluidos en movimiento, la turbulencia permite mejor transporte y eficiencia de energía y masa.

En donde el modelo k-epsilon ($k-\epsilon$), no es más que el anclaje y la interpretación de las ecuaciones de energía cinética y turbulencia para el estudio de casos que lo requieran.[19]

3.2.1 Ecuaciones de conservación

En un sistema de secado, el aire caliente que ingresa a la cámara puede considerarse como el fluido de entrada responsable de impulsar los procesos de transferencia de calor y de masa. [9], [16] Su interacción con las piezas cerámicas es fundamental para la remoción progresiva de humedad y para la eficiencia global del proceso.

La energía contenida en el aire caliente, impulsado mediante un sistema de aspas o ventilación forzada, ingresa a la cámara y transfiere calor a los productos en su interior, provocando la evaporación de la humedad retenida en el material.[16] Este mecanismo contribuye directamente al secado y acelera el proceso de remoción de agua.

La entalpía inicial del aire constituye un parámetro fundamental para evaluar la calidad y eficiencia de la transferencia de calor, ya que determina la capacidad del flujo para aportar.[20]

Para el análisis del sistema de secado es necesario considerar las ecuaciones fundamentales que gobiernan el flujo, entre ellas las ecuaciones de conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la energía. Dado que el aire circulante en la cámara se comporta como un flujo en movimiento y predominantemente turbulento, es indispensable resolver las ecuaciones de Navier–Stokes[16], que describen el comportamiento dinámico del fluido bajo estas condiciones, donde:

3.2.1.1 Conservación de la masa

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \mathbf{v}) = 0 \quad (\text{Ecuación 2})$$

- ρ es la densidad del aire húmedo [kg/m^3]
- \mathbf{v} vector de velocidad del aire [$\frac{m}{s}$]

3.2.1.2 Conservación del movimiento

$$\frac{\partial(pv)}{\partial t} + \nabla \cdot (pv) = -\nabla p + \nabla(\mu\nabla v) \quad (\text{Ecuación 3})$$

- p presión [pa]
- μ viscosidad dinámica [Pa.s]

3.2.1.3 Conservación de la energía

$$pc_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k\nabla T) + q_{evap} \quad (\text{Ecuación 4})$$

- T temperatura del aire [K]
- c_p calor específico $\left[\frac{J}{kg} \cdot K \right]$
- k conductividad térmica $\left[\frac{W}{m^3} \right]$
- q_{evap} fuente térmica evaporación $\left[\frac{W}{m^3} \right]$

3.2.2 Flujos turbulentos k-ε

En la dinámica de fluidos se emplean las ecuaciones fundamentales de conservación de masa, movimiento y energía, las cuales describen el comportamiento del fluido en cualquier punto del dominio.

Estas ecuaciones permiten modelar el flujo en sus diferentes regímenes, incluyendo el flujo laminar, en el cual las partículas del fluido se desplazan en trayectorias suaves y ordenadas, sin mezclas transversales significativas.[21]

En casos donde el número de Re) sobre pasa el valor > 4000 se define que el flujo es turbulento.[16]

Hablamos de turbulencia cuando el flujo en estudio genera remolinos, recirculación y mezclas que generan turbulencia. En donde debemos acoplar los modelos laminares y turbulentos mediante constantes de k-ε dentro de la segunda ecuación de conservación de movimiento.[19]

La notación k- ϵ hace referencia a un modelo de turbulencia, específicamente utilizado dentro de simulaciones computacionales.

Un modelo k- ϵ , es un modelado de dos ecuaciones que define movimiento y turbulencia.

- k: refiere a la energía cinética turbulenta por unidad de masa.
- ϵ : tasa de disipación de la energía cinética turbulenta en forma de calor.

El sistema de ecuaciones k- ϵ , describe la evolución de las dos ecuaciones relacionas en tiempo y espacio, permitiendo simular el comportamiento de los fluidos dentro de diferentes geometrías y condiciones específicas de flujos, por lo que convierte en uno de los sistemas de modelación más utilizado por CFD.[19]

4. Metodología y simulación

En el caso de estudio, se analiza el flujo de aire caliente utilizado para el secado de piezas cerámicas dentro de una cámara considerada adiabática; es decir, sin pérdidas de calor hacia el entorno.[14] El aire empleado corresponde a un flujo de recirculación proveniente del horno de cocción de cerámica, el cual aporta la energía térmica necesaria para el proceso de secado.[16]

Para el análisis se empleará la CFD, herramienta que permite modelar los fenómenos de transferencia de calor y movimiento del fluido. En este estudio, el aire se considera un gas ideal, lo que facilita la aplicación de las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos bajo este supuesto termodinámico.[19]

Mediante el software computacional ANSYS Fluent Student 2025, se determinó la ubicación óptima de las entradas de aire, las condiciones adecuadas para la salida de humedad, el grado de homogeneidad térmica dentro de la cámara y las dimensiones máximas que este sistema alcanzó bajo las condiciones de entrada establecidas en el presente estudio.

La primera parte se realizó revisión bibliográfica orientada y aplicada en los procesos de fabricación de cerámica decorativa; las ecuaciones que rigen los procesos físicos que se presentan dentro del sistema de secado, con un enfoque hacia CFD. La segunda parte se definió, los datos específicos del caso de estudio dentro de planta Mestiza® S.A y se realizó la simulación del sistema de secado actual de la planta.

Finalmente, se desarrolló la simulación de dos escenarios que presenten las mejoras con el fin de optimizar el sistema de secado actual, buscando homogenizar la temperatura dentro de la cámara y el aumento de las dimensiones de la misma, buscando siempre mayor productividad con el uso de flujo de recirculación desde el horno.

4.1 Características del caso de estudio

Dentro de la provincia del Azuay, en el cantón Paute ubicado a una altura de 2200 msnm, con una temperatura ambiente promedio de 23 °C, se encuentra emplazada la fábrica de cerámica decorativa Mestiza® S.A., la misma que se dedica a la fabricación de cerámica como macetas y vajillas decorativas desde el 2010, con presencia en los principales supermercados del país. [2]

Con la exportación a países como Perú, Chile, México y EEUU; ofreciendo alrededor de 50 formas diferentes de productos en combinación de diferentes colores. La fábrica consta de un laboratorio propio de diseño y desarrollo el mismo que se encuentra en frecuente estudio de nuevos modelos y más versátiles requeridos por el exigente mercado nacional e internacional.

La empresa cuenta con una cadena de producción moderna, con capacidad para abastecer tanto al mercado local como al internacional, y con proyecciones de continuar expandiendo su producción y fortalecer su presencia en nuevos mercados a nivel global. Para lo cual es fundamenta acelerar los procesos de fabricación, encontrando un limitante dentro de su producción en la zona de secado, previo al quemado de la cerámica como explicaremos a continuación.

Dentro de planta podemos encontrar los siguientes procesos de producción:

4.1.1 Materia prima para fabricación de cerámicas.

Para la fabricación de la cerámica decorativa, Mestiza® utiliza como materia prima principalmente la arcilla roja, la misma que es extraída dentro de la provincia de Azuay, Cañar, Loja y transportada hacia la planta.

La materia que ingresa al proceso de fabricación es una las mejores de la zona y cumple con los requerimientos de planta.

4.1.2 Mezcla

Una vez clasificada la materia prima pasa hacia los tambores de homogenización y mezcla en donde la materia prima gana una humedad del 25-30%. [14]

La mezcla se lo realiza a base de arcillas, aditivos químicos, fundentes, en este paso se incluye agua la misma que es el 25% del peso total de los materiales en polvo, desde aquí manejaremos la humedad controlada de un 25-30%. [9]

4.1.3 Extrusión

Una vez homogenizada la pasta es llevada hacia una tolva de la extrusora cilíndrica. El trabajo de esta máquina será sacar cilindros de diferentes diámetros los mismos que dependerán netamente del producto que se vaya a realizar, el largo aproximado de los cilindros es de 1 m, estos son colocados y almacenados en racks con el fin de conseguir mayor homogenización manteniéndose en reposo, previo el corte de longitudinal, el largo y diámetro del cilindro dependerá únicamente de la pieza final a producir. [1]



Figura 3. Área de moldeo Mestiza® S.A-Cuenca Ecuador, cortesía Gonzalo Clavijo.

4.1.4 Conformado

Una de las ventajas que sostiene la alta capacidad de producción de Mestiza® S.A es la disponibilidad de máquinas automáticas para el conformado de piezas

cerámicas. En este proceso, la arcilla plástica ingresa en forma de cilindro y mediante el accionamiento de una prensa hidráulica de impacto, se conforma la pieza con la geometría requerida.[9]



Figura 4. Proceso de conformado de Mestiza® S.A. Cuenca-Ecuador, cortesía Gonzalo Clavijo.

4.1.5 Secado

En la actualidad, la planta dispone de dos métodos de secado para las piezas conformadas, los cuales se seleccionan en función del tipo de producto, la geometría de las piezas y los requerimientos de producción. El primero corresponde a un sistema de secado natural, donde las piezas se someten a condiciones ambientales. El segundo método consiste en el secado por convección forzada, realizado dentro de cámaras adiabáticas que emplean aire caliente proveniente de la recuperación térmica del horno de cocción. Este sistema permite acelerar el proceso:

4.1.5.1 Secado a temperatura ambiente.

Una vez conformadas, las piezas cerámicas son colocadas sobre racks y transportadas hacia la zona de secado. Debido al alto volumen de producción de la planta, una parte de las piezas se somete a un proceso de secado por convección natural, utilizando únicamente la temperatura ambiente. Este método, presenta limitaciones importantes, como tiempos prolongados y defectos asociados a la eliminación no controlada de humedad.



Figura 5. Racks de secado de piezas conformadas planta Mestiza® S.A.

4.1.5.2 Secado por convención forzada dentro de cámara.

La planta cuenta con dos cámaras de secado por convección forzada, construidas con paneles termo aislados de 6 cm de espesor que actúan como paredes adiabáticas, reduciendo al mínimo las pérdidas de calor hacia el entorno. Las piezas conformadas ingresan a estas cámaras mediante su acomodamiento en racks metálicos, según su producción con una mezcla de elementos grandes y pequeños.

Estas cámaras están construidas para operar con aire caliente proveniente del sistema de recuperación térmica del horno de cocción. Por esta configuración, las cámaras permiten controlar temperatura dentro del proceso.



Figura 6. Rack de acomodamiento en cámara planta Mestiza® S.A.

Las cámaras de secado se encuentran instaladas de manera paralela a los hornos de quema de cerámica, lo que facilita el aprovechamiento del calor remanente generado durante el proceso de cocción. Esta disposición permite canalizar de forma eficiente el aire caliente hacia las cámaras, optimizando el consumo energético y reduciendo pérdidas térmicas.

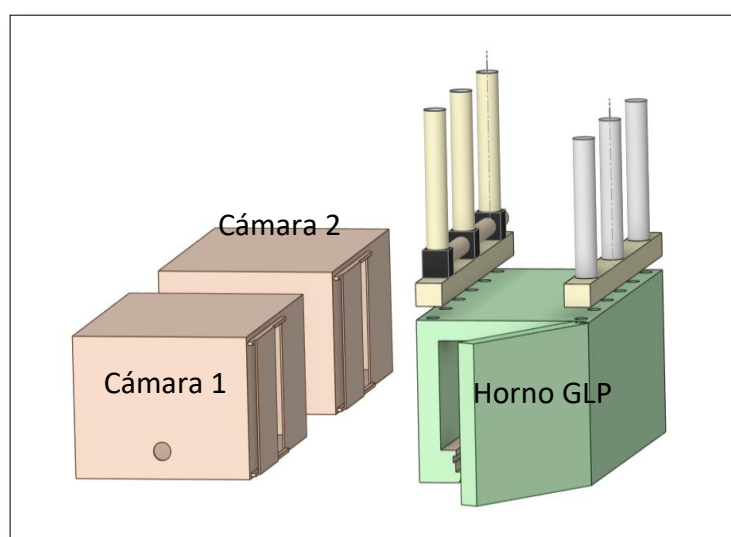


Figura 7. Esquema de instalación horno y cámara de secado planta Mestiza® S.A.

En la pared posterior se encuentra instalado dos ventiladores de 60 cm de diámetro que absorben aire desde el exterior (temperatura ambiente), generalmente el exterior se encuentra a una temperatura de 28 °C, por la presencia del horno de quemado al frente.



Figura 8. Ubicación de ventiladores de succión temperatura ambiente instalados en la cámara planta Mestiza® S.A.

En la pared posterior, junto a los ventiladores que permiten el ingreso de aire ambiente, se encuentra instalado un ducto de 40 cm de diámetro, mediante el cual se introduce aire caliente proveniente del sistema de recirculación ubicado en la zona de chimeneas del horno de quema. Este diseño permite aprovechar el calor remanente generado durante la cocción de las piezas cerámicas, utilizándolo como fuente térmica principal para el proceso de secado dentro de las cámaras.



Figura 9. Disposición de la Cámara de recuperación de aire caliente sobre el horno planta Mestiza® S.A.

Mediante un ventilador centrífugo instalado en la parte superior del horno, el aire caliente generado durante el proceso de cocción es impulsado hacia la cámara de secado. Este ventilador permite aprovechar de manera eficiente el calor residual, garantizando un flujo constante y dirigido del aire caliente.

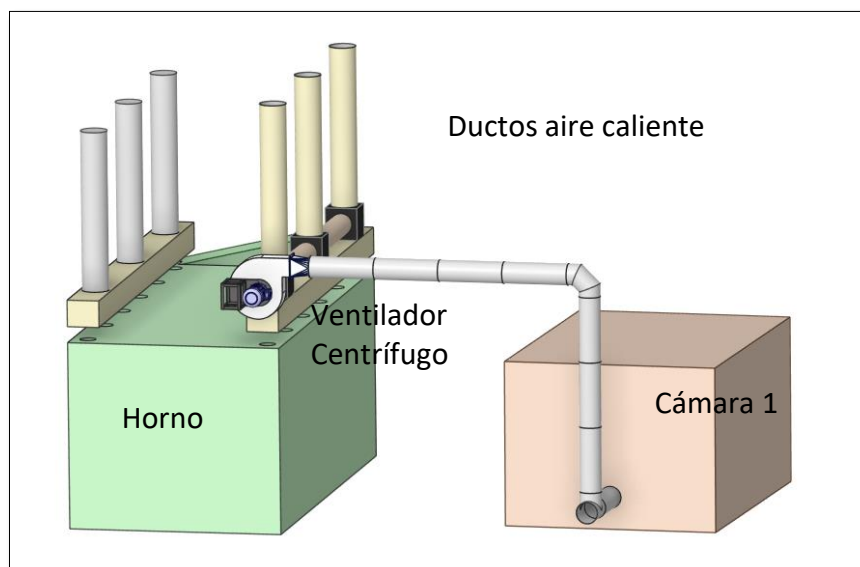


Figura 10. Esquema de instalación del ventilador centrífugo sobre el horno, de la planta Mestiza® S.A.

Internamente, la cámara de secado cuenta con dos ventiladores de recirculación de aire de 60 cm de diámetro, cuya función principal es garantizar una adecuada homogenización de la temperatura en todo el volumen interno. La recirculación también contribuye a reducir los gradientes térmicos y a mejorar la eficiencia energética del proceso.



Figura 11. Ubicación ventiladores de recirculación dentro de la cámara 1 de la planta Mestiza® S.A.

La cámara consta en la pared paralela de un ducto de 40 cm de diámetro, que permite la salida de humedad, para lograr renovación de aire dentro del sistema. La temperatura promedio que se maneja dentro de la cámara es de entre 80-100°C.

4.1.6 Quemado de piezas cerámicas.

La planta consta de dos hornos para quema de cerámica, los mismos usan como combustible de energía calórica GLP. El horno más moderno, en este caso de mayor capacidad volumétrica consta de una cámara de recuperación de calor (Figura 14), ubicada en la sección de salida hacia las chimeneas y los conductores de tiro. En esta zona, las temperaturas pueden alcanzar valores cercanos a los 800 °C.



Figura 12. Ubicación cámara de recuperación de gases hacia las chimeneas planta Mestiza® S.A.

Es en esta cámara donde se recolecta el aire caliente que posteriormente será redirigido hacia las cámaras de secado, aprovechando esta energía térmica para los procesos de transferencia de calor propios del secado por convección forzada.

4.2 Características del problema a validar

Para validar el procedimiento empleado, se realizó simulaciones del flujo de aire sobre las piezas cerámicas utilizando ANSYS Fluent Student 2025, con el objetivo de analizar los procesos de transferencia de calor, secado y equilibrio térmico. Estas simulaciones representan las condiciones reales de operación dentro de la cámara de secado instalada en la planta.

4.2.1 Datos iniciales proceso de secado

Para el proceso secado se determinó los datos iniciales, de la cámara emplaza en planta Mestiza® S.A.

- Cámara construida con paredes de 6 cm aisladas, paneles inyectados de poliuretano, tipo sándwich, lo que le permite considerar la cámara de manera adiabática.

- Dimensiones físicas de la cámara, 6 m largo, 4 m de ancho, 3 m de alto.
- Ingreso de aire caliente mediante ducto 40 cm de diámetro en la parte inferior.
- Un ventilador centrífugo, que impulsa el aire proveniente de la cámara de recuperación sobre el horno, tiene una capacidad de $2500 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Re circulación de flujo caliente tomado desde horno, temperatura promedio de 380°C , en la toma de ingreso, a velocidad constante.
- Dos ventiladores de 60 cm de diámetro, velocidad constante conectados hacia el exterior para convención forzada, los mismos que toman el aire ambiente he inyectan al interior de la cámara a 28°C .
- Dos ventiladores internos de 60 cm de diámetro, a velocidad constante instalados dentro de la cámara para re circulación.
- Ducto de salida de humedad de 40 cm de diámetro, ubicado en la pared opuesta al ingreso de aire caliente.

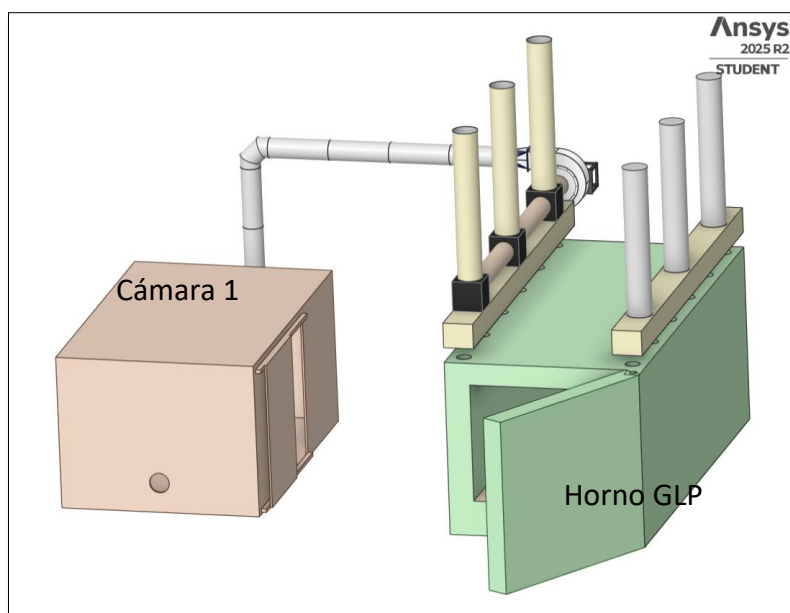


Figura 13. Modelo físico de la cámara de secado. ANSYS

4.3 Modelado del problema

4.3.1 Software utilizado

El software utilizado es *Ansys Student 2025 R2*, para el desarrollo de CFD, en específico el módulo de Fluent, para solucionar las ecuaciones:

- Conservación de la masa
- Conservación de movimiento (Navier-Stokes).
- Conservación de la energía.

Dentro de la cámara de secado lo que permite específicamente el caso de estudio determinar planos o puntos específicos:

- Velocidad del fluido.
- Distribución de la temperatura.
- Comportamiento del flujo dentro de la cámara.

4.3.2 Modelo físico

El modelado físico de la cámara de secado de la empresa Mestiza, se ha realizado mediante ANSYS Student, específicamente con el módulo de dibujo SpaceClaim en la versión 2025 R2. (Figura 16)

La cámara ha sido generada basada en las medidas tomadas en planta Mestiza® S.A.

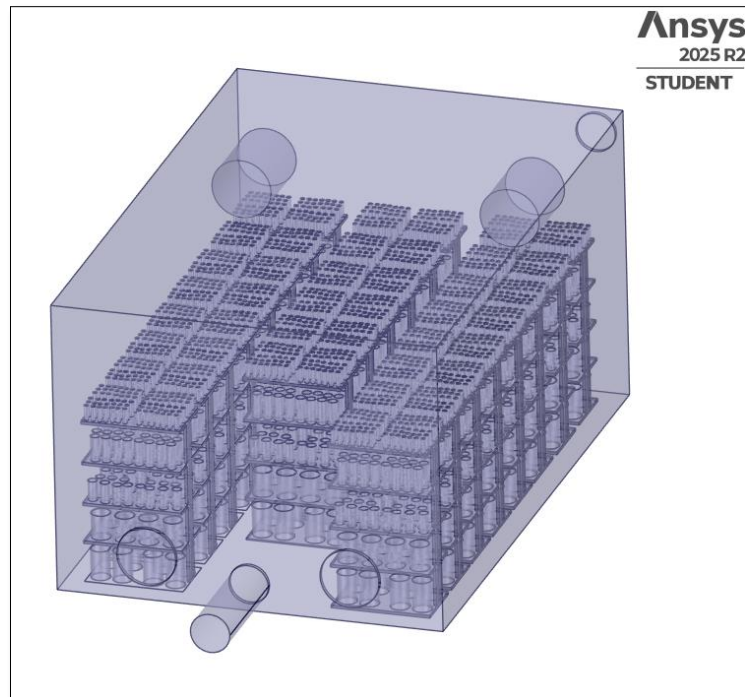


Figura 14. Modelo físico cámara de secado desarrollado en Ansys.

4.3.3 Cálculo de las variables de entrada

En este apartado se calcula las variables requeridas para el estudio en el caso base (E0), se determinarán mediante las siguientes relaciones de cálculo:

a) Ingreso Aire Caliente: el aire caliente es forzado mediante un ventilador centrífugo que genera, $2500 \text{ m}^3/\text{h}$

- Caudal volumétrico por segundo $Q = 0.695 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Área de la sección del ducto, considerando el ducto $\phi = 0.40 \text{ m}$.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$A = 0.125 \text{ m}^2$$

- Velocidad promedio de ingreso de aire vendrá dado por:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$V = 5.56 \frac{m}{s}$$

b) Numero de Reynolds: debemos determinar Re de esta manera podemos definir si el flujo es laminar o turbulento.

- La densidad del aire se determinó partir de la siguiente relación: gas ideal a 380 °C (653° k), a presión atmosférica, tenemos:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$\rho = 0.54 \text{ kg/m}^3$$

ρ densidad del aire en $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

P presión absoluta del aire [Pa]

R constante universal del aire 287 $\left[\frac{J}{kg.K}\right]$

T temperatura absoluta [K]

- El número de Reynolds se determina a partir de:

$$Re = \rho V d / \mu \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$Re = 29900 \approx 3.0 \times 10^4$$

μ viscosidad dinámica [Pa.s]

Se determina que es un flujo turbulento.

c) Aire de ingreso forzado ambiente y re circulación interna: conociendo que el diámetro de los ventiladores son 0.60 m, con un caudal volumétrico aproximado de 2000 m^3/h .

$$V_1 = \frac{Q}{A} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$V_1 = 2 \text{ m/s}$$

4.4 Calibración del modelo de simulación

4.4.1 Modelo físico del caso de simulación.

Se desarrolló una geometría bajo las medidas y los parámetros tomados en planta, como longitudes y valores de temperatura de acuerdo a las tomas realizadas y los valores cálculos en el punto que antecede.

Se delimitó los ingresos, salidas para realizar la simulación, en primer lugar se extrajo el volumen de aire que se encuentra dentro de la cámara lo que se analizó es el fluido interno y su comportamiento, tomando en cuenta siempre las dos variables predominantes para el secado de cerámica como se detalla en el numeral 3.1.4.

Se determinó las variables del sistema computacional:

- Entrada de aire caliente.
- Entrada de aire ambiente.
- Salida de humedad.
- Ventiladores internos.
- Paredes del ducto de entrada.
- Paredes que bordean la cámara.

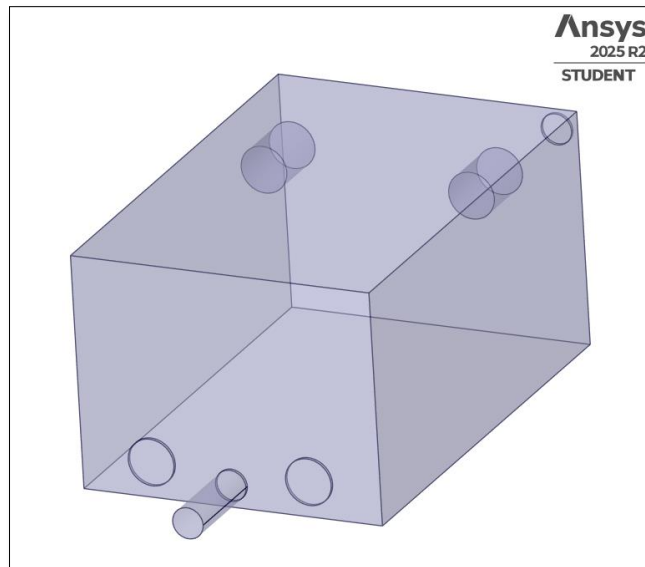


Figura 15. Modelo físico de la cámara de secado vacía.

4.4.2 Mallado del dominio computacional cámara vacía

Para definir la malla utilizada en la simulación dentro de la cámara, una vez establecido el volumen de control (Figura 17), se generó una malla poly-hexcore, conformada por celdas poliédricas en el interior del dominio. Se emplearon elementos poliédricos con dimensiones máximas de 0.08 m y mínimas de 0.005 m, considerando la limitación del paquete estudiantil de ANSYS, que permite un máximo de 512 000 celdas. (Figura 18)

Bajo estas restricciones, se obtuvo una malla compuesta por 858 862 nodos y 340 727 celdas, valores que garantizan un adecuado equilibrio entre resolución geométrica y capacidad computacional disponible.

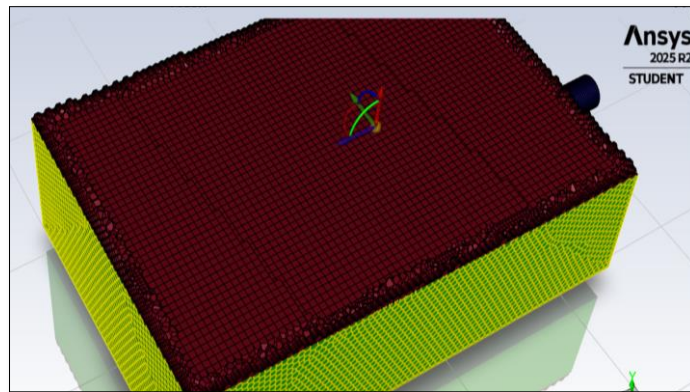


Figura 16. Mallado del dominio computacional cámara de secado vacía.

Dentro del volumen de control se realizó discretizaciones locales donde se debe aumentar la precisión de la malla en zonas de flujo o donde los parámetros como temperatura o velocidad cambian rápidamente, utilizando una malla poliédrica para cubrir el volumen de control definido.

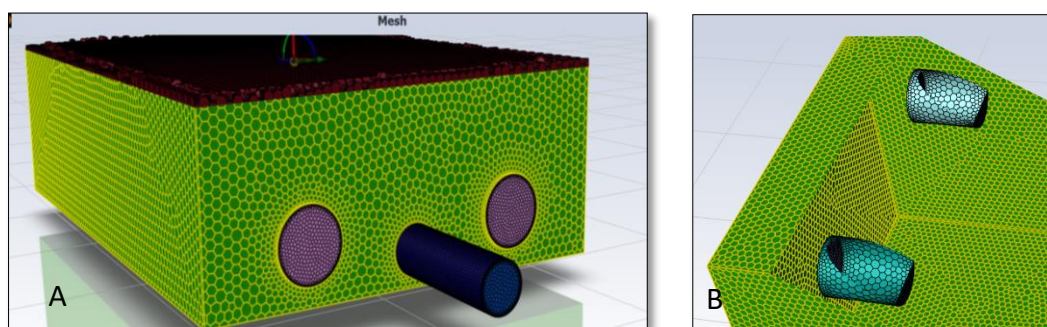


Figura 17. Mallado del dominio computacional cámara de secado vacía. A: ducto de ingreso y ventiladores de circulación aire ambiente B: ventiladores internos.

4.4.3 Condiciones de frontera dominio computacional-cámara vacía.

Las condiciones de frontera no son más que las condiciones físicas que aplicaremos a nuestra simulación, estas se aplicaran en los límites del dominio de nuestro modelo computacional, dentro de los parámetros de ANSYS Fluent, las mismas son definidas de acuerdo a las condiciones de frontera generadas en la geometría anteriormente literal 4.4.1:

Tabla 3. Condiciones de frontera del dominio computacional cámara vacía.

Condiciones de frontera	Tipo fluent	Variables principales
Ingreso aire caliente de re-proceso	velocity - inlet	Velocidad = 5.6 m/s , Temperatuta de 380 °C
Ingreso aire ambiente	velocity - inlet	Velocidad = 2 m/s , Temperatuta de 28 °C
Salida de humedad (renovación de aire)	pressure-outlet	P=0 Pa (presión manométrica atmosférica)
Circulación Fan Internos	fan	Velocidad = 2 m/s
Paredes del ducto no adiabáticas	wall	Sólida , pérdida de calor de 70 °C
Paredes de la cámara adiabáticas	wall	Sólida , pérdida de calor de 57 °C

4.4.3.1 Modelado por turbulencia.

Ansys define los modelos por turbulencia mediante la variable k- ϵ , en nuestro caso según el cálculo realizado del número de Reynolds, estamos dentro de un modelo turbulento.

Por ende, la modelación dentro de ANSYS más utilizada es k- ϵ , conformado por las variables en un modelo estándar:

- $\sigma_k = 1$
- $\sigma_\epsilon = 1.3$
- $C_\mu = 0.09$
- $\sigma_1 = 1.44$
- $\sigma_2 = 1.92$

4.4.4 Simulación de la cámara de secado vacía

Para determinar la variación de temperatura entre el modelo de la simulación y la cámara emplazada en planta, graficamos varios contornos de temperatura, en donde se tomó valores referenciales.

Se analizo 4 planos de contorno:

- a. Ingreso en el ducto
- b. Plano 1- ingreso flujo a cámara.
- c. Plano 2- flujo en el centro de la cámara.
- d. Plano 3- flujo al final de la cámara.

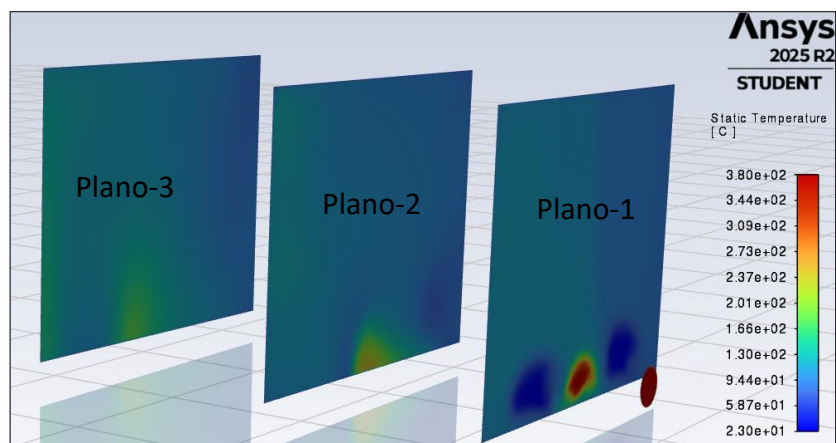


Figura 18. Contornos de temperatura de cámara de secado vacía, planos 1,2,3.

Una vez que la solución a convergido se visualiza los resultados, los diferentes contornos, presentan la variable Temperatura (T).

Se determinó valores numéricos de temperatura en el ducto de ingreso de 380°C, con pérdidas en el contorno del ducto de 70 °C.

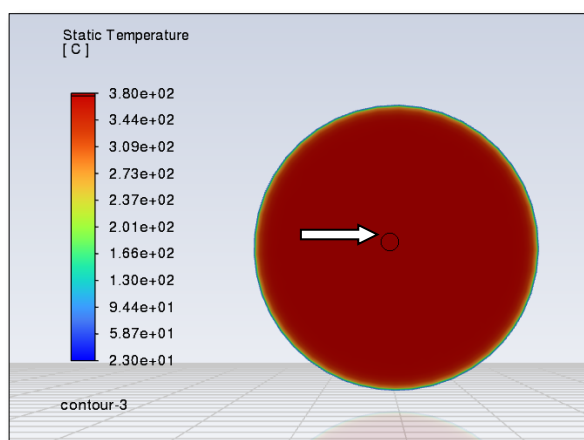


Figura 19. Contorno de temperatura, cámara de secado vacía. Ducto de entrada

Los resultados en el plano-1, los contornos T, arrojan valores de temperaturas que oscilan entre los 130 °C y 380°C, en zonas claramente marcadas.

Para comprobar los valores obtenidos en simulación con los valores obtenidos en planta, se consideró la temperatura medida en el vórtice superior interno cerca de la pared superior. Obteniendo una medición de 94.6 °C.

Otra referencia de medición fue el valor T del flujo en el momento que ingresa a la cámara, en donde el contorno de temperatura refleja 380 °C.

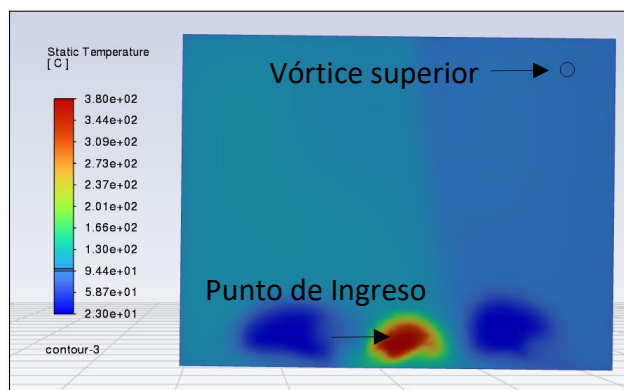


Figura 20. Contorno de temperatura, cámara de secado vacía. Plano -1

Definido los resultados numéricos en el plano-2, el contorno de temperatura presenta los valores, tomado como referencia de medición el punto en la parte superior de la cámara 94.4°C.

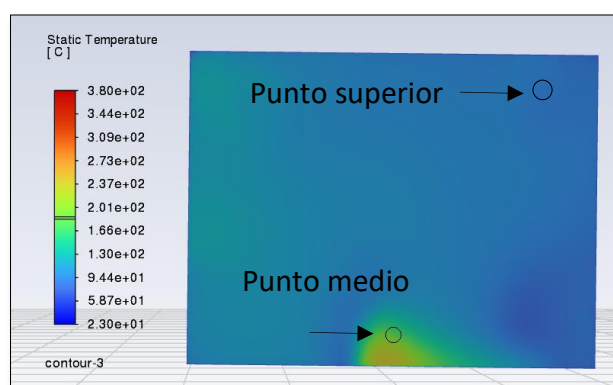


Figura 21. Contorno de temperatura, cámara de secado vacía. Plano -2.

En el plano-3, definido el contorno de temperatura al final de la cámara, tomado la medición en el punto específico en la parte superior obtenemos una temperatura de 93°C.

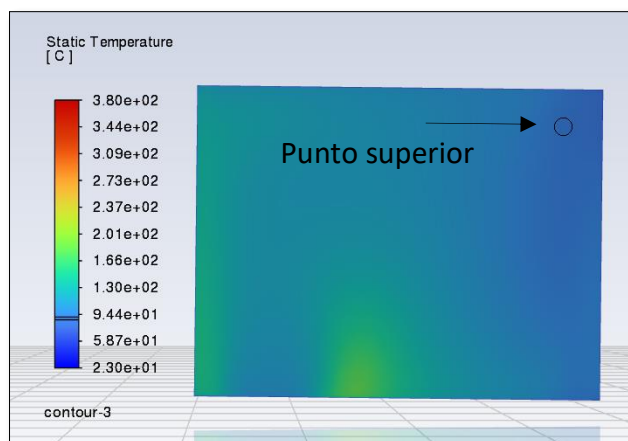


Figura 22. Contorno de temperatura, cámara de secado vacía. Ducto de entrada

Una vez obtenidos los valores referenciales de los contornos en los planos definidos anteriormente, es posible tabular los resultados y determinar el error cuadrático medio (ECM), entre los valores obtenidos en la simulación y los valores experimentales medidos en la cámara. Este análisis permite evaluar la precisión del modelo numérico, cuantificar su nivel de ajuste a las condiciones reales resultados utilizados en las propuestas de mejora.

Cálculo del error cuadrático medio, donde:

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - T_{Ref})^2}$$

- n número de puntos medidos [dlmn]
- T_i temperatura medida [°C]
- T_{Ref} temperatura idónea [°C]

Tabla 4. Valores numéricos, simulación cámara de secado vacía. Ducto, plano 1,2,3.

PUNTO DE REFERENCIA	Valores Experimentales [°C]	Valores Numéricos [°C]
Ingreso en el ducto	390	380
Plano 1- ingreso flujo a cámara.	385	380
Plano 2- flujo en el centro de la cámara.	100	94,6
Plano 3- flujo al final de la cámara.	98	94,4
Error cuadrático medio ECM 5.34 °C		

4.5 Simulación del escenario caso base (E0)

El desarrollo de la primera simulación se efectuó utilizando los valores y condiciones operativas establecidas en la planta de Mestiza® S.A., siguiendo los parámetros definidos en el literal 4.2.1. Esta configuración permitió obtener los contornos de velocidad y temperatura del flujo de aire caliente, variables fundamentales que determinan la eficiencia del proceso de secado. Estos contornos constituyen la base referencial para evaluar el comportamiento térmico dentro de la cámara de secado, los contornos se obtendrán en las mismas condiciones que la cámara vacía.

- a. Ingreso en el ducto
- b. Plano 1- ingreso flujo a cámara.
- c. Plano 2- flujo en el centro de la cámara.
- d. Plano 3- flujo al final de la cámara.

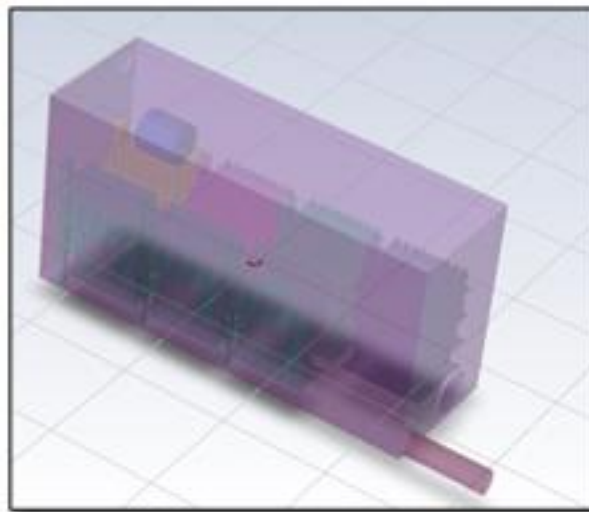


Figura 23. Modelo físico de la cámara de secado del caso base, E0.

4.5.1 Mallado del dominio computacional caso base E0

Una vez definida la geometría del modelo y establecidas las condiciones de frontera, se procedió a generar una malla poly-hexcore, incorporando refinamientos mediante capas de proximidad. Como resultado, se obtuvo una malla compuesta

por 3 588 414 nodos y 1 022 407 celdas, valores adecuados para cubrir correctamente el dominio computacional.

Los refinamientos se concentraron en las zonas donde el flujo presenta cambios bruscos de dirección o en regiones consideradas de interés dentro del dominio, con el fin de mejorar la resolución local y capturar con mayor precisión los fenómenos térmicos más relevantes.

Por la simetría del modelo geométrico obtenido se realizó el análisis únicamente de la sesión derecha de la cámara, separada longitudinalmente por el eje de simetría.

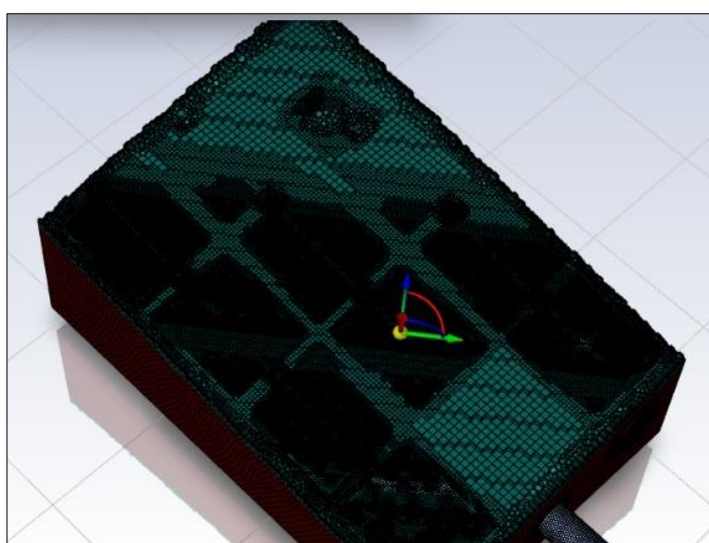


Figura 24. Mallado del dominio computacional caso base E0.

4.5.2 Condiciones de frontera dominio computacional caso base E0

La simulación del caso base se desarrollará bajo las siguientes condiciones de frontera:

Tabla 5. Condiciones de frontera del dominio computacional Caso base E0.

Condiciones de frontera	Tipo fluent	Variables principales
Ingreso aire caliente de re-proceso	velocity - inlet	Velocidad = 5.6 m/s , Temperatuta de 380 °C
Ingreso aire ambiente	velocity - inlet	Velocidad = 2 m/s , Temperatuta de 28 °C
Salida de humedad (renovación de aire)	pressure-outlet	P=0 Pa (presión manométrica atmosférica)
Circulación Fan Internos	fan	Velocidad = 2 m/s
Paredes del ducto no adiabáticas	wall	Sólida , pérdida de calor de 70 °C
Paredes de la cámara adiabáticas	wall	Sólida , pérdida de calor de 57 °C

Al enfocar esta simulación en representar las condiciones reales en planta, como un caso base se excluirá del modelado el rack que se ubica frente al ingreso de aire caliente a la cámara como comúnmente lo realizan en planta debido a la alta temperatura.

4.5.3 Resultados de la simulación del caso base E0.

Efectuada la simulación y que converja los resultados generaremos reportes de las principales variables que influyen en el desempeño de la cámara de secado, reportes como:

- Integrales sobre planos definidos, para determinar valores promedio de temperatura y velocidad.
- Valores máximos y mínimos de las variables como velocidad y temperatura en superficies seleccionadas.

En base a los reportes y contornos se determinó los valores más relevantes del caso E0:

Tabla 6. Resultados numéricos de la simulación del caso base E0.

Reporte	$\int T_p$ (°C)	$T_{máx}$ (°C)	$T_{mín}$ (°C)	$\int V_p$ (m/s)	V_{max} (m/s)	V_{min} (m/s)
Ducto ingreso	373,1	380	272,09	5,54	5,54	3,93
Plano 1	106,9	379,87	28,6	2,96	5,93	0,38
Plano 2	114,26	217,78	77,68	2,65	4,23	0,003
Plano 3	103,41	121,23	80,01	1,79	2,83	0,1

Los resultados obtenidos permiten analizar la distribución térmica y de velocidad del aire en el interior de la cámara de secado.

En el ducto de ingreso, evidencia una temperatura elevada 373,1 °C, muy próxima a la temperatura máxima de 380 °C, lo que confirma un ingreso del aire caliente proveniente del horno de quemado. Así mismo, la velocidad promedio y máxima alcanzan 5.54 m/s, que establece la energía con la que el flujo ingresa a la cámara.

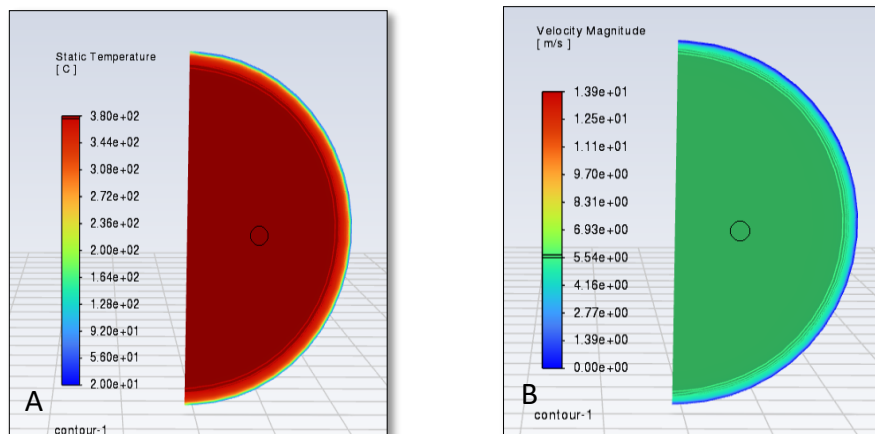


Figura 25. Contornos, resultados numéricos de la simulación E0, ducto de entrada: A: Temperatura; B: Velocidad.

En los planos internos (1, 2 y 3) se observó una disminución progresiva tanto de la temperatura como de la velocidad del flujo, lo que evidencia un proceso de mezcla entre el aire caliente proveniente del sistema de recuperación térmica y el aire ambiente. Esta atenuación gradual es coherente con el comportamiento esperado en sistemas de secado. El análisis detallado de estos planos permitió evidenciar la evolución de estas variables a lo largo de los planos.

Plano-1: La región con mayor influencia directa evidenció una velocidad más elevada $V_{\text{máx}} = 5.93 \text{ m/s}$ y el gradiente térmico más pronunciado $T_{\text{máx}} = 379.87 \text{ }^\circ\text{C}$ y $T_{\text{mín}} = 28.6 \text{ }^\circ\text{C}$. Estos valores reflejan una marcada interacción entre el aire ambiente y el flujo caliente proveniente del sistema de recuperación térmica del horno.

Dado que esta zona presenta las mayores velocidades y temperaturas de ingreso, los resultados confirman la recomendación de no ubicar racks con piezas cerámicas en este sector, con el fin de evitar daños potenciales derivados del exceso de temperatura y de la alta velocidad del flujo.

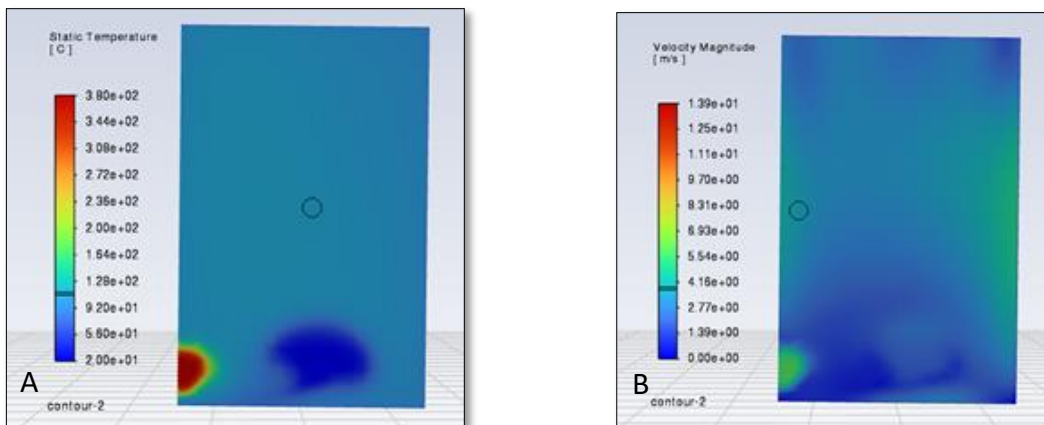


Figura 26. Contornos, resultados numéricos de la simulación E0, Plano 1. A: Temperatura; B: Velocidad.

Plano-2: mezcla más homogénea; las velocidades bajan significativamente 2.65 m/s promedio y la temperatura se estabiliza 114 °C promedio, aún por fuera de los valores idóneos para secado de cerámica sobre todo en el valor de velocidad y zonas de gradientes de temperatura sobre los 200 °C.

Al contorno de las piezas cerámicas evidencia velocidades 2.65 m/s, sobre los valores permisibles y aceptables para el secado correcto de piezas cerámicas según literal 3.1.4.2.

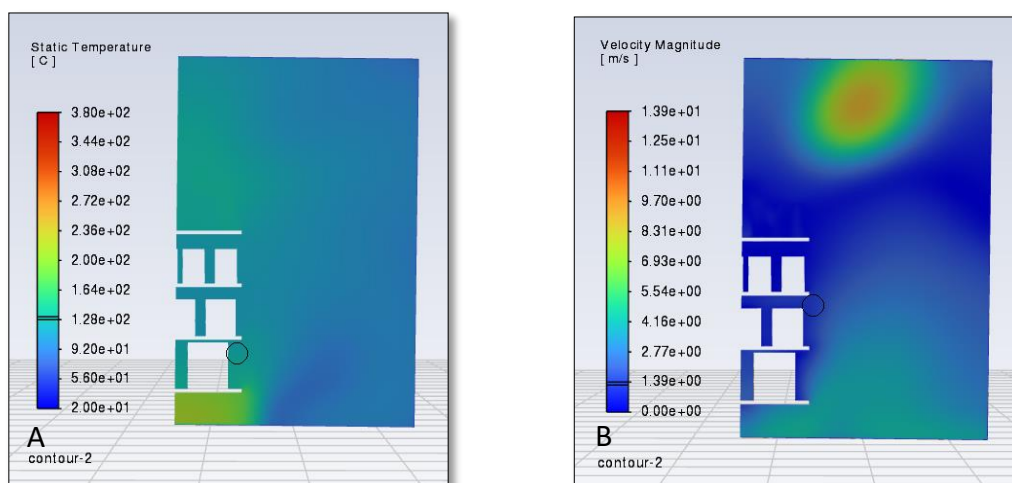


Figura 27. Contornos, resultados numéricos de la simulación E0, Plano 2: A: Temperatura; B: Velocidad.

Plano-3: zona con flujo más pasivo y estable, la temperatura promedio cae a 103 °C y la velocidad máxima apenas llega a 2.83 m/s, demostrando que no existe homogeneidad en toda la cara con respecto a temperatura.

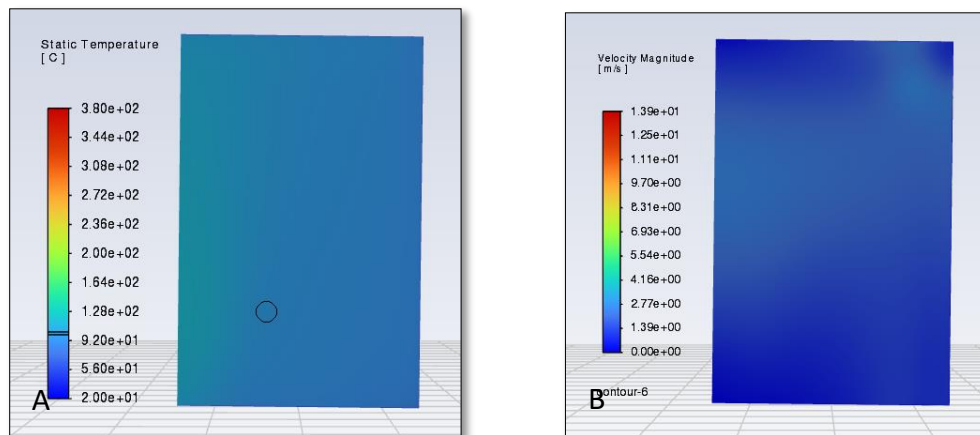


Figura 28. Contornos, resultados numéricos de la simulación E0, Plano 3: A: Temperatura; B: Velocidad.

La presencia de velocidades inferiores a 0.5 m/s confirmó la existencia de zonas muertas dentro de la cámara. En estas áreas, la transferencia de calor y masa se ve limitada. Por ello, los escenarios planteados a continuación se orientan específicamente a mitigar estas deficiencias de la acámara base E0, buscamos optimizar la uniformidad térmica y mejorar el desempeño global del proceso de secado.

En el siguiente apartado se planteó las mejoras al escenario base E0 mediante la simulación numérica de dos escenarios adicionales; escenario modificado 1 (E1) y escenario modificado 2 (E2). Estas propuestas se fundamentaron en los resultados obtenidos en la simulación inicial del caso E0, en los requerimientos operativos de la planta y en los parámetros teóricos desarrollados en el literal 4 de este documento.

Para este análisis, se determinaron previamente en el caso E0 los planos de mayor incidencia de las variables térmicas dentro de la cámara. Dichos planos serán utilizados de manera continua en las simulaciones posteriores, con el propósito de validar los resultados comparativos bajo criterios iguales.

4.6 Simulación escenario modificado-1 E1

En el E1, se plantea realizar modificaciones, significativas a la geometría del sistema:

Con el objetivo de mejorar la velocidad de ingreso y evitar el efecto jet provocado por el ducto circular con velocidades de 5-6 m/s, al ingreso del aire caliente a la cámara se reemplazó el ducto cilíndrico por un ducto rectangular, de 1 m de largo con 0,23 m de alto, buscando velocidades de flujo de ingreso de 3 m/s.

Adicional se prolonga la cámara 1m, longitudinalmente con el objetivo de aumentar la capacidad volumétrica de secado del sistema.

Este incremento geométrico favorece que el aire pierda parte de su energía inicial, se distribuya de manera más uniforme a lo largo del volumen y reduzca la diferencia entre temperaturas máximas y mínimas en cada sección evaluada.

Se modificará la altura de ubicación de los ventiladores de ingreso de aire ambiente a la cámara en E1, los ventiladores estarán colocados al centro de la pared de ingreso transversalmente tomadas desde la base de la cámara a 1.5 m, con el fin de mejorar la mezcla interna del fluido.

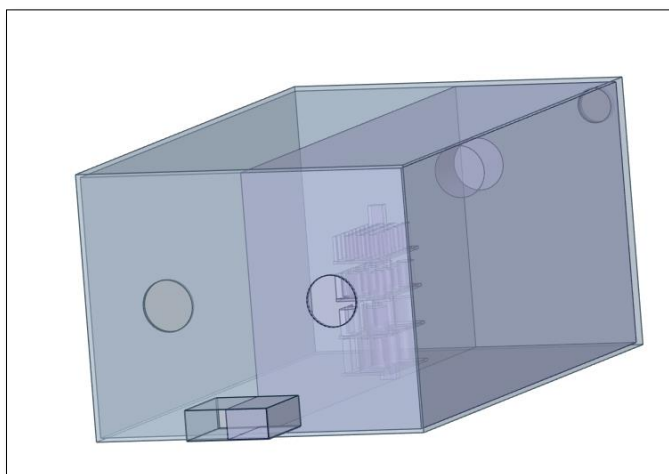


Figura 29, Modelo físico de la cámara de secado del caso E1.

4.6.1 Mallado del dominio computacional caso E1

Una vez definida la geometría del modelo y establecidas las condiciones de frontera, se procedió a generar una malla poly-hexcore. Tras varios refinamientos en las zonas de mayor interés significativo de fluido, se obtuvo una malla compuesta por 622 324 celdas y 1 922 694 nodos, valores que permiten cubrir adecuadamente el dominio del volumen de flujo.

Dado que el modelo geométrico presenta simetría, el análisis se realizó únicamente sobre la mitad del dominio, con el fin de reducir el costo computacional sin comprometer la calidad ni la veracidad de los resultados.

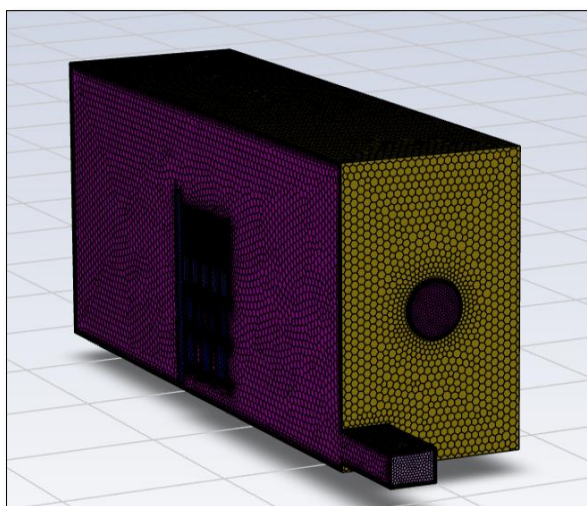


Figura 30. Mallado del dominio computacional caso E1.

4.6.2 Condiciones de frontera dominio computacional caso E1

El escenario E1, la simulación se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones de frontera:

Tabla. Condiciones de frontera del dominio computacional Coso E1.

Condiciones de frontera	Tipo fluent	Variables principales
Ingreso aire caliente de re-proceso	velocity - inlet	Velocidad = 3 m/s , Temperatuta de 380 °C
Ingreso aire ambiente	velocity - inlet	Velocidad = 2 m/s , Temperatuta de 28 °C
Salida de humedad (renovación de aire)	pressure-outlet	P=0 Pa (presión manométrica atmosférica)
Circulación Fan Internos	fan	Velocidad = 2 m/s
Paredes del ducto no adiabáticas	wall	Sólida , pérdida de calor de 70 °C
Paredes de la camara adiabáticas	wall	Sólida , pérdida de calor de 57 °C

La modificación del ducto de ingreso de aire caliente permitió reducir y estabilizar la velocidad del flujo al momento de ingresar al dominio, disminuyendo de 5.6 m/s a 3 m/s. Esta disminución de la velocidad resulta fundamental para evitar el efecto jet.

4.6.3 Resultados de la simulación del caso E1

Al igual que en el caso E0, efectuada la simulación y con la convergencia de las ecuaciones de dominio, podemos determinar los resultados:

Con base en los reportes y en los resultados obtenidos de los contornos, se determinaron los valores correspondientes al escenario E1.

Tabla 7. Resultados numéricos de la simulación del caso E1.

Reporte	f Tp (°C)	T_máx (°C)	T_mín (°C)	f Vp (m/s)	V_máx (m/s)	V_mín(m/s)
Ducto ingreso	372	380	170,28	2,99	3	1,5
Plano 1	126,19	380	42,64	1,7	3,2	0,03
Plano 2	128,19	152,73	96,14	1,5	3,3	0,05
Plano 3	131,41	133,14	94,62	1,5	3,3	0,18

Con los resultados obtenidos, se procede a analizar las mejoras y las posibles limitaciones que persisten con respecto al caso E0.

En el ducto de ingreso se registra una temperatura de 372 °C, valor muy cercano a la temperatura máxima de 380 °C, lo que confirma que no se producen pérdidas térmicas significativas antes del ingreso a la cámara.

La velocidad de ingreso se atenúa a 3 m/s, que era el objetivo evitar el efecto jet al ingreso a la cámara, al mantener una velocidad de 1.5 m/s como velocidad mínima, confirmamos que no existentes zonas muertas o sin movimiento en este contorno.

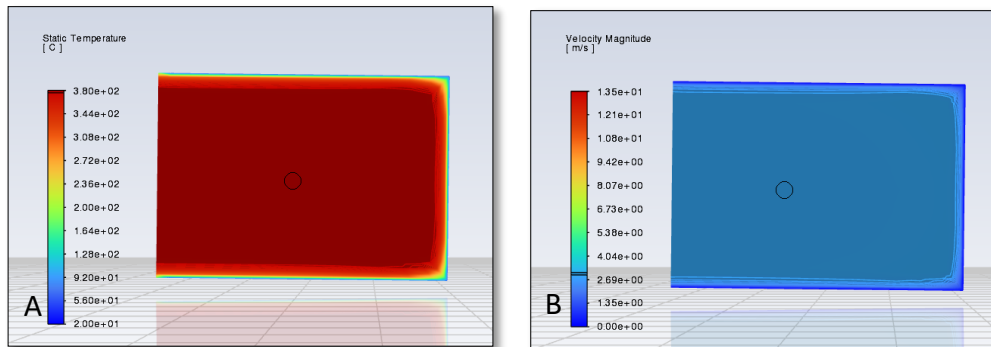


Figura 31. Contornos, resultados numéricos de la simulación E1, ducto de entrada. A: Temperatura; B: Velocidad.

De igual manera que el caso E0, se analizara en los planos 1-2-3, con el fin de conseguir homogeneidad de resultados.

Plano 1: se mantiene como una zona de influencia de temperaturas con valores de $T_{\text{máx}} = 380 \text{ }^{\circ}\text{C}$, existe una lengüeta de aire caliente, pero más corta que en el caso base E0.

Se mantiene un choque térmico de mezcla con valores mejorados de $42 - 43 \text{ }^{\circ}\text{C}$, entre el aire caliente y el ingresado del medio ambiente.

El flujo de aire caliente ya no ingresa de forma violenta a la cámara, mantiene velocidades promedio 3.2 m/s , mucho más recomendado en este caso de secado.

Al tener una velocidad mínima de 0.03 , quiere decir que aún existe zonas muertas sin movimiento junto a las paredes.

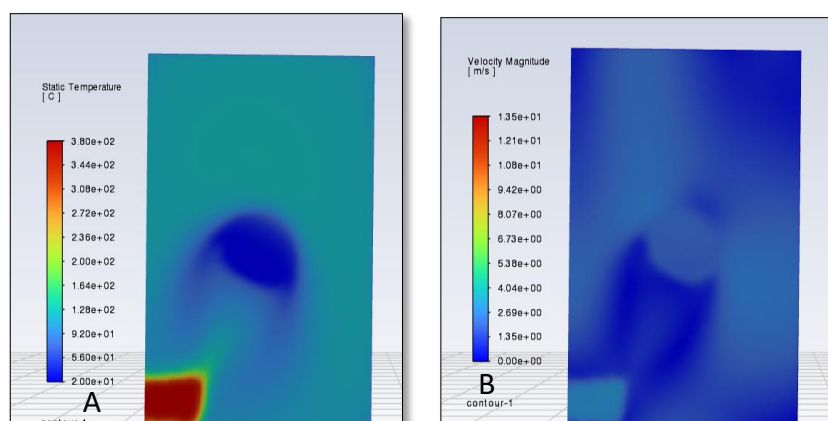


Figura 32. Contornos, resultados numéricos de la simulación E1, Plano. A: Temperatura; B: Velocidad.

Plano 2: encontramos una zona de mezcla más estable, más homogéneo con temperaturas de $T_p = 128^\circ\text{C}$ considerando, que el centro de la cámara se ha desplazado por el alargamiento geométrico de 7m. En este contorno nos encontramos dentro de los valores operativos idóneas para el secado.

La velocidad promedio de 1.5 m/s es ideal dentro de este proceso, pero se puede apreciar que tenemos puntos muertos sin movimiento con velocidades de 0.05 m/s.

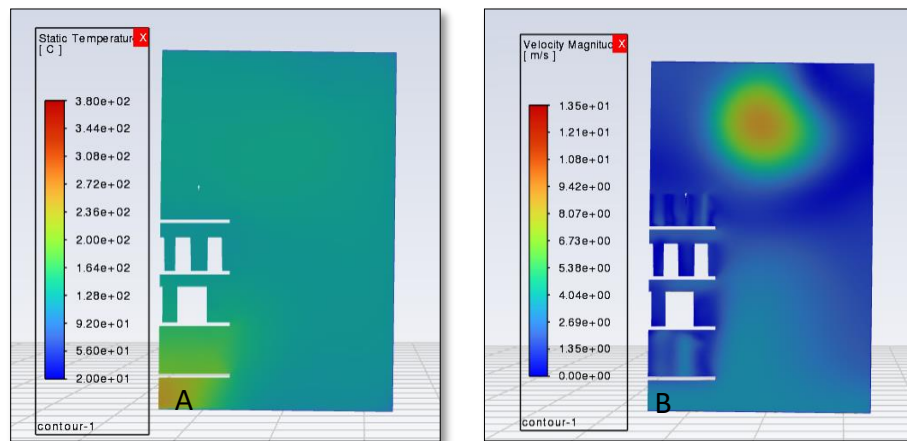


Figura 33. Contornos, resultados numéricos de la simulación E1, Plano 2. A: Temperatura; B: Velocidad.

Plano 3: en una zona donde el flujo se vuelve pasivo la temperatura promedio alcanza $T_p = 131^\circ\text{C}$, dentro de valores ideales para el secado.

La velocidad promedio de 3.3 m/s, y la velocidad mínima de 0.18 m/s nos indica que ya no es un punto muerto o sin movimiento de flujo.

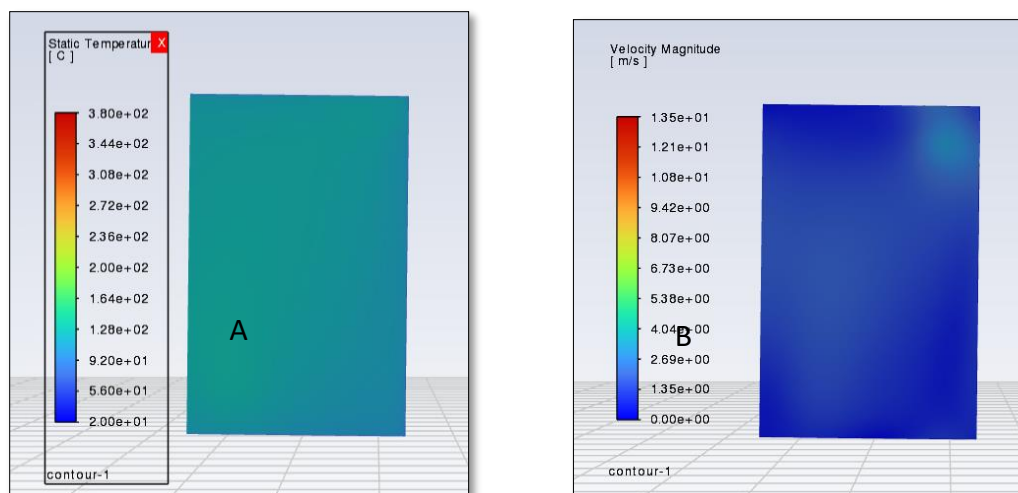


Figura 34. . Contornos, resultados numéricos de la simulación E1, Plano 3. A: Temperatura; B: Velocidad.

El cambio de ducto y el ajuste de la velocidad de ingreso a 3 m/s han mejorado de manera notable el comportamiento del flujo en la cámara. Los planos medios y finales presentan temperaturas y velocidades dentro del rango recomendado para secado de cerámica.

Aún se identifican pequeñas zonas de baja velocidad cerca de paredes de la cámara, por lo que se debería de evaluar la incorporación de difusores y sistemas de recirculación interna, para evitar estas zonas muertas dentro del flujo.

4.7 Simulación escenario modificado-2 E2

En el último escenario E2, se planteó realizar modificaciones con el fin de corregir las limitaciones presentadas tanto en E0 como en E1, como zonas muertas y el flujo tipo jet de ingreso a la cámara.

Para mejorar el ingreso del aire caliente al dominio, se propuso la instalación de un ducto de mayor longitud que cubra una superficie más amplia. En este escenario, se consideró un ducto rectangular de 2 m de longitud y 0,1 m de altura. Asimismo, se planteó la incorporación de dos ductos de alimentación de aire caliente, con el objetivo de permitir la ampliación de la cámara hasta una longitud total de 8 m.

Para mejorar el flujo se colocó deflectores a la salida, el ducto se instalará lo más pegado al piso de la cámara a una distancia no mayor a 20 cm del borde inferior.

Para evitar zonas muertas se colocaron, ventiladores en el techo de la cámara, con aspas de extracción y que vuelvan el flujo al sistema en forma de cortina de aire.

Para mejorar la salida de humedad y aumentar el número de renovaciones de aire dentro del dominio, la salida estará instalada en la pared posterior y tendrá un diámetro hidráulico de 50cm.

Este incremento geométrico a 8 m, permite que el aire reduzca parte de su energía inicial y se distribuya de manera más uniforme a lo largo del dominio. Como resultado, se logra incrementar la capacidad volumétrica de secado de la cámara, pasando de 72 m³ en el diseño inicial a 96 m³ en la configuración propuesta.

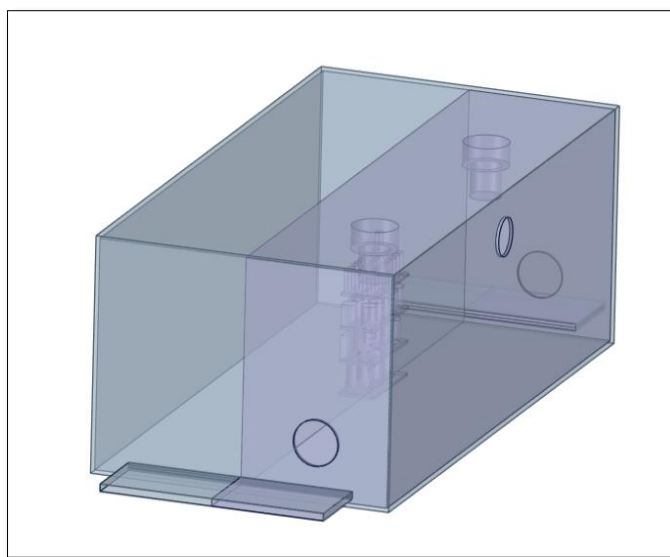


Figura 35. Modelo físico de la cámara de secado del caso E2.

4.7.1 Mallado del dominio computacional caso E2.

Una vez definida la geometría del modelo y establecidas las condiciones de frontera, se procedió a generar una malla poly-hexcore. Tras aplicar los refinamientos necesarios en las zonas de interés, se obtuvo una malla compuesta por 995 352 celdas y 193 116 nodos, la cual cubre adecuadamente el volumen del dominio de simulación.

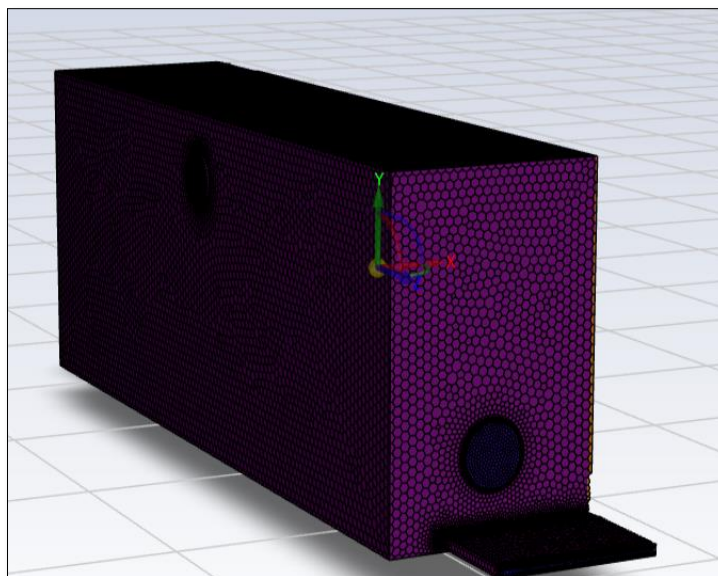


Figura 36. Mallado del dominio computacional caso E1.

Como en los escenarios anteriores E0, E1, se analizó la mitad del sistema por simetría, por ahorro significativo de datos computacionales.

4.7.2 Condiciones de frontera dominio computacional caso E2

El escenario E2 simularemos bajo las siguientes condiciones de frontera:

Tabla 8. Condiciones de frontera del dominio computacional Coso E2.

Condiciones de frontera	Tipo fluent	Variables principales
Ingreso aire caliente de re-proceso	velocity - inlet	Velocidad = 3 m/s , Temperatuta de 380 °C
Ingreso aire ambiente	velocity - inlet	Velocidad = 2 m/s , Temperatuta de 28 °C
Salida de humedad (renovación de aire)	pressure-outlet	P=0 Pa (presión manométrica atmosférica)
Circulación Fan Internos	fan	Velocidad = 3 m/s
Paredes del ducto no adiabáticas	wall	Sólida , pérdida de calor de 70 °C
Paredes de la camara adiabáticas	wall	Sólida , pérdida de calor de 57 °C

4.7.3 Resultados de la simulación del caso E2

Una vez ejecutada la simulación del escenario E2 y alcanzada la convergencia de las ecuaciones del dominio, se procedió a analizar los resultados obtenidos.

Con base en los reportes y en los contornos generados, se determinaron los valores correspondientes al escenario E2, utilizando las mismas posiciones y planos de

estudio empleados en los escenarios E0 y E1 para asegurar la coherencia comparativa.

Tabla 9. Resultados numéricos de la simulación del caso E2.

Reporte	$f Tp$ (°C)	$T_{m\acute{a}x}$ (°C)	$T_{m\acute{i}n}$ (°C)	$f Vp$ (m/s)	V_{max} (m/s)	V_{min} (m/s)
Ducto ingreso	361	380	182	2,99	3	1,65
Plano 1	99,35	361	82	1,6	4,5	0,85
Plano 2	103,11	126	96	1,4	4,9	0,78
Plano 3	100	362	83	1,59	4,3	0,76

De acuerdo a los datos obtenidos en los contornos como en las superficies mediante Surface Integrals, facet minimum, facet maximum, podemos definir:

Cabe recordar que, en el escenario E2, se dispone de dos ductos de entrada de aire caliente instalados en posiciones opuestas dentro de la cámara.

Se observó una temperatura promedio de 361 °C, valor muy cercano a la temperatura máxima de ingreso proveniente del sistema de recolección de aire caliente del horno, lo que indica que no existen pérdidas térmicas significativas en el proceso.

El perfil de velocidad evidencia un flujo homogéneo, con una velocidad promedio de 3 m/s, cumpliendo así el objetivo establecido para este escenario. Esto confirma el efecto favorable de incorporar un ducto de geometría rectangular en el ingreso del flujo dentro de la cámara.

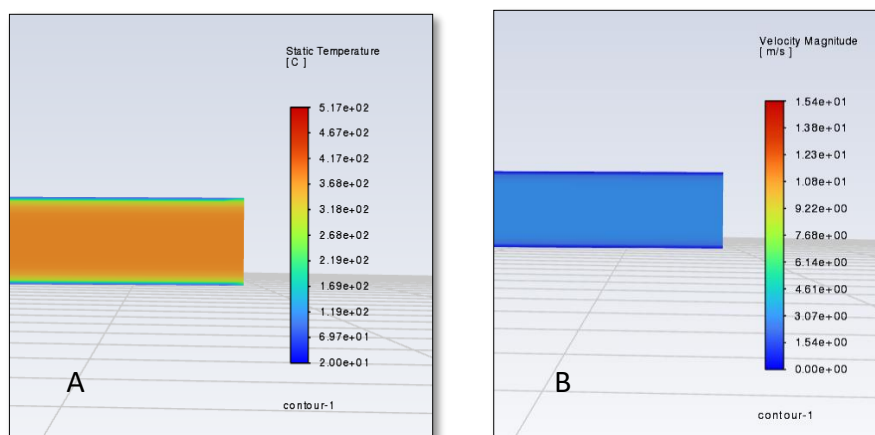


Figura 37. Contornos, resultados numéricos de la simulación E2, ducto de entrada. A: Temperatura; B: Velocidad.

En el escenario E2 se analiza los planos (1, 2, 3), planos ubicados en similares condiciones que E0 – E1.

Plano 1: en este plano se puede encontrar temperaturas máximas de 361 °C, flujo que es desviado hacia el suelo mediante los deflectores instalados al final del ducto de ingreso al dominio. De esta manera garantizamos que el flujo no golpee directamente los racks de cerámica ubicados en la zona de ingreso.

Al tener mayor área de ingreso la lengüeta de calor que se distribuye de manera homogénea, al ingresar a la cámara.

La temperatura promedio en el contorno sobre el plano-1 es de 99.35 °C, valor que se encuentra dentro de los valores idóneas para secado de cerámica 80 -130°C.

La velocidad promedio en el plano es de 1.6 m/s, manteniéndose homogénea en el contorno de interés, la velocidad cae a la mitad comparado con la velocidad del ducto de entrada 3m/s, esto es normal y coherente con la expansión que sufre el chorro de aire caliente al entrar a la cámara. Esto refleja que los difusores instalados al final del ducto de ingreso cumplen el objetivo para el cual fueron implementados.

La velocidad min de 0.85 m/s, refleja que no existe zonas muertas en el plano en estudio.

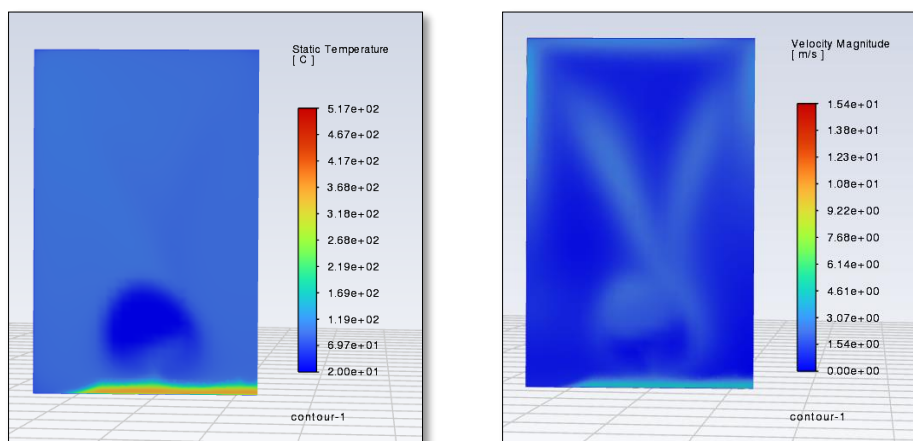


Figura 38. Contornos, resultados numéricos de la simulación E2, Plano 1. A: Temperatura; B: Velocidad.

Plano 2: encontramos una zona de mezcla estable, indica un flujo que alcanza un mescla térmica desarrollada, con temperaturas promedio de 103°C y velocidad de 1.4 m/s, siendo una zona estable de transferencia de calor.

El gradiente de temperatura entre la temperatura máxima y mínima demuestra homogeneidad térmica, $T_{\text{máx}} = 126$, $T_{\text{mín}} = 96$.

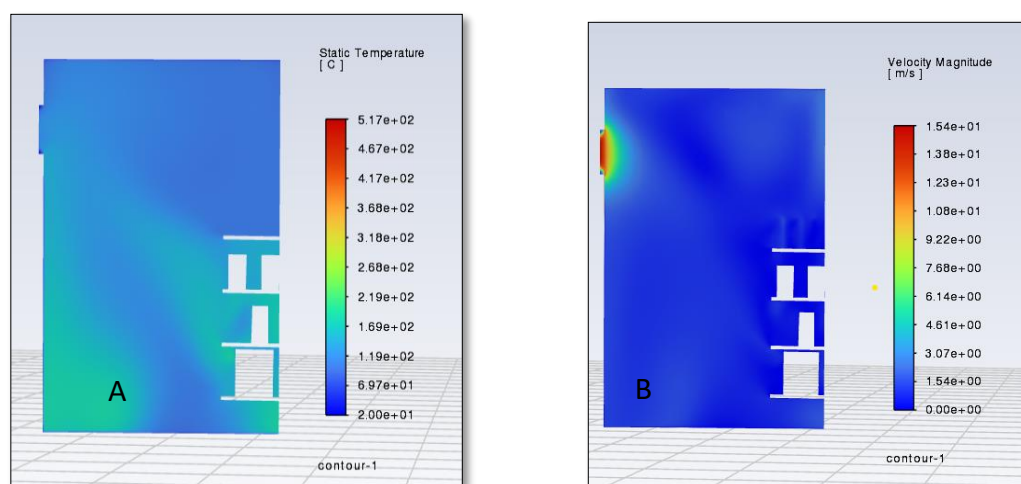


Figura 39. Contornos, resultados numéricos de la simulación E2, Plano 2. A: Temperatura; B: Velocidad.

Plano 3: al desarrollar la geometría del dominio con dos ingresos paralelos de aire caliente y aplicar parámetros de frontera equivalentes, se observó que en el extremo opuesto de la cámara se obtienen valores similares a los registrados en el plano 1. Las diferencias no superan los 5 °C en temperatura ni los 0.5 m/s en velocidad, lo que indicó una variación mínima en las condiciones del flujo.

Estos resultados confirman que el modelo propuesto presentó una mayor estabilidad térmica y una distribución más homogénea del flujo, condiciones esenciales para garantizar una correcta transferencia de calor durante el proceso de secado.

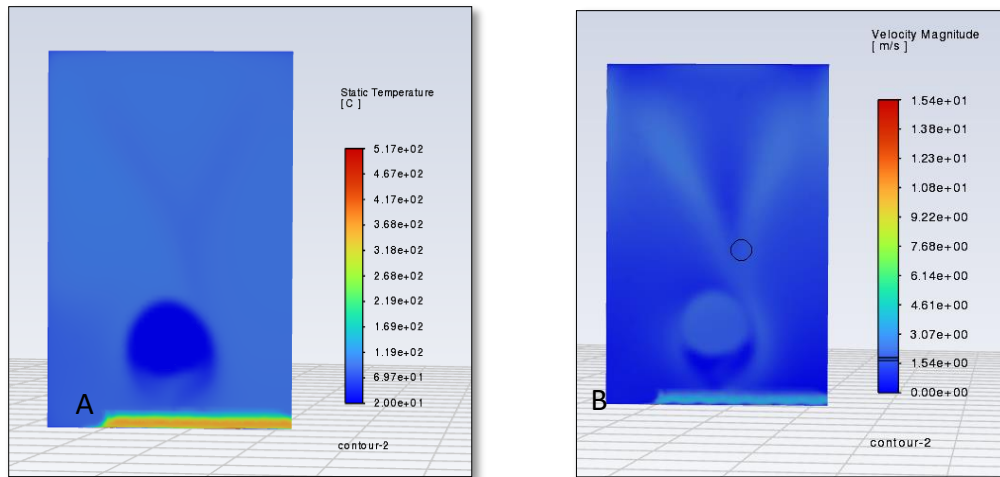


Figura 40. Contornos, resultados numéricos de la simulación E2, Plano 3. A: Temperatura; B: Velocidad.

5. Análisis de resultados y discusión

En esta sesión se presenta el análisis comparativo de los tres escenarios simulados y evaluados como caso E0, E1 y E2.

El objetivo es determinar en qué medida las modificantes geométricas y variables propuestas contribuyen a mejorar la distribución calórica y de velocidad dentro de la cámara de secado.

En base a estos resultados se buscó aproximarse a las condiciones ideales de operación del sistema de secado de piezas cerámicas.

Tabla 10. Análisis de uniformidad térmica y estabilidad de flujo en los escenarios E0, E1, ES -2.

Reporte	$f T_p$ (°C)	$f V_p$ (m/s)	T_{ideal} (100 °C)	V_{ideal} (1,5 m/s)
E0			∇T	∇V
Plano 1	106,9	2.96	6.9	1.46
Plano 2	114.26	2.65	14.29	1.15
Plano 3	103.41	1.79	3.41	0.29
E1				
Plano 1	126.19	1.7	26.19	0.2
Plano 2	128.19	1.5	28.19	0
Plano 3	131.41	1.5	31.41	0
E2				
Plano 1	99.35	1.6	0,65	0.1
Plano 2	103.11	1.4	3,11	0.1
Plano 3	100	1.6	0	0.09

5.1 Comparación de la variable de temperatura

En términos generales, los resultados numéricos de la tabla 11, muestran que el caso base E0 presenta los mayores gradientes térmicos especialmente en el segundo plano de análisis donde el gradiente $\nabla T = 14.26^{\circ}\text{C}$, muy por encima de la temperatura idónea de la cámara, lo que indica una mezcla deficiente y acumulación de aire caliente en la parte media.

De la misma manera presenta valores muy cercanos a 380°C , en la zona de ingreso lo que representa un potencial agresivo para el secado de piezas en esta zona.

Los diferenciales de temperatura en los planos de simulación (1-2-3), sobre pasan el valor de $\pm 5^{\circ}\text{C}$, identificando claramente que el sistema no maneja un flujo homogéneo.

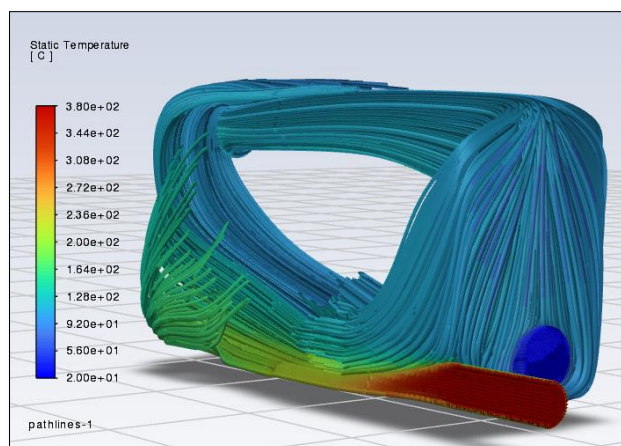


Figura 41 Pathlines de flujo de temperatura caso base E0.

En el escenario E1, la modificación del ducto y el aumento del largo de la cámara permiten reducir significativamente estos contrastes, elevando la temperatura mínima en los planos medios y finales y estrechando los diferenciales de ± 5 °C de temperatura entre los planos (1-2-3).

No obstante, aún se identifican zonas con temperaturas elevadas que sobre pasan las temperaturas ideales de secado, con un diferencial de 26°C sobre la temperatura ideal.

Finalmente, el E2 evidencia un comportamiento térmicamente más equilibrado. Dentro de los contornos de temperatura en los planos 1-2-3, presentan temperaturas más cercanas a la ideal 100°C, errores entre 0.6 °C y 3.11 °C. Los diferenciales de temperatura entre los planos de análisis no sobre pasan los ± 5 °C, la configuración de la cámara reduce considerablemente los picos de temperatura, presentándose como un sistema con homogeneidad térmica.

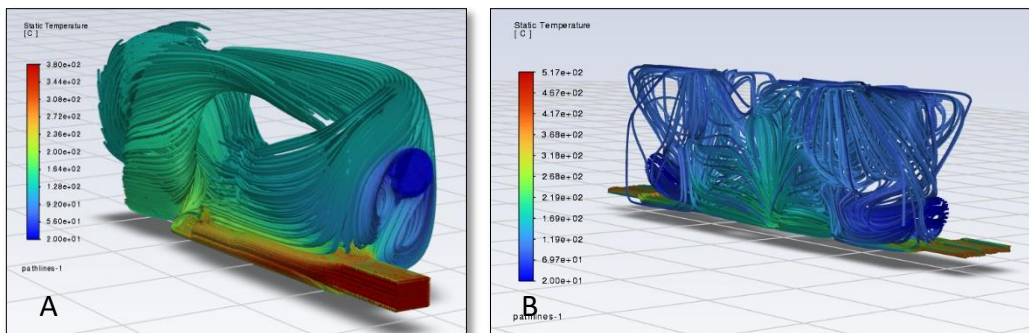


Figura 42. Pathlines de flujo de temperatura. A: E1; B: E2

5.2 Comparación de la variable velocidad

En cuanto al campo de velocidades, en el caso de E0 se observa la presencia de un chorro muy concentrado en la zona de ingreso, con velocidades máximas 5.54 m/s, y valores cercanos a 0 m/s, en diferentes regiones de la cámara que identifican zonas muertas dentro del volumen de control.

El aire ingresa al sistema demasiado rápido 5.54 m/s, generando un efecto jet energético. Esto produce turbulencia excesiva y arrastre no deseado, esto contribuye a zonas muertas dentro de la cámara.

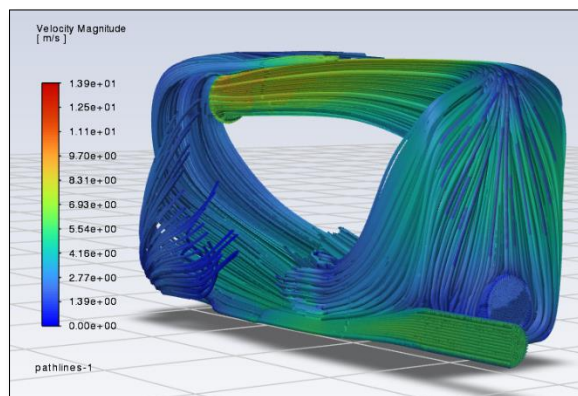


Figura 43. Líneas de trayectoria del flujo y magnitud de velocidad, caso E0.

En el E1, las velocidades se vuelven mucho más estables y cercanas a la velocidad ideal 1.5 m/s. Al permanecer la velocidad más estable dentro del sistema mejora la distribución de flujo dentro de la cámara.

El escenario E2, los deflectores cumplen su función específica enfocando los efectos jet hacia el suelo del sistema. El sistema se encuentra más estable con velocidades similares y muy cercanos a las idóneas (1.5 m/s).

La colocación de los deflector y ventiladores de re circulación atenúan los efectos de impacto jet, eliminan zonas muertas y homogenizan el flujo.

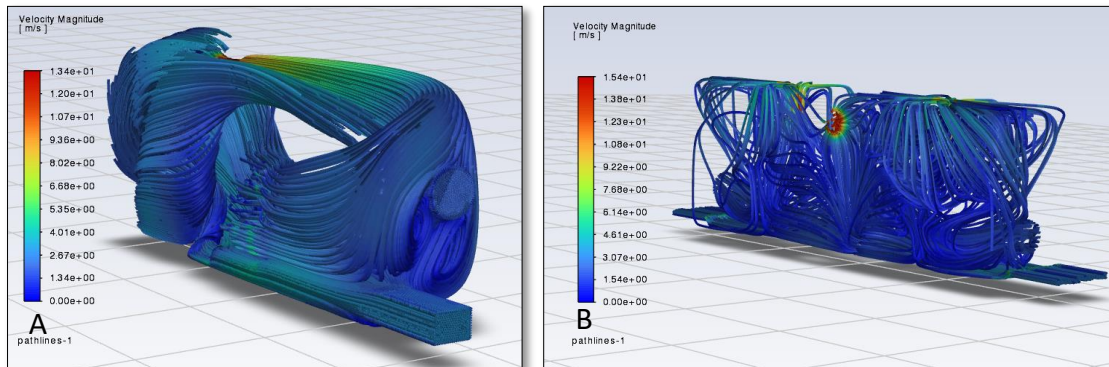


Figura 44. Líneas de trayectoria del flujo y magnitud de velocidad. A: E1; B: E2

6. Conclusiones

En el presente trabajo se realizó el estudio del flujo de aire caliente (380°C), dentro de una cámara de secado de elementos cerámicos. Mediante simulaciones numéricas computacionales con el uso de Ansys Student Fluent, se ha logrado describir el comportamiento y la influencia de las temperaturas (T) y la velocidad (V) dentro de una cámara de secado para elementos cerámicos definidos en tres escenarios (E0, E1, E2).

El desarrollado del marco teórico permitió comprender de manera integral las etapas que conforman el proceso de fabricación de cerámicas decorativas. La revisión de la literatura confirmó que el secado constituye una fase crítica del proceso productivo, ya que de él dependen las propiedades mecánicas de los artículos y directamente la calidad del producto.

En el presente trabajo se llevó a cabo una revisión de las principales tecnologías de secado empleadas en la fabricación de elementos cerámicos decorativos. De dicho análisis se estableció que la tecnología predominante en la industria actual es la recuperación del aire remanente proveniente de fuentes de calor existentes como hornos de quemado, debido a su elevada eficiencia energética, su bajo costo operativo y su capacidad de integrarse fácilmente en los procesos térmicos ya implementados.

Se revisaron diversos modelos numéricos aplicados al estudio y caracterización del flujo de aire caliente en sistemas confinados. Estos modelos permiten resolver las ecuaciones de Navier–Stokes bajo distintas configuraciones de condiciones de frontera y utilizando diferentes esquemas de discretización. A pesar del costo computacional, se determinó que la selección de esquemas de discretización adecuados, especialmente aquellos basados en formulaciones de conservación de la energía térmica, definen el comportamiento del flujo, esto resulta fundamental para garantizar la convergencia y la precisión de la solución.

El análisis realizado bajo el modelado de turbulencia k- ϵ constituye una herramienta fundamental, para la simulación del flujo de aire caliente dentro de la cámara de secado. Su capacidad para representar de manera estable los efectos de la turbulencia, la disipación de energía térmica y los patrones de mezcla lo convierten en una opción confiable para sistemas confinados con recirculaciones complejas.

El procedimiento de mallado aplicado al dominio computacional de la cámara de secado permitió garantizar la precisión de los resultados obtenidos en los campos de velocidad y temperatura. El dominio fue dividido en regiones con distintos niveles de refinamiento, priorizando las zonas de mayor complejidad de fluido. Para ello se empleó una malla poly-hexcore, que captura de gradientes y fenómenos de recirculación. Garantizando así la fidelidad de los resultados con un bajo costo computacional.

El análisis computacional CFD permitió caracterizar detalladamente el comportamiento térmico y movimiento del fluido dentro de la cámara de secado de piezas cerámicas. Evidenciando que la configuración original del caso E0, presentaba condiciones poco favorables para un secado homogéneo. Se identificaron elevados gradientes térmicos, velocidades excesivas en la zona de ingreso y la presencia de regiones con bajo movimiento de aire, factores que comprometen la calidad del proceso y generan riesgo de deformaciones o agrietamientos en las piezas.

La implementación de las modificaciones en E2 mejoró sustancialmente la distribución del flujo en comparación con la configuración inicial. Sin embargo, aún con este cambio, se observó temperaturas promedio significativamente superiores al objetivo de operación.

Los resultados demostraron que la geometría final propuesta (E2) elimina de manera efectiva los problemas detectados en el caso base, tales como las zonas muertas, la concentración de flujo en un solo punto, los picos térmicos locales y la mezcla deficiente entre el aire caliente y el aire ambiente. La cámara optimizada presenta un campo de temperatura más homogéneo y un flujo estable a lo largo de

toda su longitud, lo cual contribuye directamente a mejorar la calidad del secado de las piezas cerámicas.

7. Estudios futuros

En trabajos investigativos futuros se podrá profundizar en el análisis mediante simulaciones orientadas a evaluar el efecto de la disposición de los racks dentro de la cámara de secado. La ubicación, separación y geometría de estos elementos influyen directamente en la distribución del flujo de aire. Con el uso de CFD permitirá modelar diferentes ubicaciones de racks y analizar su impacto en la transferencia de calor y masa.

De igual manera, un estudio futuro podrá centrarse en el análisis detallado de los contornos geométricos de las piezas cerámicas y su influencia sobre los fenómenos de transferencia de calor y masa durante el proceso de secado. Mediante simulaciones CFD más específicas, será posible modelar la interacción del flujo de aire alrededor y a través de las piezas, un estudio de contornos detallados proporcionará información valiosa para optimizar el diseño de las piezas.

Referencias

- [1] M. Rahaman, *Ceramic Processing and Sintering*. Missouri: Taylor & Francis Group, 2003.
- [2] L. Ávila *et al.*, *Paute atlas cantonal*. Cuenca: Casa Editora, 2022.
- [3] R. F. Costa *et al.*, "Secagem de placas cerâmicas híbridas argila/rejeito de diatomita: Um estudo experimental," *Research, Society and Development*, vol. 10, no. 8, p. e13710817174, Jul. 2021, doi: 10.33448/rsd-v10i8.17174.
- [4] R. S. Gómez *et al.*, "Drying process of clay ceramic materials: a review," *Research, Society and Development*, vol. 9, no. 11, p. e78591110300, Dec. 2020, doi: 10.33448/rsd-v9i11.10300.
- [5] E. Galán and P. Aparicio, "Materias primas para la industria cerámica," Sevilla: Universidad de Sevilla, 2006. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/233911019>
- [6] C. Detellier, "Functional Kaolinite," *The Chemical Record*, vol. 18, no. 7–8, pp. 868–877, Jul. 2018, doi: 10.1002/tcr.201700072.
- [7] M. Dondi, "Feldspathic fluxes for ceramics: Sources, production trends and technological value," *Resour Conserv Recycl*, vol. 133, pp. 191–205, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.02.027.
- [8] E. Durgut, "Industrial-Based Comprehension on the Ceramic Body Composition by Continuous/Batch Grinding Methods," *Minerals*, vol. 15, no. 10, p. 1070, Oct. 2025, doi: 10.3390/min15101070.
- [9] J. Morales, *Tecnología de los materiales cerámicos*, vol. Tomo 1. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2005.
- [10] D. Jurado-Pabuence, C. Alvarado-Gallo, L. Cely-Illera, J. Cely-Niño, K. Anteliz-Contreras, and C. Cely-Illera, "Efecto de la molienda vía húmeda en las propiedades físico-mecánicas y estructurales de baldosas cerámicas extruidas," *Mundo FESC*, vol. 12, no. 23, pp. 269–283, Jan. 2022, doi: 10.61799/2216-0388.1208.
- [11] C. Candeias, S. Novo, and F. Rocha, "Exploring Residual Clays for Low-Impact Ceramics: Insights from a Portuguese Ceramic Region," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 15, p. 8761, Aug. 2025, doi: 10.3390/app15158761.
- [12] C. Geankoplis, *Transport processes and separation process principles*, 4th ed. 2018.
- [13] R. S. Gómez *et al.*, "Processo de secagem de materiais cerâmicos argilosos: uma revisão," *Research, Society and Development*, vol. 9, no. 11, p. e78591110300, Dec. 2020, doi: 10.33448/rsd-v9i11.10300.
- [14] A. C. Medina-Jimenez and J. E. Jaramillo-Ibarra, "Recuperación energética y análisis térmico del proceso de cocción en la industria cerámica," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 18, no. 1, pp. 81–98, Jan. 2019, doi: 10.18273/revuin.v18n1-2019007.
- [15] R. A. García-León, E. Flórez Solano, and M. Rodríguez Castilla, "Diseño de Mezclas para la Fabricación de Productos de Mampostería en la Industria Cerámica," *Revista Politécnica*, vol. 14, no. 26, pp. 19–28, Jun. 2018, doi: 10.33571/rpolitec.v14n26a2.

- [16] M. J. Moran and H. N. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons, Inc.
- [17] R. A. García-León, E. Flórez Solano, and M. Rodríguez Castilla, “Diseño de Mezclas para la Fabricación de Productos de Mampostería en la Industria Cerámica,” *Revista Politécnica*, vol. 14, no. 26, pp. 19–28, Jun. 2018, doi: 10.33571/rpolitec.v14n26a2.
- [18] B. M. Gong, K. Sukpasjaroen, and T. Chankoson, “Ancient Ceramic Culture and Technological Characteristics of Xiaopi Kiln Ceramics,” *Arts*, vol. 11, no. 1, p. 34, Feb. 2022, doi: 10.3390/arts11010034.
- [19] Dia Zeidan, · Arturo Hidalgo, · Lucy T. Zhang, and · Eric Goncalves Da Silva, *Computational Fluid Dynamics: Novel Numerical and Computational Approaches*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. doi: 10.1007/978-981-97-8152-2.
- [20] M. Hajdukiewicz, F. J. González Gallero, P. Mannion, M. G. L. C. Loomans, and M. M. Keane, “A narrative review to credible computational fluid dynamics models of naturally ventilated built environments,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 198, p. 114404, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114404.
- [21] C. Dechpratoon, A. Hokpunna, P. Yeunyongkul, R. Munsin, T. Watcharadumrongsak, and K. Wuttikid, “Numerical Simulation and Experimental Study of Thermal Distribution Behavior in Downdraft Ceramic Kiln,” *Journal of Technical Education Science*, no. 78B, pp. 36–44, Aug. 2023, doi: 10.54644/jte.78B.2023.1440.