



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y  
MATERIALES

**MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD Y  
TEMPERATURA PARA ARREGLOS DE CAJAS DE FRUTAS  
SOMETIDOS A CÁMARAS DE FRÍO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

VANESA ESTEFANÍA VERA NOVOA

PROFESOR GUÍA  
J. CRISTIAN SALGADO HERRERA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
CRISTIAN SAAVEDRA FLORES  
MELANIE COLET LAGRILLE

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la empresa CMPC

SANTIAGO DE CHILE  
2018

## **RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR**

**AL TÍTULO DE:** Ingeniera Civil Química

**POR:** Vanesa Estefanía Vera Novoa

**FECHA:** 12/12/2018

**PROFESOR GUÍA:** J. Cristian Salgado Herrera

### **MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA PARA ARREGLOS DE CAJAS DE FRUTAS SOMETIDOS A CÁMARAS DE FRÍO**

El estudio de la fluidodinámica ha sido un desafío en el diseño de las cajas de cartón corrugado para el almacenaje de frutas, ya que se debe complementar la resistencia mecánica con un diseño que permita un flujo de aire homogéneo para reducir el tiempo de enfriamiento. Dado esto, Envases Impresos, filial de CMPC Packaging, desea desarrollar una herramienta de diseño que permita estudiar la fenomenología que se presenta en el proceso de enfriamiento de las frutas al interior de las cajas con el fin de mejorarlo.

Con este trabajo se desarrolla un modelo matemático que estudia y describe el comportamiento del perfil de velocidad y temperatura en arreglos de cajas durante el proceso de enfriamiento en el interior de cámaras de frío. Para lo que se utiliza la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), que permite obtener el efecto del campo de velocidades del fluido en la transferencia de calor y masa. Esto se desarrolla con las ecuaciones de Navier-Stokes con el promedio de Reynolds, continuidad y transferencia de calor.

El estudio se centra en la uva Thompson Seedless y en dos diseños de cajas utilizadas por la Exportadora Seedless Valley. Se obtuvieron datos experimentales del proceso de enfriamiento de la uva y con estos se validó el modelo matemático desarrollado mediante la comparación de resultados y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). El menor coeficiente de determinación obtenido fue de 0,95, lo que significa que el modelo es capaz de representar gran cantidad de los fenómenos presentes en el proceso.

Se realizó un análisis de sensibilidad para estudiar el efecto del área de ventilación en el tiempo de enfriamiento, en la resistencia mecánica y en el costo de enfriamiento. Con esto fue posible plantear un nuevo diseño de caja, que permite reducir el tiempo y costo de enfriamiento en 13% y obtiene una resistencia mecánica de 15% sobre el mínimo recomendado.

Finalmente, este proyecto muestra que el modelamiento matemático aplicado permite comprender y mejorar los resultados operacionales en la industria de procesos. Siendo sus resultados extensibles a procesos similares y a el procesamiento de otras frutas y vegetales.

*“Nada te turbe,  
nada te espante,  
todo se pasa,  
Díos no se muda,  
La paciència  
todo lo alcanza.  
Quien a Díos tiene  
nada le falta.  
¡Sólo Díos basta!”*

*Santa Teresa de Jesús, S.XVI*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, por incitarme desde pequeña a estudiar en la universidad, que pese a la distancia que nos separa siempre estuvieron apoyándome. En es especial a mi hermana, la persona por la que nunca dejo de luchar por mis metas. Además, agradecer a Daniel, quien me acompañó durante todo el proceso de la memoria, quien siempre me ayudó a desestresarme para seguir adelante y con quien espero cumplir muchas metas más.

A Cristian Saavedra por darme la oportunidad de realizar la memoria en CMPC y estar siempre pendiente de los avances. Y al profesor Cristian Salgado por apoyarme a cumplir con los objetivos del proyecto y siempre darme ánimo. Gracias por las reuniones-almuerzo, fueron muy apetecidas.

A Daniela, Nico, Fallon y Jorge, quienes me dieron una nueva visión del mundo laboral en Envases Impresos. En especial, quiero agradecer a Daniela por el apoyo en coordinar visitas, tomas de muestras y todo lo que era necesario para cumplir con el proyecto.

A la Exportadora Seedless Valley, en especial a Juan Carlos Avilés, quien me dio la oportunidad de registrar los datos experimentales y quien siempre estuvo pendiente y disponible a responder mis dudas.

A Bruno Defilippi, del INIA, quien me recibió y ayudó sin dudar con todos los datos de la uva que fueron necesarios.

A la residencia, por aceptarme desde el primer día en Santiago pese a que no tenían cupos. Donde conocí a las Groupies, quienes hicieron una estancia agradable y de risas en la residencia, en especial a Caro y Anita que me acompañaron por 6 años y me ayudaron a crecer como persona.

De la universidad, agradecer a Felipe que, pese a que yo no está en la universidad, fuiste quien me acompañó en los primeros años y me hizo aceptar muchas cosas que antes no toleraba. Del DIQBT, agradecer a Vicky, Sergio y Cris, por acompañarme en el último año de la carrera y ayudarme a confiar más en mí. Y por último a los miembros del grupo PMDC, que siempre estuvieron dando consejos para mejorar el trabajo, en especial a Layimar, por acompañarme en los largos días de modelamiento en la oficina.

Y por último, pero más importante, dar gracias a Dios y la Virgen por todo lo que he logrado y las cosas maravillosas que han puesto en mi camino.

# TABLA DE CONTENIDO

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | Introducción.....   | 1  |
| 1.1.  | Antecedentes generales .....  | 1  |
| 1.2.  | Motivación .....  | 3  |
| 1.3.  | Descripción del proyecto.....   | 4  |
| 2.    | Objetivos .....   | 5  |
| 2.1.  | Objetivo general.....   | 5  |
| 2.2.  | Objetivos específicos.....  | 5  |
| 3.    | Marco teorico y Antecedentes .....  | 6  |
| 3.1.  | Enfriamiento de las frutas.....   | 7  |
| 3.2.  | Modelamiento matemático del enfriamiento de frutas en las cajas de almacenamiento ..... | 7  |
| 3.3.  | Resistencia mecánica .....  | 12 |
| 3.4.  | Uva Thompson Seedless.....  | 13 |
| 3.5.  | Exportadora Seedles Valley.....   | 14 |
| 4.    | Metodología .....   | 18 |
| 4.1.  | Revisión bibliográfica .....  | 18 |
| 4.2.  | Elección del software .....   | 19 |
| 4.3.  | Selección de fruta para estudiar .....  | 19 |
| 4.4.  | Selección de un cliente de CMPC que Procesa frutas.....                                 | 20 |
| 4.5.  | Obtención de parámetro y propiedades .....  | 21 |
| 4.6.  | Construcción del modelo matemático .....  | 23 |
| 4.7.  | Simulación del modelo matemático .....  | 30 |
| 4.8.  | Validación del modelo matemático .....  | 33 |
| 4.9.  | Estudio de los resultados obtenidos con el modelo .....                                 | 33 |
| 4.10. | Análisis del sistema sin inversión .....  | 34 |
| 4.11. | Análisis de sensibilidad.....   | 35 |
| 5.    | Resultados y discusion.....   | 36 |
| 5.1.  | Resultados experimentales .....   | 36 |
| 5.2.  | Validacion del modelo .....   | 37 |
| 5.3.  | Estudio de los agujeros de las cajas.....   | 41 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 5.4.     | Resultados gráficos del modelo .....             | 44 |
| 5.5.     | Balance de energía .....                         | 50 |
| 5.6.     | Análisis del sistema sin inversión .....         | 51 |
| 5.7.     | Análisis de sensibilidad.....                    | 53 |
| 6.       | Conclusiones y recomendaciones .....             | 60 |
| 7.       | Bibliografía.....                                | 62 |
| 8.       | Anexos .....                                     | 65 |
| Anexo A. | Desarrollo de la ecuación de continuidad .....   | 65 |
| Anexo B. | Desarrollo de la ecuación de movimiento .....    | 66 |
| Anexo C. | Deducción de ecuación del calor de la fruta..... | 71 |
| Anexo D. | Conductividad térmica.....                       | 73 |
| Anexo E. | Cálculo del número de Reynolds .....             | 75 |
| Anexo F. | Simplificación del número de cajas .....         | 77 |
| Anexo G. | Diferencia de temperatura del aire.....          | 82 |
| Anexo H. | Simplificación de la Geometría de la fruta ..... | 83 |
| Anexo I. | Balance de energía .....                         | 87 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Temperatura recomendada para conservar las frutas [9].   | 3  |
| Tabla 2: Propiedades termofísicas de la uva tipo Thompson Seedless [11].  | 14 |
| Tabla 3: Equipos utilizados para tomar datos experimentales.  | 21 |
| Tabla 4: Datos promedio de las propiedades de la uva.   | 29 |
| Tabla 5: Datos comparativos entre el modelo y datos experimentales del sistema lateral en la Caja 1.  | 38 |
| Tabla 6: Datos comparativos entre el modelo y datos experimentales del sistema cabezal en la Caja 1.  | 38 |
| Tabla 7: Coeficiente de determinación y error cuadrático medio para el modelo matemático de la Caja 1.  | 39 |
| Tabla 8: Datos comparativos entre el modelo y datos experimentales del sistema lateral en la Caja 2.  | 40 |
| Tabla 9: Datos comparativos entre el modelo y datos experimentales del sistema cabezal en la Caja 2.  | 40 |
| Tabla 10: Coeficiente de determinación para el modelo matemático de la Caja 2.  | 41 |
| Tabla 11: Flujo másico y flujo por unidad de area de los agujeros del lateral en Caja 1.  | 42 |
| Tabla 12: Flujo másico y flujo por unidad de area de los agujeros del cabezal en Caja 1.  | 42 |
| Tabla 13: Flujo másico y flujo por unidad de area de los agujeros del lateral en Caja 2.  | 43 |
| Tabla 14: Flujo másico y flujo por unidad de area de los agujeros del cabezal en Caja 2.  | 44 |
| Tabla 15: Calor transferido entre aire y fruta de los datos experimentales y calor entregado por la simulación del modelo, para ambas cajas.                    | 50 |
| Tabla 16: Temperatura del flujo de aire luego del intercambio de calor, en ambas cajas.   | 51 |
| Tabla 17: Tiempo comparativo de los modelos con y sin inversión en Caja 1 en alcanzar $-0,972[^\circ\text{C}]$ , temperatura final del proceso de enfriamiento. | 52 |
| Tabla 18: Tiempo comparativo de los modelos con y sin inversión en Caja 2 en alcanzar $-0,917^\circ\text{C}$ , temperatura final del proceso de enfriamiento.   | 52 |
| Tabla 19: Resultados del analisis de sensibilidad para la Caja 1.   | 54 |
| Tabla 20: Resultados de analisis para el diseño propuesto de la Caja 1.   | 56 |
| Tabla 21: Resultados del analisis de sensibilidad para la Caja 2.   | 57 |
| Tabla 22: Resultados de analisis para el diseño propuesto de la Caja 2.   | 59 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 23: Datos experimentales del $CO_2$ emitido para la uva a distintas temperaturas .....  | 71 |
| Tabla 24: Conductividad térmica de los materiales [11], [29]. .....   | 74 |
| Tabla 25: Conductividad térmica modificada de los materiales [11], [29]. .  | 74 |
| Tabla 26: Conductividad termica del a aire a distintas temperaturas. ....   | 74 |
| Tabla 27: Propiedades del a aire a distintas temperaturas. ....   | 75 |
| Tabla 28: Propiedades del aire ajustadas. ....  | 76 |
| Tabla 29: Valor de Reynolds a distintas velocidades. ....   | 76 |
| Tabla 30: Distribución del flujo másico al aumentar número de filas en el sistema lateral de la Caja 1.....   | 77 |
| Tabla 31: Distribución del flujo másico al aumentar número de filas en el sistema cabezal de la Caja 1. ....  | 77 |
| Tabla 32: Distribución del flujo másico al aumentar número cajas en altura en el sistema lateral de la Caja 1.....  | 78 |
| Tabla 33: Distribución del flujo másico al aumentar número de cajas en altura en el sistema cabezal de la Caja 1. ....  | 79 |
| Tabla 34: Presión y velocidad para el sistema lateral de 4 cajas en altura..  | 79 |
| Tabla 35: Distribución del flujo másico al aumentar número de filas en el sistema lateral de la Caja 2.....   | 80 |
| Tabla 36: Distribución del flujo másico al aumentar número de filas en el sistema cabezal de la Caja 2. ....  | 80 |
| Tabla 37: Distribución del flujo másico al aumentar número de cajas en altura en el sistema lateral de la Caja 2.....   | 81 |
| Tabla 38: Distribución del flujo másico al aumentar número de cajas en altura en el sistema cabezal de la Caja 2. ....  | 81 |
| Tabla 39: Presión y velocidad para el sistema lateral de 4 cajas en altura..  | 82 |
| Tabla 40: Coeficiente de determinación y error cuadrático medio para el modelo matemático con 5 placas.....   | 84 |
| Tabla 41: Coeficiente de determinación y error cuadrático medio para el modelo matemático con 1 bloque. ....  | 85 |
| Tabla 42: Coeficiente de determinación y error cuadrático medio para el modelo matemático con 5 bloques.....  | 85 |
| Tabla 43: Coeficiente de determinación y error cuadrático medio para el modelo matemático con 5 bloques en sistema lateral y 3 bloques en sistema cabezal. .... | 86 |
| Tabla 44: Calor transferido entre aire y fruta de los datos experimentales y calor entregado por la simulación del modelo. ....                                 | 88 |
| Tabla 45: Diferencia de temperatura del flujo de aire. ....   | 88 |
| Tabla 46: Temperatura del flujo de aire luego del intercambio de calor. ....  | 89 |



# ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Partes del cartón corrugado [4].   | 2  |
| Figura 2: En la figura de la izquierda se tiene un cartón simple. A la derecha se tiene un cartón doble [6].   | 2  |
| Figura 3: A la izquierda se tiene una caja con orificios [7]. A la derecha se tiene una caja sin orificios [8].  | 2  |
| Figura 4: Geometría del sistema, donde se resalta en azul los bordes correspondientes a $v_{in}$ , $T_{in}$ , $P_{out}$ y la simetría.   | 11 |
| Figura 5: Geometría del sistema, donde se resalta en azul los bordes correspondientes a $b_v$ y $Q_{ext}$ , que corresponde a todos los bordes sin incluir los de la Figura 4. | 12 |
| Figura 6: Ecuación de calor de la uva tipo Thompson Seedless.  | 13 |
| Figura 7: Cajas utilizadas por la Exportadora Seedless Valley, las que se seleccionan para el estudio. A la izquierda se tiene la Caja 1 y la derecha la Caja 2 [7].           | 15 |
| Figura 8: Túnel de enfriamiento con las dimensiones correspondientes a la cámara y pulmón.   | 15 |
| Figura 9: Túnel de enfriamiento de la Exportadora Seedless Valley, se observa la carpa a la altura de los pallets y se enumera cada pallet.                                    | 16 |
| Figura 10: Base de un pallet, base 5.  | 16 |
| Figura 11: Primera etapa del proceso de enfriamiento.  | 17 |
| Figura 12: Segunda etapa del proceso de enfriamiento.  | 17 |
| Figura 13: Diagrama de la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto.   | 18 |
| Figura 14: Posición de las termocuplas en el pallet.   | 22 |
| Figura 15: Cajas simplificadas que se utilizan en el modelo. A la izquierda se observa la Caja 1 y a la derecha la Caja 2.   | 24 |
| Figura 16: Número de cajas utilizadas en el modelo.  | 25 |
| Figura 17: Sistema lateral simplificado. Se indican algunas condiciones de borde y las flechas indican la dirección del fluido.  | 26 |
| Figura 18: Sistema cabezal simplificado. Se indican algunas condiciones de borde y las flechas indican la dirección del fluido.  | 26 |
| Figura 19: Normalización del flujo másico a distintas velocidades.   | 27 |
| Figura 20: Áreas de las que se obtiene el flujo másico. A la izquierda está la cámara de frío y a la derecha las cajas.  | 28 |
| Figura 21: Análisis de estado estacionario en distintas secciones del sistema con $v_{in}=0,01[m\cdot s^{-1}]$ .   | 28 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 22: Representación geométrica de la fruta. A la izquierda se observa la fruta para el sistema lateral y a la derecha la fruta para el sistema cabezal. .... | 30 |
| Figura 23: En azul se marca el área donde se realizan las mediciones para el sistema lateral. ....   | 31 |
| Figura 24: En azul se marca el área donde se realizan las mediciones para el sistema cabezal.....  | 32 |
| Figura 25: Selección de los agujeros para el análisis. ....  | 33 |
| Figura 26: Perfil de temperatura de la Caja 1. ....  | 36 |
| Figura 27: Perfil de temperatura de la Caja 2. ....  | 37 |
| Figura 28: Validación del modelo para la Caja 1. ....  | 38 |
| Figura 29: Validación del modelo para la Caja 2. ....  | 40 |
| Figura 30: Análsis de agujeros en Caja 1. A la izquierda se enumeran los agujeros para el el sistema lateral y a la derecha para el sistema cabezal..              | 41 |
| Figura 31: Análsis de agujeros en Caja 2. A la izquierda se enumeran los agujeros para el el sistema lateral y a la derecha para el sistema cabezal..              | 43 |
| Figura 32: Perfil de velocidad del sistema lateral en la Caja 1.....   | 44 |
| Figura 33: Perfil de velocidad de la caja central en el sistema lateral en la Caja 1.....  | 45 |
| Figura 34: Perfil de velocidad de la caja central en el sistema cabezal en la Caja 1.....  | 45 |
| Figura 35: Perfil de temperatura a $t=1[h]$ del sistema lateral de la Caja 1.  | 46 |
| Figura 36: Perfil de temperatura a $t=1[h]$ de la caja central del sistema lateral de la Caja 1. ....  | 47 |
| Figura 37: Perfil de velocidad del sistema lateral en la Caja 2.....   | 48 |
| Figura 38: Perfil de velocidad en de la caja central en el sistema lateral en la Caja 2.....   | 48 |
| Figura 39: Perfil de velocidad en de la caja central en el sistema cabezal en la Caja 2. ....  | 49 |
| Figura 40: Perfil de temperatura en $[^{\circ}C]$ a $t=1[h]$ del sistema lateral de la Caja 2.....   | 49 |
| Figura 41: Perfil de temperatura en $[^{\circ}C]$ a $t=1[h]$ de la caja central del sistema lateral de la Caja 2.....  | 50 |
| Figura 42: Comparación del modelo con inversion (c.i.) y sin inversion (s.i.) en Caja 1. ....  | 51 |
| Figura 43: Comparación del modelo con inversion (c.i.) y sin inversion (s.i.) en Caja 2. ....  | 52 |
| Figura 44: Análisis de sensibilidad en Caja 1. -50% representa a la caja con menos área y +50% el diseño con más área.....   | 53 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 45: Comparación de curvas del diseño original y propuesto de la Caja 1. ....   | 55 |
| Figura 46: Análisis de sensibilidad en Caja 2. -40% representa a la caja con menos área y +40% el diseño con más área. ....   | 57 |
| Figura 47: Comparación de curvas del diseño original y propuesto de la Caja 2. ....   | 58 |
| Figura 48: Ajuste de parámetros del CO <sub>2</sub> emitido por la uva. ....  | 72 |
| Figura 49: Representación gráfica de la ecuación de calor obtenida. ....  | 73 |
| Figura 50: Variación de la temperatura del aire en el tiempo. ....  | 82 |
| Figura 51: Configuración de la uva en 5 placas. ....  | 83 |
| Figura 52: Comparación entre los datos experimentales de temperatura con los datos del modelo para una configuración de la fruta en 5 placas. ....  | 83 |
| Figura 53: Configuración de la uva en 1 bloque. ....  | 84 |
| Figura 54: Comparación entre los datos experimentales de temperatura con los datos del modelo para una configuración de la fruta en 1 bloque. ....  | 84 |
| Figura 55: Configuración de la uva en 5 bloques. ....   | 85 |
| Figura 56: Comparación entre los datos experimentales de temperatura con los datos del modelo para una configuración de la fruta en 5 bloques. ....   | 86 |
| Figura 57: Configuración de la uva en 3 bloques. ....   | 86 |
| Figura 58: Comparación entre los datos experimentales de temperatura con los datos del modelo para una configuración de la fruta en 5 bloques para el sistema lateral y 3 bloques para el sistema cabezal. .... | 87 |

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. ANTECEDENTES GENERALES**

### **1.1.1. CMPC**

CMPC es una compañía fundada en 1920, la que se dedica a la fabricación de productos de madera, celulosa, papeles y productos tissue [1].

Se encuentra en distintos países de Latinoamérica y cuenta con más de 17.000 empleados en Chile, Colombia, Brasil, México, Argentina, Perú y Uruguay. Dada la presencia en varios países y los distintos productos que desarrolla, la empresa divide las operaciones en tres áreas principales de negocios para mantener un desempeño económico que permite el crecimiento e innovación. De este modo se divide en CMPC Celulosa, CMPC Packaging y CMPC Tissue [1], [2].

CMPC Packaging es el negocio encargado de la fabricación de los productos de papel, donde se desarrollan embalajes con materiales reciclables y reutilizables, pues son fabricados con fibra natural, lo que permite desarrollar un material resistente, flexible, liviano y de alta reciclabilidad. Este negocio lo forman diferentes filiales: CMPC Cartulinas, Papeles Cordillera, Envases Impresos, Forsac, Chimolsa, Edipac y Sorepa [2].

Envases Impresos se dedica a la producción y comercialización de embalajes de cartón corrugado. Se caracteriza por desarrollar cartón de alto valor agregado, lo que cuenta con el respaldo del grupo empresarial al que pertenece, lo que le otorga una gran solvencia y estabilidad financiera. Además, busca de manera continua mejorar su proceso para obtener mayor eficiencia y obtener un producto de la más alta calidad, y de este modo aportar el máximo valor a sus clientes. Rasgo que se ve favorecido al producir el papel en las máquinas más modernas del país [3].

### **1.1.2. Embalajes de cartón corrugado**

El cartón corrugado es el material más utilizado para la fabricación de envases y embalajes, el cual se forma a partir de un nervio central de papel ondulado (papel onda), reforzado externamente por dos capas de papel (liner), las cuales se pegan con adhesivo que se agrega en la cresta y valle de las ondas, como se muestra en la Figura 1 [4].

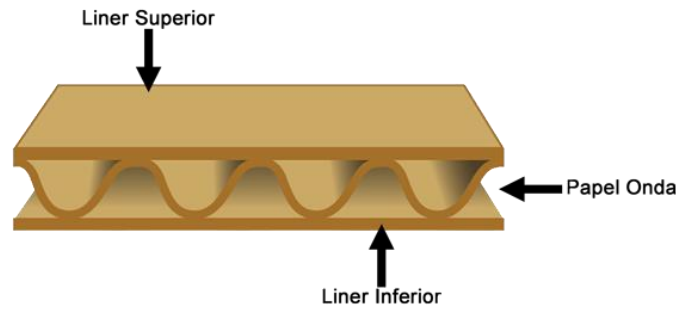


Figura 1: Partes del cartón corrugado [4].

Este material se caracteriza por ser liviano y reciclable, cuya resistencia se basa en el conjunto de tres o más láminas de papel, lo que permite formar un cartón simple o doble según las necesidades de resistencia a cubrir [4]. El cartón simple se compone de un papel onda cubierto de dos liner, mientras que el cartón doble se compone de 5 capas de papel en el siguiente orden: liner, papel onda, liner, papel onda y liner. El cartón doble es más resistente que el cartón simple debido a que se adiciona la resistencia de 2 papeles. En la Figura 2 se puede observar gráficamente un cartón simple y doble [5].



Figura 2: En la figura de la izquierda se tiene un cartón simple. A la derecha se tiene un cartón doble [6].

El diseño de la caja varía de acuerdo al producto que va a contener, pero se puede separar en 2 grupos. El primero es para el embalaje de alimentos perecibles, como las frutas, por lo que, son cajas que poseen orificios para permitir el ingreso de aire frío para conservar la calidad. El segundo se utiliza para alimentos no perecibles y útiles de aseo, por lo que son cajas sin orificios. En la Figura 3 se observa un ejemplo de cada caja.



Figura 3: A la izquierda se tiene una caja con orificios [7]. A la derecha se tiene una caja sin orificios [8].

### 1.1.3. Cajas para frutas

Las cajas para el almacenamiento de frutas deben poseer área de ventilación para poder conservar la fruta con la más alta calidad hasta que sea recibida por el consumidor final.

El área de ventilación corresponde a los agujeros que poseen las cajas, los cuales permiten el ingreso de aire frío, siendo la mayoría de las veces un enfriamiento por aire forzado (FAC, *forced air cooling* en inglés), que permite el descenso de la temperatura en las frutas hasta una temperatura que le permite conservar la calidad durante el almacenamiento y traslado. Algunos ejemplos de temperaturas recomendadas se presentan en la Tabla 1 [9].

Tabla 1: Temperatura recomendada para conservar las frutas [9].

| Fruta     | Temperatura [°C] |
|-----------|------------------|
| Manzanas  | -1 – 4,4         |
| Arándanos | 0,6 – 2          |
| Duraznos  | 0                |
| Fresas    | 0                |
| Uvas      | 0 – 2            |

La posición, tamaño y geometría de los orificios, además de la distribución del producto al interior de las cajas, son algunas de las propiedades que determinan la distribución del flujo de aire en el interior de la caja, por lo que es importante considerar estas variables en el diseño de las cajas para lograr que el flujo de aire tenga una distribución lo más homogénea posible, y de este modo las frutas alcancen la temperatura deseada [10].

## 1.2. MOTIVACIÓN

Actualmente, los diseños de cajas de frutas que desarrolla Envases Impresos están basados en características que solicita el cliente (productor de fruta), o son diseños antiguos que se siguen produciendo. En ambos casos, no se tiene un fundamento del uso de tal diseño [7].

Un mal diseño de las cajas provoca que la distribución de aire no sea homogénea, por lo que no se puede alcanzar la temperatura deseada en la fruta, causando una pérdida de 30 a 40% de las frutas almacenadas [11].

Dado lo anterior, es que Envases Impresos desea desarrollar una herramienta que permita estudiar y modelar el flujo de aire y temperatura durante el proceso de enfriamiento que utiliza cajas fabricadas por ellos. Esto con el fin de entender el proceso que efectúan sus clientes, estudiar los actuales diseños de cajas, y ofrecer mejores diseños al mercado.

### **1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

Se desarrolla un modelo matemático que consiste en un set de ecuaciones diferenciales parciales que describen los fenómenos de transferencia de calor y cantidad de movimiento en el dominio definido por la cámara de frío, cajas y el producto dispuesto al interior de las cajas. El cual se construye y simula en el software *COMSOL Multiphysics*, donde se ingresan parámetros obtenidos por la medición de datos en el sistema observado.

Este proyecto está parcialmente financiado por Envases Impresos y se lleva a cabo en distintas dependencias:

- Envases Impresos, ubicada en Camino Lo Echevers 221, Quilicura, donde se obtiene información sobre las especificaciones técnicas de las cajas.
- Laboratorio de Modelación de Procesos y Computación Distribuida (PMDC Lab) ubicado en Beauchef 851, Santiago. En el cual se desarrolla y simula el modelo matemático.
- Exportadora Seedless Valley, ubicada en Camino El Cerrillo, Buin. Donde se conoce el sistema de enfriamiento y se realiza la toma de datos experimentales.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

- Estudiar y describir el comportamiento del perfil de velocidad y temperatura en arreglos de cajas rectangulares para el almacenamiento de frutas utilizando modelación matemática.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar experimentalmente los perfiles de velocidad y temperatura en los arreglos de cajas.
- Plantear y validar un modelo matemático que describa los perfiles de velocidad y temperatura en los arreglos de cajas rectangulares con distintos porcentajes de abertura.
- Investigar el efecto del área de ventilación en el comportamiento de los perfiles de velocidad y temperatura para proponer una mejora en el diseño de las cajas.



### **3. MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES**

Se han realizado diferentes investigaciones sobre el diseño que debe poseer una caja de cartón corrugado para el almacenamiento de frutas. Donde se estudia el comportamiento del flujo de aire al interior de las cajas frente a variaciones en los orificios, como: tamaño, distribución en las caras y forma geométrica, de lo que se registra [10], [12]–[20]:

- Diseños de cajas de las mismas dimensiones y mismo porcentaje de área de ventilación, pero con distinta distribución, provoca cambios en el tiempo de enfriamiento de hasta 23%.
- Aumentar el área de ventilación favorece el enfriamiento de la fruta, en relación al tiempo, pero existe un punto en que aumentar el área no provoca un cambio significativo en el tiempo. Se describe un aumento de área de 1% a 7%, lo que logra reducir el tiempo en 85%, pero al aumentar de 7% a 100%, la reducción del tiempo es 10%.
- Mantener el área de ventilación, pero variando el número y forma de los agujeros, registra una variación de hasta 87% en el tiempo de enfriamiento, por lo que es una variable importante a considerar.

En la literatura disponible, se ha analizado el efecto que tiene modificar el área de ventilación en la resistencia mecánica, ya que esto es un aspecto importante a considerar en el mercado, pues las cajas se ordenan en pallet, por lo que deben ser capaces de soportar el esfuerzo durante todo el tiempo de almacenamiento, por lo que se entregan algunas recomendaciones en la sección 3.3 para reducir los posibles efectos en la resistencia, como [19], [20]:

- Aumentar el área de ventilación de 2% a 7% provoca una reducción de 12% en la resistencia mecánica.
- Aumentar la altura de los agujeros de 52[mm] a 152[mm] se reduce la resistencia en 18%.
- El mantener el porcentaje del área de ventilación, pero modificar el número de agujeros de 1 a 4, reduce en 8% la resistencia.

Dado lo anterior, es que complementar la resistencia mecánica con un diseño que permite reducir el tiempo de enfriamiento, sigue siendo un desafío en el área de estudio, ya que encontrar un óptimo para cada proceso de enfriamiento no ha sido posible [10], [12]–[20].

### **3.1. ENFRIAMIENTO DE LAS FRUTAS**

Existen diferentes técnicas para el enfriamiento de las frutas: enfriamiento hidráulico, enfriamiento al vacío, formación de hielo y el enfriamiento por aire forzado. El enfriamiento por aire forzado es el método más utilizado para remover calor, ya que se puede adaptar a una mayor variedad de productos [10], [12]–[19]. De este modo se acondiciona el ambiente para aumentar la duración de las frutas al crear un gradiente de presión a través de los contenedores, lo que genera una fuerza motriz que extrae el aire del entorno a través de las aberturas de la caja. Éste enfriamiento permite reducir la actividad respiratoria y enzimática de la fruta, retrasa el crecimiento microbiano, reduce la pérdida de humedad y se retrasa la producción de etileno, que es lo que provoca la pudrición y deshidratación [10], [12]–[19].

Pese a que el enfriamiento por aire forzado es el método más versátil, provoca una heterogeneidad de enfriamiento durante la refrigeración, donde los productos ubicados en las paredes no pueden ser enfriados hasta la temperatura deseada, o las frutas expuestas a mayores velocidades del aire se enfrían bajo la temperatura de congelamiento [10], [12]–[19].

Dado lo anterior, es que es necesario diseñar cajas que puedan proporcionar una distribución del flujo de aire uniforme, por lo que deben poseer aberturas que permitan cumplir con esto, pero siempre evaluando la resistencia mecánica para evitar que los resultados sean invalidados por afectar esta característica [10], [12]–[19].

Una forma de estudiar la influencia de los diferentes diseños de cajas, es por medio de experimentos, pero dado el alto costo y tiempo que necesitan al tener que procesar estas cajas, es que se han desarrollado modelos matemáticos capaces de predecir el flujo de aire, calor y transferencia de masa al interior de las cajas [19].

### **3.2. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL ENFRIAMIENTO DE FRUTAS EN LAS CAJAS DE ALMACENAMIENTO**

El modelo matemático del enfriamiento por aire forzado, se puede desarrollar con dos métodos, el enfoque de medio poroso (monofásico o bifásico) y la simulación numérica directa (DNS, *direct numerical simulation* en inglés) [19].

El enfoque de medio poroso consiste en una matriz sólida impregnada por una red interconectada de poros llenos de un fluido, donde se modelan los

fenómenos de transportes (fluidos, calor y masa) al interior de estos poros, lo que permite su aplicación a algunas áreas de la ciencia como, biomecánica, geociencias, biología y ciencias de los materiales. Este método no logra simular todos los fenómenos que ocurren en un sistema, ya que se simula todo como una sustancia continua sin una geometría definida, donde las propiedades corresponden al promedio de las propiedades de cada elemento representado, por lo que no se puede reconocer el comportamiento de cada elemento por separado. Además, al modelar la transferencia de calor, se crean modelos complejos que necesitan de varios experimentos para determinar sus parámetros como, los tensores de difusividad y el coeficiente de transferencia de calor por convección interfacial [19].

Dado lo anterior, el uso del enfoque poroso para el estudio del enfriamiento de frutas no es recomendable, ya que no es posible identificar el comportamiento del aire y la fruta por separado, lo que además provoca que se ignore el gradiente de producción interno, que es el metabolismo de la fruta [19]. Así, se ha desarrollado la simulación numérica directa, la que realiza una solución completa basándose en Navier-Stokes y ecuaciones de continuidad, lo que permite obtener el comportamiento local del efecto del flujo de fluido en la transferencia de calor y masa. La técnica más versátil que existe para DNS es la dinámica de fluidos computacional (CFD, *computational fluid dynamics* en inglés), ya que permite analizar los fenómenos de transferencia en situaciones complejas, además de ser adaptable a los diferentes diseños de cajas en que se almacenan las frutas [19].

El modelo CFD desarrolla un dominio al interior de la caja con 3 subdominios, los que corresponden al flujo de aire, producto (fruta) y porosidad efectiva. Donde la porosidad efectiva se refiere al espacio no ocupado por la fruta (aire), lo que se obtiene a partir de la resta del volumen de la caja y el volumen total de las frutas [10], [12]–[16].

Para el desarrollo del modelo se utilizan los siguientes supuestos [10], [12]–[16]:

- Propiedades físicas del aire y fruta se mantienen constante dentro del rango de temperatura que se aplica. Siendo la densidad, conductividad térmica y capacidad caloríficas constantes.
- Evaporación y condensación de humedad se considera insignificantes.
- El calor, producto de la actividad de la fruta, se calcula como una función de la temperatura. Considerando el  $CO_2$  que esta emite y

despreciando los gases que están presentes al interior del túnel de enfriamiento, como la concentración de  $CO_2$  y  $O_2$ .

- La temperatura de las paredes del refrigerador se estima como un promedio del aire exterior.
- Las frutas no se modelan con su geometría exacta, se aproxima a una con menos complejidad de solución y con las propiedades equivalentes de la fruta.
- No se considera la flotabilidad de la fruta por efecto del flujo de aire.
- La radiación es despreciable en la transferencia de calor.
- El aire se considera como un fluido incompresible al mantener la densidad constante.

De este modo, se establece un set de ecuaciones para el flujo de aire, que corresponde a Navier-Stokes con el promedio de Reynolds (RANS, *Reynolds averaged Navier-Stokes* en inglés) [10], [12]–[16]. Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el comportamiento de un fluido, las cuales no se pueden modelar de manera exacta cuando la escala de turbulencia es alta, pues se necesita una capacidad computacional de almacenamiento que no está disponible actualmente, por lo que se realiza un promediado de las ecuaciones de Navier-Stokes, que describe el promedio de la velocidad, presión y temperatura, donde las fluctuaciones turbulentas se introducen con los tensores de Reynolds a las ecuaciones. De este modo se reduce el costo computacional al realizar la simulación [21].

La primera ecuación corresponde a la ecuación de continuidad, donde se observa un término que representa la variación de materia en el sistema, el cual, al estar igualado a 0, indica conservación de la masa, ya que se asume la densidad constante en el sistema (ver detalles en Anexo A) [22].

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

La segunda, es la ecuación de movimiento que hace referencia a la conservación del momento que debe existir en el sistema. De izquierda a derecha, se tiene el término transiente de la cantidad de movimiento. Luego, la cantidad de movimiento convectivo, que es la fuerza que ejerce el fluido sobre un objeto en sus distintos puntos. Posteriormente, se describe la cantidad de movimiento molecular, que es la fuerza que ejerce un fluido sobre otro fluido que está a distinta velocidad, lo que se representa con un término de los esfuerzos viscosos que actúan en los distintitos puntos del fluido, y un término de la presión que actúa de manera normal a la superficie del fluido. Y por último, se observa una fuerza externa, la que se debe a la

acción de la aceleración de gravedad [22]. Ver el detalle de la ecuación en el Anexo B.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho V = -\nabla \cdot \rho V \otimes V + \nabla \cdot \mu_{eff} \left( (\nabla V + (\nabla V)^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot V) \delta \right) - \nabla P + \rho g \quad (2)$$

Donde  $V$  es vector velocidad del aire [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $t$  es tiempo [ $\text{s}$ ],  $\rho$  es la densidad del aire [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  $g$  es la aceleración de gravedad [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ],  $P$  es la presión [ $\text{Pa}$ ] y  $\mu_{eff}$  es la viscosidad efectiva [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ], que corresponde a la suma de la viscosidad dinámica laminar y viscosidad turbulenta, donde esta última depende de la turbulencia presente en el sistema y no corresponde a una propiedad propia del fluido, por lo que al aumentar la turbulencia, aumenta la viscosidad efectiva [21], [23].

El símbolo  $\partial$  representa la derivada parcial,  $\nabla$  es el gradiente de un vector,  $\nabla \cdot$  es la divergencia de un vector,  $\otimes$  es el producto tensorial que multiplica el primer factor por el segundo factor traspuesto, el superíndice  $T$  indica que es el vector traspuesto y  $\delta$  que es el delta de Kronecker, representa una matriz identidad [21].

Luego se tienen las ecuaciones de transferencia de calor del aire y la fruta, respectivamente. En las ecuaciones se tiene un término transiente de energía en el volumen de control a la izquierda, y a la derecha se tiene el término que corresponde a la transferencia de calor por conducción. Además, en la ecuación de calor, se adiciona un término que representa a una generación de energía que ocurre en el sistema [12], [14], [18], [19], [22].

$$(\rho_a C_{pa}) \left( \frac{\partial T_a}{\partial t} + V \cdot \nabla T_a \right) = \nabla \cdot (k_a \nabla T_a) \quad (3)$$

$$\rho_s C_{ps} \left( \frac{\partial T_s}{\partial t} \right) = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + Q_s \quad (4)$$

Los subíndices  $a$  y  $s$  representan al aire y sólido (fruta), respectivamente. Así se tiene  $\rho C_p$  como la capacidad calorífica por unidad de volumen [ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{°C}^{-1}$ ],  $k$  es la conductividad térmica [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ] y  $T$  es la temperatura [ $\text{°C}$ ].

$Q_s$  es la generación de calor por unidad de volumen de la fruta debido a la respiración, lo que se obtiene en base a datos experimentales en la fruta de estudio, como se explica posteriormente en la sección 3.4 y en el Anexo C.

Para el set de ecuaciones que modela el aire y transferencia de calor, se tienen las siguientes condiciones iniciales, las que dependen de las condiciones de cada fruta y productor:

- $v_0$ : velocidad inicial en el sistema.
- $P_0$ : Presión inicial en el sistema.
- $T_0$ : Temperatura inicial del sistema.

Y como condiciones de borde:

- $v_{in}$ : Velocidad a la que ingresa el flujo de aire.
- $v_b=0[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ : Velocidad del aire en las paredes del sistema y fruta.
- $P_{out}$ : Presión de salida del flujo de aire.
- $T_{in}$ : Temperatura con que ingresa el flujo de aire.
- $Q_{ext}=0[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ : Aislamiento térmico.
- Simetría: Indica que existe simetría en geometría y fenomenología respecto al plano indicado.

En la Figura 4 y Figura 5 se observan las condiciones de bordes en la geometría correspondiente.

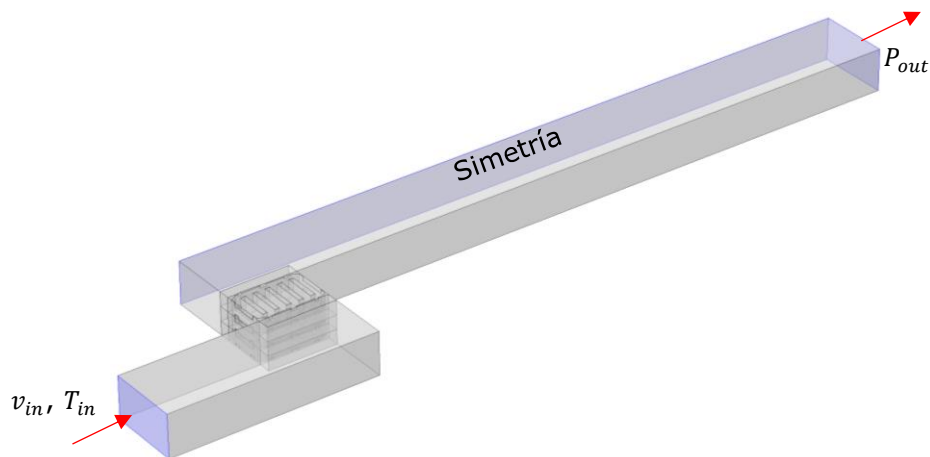


Figura 4: Geometría del sistema, donde se resalta en azul los bordes correspondientes a  $v_{in}$ ,  $T_{in}$ ,  $P_{out}$  y la simetría.

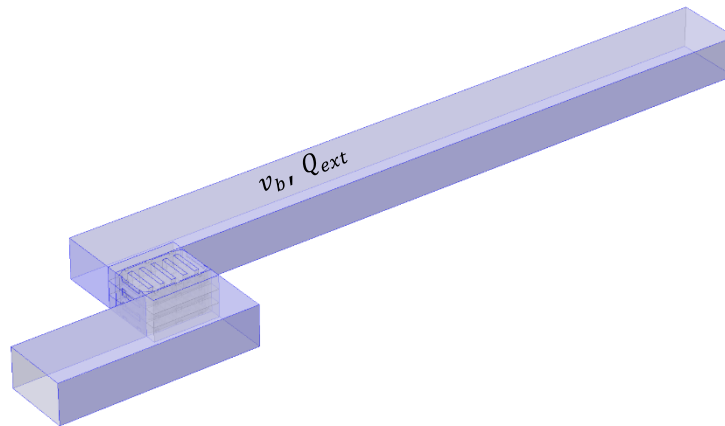


Figura 5: Geometría del sistema, donde se resalta en azul los bordes correspondientes a  $b_v$  y  $Q_{ext}$ , que corresponde a todos los bordes sin incluir los de la Figura 4.

### 3.3. RESISTENCIA MECÁNICA

La resistencia mecánica es importante en el diseño de las cajas, pues la configuración de los agujeros puede reducir la resistencia de 20% a 50%, lo que no es favorable para el proceso de enfriamiento, ya que la caja debe ser capaz de soportar la masa de uno o dos pallets hasta que la fruta llegue a su destino [20].

En la literatura, se establecen algunos criterios que se deben considerar al momento de diseñar una caja para mantener una resistencia mecánica adecuada [20]:

- El largo de los orificios no debe superar el 25% de la altura de la caja.
- El área de ventilación debe comprender de un 2% a un 7% de la superficie de la caja.
- La relación ancho/largo del agujero debe estar entre 0,29 y 0,4.
- La distancia entre el orificio y las aristas de las cajas debe ser de 60 a 70[mm].

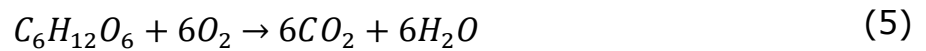
Para verificar la resistencia mecánica se realizan pruebas de compresión vertical (BCT, *box compression test* en inglés), un método que se reconoce como el mejor para evaluar y comparar la capacidad de soporte de carga en las cajas de cartón corrugado [24].

La prueba consiste en someter a esfuerzo vertical una caja armada y registrar la fuerza y deformación de manera continua hasta que se produce un fallo en la compresión, reconociendo la fuerza en ese punto como la máxima compresión que soporta la caja [24].

### 3.4. UVA THOMPSON SEEDLESS

La uva es una fruta importante a nivel nacional, debido a que en el mercado de frutas de exportación, se encuentra en el tercer lugar con un 9,12%, superada por la manzana (34,01%) y palta (9,72%), de acuerdo los datos registrados por el Servicio Ganadero y Agrícola (SAG) en el año 2017, siendo la especie Thompson Seedless la más exportada [25].

Esta fruta, al igual que todas las frutas, generan calor debido al proceso de respiración. La respiración es el proceso bioquímico por el cual las frutas y verduras convierten los azúcares (principalmente glucosa,  $C_6H_{12}O_6$ ) y el oxígeno ( $O_2$ ) en dióxido de carbono ( $CO_2$ ) [26].



La velocidad de la reacción química depende de la especie y la temperatura de la fruta. Es decir, la tasa de producción de dióxido de carbono y la generación de calor están correlacionadas con la temperatura, pues al aumentar la temperatura de la fruta, la generación de  $CO_2$  aumenta. [26].

La ecuación de calor de un producto se puede obtener con datos experimentales de la emisión de  $CO_2$  a distintas temperaturas, así, se tiene la ecuación de calor para la uva tipo Thompson Seedless ( $Q_s$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ ]) que se produce en Chile, de acuerdo a lo presentado en el Anexo C [11].

$$Q_s \begin{cases} 10,653 \cdot (0,076T^2 - 0,309T + 7,235) & \forall T \geq 0^\circ C \\ 75,906 & \forall T < 0^\circ C \end{cases} \quad (6)$$

La cual queda graficado como lo muestra la Figura 6.

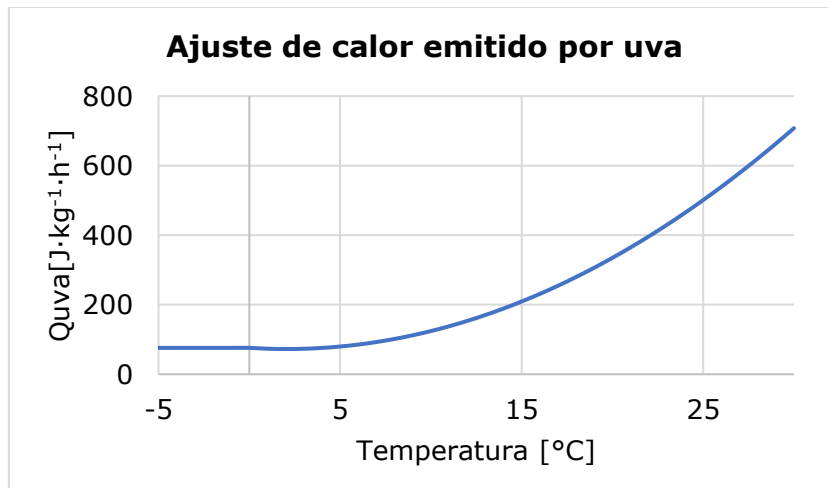


Figura 6: Ecuación de calor de la uva tipo Thompson Seedless.



Además, se tienen las propiedades termofísicas que caracterizan la uva tipo Thomson Seedless, las que corresponden a las mostradas en la Tabla 2 [11].

Tabla 2: Propiedades termofísicas de la uva tipo Thompson Seedless [11].

| Propiedades  | Valor    |
|--|----------|
| Densidad [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]                               | 1.314,93 |
| Capacidad calorífica [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] | 3.810    |
| Conductividad térmica [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] | 0,6839   |
| Temperatura de congelamiento [ $^{\circ}\text{C}$ ]                      | -2       |

### 3.5. EXPORTADORA SEEDLES VALLEY

La Exportadora Seedless Valley tiene la misión de exportar uva de mesa desde Chile al mundo, quienes cuentan con un equipo técnico y comercial de alta experiencia y profesionalismo. Su sistema de enfriamiento de postcosecha y embalaje le permite llevar sus productos a mayoristas internacionales y a las mejores cadenas de supermercado del mundo [27].

El sistema de enfriamiento de la exportadora se describe a continuación, donde se detallan las cajas utilizadas para el proyecto y el funcionamiento de los túneles de enfriamiento [27].

#### 3.5.1. Cajas

La exportadora usa distintos diseños de cajas, lo que depende del mercado al que debe abastecer con fruta, por lo que pueden ser de distintas dimensiones, y utilizar distinto tipo de embalaje, como bolsas plásticas o *clamshell* [28].

La caja que más utiliza, *Caja 1* en adelante, es de dimensiones 600[mm]x400[mm]x123[mm], como se puede observar en la Figura 7 [7]. De este diseño enfrían aproximadamente  $1,12\cdot 10^6$  al año, la cual contiene 8,2[kg] de uva cada una, donde la fruta se envuelve en una bolsa de polietileno de alta densidad con 0,09% de orificios [29].

Otra caja de interés, *Caja 2* en adelante, es de dimensiones 600[mm]x400[mm]x95[mm], que se aprecia en la Figura 7 [7]. Esta caja contiene 5,5[kg] de uva distribuidas en 10 *clamshell* con 0,55[kg] cada uno, de la cual enfrían aproximadamente  $3,36\cdot 10^5$  cajas al año [29].

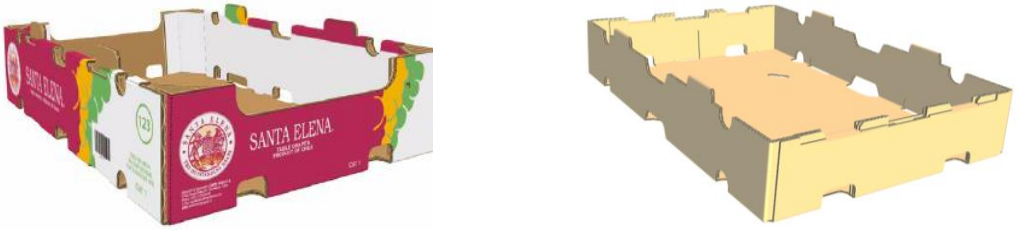


Figura 7: Cajas utilizadas por la Exportadora Seedless Valley, las que se seleccionan para el estudio. A la izquierda se tiene la Caja 1 y la derecha la Caja 2 [7].

### 3.5.2. Configuración túnel

Cada empresa dedicada al enfriamiento de fruta utiliza una configuración que ellos consideran apropiada, no existe algo determinado para el proceso [28].

La Exportadora Seedless Valley, posee túneles con dimensiones 4,5[m]x8,15[m]x5,9[m] (ancho, largo, alto), donde la cámara tiene un largo de 6,95[m] y el pulmón 1,2[m] (Figura 8). En el pulmón se encuentra el sistema de intercambio de calor para el aire y el ventilador que eyecta aire a una altura superior que el alto de los pallets, mientras que en la cámara se colocan las cajas en 2 filas de 5 pallets, formando 3 pasillos en la cámara, 2 externos y 1 interno. Además, se instala una carpa a la altura del pallet (Figura 9) para que el aire eyectado por el ventilador ingrese por el pallet 1, como se muestra posteriormente en la Figura 11 y Figura 12 [28].

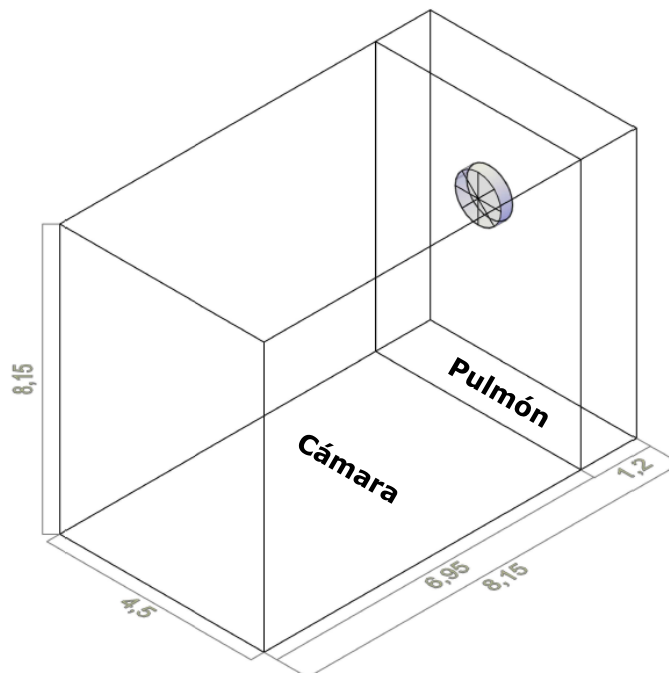


Figura 8: Túnel de enfriamiento con las dimensiones correspondientes a la cámara y pulmón.

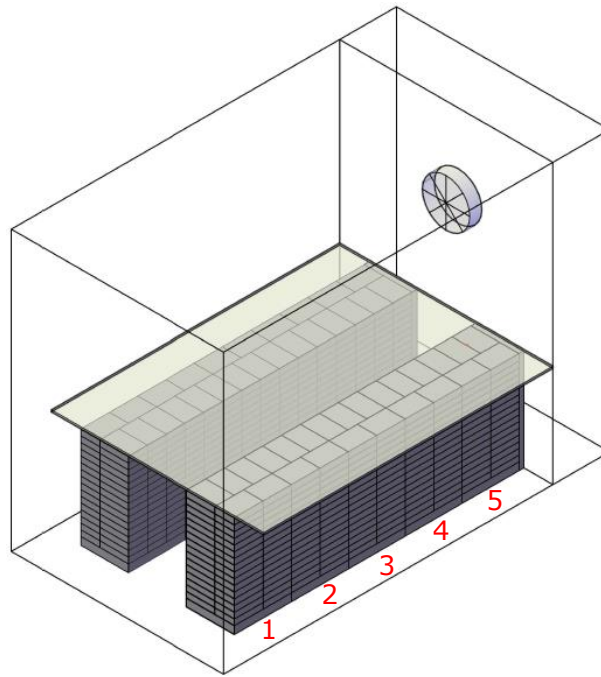


Figura 9: Túnel de enfriamiento de la Exportadora Seedless Valley, se observa la carpa a la altura de los pallets y se enumera cada pallet.

Los pallets deben medir  $1[m] \times 1,2[m]$ , y dado que las cajas estudiadas son de  $0,6[m] \times 0,4[m]$ , la base del pallet debe ser base 5 (Figura 10) para cumplir con las medidas. De este modo, los laterales (parte larga de la caja) quedan en los pasillos externos y los cabezales (parte corta de la caja) en el pasillo interno [28].

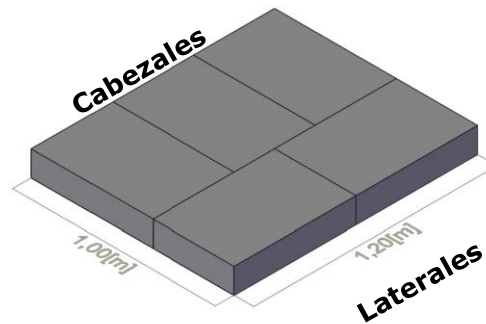
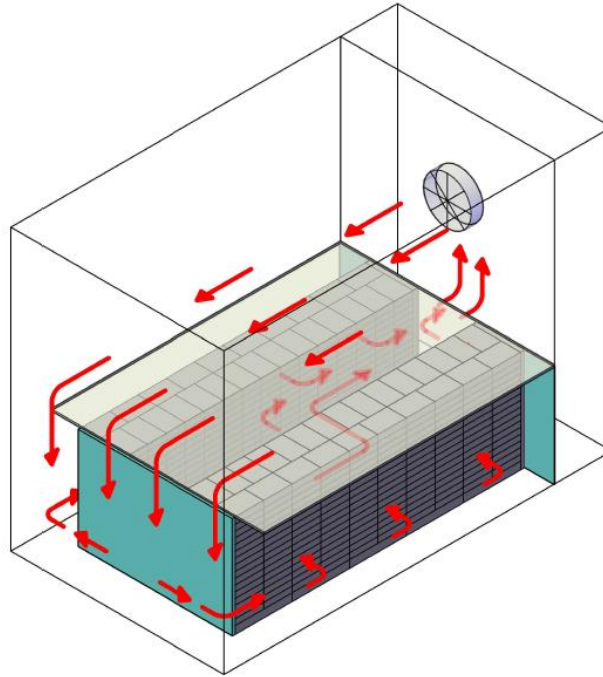


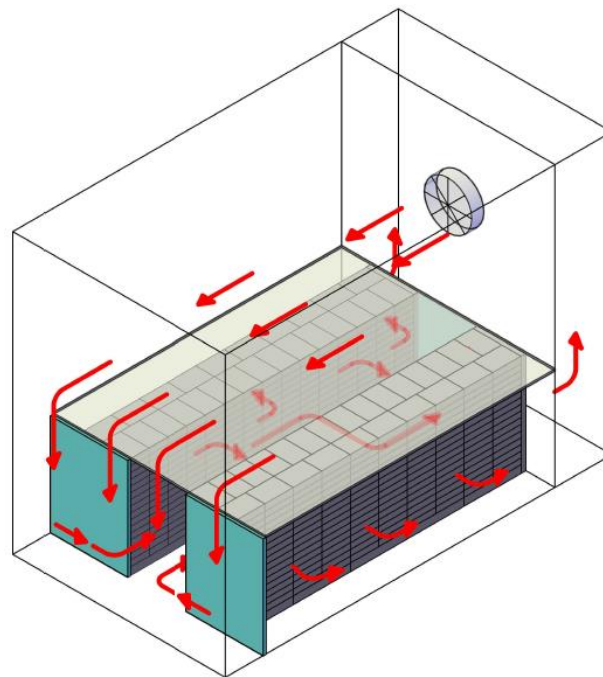
Figura 10: Base de un pallet, base 5.

El enfriamiento de la fruta involucra 2 etapas. La primera etapa consiste en colocar tapones en distintas ubicaciones de la cámara, de forma tal que el flujo de aire ingresa por los pasillos externos, atraviesa los pallets y es extraído por el pasillo interno, como se muestra en la Figura 11. Cuando la fruta ubicada en los laterales alcanza  $-0,5[^\circ C]$  aproximadamente, ocurre el proceso de inversión para iniciar la segunda etapa de enfriamiento [28].

Para iniciar la segunda etapa, se debe cambiar la ubicación de los tapones para que el flujo de aire ingrese por el pasillo interno y sea extraído por los pasillos externos, como se observa en la Figura 12. Esta segunda etapa dura hasta que la temperatura de la fruta ubicada en los cabezales sea de  $-0,5[^\circ\text{C}]$  aproximadamente [28].



*Figura 11: Primera etapa del proceso de enfriamiento.*



*Figura 12: Segunda etapa del proceso de enfriamiento.*

## 4. METODOLOGÍA

Para realizar el trabajo descrito, se plantea una metodología que se presenta en la Figura 13, las que se describen a continuación.

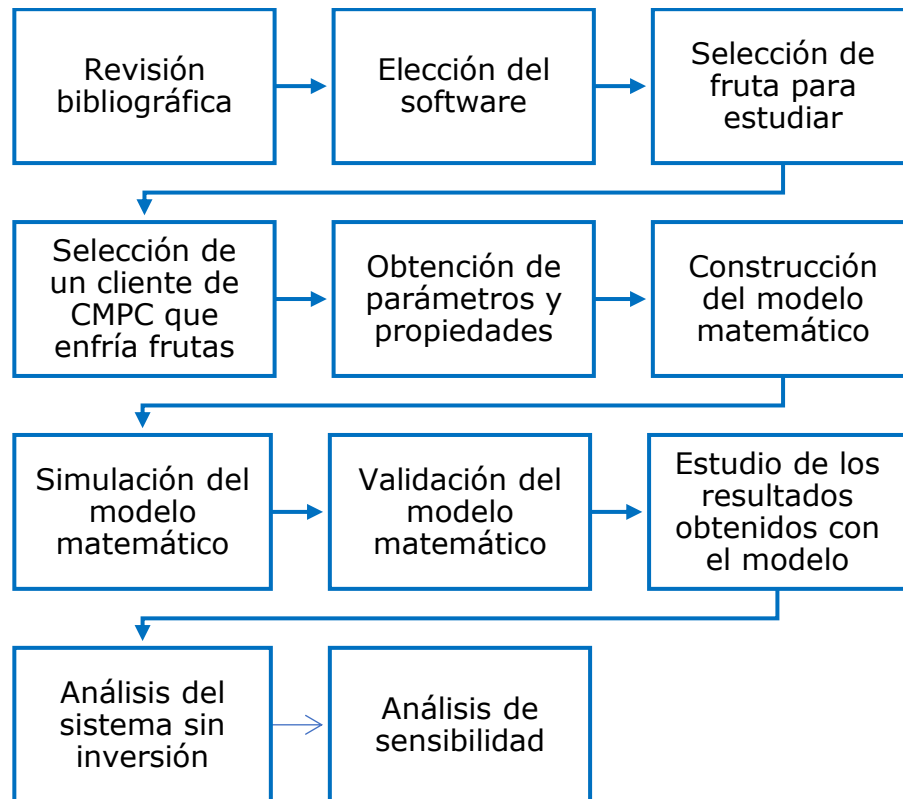


Figura 13: Diagrama de la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto.

### 4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se revisan estudios teóricos y experimentales descritos en publicaciones, los cuales se han desarrollado para distintos diseños de cajas y frutas, además de estar desarrollados en softwares de modelación de fluidos como, *ANSYS Fluent* y *COMSOL Multiphysics*.

Mediante el estudio de estas publicaciones, se analizan los modelos matemáticos que se proponen, simplificaciones usadas, parámetros que deben obtenerse experimentalmente, condiciones iniciales y de borde, y de este modo seleccionar el set de ecuaciones que permiten un mayor acercamiento a la realidad.

Respecto a los parámetros que se deben obtener experimentalmente, se encuentra la velocidad de entrada del flujo de aire ( $v_{in}$ ), temperatura de entrada del flujo de aire ( $T_{in}$ ), temperatura de la fruta en el tiempo ( $T$ ), presión de salida del flujo de aire ( $P_{out}$ ).

## **4.2. ELECCIÓN DEL SOFTWARE**

Dado lo reportado por la literatura, se recomienda el uso de un software interactivo que cuente con las herramientas necesarias para el modelamiento y simulación de fluidodinámica y transferencia de calor. Existen varios softwares que cumplen con estas características, los cuales se pueden utilizar tras adquirir una licencia, entre ellos: ANSYS Fluent [30], COMSOL Multiphysics [31], FreeFem [32] y Abaqus FEA [33].

En el Laboratorio de Modelación de Procesos y Computación Distribuida (PMDC Lab), del Departamento de Ingeniería Civil Química de la Universidad de Chile, se cuenta con la licencia de Comsol Multiphysics, razón por la que se decide utilizar este software.

## **4.3. SELECCIÓN DE FRUTA PARA ESTUDIAR**

Al iniciar el proyecto, se toma la decisión de acotar el problema para lograr cumplir con los objetivos. Dado esto es que se selecciona una fruta para realizar el estudio.

Para escoger la fruta, se investiga que fruta es de importancia en el mercado y para Envases Impresos, mediante la estadística de las frutas que se exportan y la participación de Envases Impresos en el mercado nacional de las frutas.

Con el análisis se selecciona la uva, ya que es la tercera fruta que más se exporta, con un 9,12%, superada por la manzana (34,01%) y palta (9,72%), de acuerdo los datos registrados por el Servicio Ganadero y Agrícola (SAG) en el año 2017 [25]. Por otro lado, Envases Impresos participa con 34,4% del mercado de la uva, lo que corresponde al 9,2% de las ventas de la empresa [34], por lo que es un producto de importancia para el país y la empresa.

## **4.4. SELECCIÓN DE UN CLIENTE DE CMPC QUE PROCESA FRUTAS**

Luego de seleccionar la fruta, se elige una empresa que procesa uva y es cliente de CMPC, esto para poder estudiar el sistema de enfriamiento y realizar las mediciones de los datos experimentales. Dado esto, es que se analiza y se escoge un cliente con ayuda del Área Comercial de Envases Impresos, basándose en las ventas y en la relación empresa-cliente que existe.

Se selecciona la Exportadora Seedless Valley, debido a que trabaja con uva tipo Thompson Seedless, y es un cliente que compra el 100% de sus cajas a Envases Impresos, lo que implica una buena relación entre ambas entidades. Además, las ventas a este cliente corresponden a un 10% de las ventas destinadas a cajas para el almacenaje de uvas [34].

El cliente acepta participar de la investigación y a estar disponible para entregar toda la información que sea necesaria para el estudio, pues el proyecto aporta a mejorar y reducir los costos del proceso de enfriamiento de ellos.

### **4.4.1. Sistema de enfriamiento**

Se asiste a las dependencias de la Exportadora Seedless Valley, en una primera instancia para conocer el sistema de enfriamiento que utilizan y así definir la metodología para realizar las mediciones de los datos que son necesarios para la construcción del modelo, la que se explica en la sección 4.5.1. Posteriormente, se asiste para hacer las mediciones de los datos en un túnel de enfriamiento cuando está en funcionamiento con las cajas estudiadas.

### **4.4.2. Cajas**

Junto a la exportadora, se seleccionan dos cajas para el estudio que son de importancia para ellos. La *Caja 1* se selecciona porque es la más utilizada por el cliente, por lo que tienen interés en mejorar el proceso. Mientras que la *Caja 2*, se estudia debido a que es una caja donde se embala la uva en *clamshell* (la *Caja 1* usa bolsa), por lo que se desea realizar una comparación de los diseños de cajas en el proceso.

## 4.5. OBTENCIÓN DE PARÁMETRO Y PROPIEDADES

### 4.5.1. Parámetros experimentales

Para realizar las mediciones de los datos experimentales se utilizan los equipos mencionados en la Tabla 3. Posteriormente se detalla la metodología para medir los datos.

Tabla 3: Equipos utilizados para tomar datos experimentales.

| Equipo                         | Fabricante y modelo             |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Anemómetro punta incandescente | Benetech<br>GM 8903             |
| Termocupla                     | Elitech<br>RC-4                 |
| Manómetro                      | Dwyer<br>Minihelic 2 Serie 5000 |

#### **Velocidad de entrada del flujo de aire ( $v_{in}$ )**

Con el anemómetro se mide la velocidad cada 2[h] para verificar la constancia del parámetro, lo que corresponde a  $v_{in}=3,5[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$  para la *Caja 1*, y  $v_{in}=3,5[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$  para la *Caja 2*.

#### **Temperatura de entrada del flujo de aire ( $T_{in}$ )**

El anemómetro posee un sensor de temperatura con el que se mide la temperatura cada 2[h], esto para analizar una posible variación en el tiempo y corroborar que la temperatura utilizada no es inferior a la temperatura de congelamiento ( $-2[^\circ\text{C}]$ ) para evitar que la uva se congele [28]. La temperatura resulta ser  $T_{in}=-1[^\circ\text{C}]$ , la cual, al ser superior a la temperatura de congelamiento, no existe un límite inferior en el tiempo de enfriamiento ya que no provocara congelamiento en la fruta [28].

#### **Temperatura de la fruta en el tiempo ( $T$ )**

Este parámetro se mide durante el tiempo que dura el proceso, con lo que se obtiene la trayectoria de la temperatura en el tiempo. Las termocuplas se instalan en el primer pallet de ambas filas de cajas, una en la zona que se enfría por cabezal y otra por la zona que se enfría por lateral, como muestra la Figura 14. A una altura correspondiente a la mitad del pallet aproximadamente.



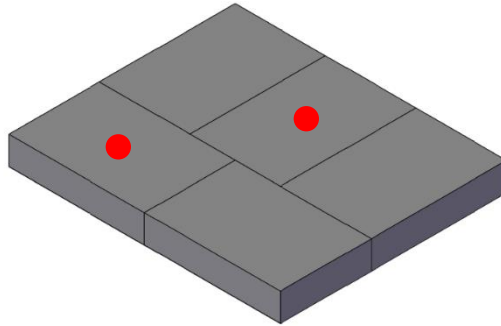


Figura 14: Posición de las termocuplas en el pallet.

#### **Presión de salida del flujo de aire ( $P_{out}$ ).**

Con el manómetro se obtiene la diferencia de presión que existe entre la entrada y salida del flujo de aire, donde se obtiene un  $\Delta P=35[\text{mmH}_2\text{O}]$  de manera constante cuando se realizan las mediciones cada 2[h].

Al tener esta diferencia de presión, se calcula la presión manométrica en la salida de la cámara, que corresponde a  $P_{out}=35[\text{mmH}_2\text{O}]=343,23[\text{Pa}]$ , pues en la entrada la presión corresponde a la presión atmosférica.

#### **4.5.2. Propiedades de la uva**

Se tiene que la fruta a estudiar corresponde a uva tipo Thompson Seedless, por lo que se debe conocer las propiedades de esta fruta: ecuación de calor, tamaño y masa.

En la bibliografía se encuentran distintos datos de las propiedades, las que corresponden a especies cosechadas en Estados Unidos [26], por lo que se procede a investigar datos sobre esta especie de uva cosechada en Chile.

Se acude al Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) para solicitar información, quienes acceden a realizar pruebas en la uva tipo Thompson Seedless para obtener los parámetros que se necesitan y a ayudar con los datos que sean necesarios.

#### **Ecuación de calor**

La ecuación de calor se obtiene a partir del  $\text{CO}_2$  que se emite debido a la respiración a distintas temperaturas, lo que se describe en detalle en el Anexo C.

### **Propiedades termofísicas**

Se accede a datos promedio de tamaño y masa (Tabla 4), con lo que se puede calcular su densidad. Por otro lado, las propiedades térmicas son entregadas por el INIA, lo que se observa en la Tabla 2.

Para el caso de la conductividad térmica, esta se modifica para añadir la resistencia que corresponde al plástico, como se muestra en el Anexo D. De este modo se utiliza  $k_{s1}=0,65[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$  para la *Caja 1*, mientras que para la *Caja 2* se usa  $k_{s1}=0,637[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ .

#### **4.5.3. Propiedades de las cajas**

Para las propiedades de las cajas, se utilizan datos que corresponden a cartón corrugado, los que se encuentran en la bibliografía y se asumen ambas cajas con las mismas propiedades. Así, se obtiene  $\rho_{s2}=200,178[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ ,  $k_{s2}=0,065[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$  y  $C_{p,s2}=0,63[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$  [20].

## **4.6. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO**

Al construir el modelo, se debe seleccionar el set de ecuaciones que debe utilizar el modelo, además de construir la geometría del sistema.

Dada la dificultad que presenta la geometría del sistema, se analiza la opción de simplificar el modelo para disminuir el tiempo de resolución de las simulaciones, esto mediante la reducción de dominios.

#### **4.6.1. Selección de las ecuaciones**

En la bibliografía se tiende a usar las ecuaciones en régimen turbulento, para verificar el uso de este régimen en este estudio, se calcula el número de Reynolds, lo que se detalla en el Anexo E, obteniendo  $Re=2,54\cdot 10^5$ , lo que es régimen turbulento.

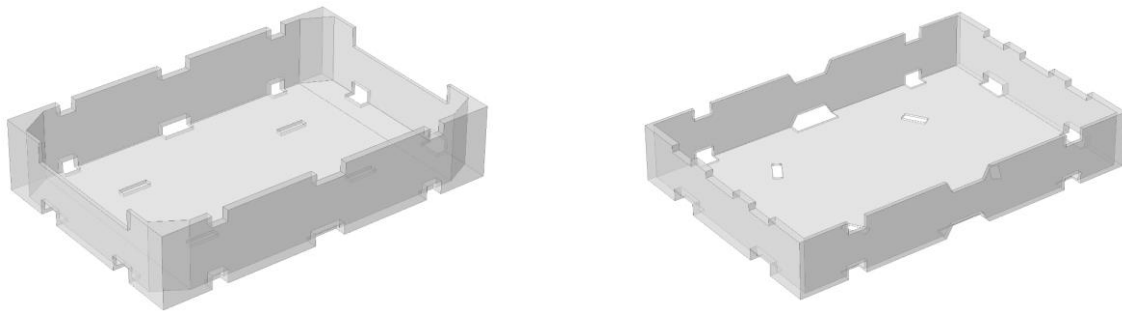
#### **4.6.2. Simplificaciones en la geometría**

La geometría de la cámara consta de 800 cajas (*Caja 1*) o 1.150 cajas (*Caja 2*) aproximadamente [28]. Cada caja contiene un gran número de granos de uvas, los que pueden simularse como esferas para representar su geometría. Esto implica un gran número de elementos en el sistema, y a su vez un alto gasto computacional, por lo que se realizan distintas simplificaciones.

### **Geometría de las cajas**

Las cajas se simplifican como un sólido compacto, donde no se describen las ondas del cartón corrugado ni los dobleces en las distintas caras, como se puede ver en la Figura 7 de la sección 3.5. Para esto, se construye a partir de un bloque al que se le extraen otros bloques con las dimensiones de los distintos agujeros que posee, además de un bloque que representa las dimensiones interiores de la caja.

Para los agujeros, se desprecian las esquinas redondeadas, ya que esto complejiza el mallado de la geometría, pues se necesita una malla más fina que en esquinas cuadradas, lo que se traduce en un mayor tiempo en las simulaciones. Obteniendo las cajas de la Figura 15.



*Figura 15: Cajas simplificadas que se utilizan en el modelo. A la izquierda se observa la Caja 1 y a la derecha la Caja 2.*

### **Número de cajas**

Teniendo la geometría simplificada para la cámara, se realiza un análisis del flujo másico de aire que ingresa a las cajas para encontrar una relación entre ellos, lo que permite reducir el número de cajas a utilizar en el modelo. Para esto, se asume en estado estacionario las ecuaciones de la fluidodinámica, lo que posteriormente se valida con lo descrito en la sección 4.6.3.

Se analiza el flujo másico al variar las cajas en altura (3, 4 y 5 cajas) y el número de filas de cajas (1, 2 y 3 filas) con 3 cajas en altura, se encuentra una relación y se minimiza el número de cajas. Cabe mencionar que, se utiliza desde 3 cajas en altura para observar un posible efecto de los agujeros presentes en la base de las cajas.

El detalle del análisis se describe en el Anexo F, con lo que se asume una división equitativa del flujo másico a cada caja, lo que permite reducir el número de cajas a 1 fila con 3 cajas en altura, como se muestra en la Figura 16.

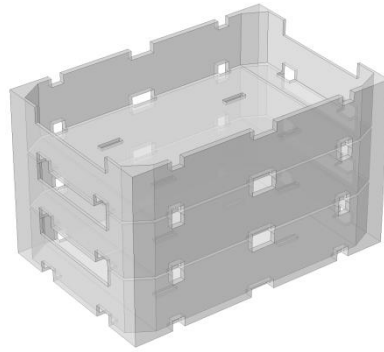


Figura 16: Número de cajas utilizadas en el modelo.

Debido a la reducción de cajas, el flujo másico que ingresa debe ser equivalente a lo que ingresa a una fila de caja. Para esto se tiene la ecuación 7 que calcula el flujo másico ( $\dot{m}[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$ ) que, al utilizar el supuesto de densidad constante, se tiene la ecuación 8 con la que se obtiene el caudal ( $F[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$ ).

$$\dot{m} = A \cdot \rho \cdot v_{in} \quad (7)$$

$$F = A \cdot v_{in} \quad (8)$$

Considerando que en 5 pallets hay 10 cajas, el flujo másico se divide en 10 partes iguales, ya que la distribución del flujo es aproximadamente equitativa para cada fila de cajas. Además, se tiene que el área transversal por donde el flujo de aire ingresa al sistema ( $A[\text{m}^2]$ ) se mantiene constante, por lo que, al hacer uso de la ecuación 8, la velocidad de entrada del flujo de aire corresponde a una décima parte de la original, por lo que  $v_{in}$  pasa de  $3,5[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$  a  $0,35[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ , y de  $2,7[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$  a  $0,27[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ , manteniendo el régimen turbulento con  $Re=1,22\cdot 10^4$  y  $7,94\cdot 10^3$  para la *Caja 1* y *Caja 2* respectivamente, de acuerdo al Anexo E.

### **Resultado de simplificar la geometría del túnel de enfriamiento**

Con el análisis anterior, se utiliza un sistema con la geometría simplificada del túnel de enfriamiento, la cual contiene solo una fila con 3 cajas en altura. Para generar el efecto de las cajas que están por el pasillo interno, se gira el túnel en  $90^\circ$ . En adelante, se denomina *sistema lateral* y *sistema cabezal*, respectivamente. En la Figura 17 y Figura 18 se observan ambos sistemas.

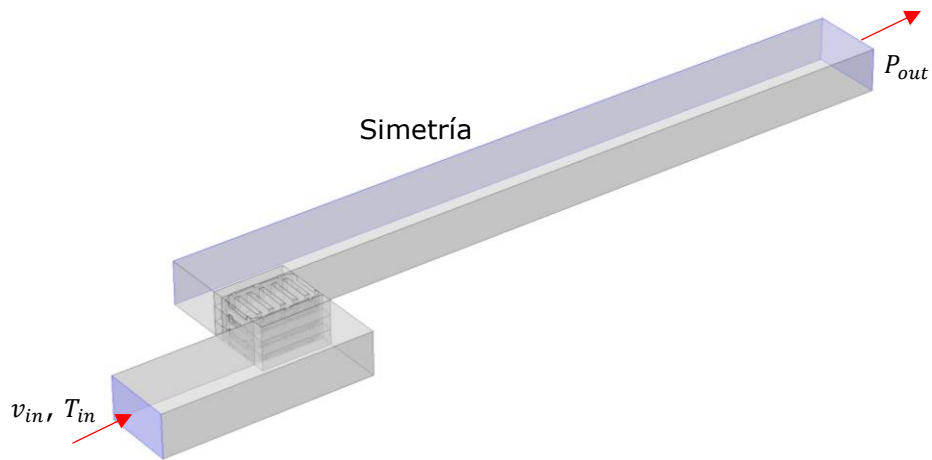


Figura 17: Sistema lateral simplificado. Se indican algunas condiciones de borde y las flechas indican la dirección del fluido.

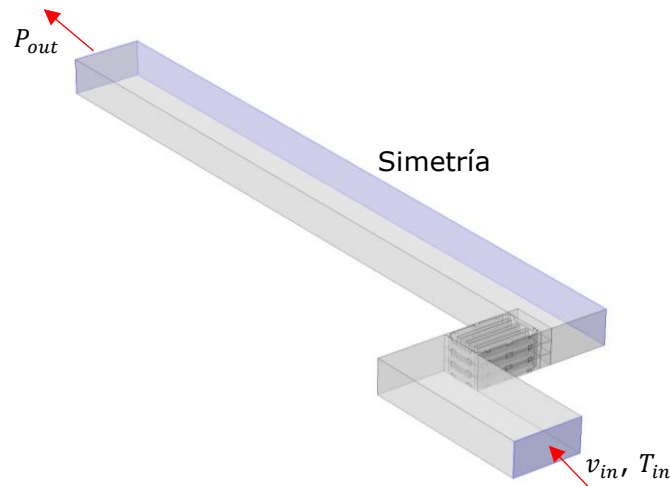


Figura 18: Sistema cabezal simplificado. Se indican algunas condiciones de borde y las flechas indican la dirección del fluido.

#### 4.6.3. Estado estacionario ecuaciones de fluidodinámica

Simplificada la geometría del sistema, se procede a simular el modelo con cajas vacías para verificar que funciona el conjunto de ecuaciones de momento y calor. Para esto se utiliza una velocidad de ingreso del aire de  $0,1[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$  y se modela por  $10[\text{s}]$ , lo que tarda  $3[\text{d}]$  aproximadamente en resolver. Dado esto, se concluye que el tiempo de simulación sigue siendo alto pese a las simplificaciones mencionadas anteriormente, por lo que se estudia la posibilidad de utilizar las ecuaciones de fluidodinámica en estado estacionario.

En la bibliografía, las ecuaciones de calor se utilizan en estado transiente y las de fluidodinámica en estado estacionario, lo que permite reducir el gasto computacional en relación con utilizar las ecuaciones de movimiento en estado transiente [10], [12]–[16]. Las razones por la cual se utiliza

estacionario son: el asumir que no existe flotabilidad, por lo que, el movimiento de la fruta no perturba el estado estacionario del fluido; y la variación de la temperatura en el aire es insignificante ( $<20[^\circ\text{C}]$ ), lo que permite despreciar los cambios producidos en las propiedades termofísicas del aire [10], [12]–[16].

La primera razón mencionada en el párrafo anterior se cumple en este proyecto, pues es un supuesto utilizado, mencionado en la sección 3.2. La segunda razón se analiza en el Anexo G, y se determina que también se cumple, pues se compara  $T_{in}$  y  $T_{out}$ , siendo la mayor diferencia  $10,1[^\circ\text{C}]$ .

De igual modo, se procede a estudiar el tiempo que tarda el sistema en llegar al estado estacionario, para esto se compara el flujo másico de entrada con el de salida. Así, se simula el modelo con distintas velocidades, inferiores a lo utilizado en el sistema, ya que así el tiempo de simulación es inferior. Así se utiliza  $0,1[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$  y  $0,06[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$  (ambas en régimen turbulento) y  $0,01[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$  (régimen laminar), según el Anexo E. Se obtiene lo que se muestra en la Figura 19 para un tiempo de  $10[\text{s}]$ .

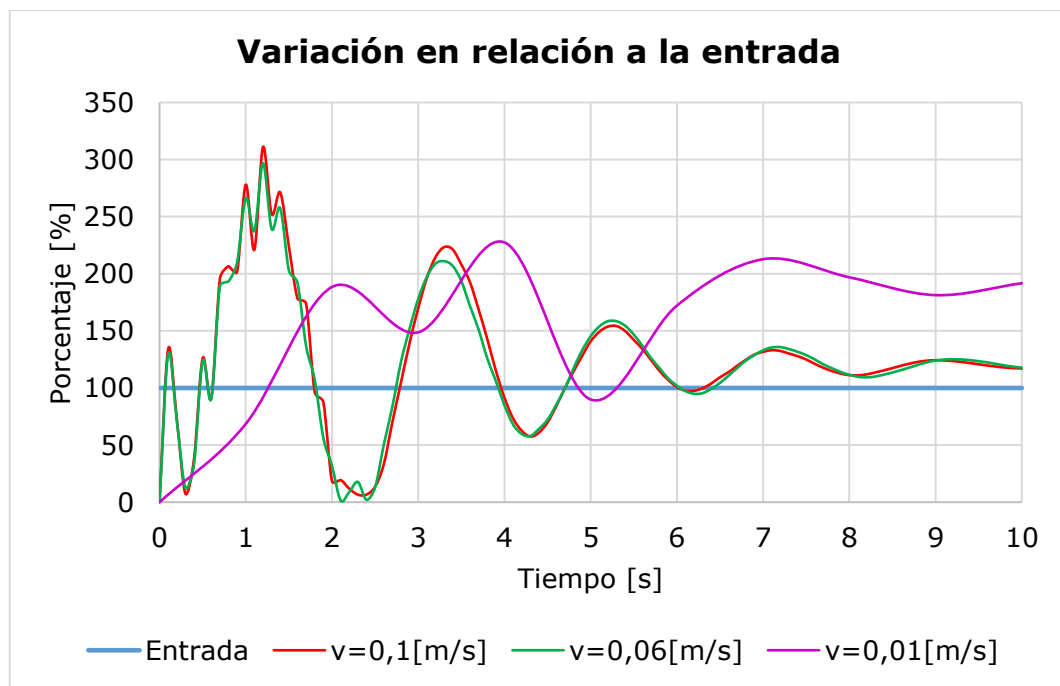


Figura 19: Normalización del flujo másico a distintas velocidades.

Se observa que, a mayor velocidad las oscilaciones tienden a reducirse, lo que se puede interpretar como una aproximación al estado estacionario en un tiempo menor en relación con las oscilaciones de una velocidad menor. Dado esto, se realiza un mayor análisis para el caso con  $v_{in}=0,1[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ ,

donde se analiza el comportamiento del flujo másico en distintos puntos del sistema (Figura 20) para poder estudiar la tendencia al estado estacionario, obteniendo como resultado lo mostrado en la Figura 21.

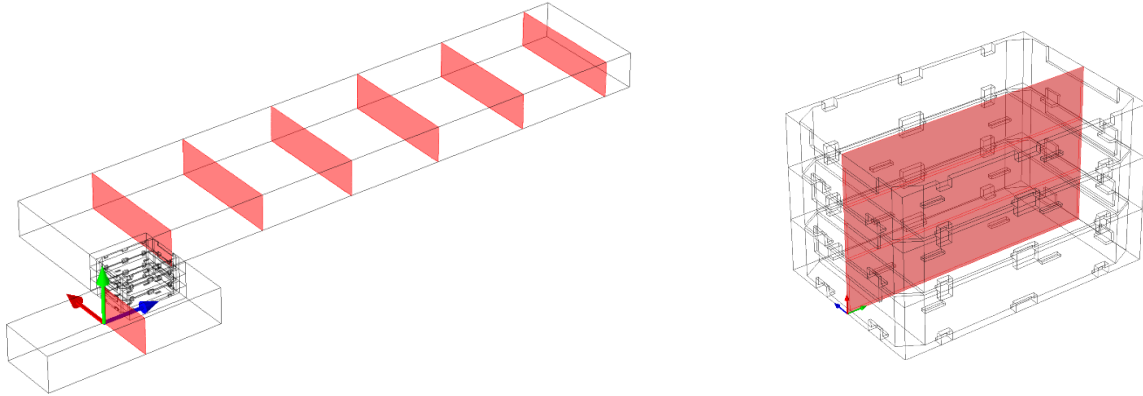


Figura 20: Áreas de las que se obtiene el flujo másico. A la izquierda está la cámara de frío y a la derecha las cajas.

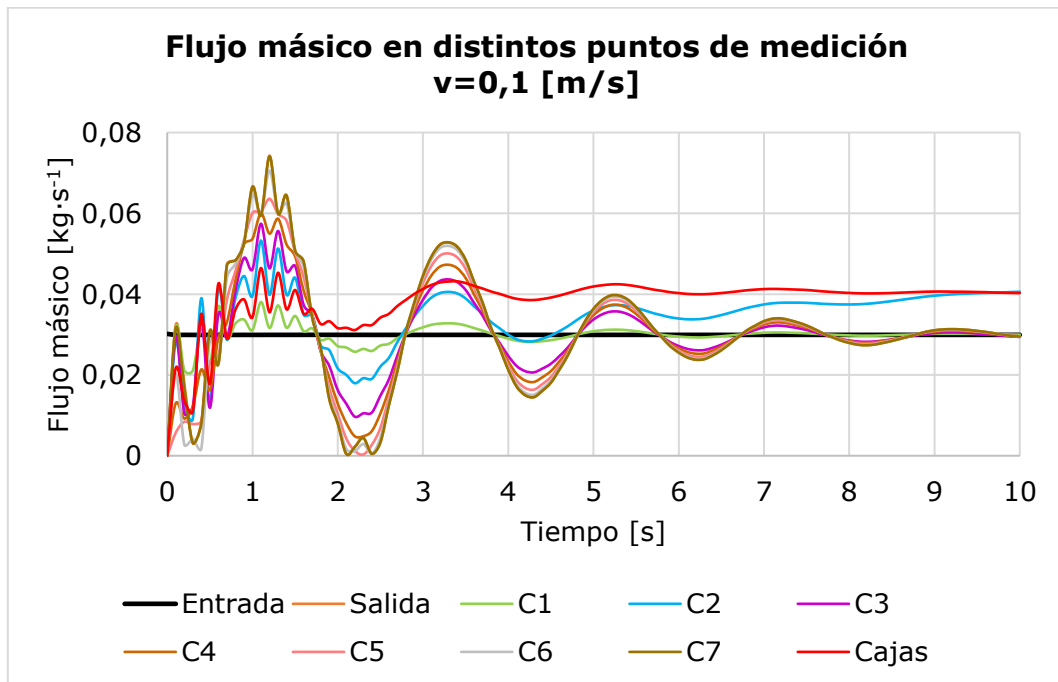


Figura 21: Análisis de estado estacionario en distintas secciones del sistema con  $v_{in}=0,01[m\cdot s^{-1}]$ .

En la Figura 21, se observa que cada una de las curvas que resultan del análisis, tienden a reducir las oscilaciones en los 10[s], por lo que se puede asumir que se alcanza el estado estacionario en este periodo de tiempo. Así, para una velocidad mayor, se puede asumir que se alcanza el estado estacionario dentro de los primeros 10[s], tiempo que es despreciable en

comparación a las 11[h] (*Caja 1*) y 7,5[h] (*Caja 2*) que dura el proceso, lo que permite suponer el uso de las ecuaciones de fluidodinámica en estado estacionario.

#### 4.6.4. Geometría fruta

Se procede a analizar una geometría adecuada para la representación de la fruta, donde se descarta el uso de esferas equivalentes al número de granos de uva, debido al alto número de dominios en el sistema. De este modo se estudia la factibilidad del uso de bloques.

Antes de realizar el estudio, se calcula el volumen efectivo de la uva en las cajas. Para esto el INIA proporciona datos del diámetro y masa de la uva tipo Thompson Seedless, los que se muestra en la Tabla 4.

*Tabla 4: Datos promedio de las propiedades de la uva.*

|                 | <b>Radio Polar[m]</b> | <b>Radio Ecuatorial [m]</b> | <b>Masa [kg]</b>      |
|-----------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| <b>Promedio</b> | $1,460 \cdot 10^{-2}$ | $1,006 \cdot 10^{-2}$       | $8,144 \cdot 10^{-3}$ |

Para efectos del cálculo de la densidad, se considera que solo hay presencia de granos de uva, sin tallo. De este modo, se obtiene una densidad de  $\rho=1.314,93[\text{kg} \cdot \text{m}^3]$ .

Para la *Caja 1*, que contiene 8,2[kg] de uva, el volumen efectivo es  $6,24 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3]$ , que corresponde al 24,25% del volumen interno de la caja. En la *Caja 2*, el volumen efectivo es  $4,18 \cdot 10^{-3}[\text{m}^3]$ , siendo un 20,34% del volumen interno de la caja.

Se realizan simulaciones con distintas geometrías que equivalen al volumen efectivo de la uva, geometrías que poseen las propiedades termofísicas de la uva, donde la conductividad térmica se obtiene del conjunto uva y plástico que se utiliza, como se detalla en el Anexo D.

En el Anexo H se describe el análisis que se realiza con las distintas geometrías, donde se calcula el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el error cuadrático medio (ECM) con los datos de las temperaturas que se obtienen de los modelos. Esta temperatura se mide en la caja central del sistema y en el punto central del bloque que representa la uva. Así, se decide utilizar 5 bloques en cada caja cuando se simula el sistema lateral, mientras que al simular el sistema cabezal, se utilizan 3 bloques, como se muestra en la Figura 22, donde el área de transferencia de los bloques en el sistema



cabezal es 0,1% mayor que en el área lateral, lo que se debe a la aproximación de los decimales. Así, con esta configuración se obtienen altos  $R^2$  y ECM inferiores a 1, como se indica en la sección 5.2.

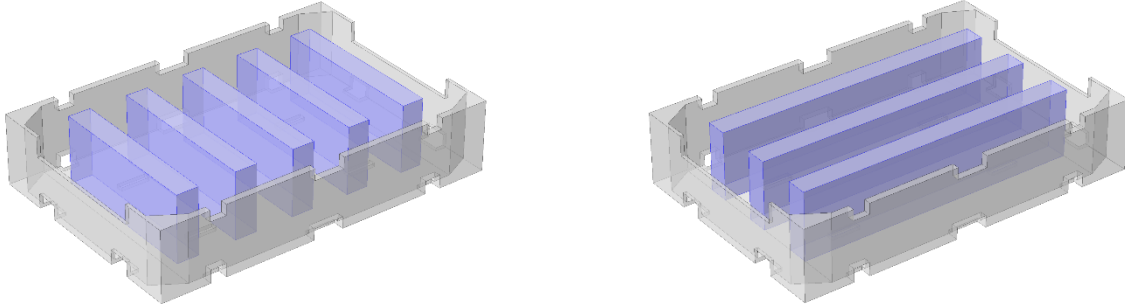


Figura 22: Representación geométrica de la fruta. A la izquierda se observa la fruta para el sistema lateral y a la derecha la fruta para el sistema cabezal.

## 4.7. SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Para simular el modelo matemático se siguen 4 pasos, que se explican a continuación.

### 4.7.1. Paso 1

Simular la fluidodinámica en estado estacionario del sistema lateral hasta el tiempo correspondiente al momento de la inversión, donde se utiliza la  $v_{in}$  obtenida en la sección 4.6.2.

Al terminar la simulación se obtiene el campo de velocidades del sistema, además de la velocidad del flujo del aire de salida de las cajas a partir de la integral de superficie (ecuación 9). Para esto último, se selecciona el área de interés, que corresponde a los orificios que se enlazan con la caja del sistema cabezal, como se muestra en la Figura 23 y así obtener la velocidad de acuerdo a la ecuación 8 mostrada en la sección 4.6.2. Dado que la fluidodinámica se modela en estado estacionario, los resultados son constantes en el tiempo.

$$F = \iint_A V dA \quad (9)$$

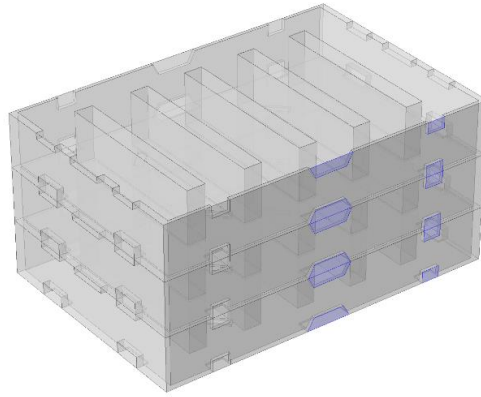


Figura 23: En azul se marca el área donde se realizan las mediciones para el sistema lateral.

#### 4.7.2. Paso 2

Incluir el campo de velocidades, obtenido en el paso 1, a la transferencia de calor del sistema lateral y simular en estado transiente hasta la inversión, donde se utiliza como  $T_0$  la temperatura inicial de la fruta y  $T_{in}$  corresponde a la temperatura obtenida en la sección 4.5.1.

Al simular, se obtiene la temperatura del flujo del aire de salida de las cajas a partir de la integral de flujo (ecuación 10), para lo que se selecciona el área de interés al igual que en el paso anterior (Figura 23), la que se utiliza para dividir el resultado de la integral y así obtener la temperatura.

$$T \cdot A = \iint_A T dA \quad (10)$$

#### 4.7.3. Paso 3

Se simula la fluidodinámica del sistema cabezal en estado estacionario por el periodo de pre-inversión. Para esto, el aire que ingresa lo hace con la velocidad obtenida en el paso 1, lo que permite obtener el campo de velocidades del sistema cabezal.

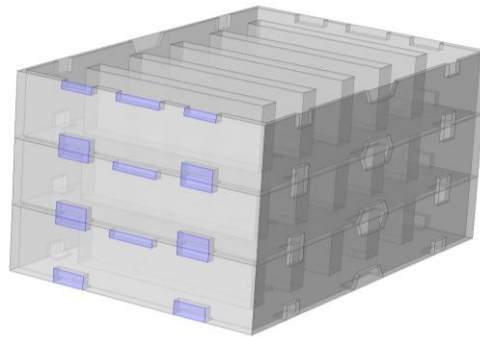
#### 4.7.4. Paso 4

Se incluye el campo de velocidades, obtenido en el paso 3, a la transferencia de calor del sistema cabezal, para lo cual, se considera que el flujo de aire ingresa con la temperatura obtenida en el paso 2, y la temperatura inicial de fruta corresponde al dato obtenido en la sección 4.5.1. Se simula por el periodo de pre-inversión

#### 4.7.5. Paso 5

Se simula la fluidodinámica en una segunda instancia para el sistema cabezal, esto por la cantidad de horas que corresponde al proceso de post-inversión, donde  $v_{in}$  corresponde a lo calculado en 4.6.2.

Simulado el modelo, se obtiene el campo de velocidades del sistema y la velocidad de la salida de las cajas a partir de la integral de flujo, al igual como se describe en el paso 1, donde el área seleccionada corresponde a lo mostrado en la Figura 24.



*Figura 24: En azul se marca el área donde se realizan las mediciones para el sistema cabezal.*

#### 4.7.6. Paso 6

Incluir el campo de velocidades, obtenido en el paso 5, a la transferencia de calor del sistema cabezal y simular durante la post-inversión. Se considera como temperatura inicial del sistema, el resultado final de las ecuaciones de transferencia de calor de la pre-inversión (paso 4). Por otro lado,  $T_{in}$  corresponde a lo obtenido en la sección 4.5.1.

Se obtiene la temperatura del flujo del aire de salida de las cajas mediante integrales de flujo, al igual como se describe en el paso 2, donde el área seleccionada corresponde a lo mostrado en la Figura 24.

#### 4.7.7. Paso 7

Se simula la fluidodinámica en el sistema lateral por las horas de la post-inversión, utilizando como  $v_{in}$  lo obtenido en el paso 5, dando como resultado el campo de velocidades del sistema.

#### 4.7.8. Paso 8

Se simula la transferencia de calor del sistema lateral para la post-inversión, donde se utiliza el campo de velocidades del paso 7. Para esto, se utiliza como temperatura inicial el resultado final de las ecuaciones de transferencia de calor de la pre-inversión (paso 2) y  $T_{in}$  corresponde a lo obtenido en el paso 6.

### 4.8. VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

La validación del modelo se efectúa mediante una comparación de los datos del perfil de temperatura medidos a la fruta, con lo que se obtiene un valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el error cuadrático medio (ECM) en cada caso. Como se muestra en el Anexo H, este método de validación se utiliza para seleccionar la mejor geometría que representa la uva, donde se selecciona la geometría que obtiene mejor  $R^2$  y ECM.

### 4.9. ESTUDIO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MODELO

Se estudia la funcionalidad de los agujeros de las cajas, para esto, se estudia el flujo másico de aire que atraviesa cada uno de los agujeros de los laterales y cabezales de la caja. Para lo cual, se selecciona el área que se desea evaluar, que en este caso corresponde a los agujeros de la caja como se muestra en la Figura 25. Además, se obtiene el flujo másico por unidad de área (ecuación 11) para determinar si cada uno de ellos cumple con su objetivo, que es permitir el ingreso de aire para poder enfriar la fruta.

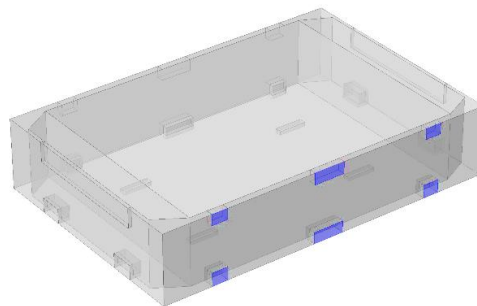


Figura 25: Selección de los agujeros para el análisis.

$$\dot{m} = F \cdot \rho = \rho \iint_A V dA \quad (11)$$

Por otro lado, se obtienen imágenes que describen el perfil de velocidad y temperatura del sistema, lo que también se puede obtener de una caja específica o alguna zona que sea de interés. Para el caso del perfil de velocidad, se obtiene una única imagen, debido al estado estacionario asumido, mientras que, para el perfil de calor se pueden obtener imágenes para cada unidad de tiempo evaluada en el modelo. Dado lo último, se realiza un análisis para  $t=1[h]$ , ya que se puede apreciar una mayor diferencia de temperatura entre cada elemento del sistema, como se muestra en la sección 5.4.

Además, se realiza un balance simple de energía, donde se obtiene el calor neto por unidad de tiempo que pierde la fruta durante el proceso ( $Q[W]$ ), en el modelo y con los datos experimentales. Para el modelo se obtiene directo como resultado de la simulación, mientras que con los datos experimentales se utiliza la ecuación 12. Con los resultados obtenidos, se calcula la temperatura que adquiere el flujo de aire  $T_{af}[^{\circ}C]$ , efectuando un balance de energía entre el calor perdido de la fruta ( $Q_s$ ) y el calor adquirido por el flujo de aire ( $Q_a$ ), con la ecuación 13 y 14.

$$Q = \frac{m \cdot cp_s \cdot \Delta T}{t} \quad (12)$$

$$Q_s = Q_a \quad (13)$$

$$\frac{m_s \cdot cp_s \cdot \Delta T_s}{t} = v_{in} \cdot A \cdot \rho_a \cdot C_{pa} \cdot (T_{af} - T_{a0}) \quad (14)$$

#### 4.10. ANÁLISIS DEL SISTEMA SIN INVERSIÓN

Se desea estudiar si el uso de la inversión es adecuado para el proceso, por lo que se realizan simulaciones sin incluir la etapa de inversión. Para esto, se selecciona como tiempo final, el momento en que la temperatura en el cabezal es igual a la temperatura final del sistema cabezal en el modelo original.

#### **4.11. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

Una vez que se logra un ajuste adecuado en el modelo, se procede a realizar un análisis de sensibilidad, el que consiste en estudiar el efecto del área de ventilación en el tiempo de enfriamiento, resistencia mecánica y en el costo de enfriamiento. Para esto se estudia una caja con menos área de ventilación y otra con más área para compararlas con las cajas originales. Cabe mencionar que la diferencia en el área se realiza al cambiar el tamaño de los agujeros existentes.

La metodología para obtener el tiempo de enfriamiento consiste en obtener la temperatura del modelo base en el sistema lateral al momento de la inversión, para usar este dato como el punto que marca la inversión. Posteriormente se obtiene la temperatura final del modelo base en la zona en el sistema cabezal, lo que representa la temperatura final que se debe alcanzar en el proceso.

La resistencia mecánica la obtiene CMPC al realizar pruebas de compresión vertical de las cajas armadas (BCT, *Box Compression Test*), lo que permite evaluar la factibilidad de los nuevos diseños.

El costo de enfriamiento se obtiene a partir del dato entregado por la Exportadora Seedless Valley, el que corresponde a US\$0,65 por caja en un ciclo de enfriamiento, valor que corresponde a mano de obra, manutención, petróleo y todos los posibles costos que pueden ocurrir durante el proceso, sin hacer diferencia entre el tipo de caja ni tiempo de enfriamiento [28]. Para los cálculos, se supone que este costo es proporcional al tiempo de enfriamiento, siendo US\$0,65 el costo para el diseño original de la *Caja 1* y *Caja 2*.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSION

Con la metodología descrita anteriormente, se obtienen resultados experimentales a partir de la toma de datos durante el proceso de enfriamiento en la Exportadora Seedless Valley, además de resultados del modelo que permiten validar el modelo y realizar un análisis para cumplir con los objetivos del proyecto.

### 5.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con las termocuplas, se obtiene el perfil de temperatura para el lateral y cabezal de las cajas estudiadas, lo que se muestra en la Figura 26 y Figura 27, donde la curva roja corresponde al enfriamiento por la zona del cabezal y las curva azul a la que se enfría por lateral en cada tipo de caja.

En ambas figuras, se observa que la curva azul presenta un mayor decaimiento de la temperatura durante la etapa de pre-inversión, lo que se debe a que el flujo de aire ingresa directamente por los laterales en la primera etapa, como se explica en la sección 3.5., lo que permite una mayor transferencia de calor.

En la curva roja se observa un momento en que aumenta la velocidad de enfriamiento, esto se debe al proceso de inversión que ocurre a las 6[h] en la *Caja 1* y a las 5[h] en la *Caja 2*, completando el enfriamiento a las 11[h] y 7,5[h], respectivamente.

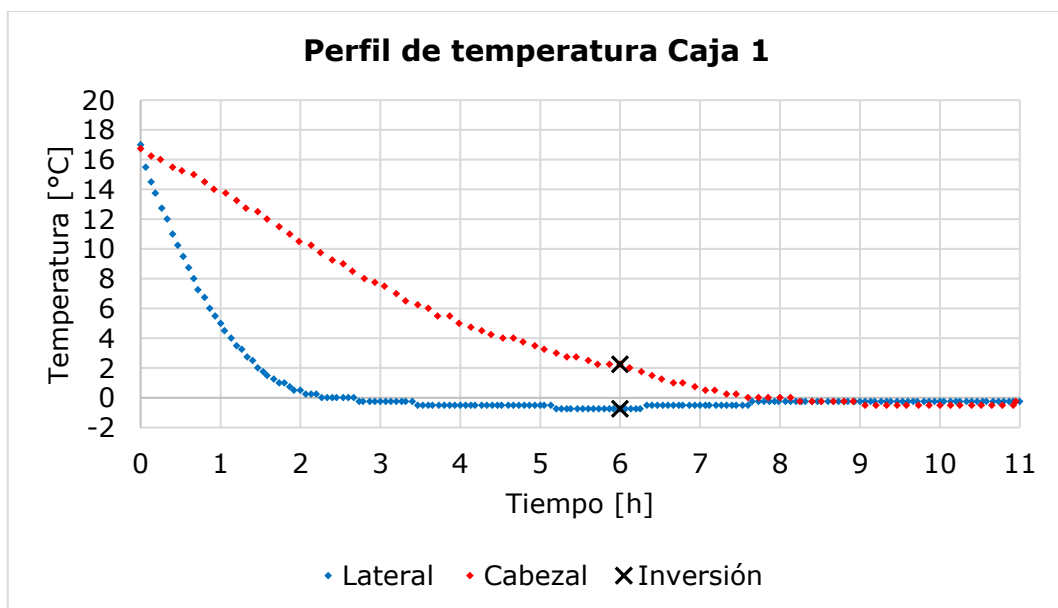


Figura 26: Perfil de temperatura de la Caja 1.

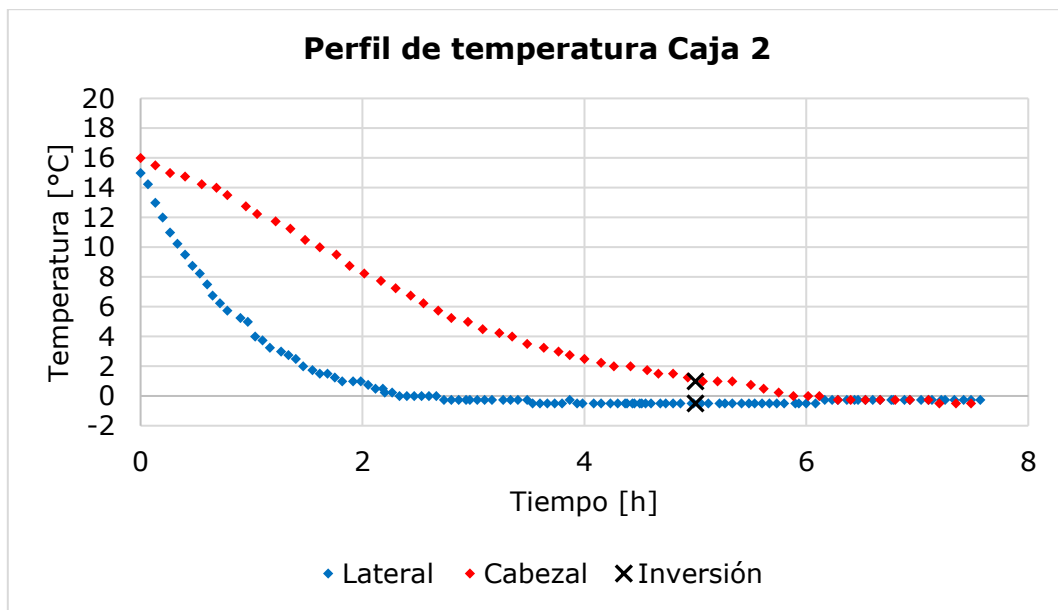


Figura 27: Perfil de temperatura de la Caja 2.

Las curvas coinciden con las ecuaciones de calor presentadas en la sección 3.2, ya que al integrar estas ecuaciones, la temperatura queda descrita por una función exponencial, tanto para la ecuación de calor del aire como de la fruta, donde la temperatura va descendiendo a causa del proceso enfriamiento. Así, al descender rápido la temperatura, se obtiene una curva como la azul, mientras que al descender más lento se logra una curva como la roja. Además, la principal razón por la que la *Caja 2* tarda menos tiempo en enfriarse, es por la menor masa de uva que contiene (5,5[kg]) en comparación a la *Caja 1* (8,2[kg]), lo que favorece la transferencia de calor entre el flujo de aire y la fruta.

## 5.2. VALIDACION DEL MODELO

Una vez que se tienen los datos experimentales y se desarrolla el modelo, se procede a validar el modelo, lo cual está relacionado a la selección de la geometría de la fruta (sección 4.6.2), ya que con esto se obtiene la geometría con la que el modelo puede representar mejor los fenómenos presentes en el sistema, de este modo se comparan los resultados del proceso con los obtenidos en el modelo.

### 5.2.1. Caja 1

La validación de la *Caja 1* se presenta en la Figura 28. Donde se observa que las curvas del modelo tienen una misma tendencia a los datos registrados y



se asemejan entre ellas. Además, se desprenden algunos datos para efectuar una comparación entre ellos, ver Tabla 5 y Tabla 6.

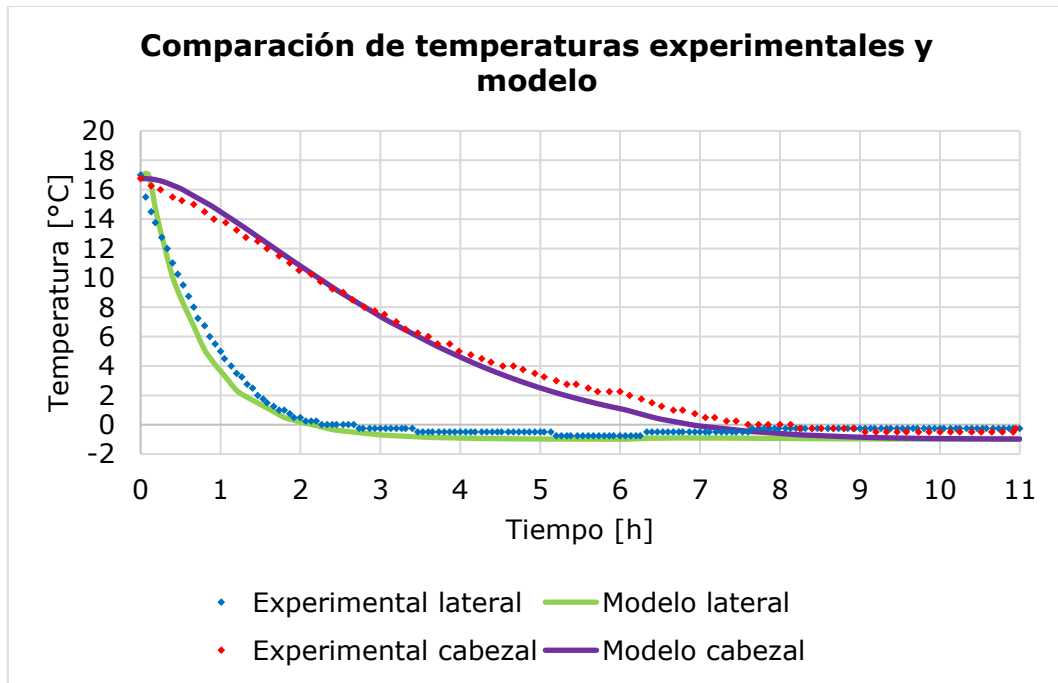


Figura 28: Validación del modelo para la Caja 1.

Tabla 5: Datos comparativos entre el modelo y datos experimentales del sistema lateral en la Caja 1.

| Parámetro       | Experimental | Modelo |
|-----------------|--------------|--------|
| $T(6[h])$ [°C]  | -0,75        | -0,988 |
| $T(11[h])$ [°C] | -0,5         | -0,988 |
| $t(0[°C])$ [h]  | 2,3          | 2,1    |

Tabla 6: Datos comparativos entre el modelo y datos experimentales del sistema cabezal en la Caja 1.

| Parámetro       | Experimental | Modelo |
|-----------------|--------------|--------|
| $T(6[h])$ [°C]  | 2,25         | 1,090  |
| $T(11[h])$ [°C] | -0,50        | -0,972 |
| $t(0[°C])$ [h]  | 7,6          | 6,8    |

En estos resultados, se observa cierta proximidad entre los datos experimentales y los del modelo, donde los resultados del modelo

demuestran que la velocidad de enfriamiento es mayor que en el proceso observado, siendo el calor neto por unidad de tiempo ( $Q$ ) mayor en el modelo, como se muestra posteriormente en la sección 5.5. La posible causa de esto puede ser que se está despreciando el intercambio de energía que ocurre entre el sistema y el exterior durante el proceso, en especial cuando los operarios ingresan a la cámara de frío para hacer mediciones o supervisar que esté todo funcionando en perfectas condiciones, pues cuando ingresa alguien, la puerta se deja abierta para evitar algún accidente por quedar encerrado en el interior, lo que ocurre cada 1[h] o menos. Por otro lado, se tiene el supuesto de la ecuación de calor de la uva, donde la generación de calor para  $T < 0[^\circ\text{C}]$  es igual a  $Q_s(0[^\circ\text{C}])$ , según el Anexo C.

Además, se obtiene el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el error cuadrático medio (ECM) mostrado en la Tabla 7, para verificar la proximidad del modelo a los fenómenos presentes en el proceso.

*Tabla 7: Coeficiente de determinación y error cuadrático medio para el modelo matemático de la Caja 1.*

| <b>Parámetro</b> | <b>Lateral</b> | <b>Cabezal</b> |
|------------------|----------------|----------------|
| $R^2$            | 0,96           | 0,99           |
| ECM              | 0,44           | 0,36           |

Con estos resultados del  $R^2$  se puede decir que el modelo captura gran parte de la fenomenología presente en el sistema, por lo que se aproxima a los datos experimentales, además se obtiene un bajo error cuadrático medio, por lo que se puede realizar un análisis de sensibilidad para esta caja.

### **5.2.2. Caja 2**

Para la *Caja 2* se realiza el mismo análisis, obteniendo curvas similares a los datos experimentales, lo que se puede observar en la Figura 29 y se comparan algunos datos de interés en la Tabla 8 y

Tabla 9.

De igual modo que en el caso anterior, los resultados del modelo demuestran que el enfriamiento es más rápido respecto a lo registrado en los datos experimentales, siendo la posible causa el despreciar el intercambio de energía entre el sistema y el exterior, además del supuesto de la ecuación de calor de la uva.

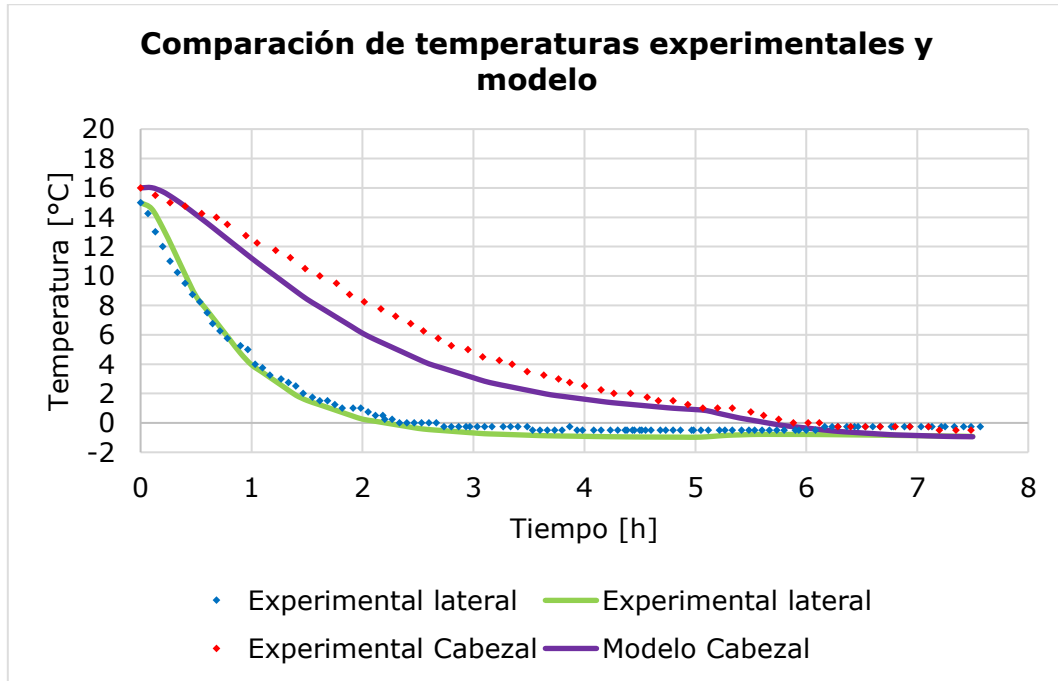


Figura 29: Validación del modelo para la Caja 2.

Tabla 8: Datos comparativos entre el modelo y datos experimentales del sistema lateral en la Caja 2.

| Parámetro        | Experimental | Modelo |
|------------------|--------------|--------|
| $T(5[h])$ [°C]   | -0,50        | -0,974 |
| $T(7,5[h])$ [°C] | -0,25        | -0,917 |
| $t(0[°C])$ [h]   | 2,3          | 2,3    |

Tabla 9: Datos comparativos entre el modelo y datos experimentales del sistema cabezal en la Caja 2.

| Parámetro        | Experimental | Modelo |
|------------------|--------------|--------|
| $T(5[h])$ [°C]   | 1,00         | 0,907  |
| $T(7,5[h])$ [°C] | -0,50        | -0,942 |
| $t(0[°C])$ [h]   | 6,1          | 5,6    |

Se obtiene el coeficiente de determinación y el error cuadrático medio para corroborar la proximidad del modelo a los datos experimentales, obteniendo como resultado lo de la Tabla 10.

Tabla 10: Coeficiente de determinación para el modelo matemático de la Caja 2.

| Parámetro | Lateral | Cabezal |
|-----------|---------|---------|
| $R^2$     | 0,98    | 0,95    |
| ECM       | 0,23    | 0,52    |

Dado los buenos resultados obtenidos en el coeficiente de determinación, se procede a simular el modelo para nuevos diseños de cajas, en los cuales se varía el porcentaje de área de ventilación.

### 5.3. ESTUDIO DE LOS AGUJEROS DE LAS CAJAS

Se estudia la función que cumple cada agujero mediante el análisis del flujo másico que ingresa por cada uno de ellos. Para esto se estudia la caja central del conjunto de 3 cajas utilizado en el modelo.

#### 5.3.1. Caja 1

En la Figura 30 se enumeran los agujeros y se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 11 y Tabla 12, que corresponde a la simulación del sistema lateral y cabezal. Además, se entrega el resultado del análisis de los 4 orificios que se encuentran en la base de la caja (*base* en las tablas), para determinar la incidencia de éstos en el proceso.

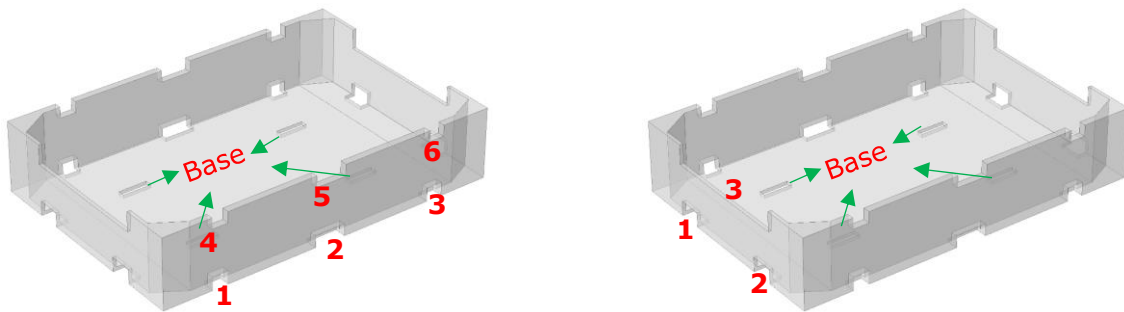


Figura 30: Análisis de agujeros en Caja 1. A la izquierda se enumeran los agujeros para el sistema lateral y a la derecha para el sistema cabezal.

En la Tabla 11 y Tabla 12 se observa el flujo másico de aire que ingresa por cada agujero, donde se indica que por los agujeros 2 y 5 ingresa un mayor flujo en el sistema lateral, mientras que en el sistema cabezal predomina el 3, lo que se debe a que son orificios de mayor tamaño.

Tabla 11: Flujo másico y flujo por unidad de área de los agujeros del lateral en Caja 1.

| <b>Agujero</b> | $\dot{m}[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]\cdot 10^{-2}$ | $\dot{m} \cdot A^{-1}[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}]$ |
|----------------|---|---|
| <b>1</b>       | 4,052   | 62,923  |
| <b>2</b>       | 6,623   | 61,323  |
| <b>3</b>       | 4,017   | 62,379  |
| <b>4</b>       | 3,379   | 63,515  |
| <b>5</b>       | 6,711   | 62,136  |
| <b>6</b>       | 3,201   | 60,164  |
| <b>Base</b>    | 0,005   | 0,0852  |

Tabla 12: Flujo másico y flujo por unidad de área de los agujeros del cabezal en Caja 1.

| <b>Agujero</b> | $\dot{m}[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]\cdot 10^{-2}$ | $\dot{m} \cdot A^{-1}[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}]$ |
|----------------|---|---|
| <b>1</b>       | 2,882   | 28,821  |
| <b>2</b>       | 2,891   | 28,911  |
| <b>3</b>       | 22,049  | 28,319  |
| <b>Base</b>    | 0,005   | 0,0832  |

Para determinar el comportamiento de cada orificio, se obtiene el flujo másico por unidad de área, y así se puede observar que por cada uno de los agujeros ingresa aproximadamente un flujo proporcional a su área, por lo que, cada uno está cumpliendo con su objetivo.

Lo anterior, se debe al régimen turbulento que se presenta en el sistema, lo que permite que el fluido en movimiento esté presente en todo el con una misma velocidad, por lo que tiende a ingresar a todos los agujeros de manera equitativa. Además, se tiene que existe una baja pérdida de carga a medida que el fluido avanza por la cámara de frío, como se observa en el Anexo F, lo que genera una distribución más equitativa.

Respecto a los agujeros de la base, se observa un pequeño flujo, el cual es prácticamente despreciable. Este flujo se debe a que existe una pequeña diferencia de presión entre las cajas, la cual no es superior a 2,49[Pa] entre las 3 cajas, como se puede observar en el Anexo F. Ante esto, se puede decir que estos agujeros no tienen relevancia en este proceso, pero, su importancia está en uno de los procesos posteriores, que corresponde a al transporte de la fruta en barcos, ya que el sistema de enfriamiento hace

circular el flujo de aire de manera vertical, siendo la razón por la cual no se pueden eliminar [12]–[19].

### 5.3.2. Caja 2

Se efectúa el mismo estudio para la *Caja 2* (Figura 31), obteniendo los resultados de la Tabla 13 y Tabla 14. Donde se observa que el flujo másico por unidad de área se aproxima a un comportamiento similar en cada orificio, por lo que cada agujero cumple de forma adecuada con su objetivo, que es permitir el ingreso de aire para el enfriamiento de la fruta. Lo que se debe al régimen turbulento y a la mínima pérdida de carga que existe de acuerdo a lo mostrado en el Anexo F.

Respecto a los agujeros de la base, se puede decir que su incidencia es mínima para este diseño de caja, pero su influencia aparece cuando ocurre el transporte en barcos donde el flujo de aire es vertical [12]–[19].

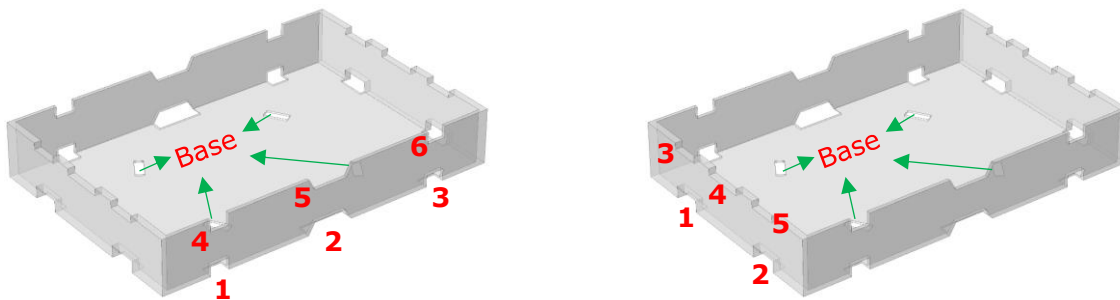


Figura 31: Análisis de agujeros en Caja 2. A la izquierda se enumeran los agujeros para el sistema lateral y a la derecha para el sistema cabezal.

Tabla 13: Flujo másico y flujo por unidad de área de los agujeros del lateral en Caja 2.

| Agujero | $\dot{m}[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]\cdot 10^{-2}$ | $\dot{m} \cdot A^{-1}[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}]$ |
|---------|---|---|
| 1       | 2,763   | 43,171  |
| 2       | 5,929   | 43,594  |
| 3       | 2,739   | 42,802  |
| 4       | 2,770   | 43,276  |
| 5       | 6,060   | 43,916  |
| 6       | 2,736   | 42,752  |
| Base    | 0,006   | 0,0978  |

Tabla 14: Flujo másico y flujo por unidad de área de los agujeros del cabezal en Caja 2.

| Agujero     | $\dot{m}[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]\cdot 10^{-2}$ | $\dot{m} \cdot A^{-1}[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}]$ |
|-------------|---|---|
| <b>1</b>    | 5,573   | 55,733  |
| <b>2</b>    | 5,660   | 56,605  |
| <b>3</b>    | 3,108   | 56,511  |
| <b>4</b>    | 4,256   | 55,277  |
| <b>5</b>    | 3,011   | 54,741  |
| <b>Base</b> | 0,006   | 0,0958  |

## 5.4. RESULTADOS GRÁFICOS DEL MODELO

Al validar el modelo, se puede obtener una serie de imágenes como resultado del modelo, que representan el perfil de velocidad y temperatura del sistema, las que son mostradas a continuación.

### 5.4.1. Caja 1

#### Perfil de velocidad

Dado que se asumen las ecuaciones de fluidodinámica en estado estacionario, se obtiene una única representación de la trayectoria del fluido. En la Figura 32, se observa el perfil de velocidad en el sistema.

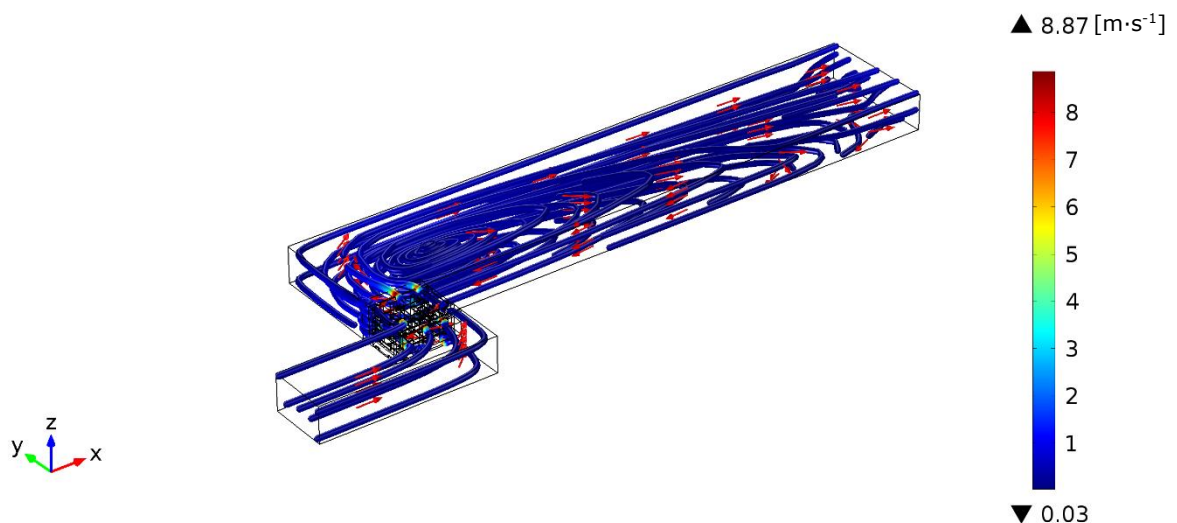


Figura 32: Perfil de velocidad del sistema lateral en la Caja 1.

En esta figura se observan *streamlines* del campo de velocidad. *Streamline*, corresponde a un vector tangente a la velocidad, por lo que representa la

trayectoria del fluido. Y los colores que representan el valor del campo de velocidad:

$$\vec{V} = v_x + v_y + v_z \quad (15)$$

Otro elemento que se observa en la imagen, son unas flechas que representan el sentido de la trayectoria del fluido, por lo que se puede observar turbulencia al tener flechas que van en distintos sentidos.

Además, se puede obtener una imagen de una caja, lo que se observa en la Figura 33 y Figura 34, donde la primera corresponde a la caja central del sistema lateral, y la segunda imagen es del sistema cabezal.

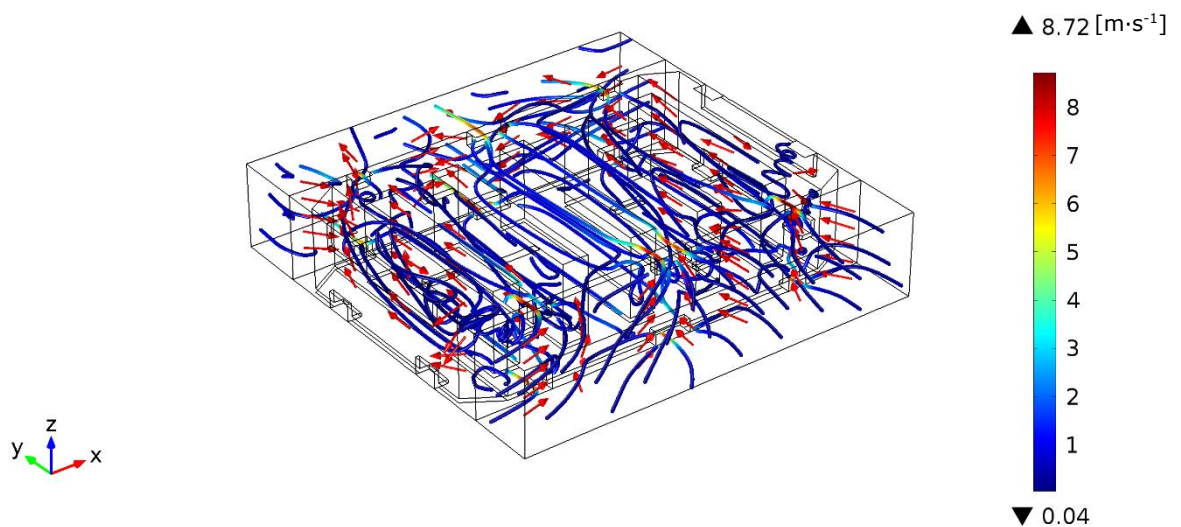


Figura 33: Perfil de velocidad de la caja central en el sistema lateral en la Caja 1.

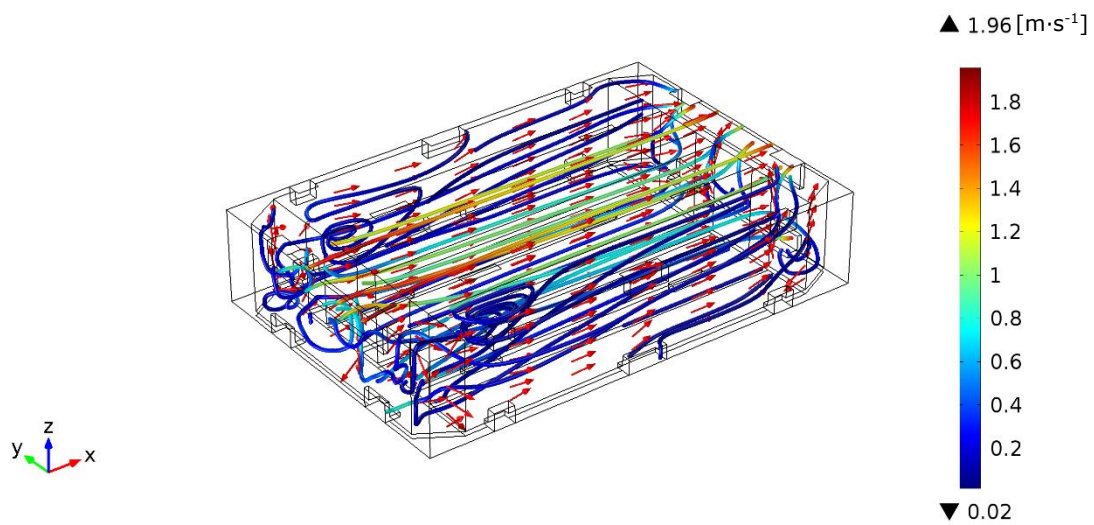


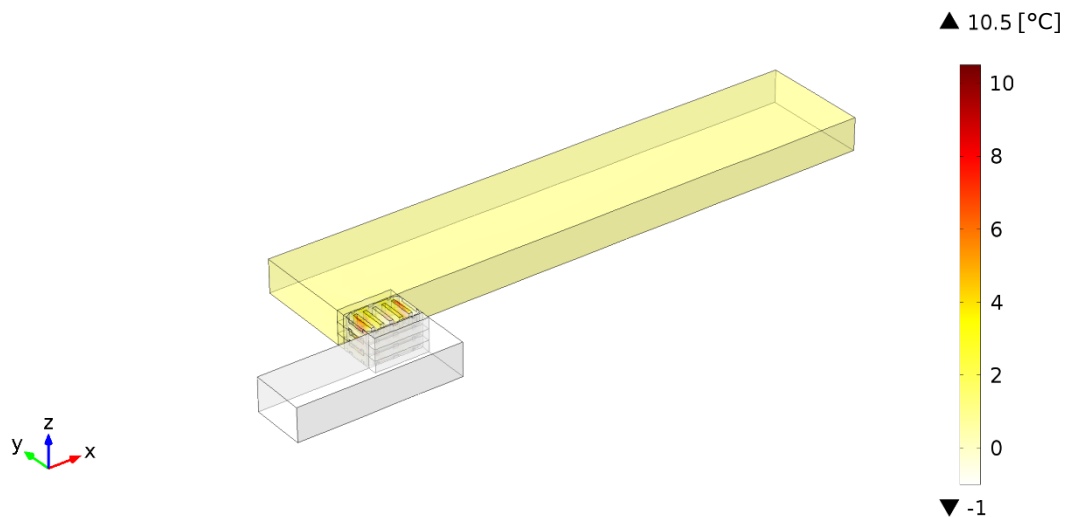
Figura 34: Perfil de velocidad de la caja central en el sistema cabezal en la Caja 1.



En las figuras, se observan algunas zonas con una mayor magnitud de la velocidad, específicamente cerca de los agujeros de las cajas, ya que se reduce el área transversal y por lo tanto la velocidad aumenta. Además, se puede apreciar que la velocidad se reduce en el sistema cabezal, lo que se debe a la pérdida de carga que existe al pasar el fluido de lateral a cabezal, lo que reduce la velocidad y la turbulencia en 32%, lo que se aprecia al observar una trayectoria más lineal en la Figura 34.

### **Perfil de temperatura**

En este caso, como las ecuaciones se utilizan en transiente, se puede obtener una imagen para cada unidad de tiempo en que fue evaluada la ecuación. En la Figura 35 se observa el perfil de temperatura a  $t=1[h]$ .



*Figura 35: Perfil de temperatura a  $t=1[h]$  del sistema lateral de la Caja 1.*

En la figura, se observa que la primera sección de aire está a menor temperatura, lo que se debe a que el flujo de aire ingresa directamente por esa zona, ejerciendo fuerza sobre el aire que no está en movimiento (movimiento molecular) y por ende se desplaza este aire que es con mayor temperatura y empieza a circular el aire que ingresa a  $-1[^\circ\text{C}]$  en esta zona. Posteriormente, se observan zonas de la fruta con altas temperaturas pero que ha empezado a descender debido al intercambio de energía, y dada esta transferencia de calor es que la sección posterior de aire muestra mayor temperatura que en la entrada del sistema, temperatura que es inferior en relación a la fruta ya que posee un coeficiente de conductividad térmica inferior ( $k_a=0,024[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}]$  según Anexo D), lo que implica una mayor resistencia.

Del mismo modo que para el perfil de velocidad, se puede obtener el perfil en una caja, como muestra la Figura 36. Donde se puede apreciar mejor la diferencia entre la temperatura del aire y la fruta, donde existe una mayor temperatura en la fruta, la cual también depende del metabolismo que ésta posee (sección 3.4), siendo un factor para que la temperatura sea mayor, además del coeficiente de conductividad térmica que es mayor ( $k=0,65[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ ). Además, se observa que el bloque central posee una menor temperatura, lo que se debe a que se encuentra posicionado frente a los agujeros de mayor tamaño, por lo que ingresa un mayor flujo másico de aire, como se muestra en la sección 5.3.

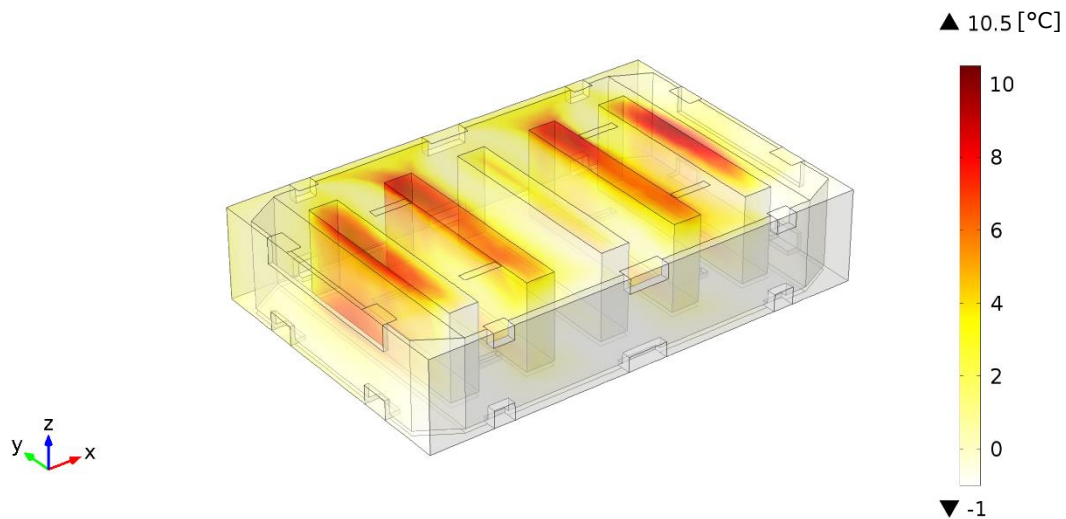


Figura 36: Perfil de temperatura a  $t=1[\text{h}]$  de la caja central del sistema lateral de la Caja 1.

#### 5.4.2. Caja 2

Se pueden obtener las mismas figuras para la *Caja 2*, las que se presentan a continuación.

##### **Perfil de velocidad**

Dado que se asumen las ecuaciones de fluidodinámica en estado estacionario, se obtiene una única representación de la trayectoria del fluido. En la Figura 37, se observa el perfil de velocidad en el sistema.

A diferencia de la *Caja 1*, en esta figura se observa un campo de velocidad inferior, esto debido a que la velocidad del flujo de entrada es inferior,  $0,27[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ , mientras que en la *Caja 1* es  $0,35[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ . Además, como se describe en el Anexo E, este sistema es menos turbulento.

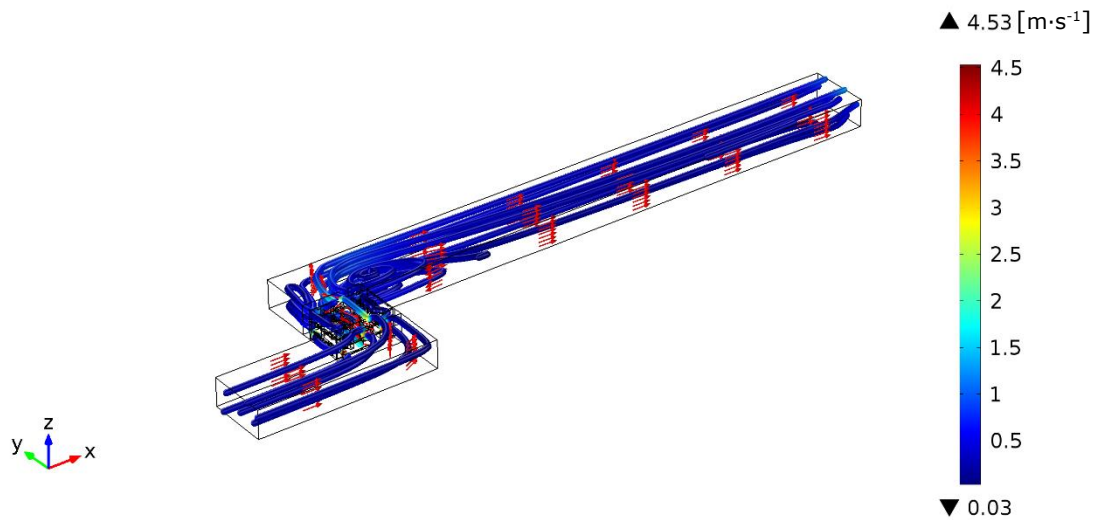


Figura 37: Perfil de velocidad del sistema lateral en la Caja 2.

Por otro lado, se obtiene una imagen del perfil en una caja, lo que se observa en la Figura 38 y Figura 39, donde la primera corresponde a la caja central del sistema lateral, y la segunda imagen es del sistema cabezal. En estas figuras, se observa algo similar que en la *Caja 1*, pues en algunas zonas se aprecia mayor campo de velocidad, que es cercano a los agujeros de las cajas, ya que se reduce el área transversal y por lo tanto la velocidad aumenta. Además, se observa una reducción de velocidad en el sistema cabezal, lo que se debe a la pérdida de carga, lo que provoca una reducción en la turbulencia de 15%, mostrando una trayectoria más lineal.

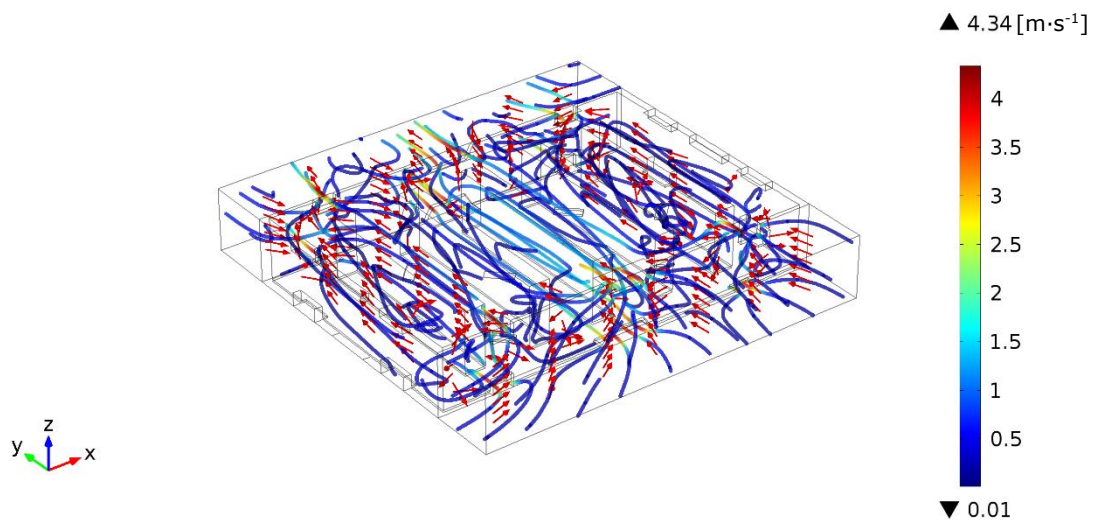


Figura 38: Perfil de velocidad en de la caja central en el sistema lateral en la Caja 2.

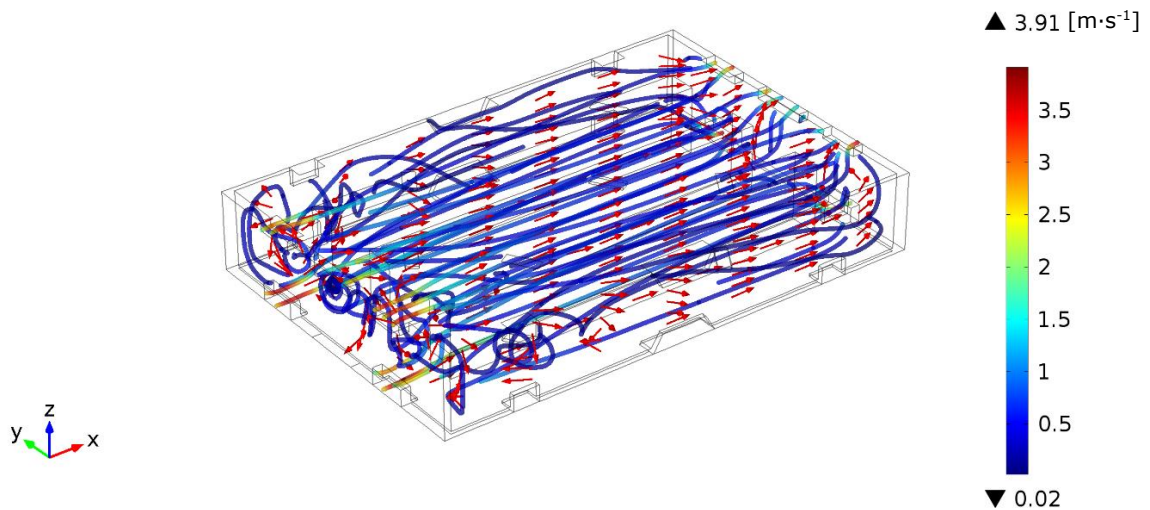


Figura 39: Perfil de velocidad en de la caja central en el sistema cabezal en la Caja 2.

### Perfil de temperatura

Se obtiene el perfil de temperatura del sistema y de una caja, correspondiente al  $t=1[h]$ , lo que se muestra en la Figura 40 y Figura 41.

La fruta presenta mayor temperatura en relación con el aire, debido a que el aire tiene un menor coeficiente de conductividad térmica y por ende una mayor resistencia. Además, la fruta tiene un metabolismo que impide una mayor velocidad de enfriamiento en estas condiciones de operación.

Por otro lado, el bloque central posee una menor temperatura, lo que se debe a que se encuentra posicionado frente a los agujeros de mayor tamaño, por lo que ingresa un mayor flujo másico de aire, como se muestra en la sección 5.3.

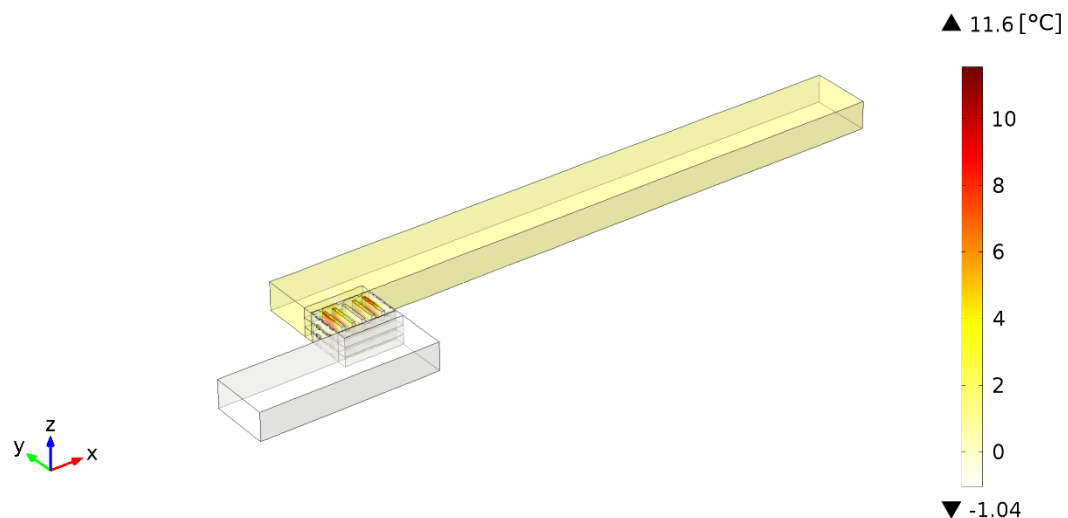


Figura 40: Perfil de temperatura en  $[^{\circ}C]$  a  $t=1[h]$  del sistema lateral de la Caja 2.

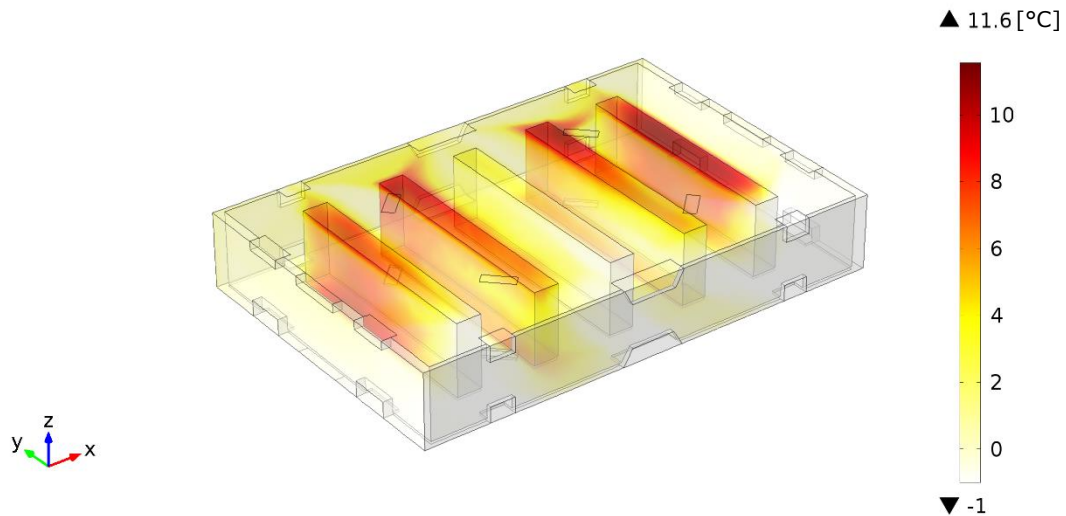


Figura 41: Perfil de temperatura en [°C] a  $t=1[h]$  de la caja central del sistema lateral de la Caja 2.

## 5.5. BALANCE DE ENERGÍA

Se efectúa un balance simple de energía (Anexo I), como se menciona en la sección 4.9, por lo que se obtiene en primer lugar el calor neto que transfiere la fruta de acuerdo a los datos experimentales ( $Q_{exp}$ ) y el modelo ( $Q_m$ ), obteniendo los resultados de la Tabla 15.

Tabla 15: Calor transferido entre aire y fruta de los datos experimentales y calor entregado por la simulación del modelo, para ambas cajas.

| Parámetro | $Q_{exp} [W]$ | $Q_m [W]$ | $\Delta Q [\%]$ |
|-----------|---------------|-----------|-----------------|
| Caja 1 L  | 13,806        | 14,191    | 2,71            |
| Caja 1 C  | 13,609        | 13,982    | 2,67            |
| Caja 2 L  | 11,836        | 12,353    | 4,19            |
| Caja 2 C  | 12,806        | 13,149    | 2,61            |

Con estos resultados, se puede obtener la temperatura del flujo de aire luego de efectuar el intercambio de energía ( $T_{af}$ ), para lo cual se realiza un balance de energía como se menciona en la sección 4.9, con lo que se obtiene la temperatura para los datos experimentales ( $T_{af\_exp}$ ) y el modelo ( $T_{af\_m}$ ), lo que se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16: Temperatura del flujo de aire luego del intercambio de calor, en ambas cajas.

| Parámetro | $T_{af\_exp}$ [°C] | $T_{af\_m}$ [°C] |
|-----------|--------------------|------------------|
| Caja 1 L  | -0,869             | -0,865           |
| Caja 1 C  | -0,871             | -0,867           |
| Caja 2 L  | -0,811             | -0,803           |
| Caja 2 C  | -0,796             | -0,799           |

Estos resultados, muestran que en el modelo se realiza un mayor intercambio de energía que el proceso experimental, lo que coincide con los resultados que se obtienen en la sección 5.2 de la validación del modelo, puede ser a que se está despreciando el intercambio de energía entre el sistema y el exterior, además del supuesto de la ecuación de calor de la fruta. Este mayor intercambio de calor provoca que la temperatura final del flujo de aire sea mayor en el modelo. Pese a presentar esta diferencia, no es significativa, como también se muestra en los resultados de la sección 5.2, siendo la mayor diferencia en el calor neto de 4,19%, que es para la *Caja 2* en el sistema lateral.

## 5.6. ANÁLISIS DEL SISTEMA SIN INVERSIÓN

### 5.6.1. Caja 1

Se simula el modelo sin realizar el proceso de inversión y se compara con el modelo con inversión, lo que se muestra en la Tabla 17 y Figura 42.

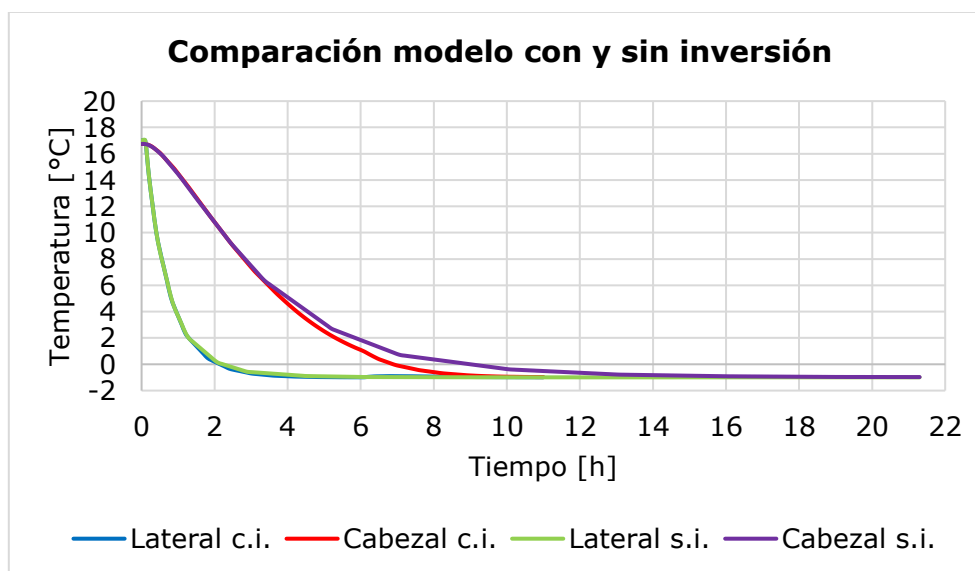


Figura 42: Comparación del modelo con inversión (c.i.) y sin inversión (s.i.) en Caja 1.

Tabla 17: Tiempo comparativo de los modelos con y sin inversión en Caja 1 en alcanzar  $-0,972[^\circ\text{C}]$ , temperatura final del proceso de enfriamiento.

| Parámetro           | Con inversión | Sin inversión  |
|---------------------|---------------|----------------|
| $t_{enf}[\text{h}]$ | 11            | 21,3 (+93,63%) |

En estos resultados, se puede decir que el proceso de inversión cumple una función importante en el proceso, pues el tiempo de enfriamiento sin inversión es un 93,63% mayor. Lo que se debe a que el aire ingresa solo por lo laterales, provocando un intercambio de energía antes de ingresar a las cajas que están ordenadas por los cabezales y de este modo se reduce la velocidad de enfriamiento de esta zona.

### 5.6.2. Caja 2

Se realiza el mismo análisis para la Caja 2. Los resultados se muestran en la Figura 43 y Tabla 18.

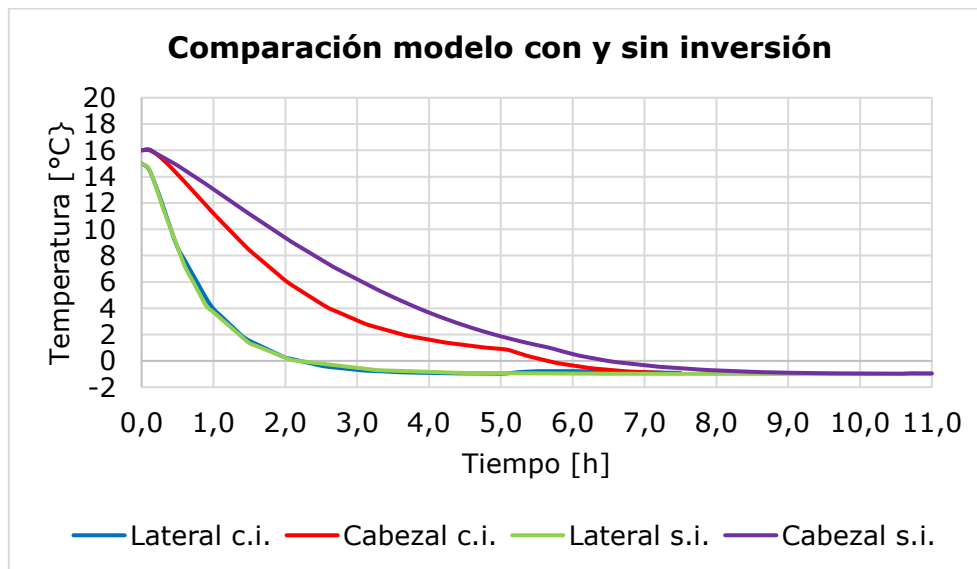


Figura 43: Comparación del modelo con inversión (c.i.) y sin inversión (s.i.) en Caja 2.

Tabla 18: Tiempo comparativo de los modelos con y sin inversión en Caja 2 en alcanzar  $-0,917[^\circ\text{C}]$ , temperatura final del proceso de enfriamiento.

| Parámetro           | Con inversión | Sin inversión |
|---------------------|---------------|---------------|
| $t_{enf}[\text{h}]$ | 7,5           | 11 (+46,67%)  |



Para esta caja, al igual que en la anterior, se obtienen mejores resultados usando el modelo con inversión, ya que aumenta en 46,67% al no utilizar inversión, provocando el mayor cambio en el sistema cabezal.

## 5.7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

### 5.7.1. Caja 1

Se estudia la caja con cambios en el área de sus orificios, manteniendo la posición y geometría, donde aumenta y se reduce el tamaño en 50%, además de un análisis extra con el área aumentada en 25%, con lo que se obtienen los perfiles de temperaturas, presentadas en la Figura 44.

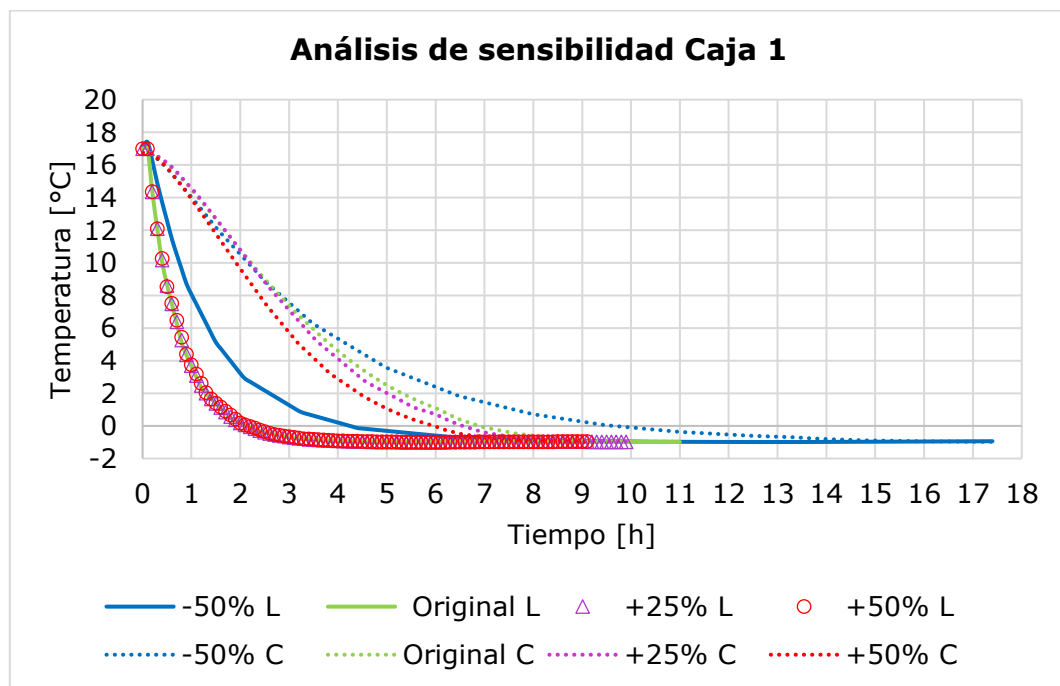


Figura 44: Análisis de sensibilidad en Caja 1. -50% representa a la caja con menos área y +50% el diseño con más área.

En la imagen, cada color representa a una caja, azul es la caja a la que se le reduce área, verde es el diseño original, morado es el diseño con 25% más de área y el rojo es el diseño con 50% más de área. La línea continua representa la zona que se enfría por los laterales, a excepción de la curva con triángulos que representa el lateral de +25% y la curva con círculos de +50%, debido a que están sobre la línea continua verde, mientras que la línea punteada corresponde a la zona que se enfría por los cabezales.



En la Tabla 19, se observan los datos que se pueden extraer de la imagen, como el tiempo de inversión ( $t_{inv}$ ) y tiempo total de enfriamiento ( $t_{enf}$ ). Además de la diferencia en el costo por ciclo de enfriamiento que se produce ( $\Delta Costo_{enf} \cdot ciclo^{-1}$ ), y la resistencia mecánica para cada diseño (BCT), donde el BCT mínimo a cumplir es 3.000[lb<sub>f</sub>] [7].

Tabla 19: Resultados del analisis de sensibilidad para la Caja 1.

| Parámetro                                | -50%        | Original | +25%        | +50%        |
|--|-------------|----------|-------------|-------------|
| $t_{inv}$ [h]                            | 13,3        | 6        | 6           | 5,9         |
| $t_{enf}$ [h]                            | 17,4        | 11       | 9,9         | 9,1         |
| $\Delta t$ [h]                           | +6,4 (+58%) | --       | -1,1 (-10%) | -1,9 (-17%) |
| $\frac{\Delta Costo_{enf}}{ciclo}$ [USD] | +303 (+58%) | --       | -52 (-10%)  | -90 (-17%)  |
| BCT[lb <sub>f</sub> ]                    | 3.850       | 3.551    | 3.370       | 3.020       |

Dado estos datos y lo que se observa de la Figura 44 se puede decir que al aumentar el área de ventilación en 25% se reduce el tiempo y costo de enfriamiento en 10%, mientras que al aumentar en 50% se reduce en 17%. Por otro lado, al reducir el área de ventilación, el tiempo y costo de enfriamiento aumenta en 58%.

El porcentaje de área se relaciona con el tiempo de enfriamiento, debido a que el fluido se encuentra con mayor o menor resistencia para fluir libremente. Es decir, al tener menos área de ventilación, se aumenta el material de la caja, lo que provoca un aumento en el movimiento convectivo, que corresponde a la fuerza que ejerce el fluido sobre un sólido, por lo que existe una mayor resistencia antes que el fluido llegue a la fruta, aumentando la pérdida de carga en 47%. Además, esto provoca un mayor intercambio de calor entre el aire y la caja, por lo que, la temperatura del flujo de aire es mayor al tomar contacto con la uva. Mientras que al aumentar el área de ventilación ocurre lo inverso, ya que la cantidad de material de la caja es inferior, por lo que la pérdida de carga es inferior respecto al diseño original, reduciendo en 5% y 8% para el diseño de 25% y 50% más de área, respectivamente.

Es importante notar que la curva correspondiente al lateral del diseño aumentado en 25% y 50% se asemeja a la curva del diseño original, lo que se corrobora en el tiempo en que se produce la inversión, el cual se reduce en 0% y 1,67%, respectivamente. Dado esto, se sugiere que el diseño del

lateral de esta caja está cerca de un punto de saturación, ya que los resultados obtenidos muestran una reducción de tiempo en la caja con 50% más de área, donde la diferencia es mínima respecto al porcentaje que se ha aumentado de área.

El BCT tiene un comportamiento esperable, pues al disminuir el área de ventilación, el BCT aumenta, mientras que, al aumentar el área de ventilación, la resistencia disminuye por reducir la cantidad de material. El resultado para el caso de aumentar en 50%, está cerca del mínimo que se necesita para el proceso, 0,67% sobre el mínimo, por lo que no se considera factible generar este diseño, pues existen distintos factores durante el proceso de producción que puede generar un cambio en el cartón corrugado, y de este modo afectar el BCT de manera positiva o negativa.

Dado lo anterior, se genera una propuesta de diseño, la que consiste en desarrollar una caja donde los laterales corresponden al diseño original, y los cabezales al diseño con mayor área de ventilación, con lo que se busca mejorar la transferencia de calor sin afectar en gran medida la resistencia mecánica de la caja.

### **Propuesta**

Se desarrolla el diseño propuesto y se procede a simular el modelo, obteniendo resultados que se muestran en la Figura 45 y Tabla 20.

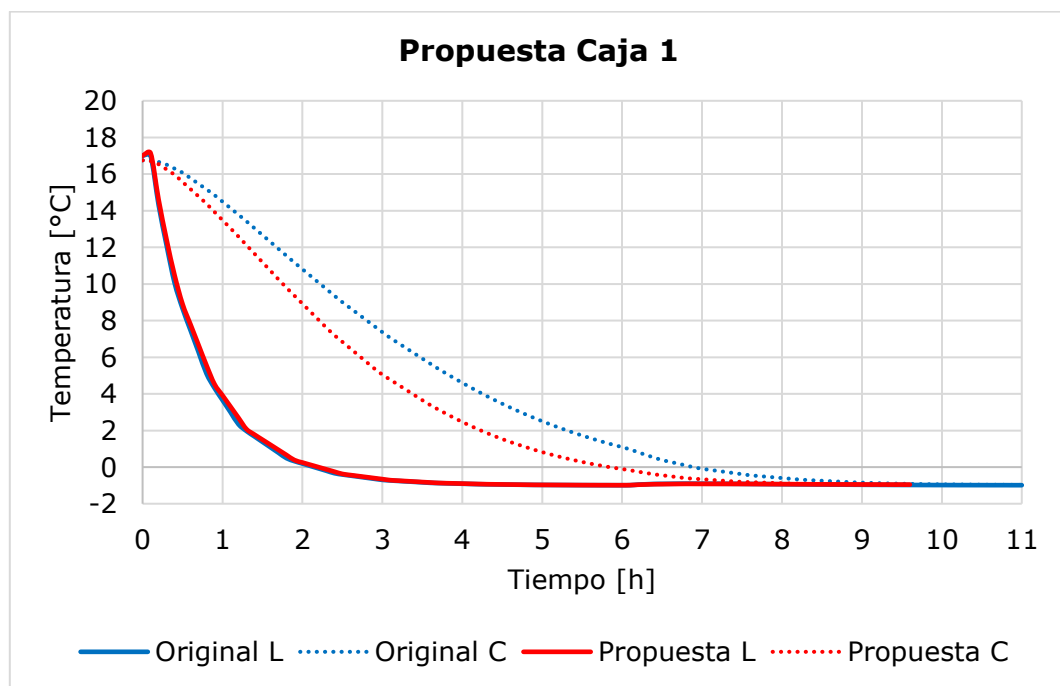


Figura 45: Comparación de curvas del diseño original y propuesto de la Caja 1.

Tabla 20: Resultados de analisis para el diseño propuesto de la Caja 1.

| Parámetro                                | Original | Propuesta   |
|--|----------|-------------|
| $t_{inv}$ [h]                            | 6        | 6           |
| $t_{enf}$ [h]                            | 11       | 9,6         |
| $\Delta t$ [h]                           | --       | -1,4 (-13%) |
| $\frac{\Delta Costo_{enf}}{ciclo}$ [USD] | --       | -66 (-13%)  |
| BCT[lb <sub>f</sub> ]                    | 3.551    | 3.452       |

Se obtiene que el tiempo de enfriamiento se reduce en un 13%, lo que permite un ahorro en costos del proceso en 13%, siendo una reducción inferior al comparar con el diseño de mayor área en lateral y cabezal, que lograba una reducción de 17%. Pero, esto se compensa con el resultado del BCT, pues la propuesta está un 15% por sobre el BCT mínimo (3.000[lb<sub>f</sub>]), lo que es superior al otro diseño que es 0,67% mayor al mínimo requerido, lo que permite considerar la propuesta como un diseño factible.

Además, considerando que la Exportadora Seedless Valley procesa aproximadamente  $1,12 \cdot 10^6$  cajas al año, se puede obtener un ahorro aproximado de MUS\$93 al año en costos de enfriamiento.

### 5.7.2. Caja 2

Se realiza un estudio similar a lo presentado para la *Caja 1*, pero en este caso la variación de área es aumentar y reducir en 40% el área de ventilación, además de un análisis adicional de 25% más de área, dado por los planos de CMPC. Los resultados se pueden observar en la Figura 46 y Tabla 21, donde el BCT mínimo a cumplir es 2.850[lb<sub>f</sub>] [7].

En la imagen, cada color representa a una caja, azul es la caja a la que se le reduce área, verde es el diseño original, morado es el diseño con 25% más de área y el rojo es el diseño con 50% más de área. La línea continua representa la zona que se enfría por los laterales, mientras que la línea punteada corresponde a la zona que se enfría por los cabezales.

En los resultados se observa que las curvas de los laterales se asemejan entre sí, pero la caja con menos área tarda mayor tiempo en alcanzar la temperatura deseada para realizar la inversión, mientras que los diseños con mayor área realizan la inversión al mismo instante que en el diseño original. Esto da indicios que el diseño del lateral de la caja alcanza un punto de

saturación, por lo que, al aumentar el área no se logra un cambio en el tiempo de enfriamiento hasta la inversión.

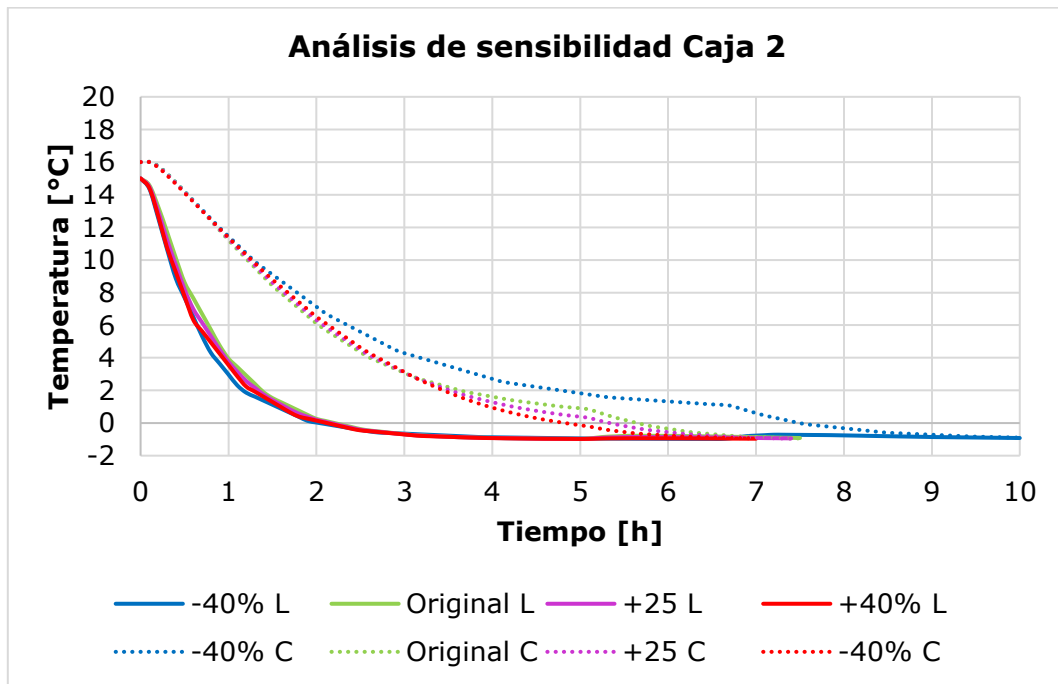


Figura 46: Análisis de sensibilidad en Caja 2. -40% representa a la caja con menos área y +40% el diseño con más área.

Tabla 21: Resultados del análisis de sensibilidad para la Caja 2.

| Parámetro                                | -40%        | Original | +25%       | +40%      |
|--|-------------|----------|------------|-----------|
| $t_{inv}$ [h]                            | 6,6         | 5        | 5          | 5         |
| $t_{enf}$ [h]                            | 10,4        | 7,5      | 7,4        | 7         |
| $\Delta t$ [h]                           | +2,9 (+39%) | --       | -0,1 (-1%) | -0,5 (7%) |
| $\frac{\Delta Costo_{enf}}{ciclo}$ [USD] | +289 (+39%) | --       | -7 (-1%)   | -50 (-7%) |
| BCT[ $lb_f$ ]                            | 3.154       | 3.004    | 2.656      | 2.415     |

En las curvas de los cabezales se distingue una mayor diferencia y es lo que provoca los cambios en el tiempo de enfriamiento. Así, al reducir el tamaño de las aberturas el tiempo de enfriamiento aumenta en un 39%, al igual que los costos. Por otro lado, al aumentar el área de ventilación en 25%, el costo y tiempo de enfriamiento se reduce en 1%, mientras que al aumentar en 40% el área, se reduce en 7% el tiempo y costo, diferencias pequeñas si se comparan con el resultado de la *Caja 1* al modificar el área, lo que puede deberse a que el área de ventilación de la *Caja 2* está cercano a un punto de saturación en el cabezal y lateral.

La relación entre el área y tiempo de enfriamiento se debe a lo mencionado en 5.7.1, donde se afecta el movimiento convectivo del fluido al cambiar el área del cartón y afecta la pérdida de carga. De este modo, al tener menos área de ventilación se aumenta la pérdida de carga en 12%. Mientras que, al aumentar el área de ventilación se reduce la pérdida de carga en 1% y 2% para el diseño de 25% y 40% más de área, respectivamente. Donde se observa que estos dos últimos resultados coinciden con la diferencia de tiempo que se produce al aumentar el área, la cual también es de bajo porcentaje respecto al diseño original.

Al analizar la resistencia mecánica de las cajas, se aprecia que el BCT aumenta al reducir el área de ventilación y se reduce al aumentar el área, lo que se debe a la diferencia de cartón presente en cada diseño. Además, se aprecia que el BCT del diseño con 40% más de área se encuentra por debajo del BCT mínimo (2.850[lb<sub>f</sub>]), 15,26% menos. Dado esto, es que se realiza una propuesta similar que para la *Caja 1*, donde se mantiene el lateral del diseño original y el cabezal del diseño con mayor área de ventilación.

### **Propuesta**

Se desarrolla el diseño propuesto y se procede a simular el modelo, obteniendo resultados que se muestran en la Figura 47 y Tabla 22.

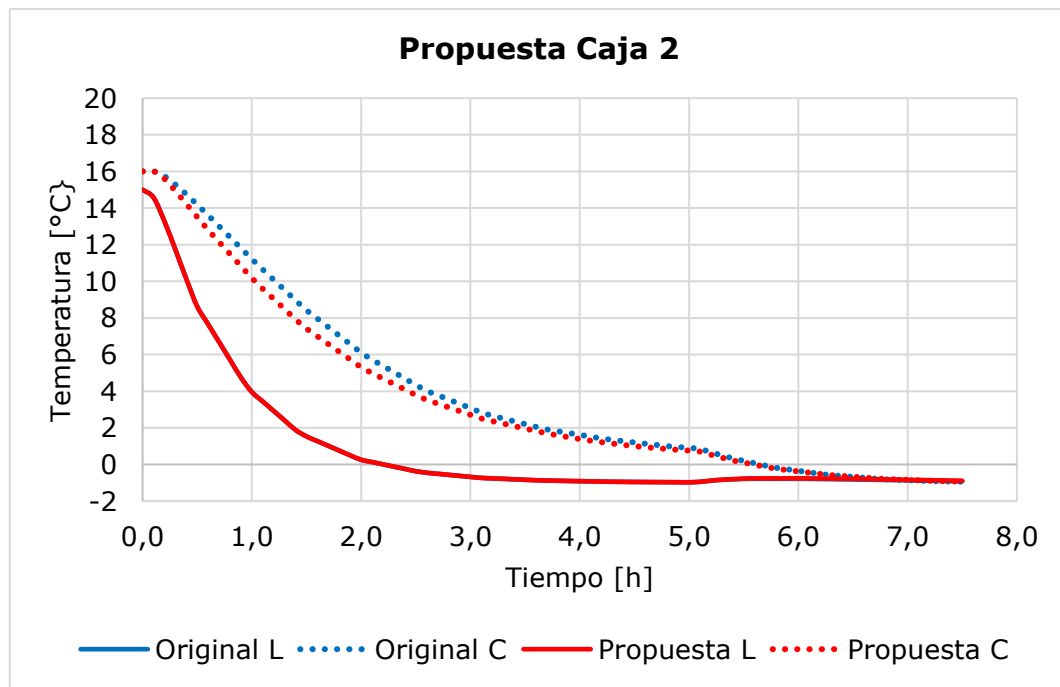


Figura 47: Comparación de curvas del diseño original y propuesto de la Caja 2.

Tabla 22: Resultados de analisis para el diseño propuesto de la Caja 2.

| <b>Parámetro</b>                         | <b>Original</b> | <b>Propuesta</b> |
|--|-----------------|------------------|
| <i>tiempo</i> [h]                        | 7,5             | 7,5              |
| $\Delta t$ [h]                           | --              | 0                |
| $\frac{\Delta Costo_{enf}}{ciclo}$ [USD] | --              | 0                |
| BCT[ $lb_f$ ]                            | 3.004           | 2.688            |

Los resultados muestran que el tiempo de enfriamiento no se logra reducir, así que no se produce un cambio en el costo de enfriamiento, lo que indicaría que el área de ventilación de diseño actual se encuentra en un punto de saturación, ya que no se logran cambios en el tiempo de enfriamiento al aumentar el área de ventilación.

Respecto al resultado del BCT, este se encuentra por debajo del BCT mínimo, en 5,68%, por lo que no es recomendable usar este diseño.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se estudió la fenomenología presente en el proceso de enfriamiento de las frutas, en específico, se analizó el efecto del área de ventilación de 2 cajas de cartón corrugado en el tiempo de enfriamiento, para lo cual se estudió la uva tipo Thompson Seedless en los túneles de frío de la Exportadora Seedless Valley, uno de los principales clientes de Envases Impresos dedicado a la exportación de uva.

De la exportadora, se obtuvieron datos experimentales de velocidad, temperatura y presión durante el proceso de enfriamiento, lo que permitió el desarrollo e implementación de un modelo matemático de fluidodinámica y transferencia de calor en el software de fluidodinámica COMSOL Multiphysics.

Se realizó un estudio del calor que emite la uva tipo Thomson Seedless cosechada en Chile, ya que es un elemento importante dentro del sistema de enfriamiento, de lo cual se obtuvo una ecuación representativa del calor emitido a distintas temperaturas.

Se realizaron simplificaciones en la geometría del sistema, reduciendo el número de cajas a 3, y la fruta quedó representada con 5 bloques en el sistema lateral y 3 bloques para el sistema cabezal. Además, las ecuaciones de fluidodinámica se aproximaron al estado estacionario, supuestos que se validaron satisfactoriamente al comparar el perfil de temperatura obtenido por la simulación con los datos experimentales, donde el coeficiente de determinación más bajo resultó en  $R^2=0,95$ .

Se determinó que los agujeros cumplen con su objetivo, que es permitir el ingreso de aire, ya que el flujo másico por unidad de área es similar para cada agujero, donde se excluyen los orificios de la base de cada caja, ya que estos no tienen incidencia en el proceso al presentar un flujo prácticamente insignificante,  $6 \cdot 10^{-5}[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$  aproximadamente.

Se analizó un sistema donde no existe el proceso de inversión, con lo que se obtuvieron tiempos de enfriamiento superiores respecto al uso de la inversión, aumentando en 93,63% en la *Caja 1* y 46,67% en la *Caja 2*. De lo que se concluye que, el proceso de inversión y la configuración utilizada por la Exportadora Seedless Valley son adecuadas para cumplir con el objetivo, pues le permite reducir el tiempo de enfriamiento, y así los gastos operacionales que esto conlleva.

Se realizó un análisis de sensibilidad, donde se estudió el efecto del porcentaje del área de ventilación en el tiempo de enfriamiento, BCT y costo

de enfriamiento. De lo que se concluye que, al aumentar el área, se reduce el tiempo, BCT y costo; mientras que al reducir el tamaño de los agujeros ocurre lo contrario. Además, se determina que existe un punto de saturación en el diseño de las cajas, pues al aumentar en 25% y 50% el área de ventilación en el lateral de la *Caja 1*, no existe reducción o solo se disminuye en 0,1[h] en la primera etapa de enfriamiento, respectivamente. Mientras que en la *Caja 2*, al aumentar en 25% y 40% el lateral, no se logra reducir el tiempo de enfriamiento hasta la inversión. Además, se puede concluir que la resistencia mecánica es importante de evaluar, ya que una caja que permite un enfriamiento rápido, pero tiene bajo BCT, no puede cumplir con el objetivo de almacenamiento durante todo el tiempo de almacenamiento, pues colapsa antes de llegar a destino.

Para la *Caja 1*, se recomienda un nuevo diseño, donde se utiliza el lateral del diseño original y el cabezal del diseño con +50% de área, ya que reduce el tiempo y costo de enfriamiento en un 13%. Además, se obtiene un resultado de BCT favorable, 15% superior al BCT mínimo (3.000[lb<sub>f</sub>]), por lo que al utilizar esta caja, la Exportadora Seedless Valley podría ahorrar MUS\$93 al año.

Para la *Caja 2*, se recomienda mantener el actual diseño, ya que no se observan mejoras en el tiempo de enfriamiento al cambiar el diseño, y si esto ocurre, la resistencia mecánica es inferior al BCT mínimo.

Dado lo anterior, se puede decir que el modelamiento matemático aplicado permite comprender y mejorar los procesos industriales, el cual es extensible a procesos similares y a el procesamiento de otras frutas y vegetales. Ante lo cual, se recomienda estudiar los diferentes diseños de cajas y frutas de los clientes de CMPC, donde se debe seguir una metodología similar a la descrita en el informe, que involucra tomar datos experimentales en el proceso de enfriamiento y estudiar la fruta de interés.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Empresas CMPC S.A., "Empresas CMPC S.A. - Quiénes somos?", 2018. [En línea]. Disponible en: <http://ir.empresascmpc.cl/Spanish/Descripcion-General/Quines-somos/default.aspx>. [Accedido: 25-oct-2018].
- [2] CMPC, "CMPC - Negocios", 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.cmpc.com/nosotros/negocios/>. [Accedido: 25-oct-2018].
- [3] CMPC, "Envases Impresos", 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.envases.cl/compania/organizacion/>. [Accedido: 13-nov-2017].
- [4] Henkel Adhesives Latinoamérica, "Cartón Corrugado: seguridad estructural para el transporte y almacenamiento de alimentos", 2014. [En línea]. Disponible en: [http://la.henkel-adhesives.com/2014-6845\\_cartn-corrugado-seguridad-estructural-para-el-transporte-y-6880\\_MXE\\_HTML.htm](http://la.henkel-adhesives.com/2014-6845_cartn-corrugado-seguridad-estructural-para-el-transporte-y-6880_MXE_HTML.htm). [Accedido: 25-oct-2018].
- [5] Área de Desarrollo e Ingeniería CMPC, "Cartón corrugado y resistencia". Santiago, 2018.
- [6] Caja de cartón, "Cómo escoger entre cajas de cartón simple y doble", 2014. [En línea]. Disponible en: <http://blog.cajadecarton.es/diferencia-carton-simple-doble/>. [Accedido: 25-oct-2018].
- [7] Área de Desarrollo e Ingeniería, "Diseños de cajas". Envases Impresos, Santiago, 2018.
- [8] StickPNG, "Caja de Cartón Cerrada PNG transparente", 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.stickpng.com/es/img/objetos/cajas/caja-de-carton-cerrada>. [Accedido: 25-oct-2018].
- [9] M. Shafiur Rahman, *Handbook of Food Preservation*, Segunda., vol. 35, nº 4. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Gr, 2002.
- [10] T. M. Berry, T. Defraeye, B. M. Nicolaï, y U. L. Opara, "Multiparameter Analysis of Cooling Efficiency of Ventilated Fruit Cartons using CFD: Impact of Vent Hole Design and Internal Packaging", *Food Bioprocess Technol.*, vol. 9, nº 9, pp. 1481–1493, 2016.
- [11] B. Defilippi, "Datos para ecuación de calor de la uva Thompson Seedless producida en Chile". INIA, Santiago, 2018.
- [12] M. A. Delele, M. E. K. Ngcobo, S. T. Getahun, L. Chen, J. Mellmann, y U. L. Opara, "Studying airflow and heat transfer characteristics of a horticultural produce packaging system using a 3-D CFD model. Part I: Model development and validation", *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 86, pp. 536–545, 2013.
- [13] M. A. Delele, M. E. K. Ngcobo, S. T. Getahun, L. Chen, J. Mellmann, y U. L. Opara, "Studying airflow and heat transfer characteristics of a horticultural produce packaging system using a 3-D CFD model. Part II: Effect of package design", *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 86, pp. 546–555, 2013.
- [14] S. Getahun, A. Ambaw, M. Delele, C. J. Meyer, y U. L. Opara, "Analysis of airflow and heat transfer inside fruit packed refrigerated shipping container:

- Part I – Model development and validation”, *J. Food Eng.*, vol. 203, pp. 58–68, 2017.
- [15] S. Getahun, A. Ambaw, M. Delele, C. J. Meyer, y U. L. Opara, “Analysis of airflow and heat transfer inside fruit packed refrigerated shipping container: Part II - Evaluation of apple packaging design and vertical flow resistance”, *J. Food Eng.*, vol. 203, pp. 83–94, 2017.
- [16] J. W. Han, J. P. Qian, C. J. Zhao, X. T. Yang, y B. L. Fan, “Mathematical modelling of cooling efficiency of ventilated packaging: Integral performance evaluation”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 111, pp. 386–397, 2017.
- [17] J. Dehghannya, M. Ngadi, y C. Vigneault, “Simultaneous aerodynamic and thermal analysis during cooling of stacked spheres inside ventilated packages”, *Chem. Eng. Technol.*, vol. 31, nº 11, pp. 1651–1659, 2008.
- [18] J. Dehghannya, M. Ngadi, y C. Vigneault, “Mathematical modeling of airflow and heat transfer during forced convection cooling of produce considering various package vent areas”, *Food Control*, vol. 22, nº 8, pp. 1393–1399, 2011.
- [19] J. Dehghannya, M. Ngadi, y C. Vigneault, “Mathematical Modeling Procedures for Airflow, Heat and Mass Transfer During Forced Convection Cooling of Produce: A Review”, *Food Eng. Rev.*, vol. 2, nº 4, pp. 227–243, 2010.
- [20] T. Fadiji, C. Coetzee, y U. L. Opara, “Compression strength of ventilated corrugated paperboard packages: Numerical modelling, experimental validation and effects of vent geometric design”, *Biosyst. Eng.*, vol. 151, pp. 231–247, 2016.
- [21] A. Pedrozo-Acuña, “Sobre el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes con el promedio de Reynolds en el campo de la ingeniería de costas”, *Tecnol. y ciencias del agua*, vol. 2, nº 2, pp. 51–67, 2011.
- [22] R. Bird, W. Stewart, y E. Lightfoot, *Fenómenos de Transporte*, Segunda. Mexico, 2006.
- [23] O. Azpitarte, “Análisis del modelo de dos fluidos en flujo bifásico totalmente desarrollado”, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, 2003.
- [24] C. y S. A. Asociación de corrugadores del Caribe, “Métodos e Instrumentos de Prueba para el Cartón Corrugado”, *Capacitación*. [En línea]. Disponible en: [https://www.corrugando.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=464:metodos-e-instrumentos-de-prueba-para-el-carton-corrugado&catid=37:edicion-34&Itemid=18](https://www.corrugando.com/index.php?option=com_content&view=article&id=464:metodos-e-instrumentos-de-prueba-para-el-carton-corrugado&catid=37:edicion-34&Itemid=18). [Accedido: 10-sep-2018].
- [25] ODEPA, “Exportaciones de frutas y hortalizas frescas (fuente SAG)”, *Informe*, 2017. [En línea]. Disponible en: [http://www.odepa.gob.cl/Certificado fitosanitario](http://www.odepa.gob.cl/Certificado_fitosanitario). [Accedido: 16-abr-2018].
- [26] B. Becker, M. Anil, y B. Fricke, *Bulk refrigeration of fruits and vegetables*. Kansas, 1995.
- [27] Santa Elena Grapes, “Misión Santa Elena”. [En línea]. Disponible en: [http://santaelenagrapes.cl/?page\\_id=613](http://santaelenagrapes.cl/?page_id=613). [Accedido: 10-sep-2018].

- [28] Exportadora Seedless Valley, "Túnel de enfriamiento". Buin, 2018.
- [29] Exportadora Seedless Valley, "Propiedades de los plásticos". Buin, 2018.
- [30] ANSYS, "ANSYS Fluent Software", 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>. [Accedido: 25-nov-2018].
- [31] COMSOL, "The COMSOL® Software Product Suite", 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.comsol.com/products>. [Accedido: 25-nov-2018].
- [32] FreeFem, "Introduction - FreeFem++", 2018. [En línea]. Disponible en: <https://doc.freefem.org/>. [Accedido: 25-nov-2018].
- [33] 3 Dasault Systems, "Abaqus Unified FEA", 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/abaqus/>. [Accedido: 03-dic-2018].
- [34] Área de Estudios, "Ventas de cajas para uva". Envases Impresos, Santiago, 2018.
- [35] R. Perry, *Manual del Ingeniero Químico*, Sexta. 1994.

## 8. ANEXOS

### ANEXO A. DESARROLLO DE LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

La conservación de la masa se expresa como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{aumento de materia} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{entrada de materia} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{salida de materia} \end{array} \right\}$$

Lo que corresponde a:

$$\begin{aligned} \Delta x \Delta y \Delta z (\rho|_{t_1} - \rho|_{t_2}) &= (\Delta y \Delta z [(\rho v_x)|_x - (\rho v_x)|_{x+\Delta x}] \\ &\quad + \Delta x \Delta z [(\rho v_y)|_y - (\rho v_y)|_{y+\Delta y}] \\ &\quad + \Delta x \Delta y [(\rho v_z)|_z - (\rho v_z)|_{z+\Delta z}]) (t_1 - t_2) \end{aligned}$$

Al dividir por el factor tiempo  $(t_2 - t_1)$ , la expresión queda como:

$$\begin{aligned} \Rightarrow \Delta x \Delta y \Delta z \frac{(\rho|_{t_1} - \rho|_{t_2})}{(t_2 - t_1)} &= \Delta y \Delta z [(\rho v_x)|_x - (\rho v_x)|_{x+\Delta x}] \\ &\quad + \Delta x \Delta z [(\rho v_y)|_y - (\rho v_y)|_{y+\Delta y}] \\ &\quad + \Delta x \Delta y [(\rho v_z)|_z - (\rho v_z)|_{z+\Delta z}] \end{aligned}$$

Se divide por el volumen  $(\Delta x \Delta y \Delta z)$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{(\rho|_{t_1} - \rho|_{t_2})}{(t_2 - t_1)} &= \frac{[(\rho v_x)|_x - (\rho v_x)|_{x+\Delta x}]}{\Delta x} + \frac{[(\rho v_y)|_y - (\rho v_y)|_{y+\Delta y}]}{\Delta y} + \frac{[(\rho v_z)|_z - (\rho v_z)|_{z+\Delta z}]}{\Delta z} \\ \Rightarrow \frac{\Delta \rho}{\Delta t} &= \frac{-\Delta \rho v_x}{\Delta x} + \frac{-\Delta \rho v_y}{\Delta y} + \frac{-\Delta \rho v_z}{\Delta z} \\ \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} &= - \left( \frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

Al asumir que el fluido es incompresible, se establece que la densidad no varía en el tiempo y espacio, por lo que  $\rho = cte$ .

$$\Rightarrow \rho = -\left(\rho \frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho \frac{\partial v_y}{\partial y} + \rho \frac{\partial v_z}{\partial z}\right)$$

$$\Rightarrow 0 = \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right)$$

Lo que representa la divergencia del vector velocidad.

$$\Rightarrow \nabla \cdot V = 0 \quad (16)$$

## ANEXO B. DESARROLLO DE LA ECUACIÓN DE MOVIMIENTO

La ecuación de movimiento está representada por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad} \\ \text{de incremento} \\ \text{de cantidad} \\ \text{de movimiento} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad} \\ \text{de entrada} \\ \text{de cantidad} \\ \text{de movimiento} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad} \\ \text{de salida} \\ \text{de cantidad} \\ \text{de movimiento} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Fuerza} \\ \text{externa sobre} \\ \text{el fluido} \end{array} \right\}$$

La cantidad de movimiento ( $\phi$ ) es:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{cantidad de} \\ \text{movimiento} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{cantidad} \\ \text{de movimiento} \\ \text{convectivo} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{cantidad} \\ \text{de movimiento} \\ \text{molecular} \end{array} \right\}$$

$$\phi = \rho V V + \pi$$

La cantidad de movimiento convectivo es la fuerza que ejerce el fluido sobre un objeto, que es el producto del flux másico ( $\rho V$ ) y la velocidad ( $V$ ). La cantidad de movimiento molecular es la fuerza que ejerce un fluido sobre otro fluido que está a distinta velocidad, lo que se representa como la suma de la presión ( $P$ ) que actúa de manera normal a la superficie del fluido y los esfuerzos viscosos ( $\tau$ ) que actúan en todos los sentidos, las que se escribe:

$$\pi_{ij} = \delta_{ij} P + \tau_{ij}$$

Donde  $P$  es un escalar y  $\delta$  es el delta de Kronecker que es:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases}$$

De este modo, la presión solo está presente en la diagonal de la matriz, que son las direcciones normales a la superficie del fluido

$$\pi_{ij} = \begin{bmatrix} P + \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & P + \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & P + \tau_{zz} \end{bmatrix}$$

Los esfuerzos viscosos ( $\tau_{ij}$ ), es la combinación lineal de todos los gradientes de velocidad

$$\tau_{ij} = - \sum_k \sum_l \mu_{ijkl} \frac{\partial v_k}{\partial x_l} \quad i, j, k, l \in \{1, 2, 3\}$$

Lo que significa que existen 81 coeficientes de viscosidad, por lo que se asume que no hay fuerza viscosa si el fluido está en rotación pura, por lo que  $\tau_{ij}$  debe ser una combinación simétrica de los gradientes de velocidad. Así se entiende que si se intercambian  $i$  y  $j$ , la combinación de los gradientes permanece sin cambio. De este modo se tiene que las únicas combinaciones lineales son:

$$\left( \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad y \quad \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \delta_{ij}$$

Así, los esfuerzos viscosos quedan como:

$$\tau_{ij} = A \left( \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + B \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \delta_{ij}$$

Al considerar que es un fluido isotrópico, es decir, no tiene una dirección preferida,  $A$  y  $B$  son escalares, por lo que se reduce de 81 coeficientes a 2.

El factor  $A$  se obtiene mediante la simplificación a la ley de viscosidad de Newton, que es:

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{\partial v_x}{\partial y}$$

$$\Rightarrow A = -\mu$$

Por otro lado,  $B$  está determinado por un acuerdo entre los especialistas de dinámica de fluidos:

$$B = \frac{2}{3}\mu - \kappa$$

Así, el esfuerzo viscoso queda

$$\tau_{ij} = -\mu \left( \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \left( \frac{2}{3}\mu - \kappa \right) \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \delta_{ij}$$

Lo que se escribe de manera compacta como

$$\tau = -\mu(\nabla V + (\nabla V)^T) + \left( \frac{2}{3}\mu - \kappa \right) (\nabla \cdot V) \delta$$

$\kappa$  es la viscosidad dilatacional, la que se considera  $\kappa = 0$  cuando es un fluido gaseoso o un líquido incompresible. Dado que el aire es un fluido gaseoso, el esfuerzo viscoso queda expresado como:

$$\tau = -\mu(\nabla V + (\nabla V)^T) + \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot V) \delta$$

Y al referirse a un régimen turbulento,  $\mu$  es reemplazado por  $\mu_{eff}$ :

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$$

Donde  $\mu_t$  corresponde a una viscosidad virtual que incluye el software automáticamente e intensifica la viscosidad laminar. Así, el esfuerzo viscoso queda como:

$$\tau = -\mu_{eff}(\nabla V + (\nabla V)^T) + \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot V) \delta$$

Y la cantidad de movimiento se escribe de manera extendida:

$$\phi = \rho V \otimes V + \tau + \delta P$$

$$\Rightarrow \phi_{ij} = \rho v_i v_j + \tau_{ij} + \delta_{ij} P$$

$$\Rightarrow \phi_{ij} = \rho v_i v_j + \left( -\mu \left( \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \frac{2}{3} \mu_{eff} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \delta_{ij} \right) + \delta_{ij} P$$

Algunos ejemplos de la cantidad de movimiento en distintos ejes son:

$$\phi_{xx} = \rho v_x v_x + \left( -\mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{2}{3} \mu_{eff} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right) + P$$

$$\phi_{xy} = \rho v_x v_y - \mu_{eff} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)$$

Recordando que la ecuación de movimiento es:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad} \\ \text{de incremento} \\ \text{de cantidad} \\ \text{de movimiento} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad} \\ \text{de entrada} \\ \text{de cantidad} \\ \text{de movimiento} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{velocidad} \\ \text{de salida} \\ \text{de cantidad} \\ \text{de movimiento} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Fuerza} \\ \text{externa sobre} \\ \text{el fluido} \end{array} \right\}$$

Para el eje  $x$ , queda como:

$$\begin{aligned} \Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial \rho v_x}{\partial t} &= (\Delta y \Delta z [(\phi_{xx})|_x - (\phi_{xx})|_{x+\Delta x}] \\ &+ \Delta x \Delta z [(\phi_{yx})|_y - (\phi_{yx})|_{y+\Delta y}] \\ &+ \Delta x \Delta y [(\phi_{zx})|_z - (\phi_{zx})|_{z+\Delta z}] \\ &+ \rho g_x \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned}$$

Se divide en  $\Delta x \Delta y \Delta z$  y queda:

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial t} = \frac{[(\phi_{xx})|_x - (\phi_{xx})|_{x+\Delta x}]}{\Delta x} + \frac{[(\phi_{yx})|_y - (\phi_{yx})|_{y+\Delta y}]}{\Delta y} + \frac{[(\phi_{zx})|_z - (\phi_{zx})|_{z+\Delta z}]}{\Delta z} + \rho g_x$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_x = - \left( \frac{\partial}{\partial x} \phi_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} \phi_{yx} + \frac{\partial}{\partial z} \phi_{zx} \right) + \rho g_x$$



De forma análoga para el eje  $y$  y  $z$ , la cantidad de movimiento es:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_y = - \left( \frac{\partial}{\partial x} \phi_{xy} + \frac{\partial}{\partial y} \phi_{yy} + \frac{\partial}{\partial z} \phi_{zy} \right) + \rho g_y$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_z = - \left( \frac{\partial}{\partial x} \phi_{xz} + \frac{\partial}{\partial y} \phi_{yz} + \frac{\partial}{\partial z} \phi_{zz} \right) + \rho g_z$$

Este set de ecuaciones se puede escribir de manera compacta:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_{ii} = -\nabla \cdot \phi_i + \rho g_i$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial t} \rho V = -\nabla \cdot \phi + \rho g$$

Al reemplazar  $\phi$  por su forma compacta:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho V = -\nabla \cdot (\rho V V + \tau + \delta P) + \rho g$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial t} \rho V = -\nabla \cdot \rho V V - \nabla \cdot \tau - \nabla P + \rho g$$

Luego al reemplazar  $\tau$  por su expresión compacta, queda:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho V = -\nabla \cdot \rho V \otimes V + \nabla \cdot \mu_{eff} \left( (\nabla V + (\nabla V)^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot V) \delta \right) - \nabla P + \rho g \quad (17)$$

Está ecuación de manera extendida, es decir para cada eje, queda escrito del siguiente modo al utilizar la ecuación de movimiento que representa el eje  $x$ :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_x = - \left( \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x v_x + \tau_{xx} + P) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y v_x + \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z v_x + \tau_{zx}) \right) + \rho g_x$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial t} \rho v_x = - \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho v_x v_x + \left( -\mu_{eff} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{2}{3} \mu_{eff} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right) + P \right) \right.$$

$$\left. + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho v_x v_x - \mu_{eff} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho v_z v_x - \mu_{eff} \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right) \right) + \rho g_x$$

Y de forma análoga para los ejes  $y$  y  $z$  son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho v_y = & - \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho v_x v_x - \mu_{eff} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \right) \right. \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho v_y v_y + \left( -\mu_{eff} \left( \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \frac{2}{3} \mu_{eff} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right) + P \right) \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho v_z v_y - \mu_{eff} \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \right) \right) + \rho g_y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho v_z = & - \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho v_x v_z - \mu_{eff} \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho v_y v_z - \mu_{eff} \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \right) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho v_z v_z + \left( -\mu_{eff} \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{2}{3} \mu_{eff} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right) + P \right) \right) \\ & + \rho g_z \end{aligned}$$

## ANEXO C. DEDUCCIÓN DE ECUACIÓN DEL CALOR DE LA FRUTA

La ecuación de calor en el sólido tiene un factor que representa el calor que emite la fruta debido a la respiración, lo que hace alusión al  $CO_2$  a cierta temperatura.

Para estudiar esto, del INIA (Instituto de Investigación Agropecuaria) se obtienen datos de la emisión de  $CO_2$  a distintas temperaturas:

Tabla 23: Datos experimentales del  $CO_2$  emitido para la uva a distintas temperaturas

| Temperatura [°C] | Respiración [ml $CO_2$ ·kg <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ] |
|------------------|---|
| 0                | 3,574   |
|                  | 3,873   |
|                  | 3,857   |
| 10               | 4,697   |
|                  | 5,196   |
|                  | 6,332   |
| 20               | 15,07   |
|                  | 19,02   |
|                  | 15,109  |
| 30               | 33,707  |
|                  | 30,003  |
|                  | 36,683  |

Datos que deben usarse  $[\text{mgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}]$ , por lo que se transforma utilizando una densidad de  $\rho_{\text{CO}_2} = 1,977 [\text{mg} \cdot \text{ml}^{-1}]$ .

Se grafican estos datos y se realiza un ajuste (Figura 48) para obtener la ecuación representativa de este tipo de fruta.

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = 0,076T^2 - 0,309T + 7,235$$

$$R^2 = 0,979$$

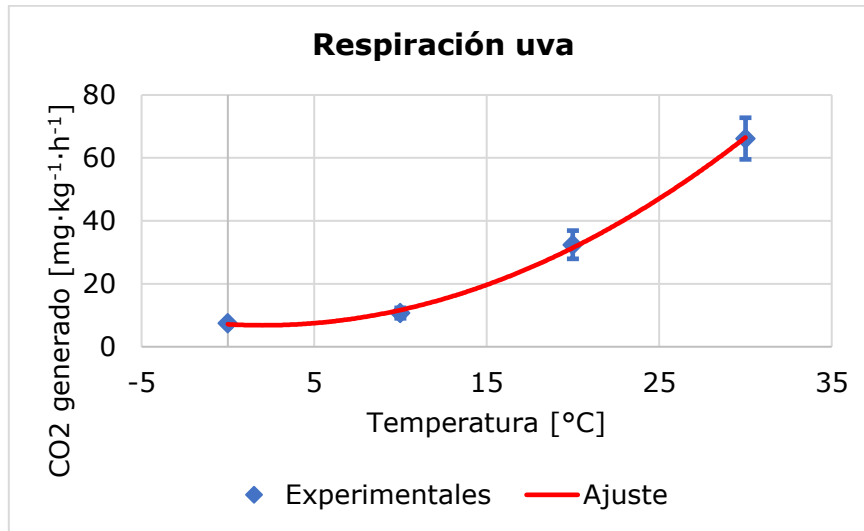
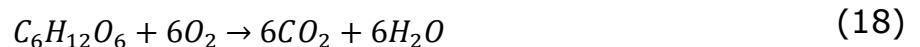


Figura 48: Ajuste de parámetros del  $\text{CO}_2$  emitido por la uva.

Para calcular el calor que emite ( $Q_s$ ) se debe considerar la reacción de glicolisis.



Donde la entalpia de esta reacción es  $\Delta H = 2.813 [\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}]$ , lo que indica que por cada 6 moles de  $\text{CO}_2$  que se generan, se emiten  $2.813 [\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}]$ .

El peso molecular del  $\text{CO}_2$  es  $PM_{\text{CO}_2} = 44,01 [\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}]$ , por lo que la masa que se produce es:

$$6[\text{mol}] \cdot 44,01[\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}] = 264,06[\text{g}]$$

Así, el calor por gramo de  $\text{CO}_2$  es:

$$\Delta H = \frac{2.813[kJ \cdot mol^{-1}]}{264,06[g]} \cdot \frac{1[g]}{1000[mg]} \cdot \frac{1000[J]}{1[kJ]} = 10,653[J \cdot mg^{-1}]$$

De este modo se obtiene que el flujo de calor que se obtiene es:

$$\dot{Q} = \Delta H \cdot \dot{m}_{CO_2}$$

$$\dot{Q} = 10,653[J \cdot mgCO_2^{-1}] \cdot (0,076T^2 - 0,309T + 7,235)[mgCO_2 \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}]$$

$$\dot{Q} = 10,653 \cdot (0,076T^2 - 0,309T + 7,235)[J \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}]$$

La que se asume de la siguiente forma:

$$Q_s[J \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}] \begin{cases} 10,653 \cdot (0,076T^2 - 0,309T + 7,235)[J \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}] & \forall T \geq 0^\circ C \\ 75,906 & \forall T < 0^\circ C \end{cases} \quad (19)$$

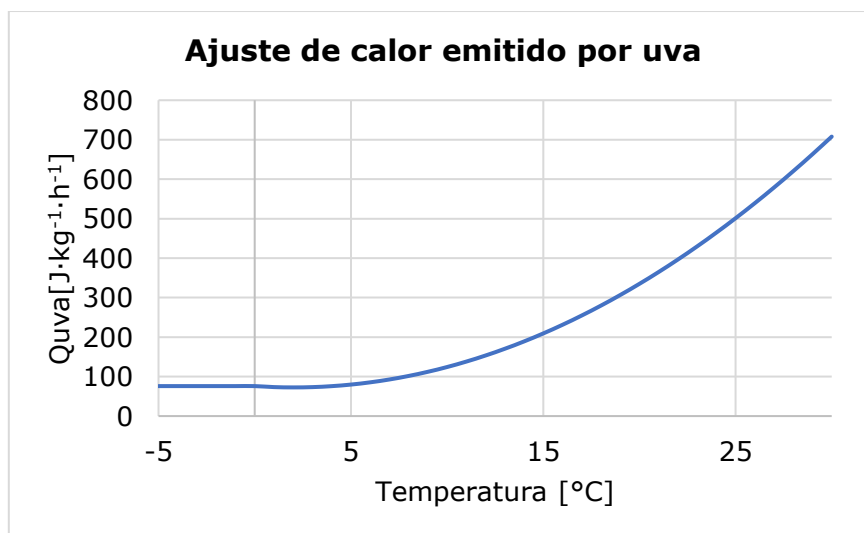


Figura 49: Representación gráfica de la ecuación de calor obtenida.

## ANEXO D. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

### Uva y sistema de embalaje

Para calcular la conductividad térmica de la geometría representativa en la uva, se debe añadir la conductividad del plástico correspondiente.

De esta forma, se utiliza:

$$R = \sum_i \frac{L_i}{A \cdot k_i} \quad (20)$$

Donde  $L_i$  es el espesor de cada elemento [m],  $A$  es el área de transferencia de calor [m<sup>2</sup>] y  $k_i$  es la conductividad térmica de cada elemento.

Las propiedades de cada material se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24: Conductividad térmica de los materiales [11], [29].

| Material  | Conductividad térmica [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] | Espesor [m]          |
|-----------|---|----------------------|
| Uva       | 0,68  | 0,370                |
| Bolsa     | 0,49  | 1·10 <sup>-3</sup>   |
| Clamshell | 0,29  | 4,6·10 <sup>-6</sup> |

De este modo se obtienen los resultados de la Tabla 25.

Tabla 25: Conductividad térmica modificada de los materiales [11], [29].

| Material        | Conductividad térmica [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] |
|-----------------|---|
| Uva + bolsa     | 0,650   |
| Uva + clamshell | 0,637   |

### Aire

Se calcula la conductividad térmica del aire a -1[°C], asumiendo una presión de 1[atm] para lo cual se tiene los datos a -10 y 0[°C] [35].

Tabla 26: Conductividad termica del a aire a distintas temperaturas.

| T[°C] | k[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] |
|-------|--|
| -10   | 0,02288                                |
| 0     | 0,02364                                |

Se realiza un ajuste lineal y se obtiene el dato para -1[°C], el que corresponde a  $k_a=0,023564$

## ANEXO E. CÁLCULO DEL NÚMERO DE REYNOLDS

Se calcula el número de Reynolds para determinar la turbulencia del fluido y de este modo corroborar que las ecuaciones seleccionadas son las adecuadas para representar el problema planteado.

El número de Reynolds ( $Re$ ) está planteado con la ecuación descrita a continuación [35].

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} \quad (21)$$

Donde  $\rho$  corresponde a la densidad del fluido,  $v$  velocidad del fluido,  $D_h$  diámetro hidráulico por donde pasa el flujo del fluido.

Para el diámetro hidráulico se utiliza un diámetro equivalente al ser una sección rectangular y no circular, lo cual se obtiene mediante:

$$D_h = \frac{4(L \cdot W)}{2(L + W)} = \frac{2(L \cdot W)}{L + W} \quad (22)$$

Donde  $L$  corresponde al largo de la sección rectangular y  $W$  al ancho de la sección.

Así se obtiene:

$$D_h = \frac{2(2,13[m] \cdot 0,625[m])}{2,13[m] + 0,625[m]} = 0,966 [m]$$

Además, se obtiene la viscosidad y densidad del aire a  $-1[^\circ\text{C}]$ , asumiendo una presión de  $1[\text{atm}]$  para lo cual se tienen datos a  $-10$  y  $0[^\circ\text{C}]$  [35].

Tabla 27: Propiedades del a aire a distintas temperaturas.

| Temperatura<br>[ $^\circ\text{C}$ ] | Densidad<br>[ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] | Viscosidad<br>[ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ] |
|-------------------------------------|---|---|
| <b>-10</b>                          | 1,341   | $1,680 \cdot 10^{-5}$   |
| <b>0</b>                            | 1,292   | $1,729 \cdot 10^{-5}$   |

Por lo que se realiza un ajuste lineal con estos datos y se obtienen los correspondientes a  $-1[^\circ\text{C}]$ .

Tabla 28: Propiedades del aire ajustadas.

| Propiedad   | Valor                  |
|---|------------------------|
| Densidad [kg·m <sup>-3</sup> ]                    | 1,297                  |
| Viscosidad [kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ] | 1,724·10 <sup>-5</sup> |

Con estos datos se procede a calcular el número de Reynolds del fluido.

$$Re = \frac{1,297[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \cdot 3,5[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \cdot 0,966[\text{m}]}{1,724 \cdot 10^{-5} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]} = 254.359,45$$

Resultado que indica que el fluido es turbulento, por lo que las ecuaciones planteadas son adecuadas para este problema.

### Reynolds otras velocidades

En este caso, como se reduce la sección transversal, se obtienen nuevos  $D_h$ , para la *Caja 1* y *Caja 2* respectivamente

$$D_h = \frac{2(0,625 \cdot 0,369)}{0,625 + 0,369} = 0,464[\text{m}]$$

$$D_h = \frac{2(0,625 \cdot 0,285)}{0,625 + 0,285} = 0,391[\text{m}]$$

Se calcula para  $Re$  para  $v_{in} = 0,35[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

$$Re = \frac{1,297[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \cdot 0,35[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \cdot 0,464[\text{m}]}{1,724 \cdot 10^{-5} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]} = 12.176,68$$

Del mismo modo se calcula para velocidades de 0,1[m·s<sup>-1</sup>], 0,06[m·s<sup>-1</sup>] y 0,01[m·s<sup>-1</sup>] para la *Caja 1* y 0,27[m·s<sup>-1</sup>] para la *Caja 2*.

Tabla 29: Valor de Reynolds a distintas velocidades.

| Velocidad [m·s <sup>-1</sup> ] | Reynolds |
|--------------------------------|----------|
| 0,1                            | 3.479,06 |
| 0,06                           | 2.087,43 |
| 0,01                           | 347,91   |
| 0,27                           | 7.942,24 |

## ANEXO F. SIMPLIFICACIÓN DEL NÚMERO DE CAJAS

Se analiza el porcentaje de flujo másico que ingresa a las cajas al variar el número de cajas en altura (3, 4 y 5 cajas) y el número de filas (1, 2 y 3 filas) con 3 cajas en altura, como se puede observar en las tablas con los resultados.

### Caja 1

En primera instancia se estudia la *Caja 1*, donde los resultados sobre el número de filas en sistema lateral y cabezal se presentan en la Tabla 30 y Tabla 31.

Tabla 30: Distribución del flujo másico al aumentar número de filas en el sistema lateral de la Caja 1.

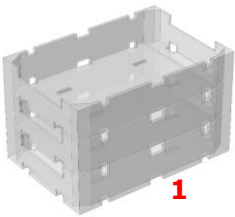
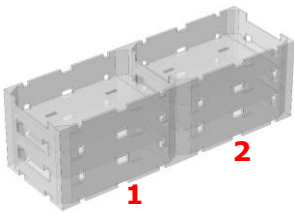
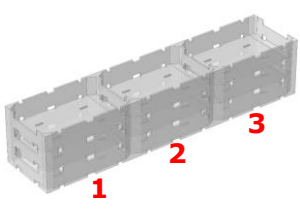
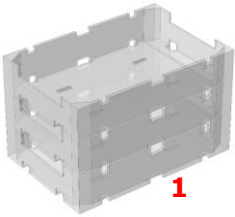
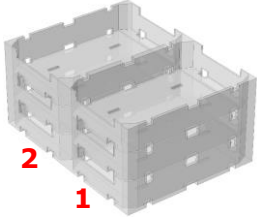
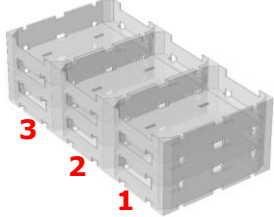
|                              |   |  |   |
|------------------------------|---|--|---|
|                              |  |  |  |
| $\Delta\dot{m}$ de entrada % |   | +2,09  | +0,78   |
| % a fila 1                   | 100   | 50,48  | 34,12   |
| % a fila 2                   |   | 49,52  | 33,09   |
| % a fila 3                   |   |  | 32,79   |

Tabla 31: Distribución del flujo másico al aumentar número de filas en el sistema cabezal de la Caja 1.

|                              |   |  |   |
|------------------------------|---|--|---|
|                              |  |  |  |
| $\Delta\dot{m}$ de entrada % |   | -1,10  | -1,30   |
| % a fila 1                   | 100   | 51,12  | 34,82   |
| % a fila 2                   |   | 48,88  | 32,90   |
| % a fila 3                   |   |  | 32,27   |



En estas tablas se aprecia que, el flujo total que ingresa tiene unas pequeñas variaciones, casi despreciables, por lo que se puede asumir que el flujo másico se mantiene constante, lo que se debe a que la sección transversal por donde ingresa el aire se mantiene constante. Respecto a lo que ingresa a cada fila de cajas, se aprecian pequeñas diferencias entre ellas, disminuyendo a medida que se avanza, lo que se debe a la pérdida de carga que sufre el fluido, aun así, al ser mínima la diferencia, se puede asumir una distribución equitativa. Esta pequeña variación se debe principalmente a que es un flujo altamente turbulento,  $2,54 \cdot 10^5$  según el Anexo E, por lo que, el fluido en movimiento tiende a ocupar el espacio disponible.

Posteriormente se analiza al variar el número de cajas en altura en una fila de cajas, resultados que se presentan en la Tabla 32 y Tabla 33.

En estas tablas se observa que el flujo másico total que ingresa aumenta aproximadamente de manera proporcional a la altura de las cajas, pues la sección transversal de entrada aumenta en esta cantidad. Por otro lado, existen pequeñas variaciones entre lo que ingresa a cada caja, pues al aumentar la altura, el porcentaje masa de aire aumenta, lo que se puede despreciar y asumir que la distribución es equitativa.

Tabla 32: Distribución del flujo másico al aumentar número cajas en altura en el sistema lateral de la Caja 1.

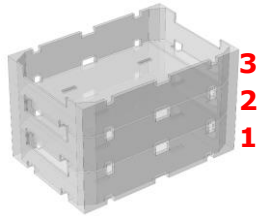
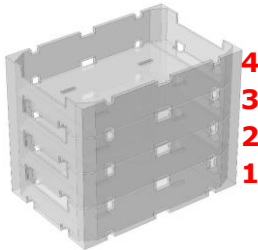
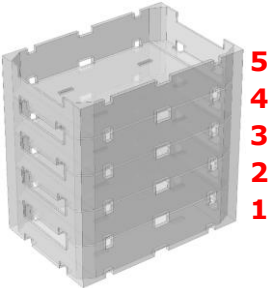
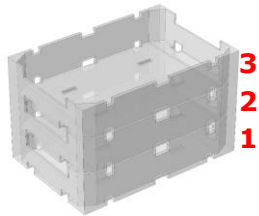
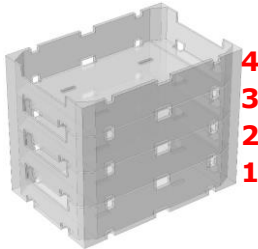
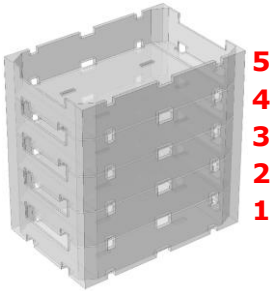
|   |  |  |  |
|---|---|--|---|
| <b><math>\Delta \dot{m}</math> de entrada %</b> |   | +33,88   | +66,48  |
| <b>% a caja 1</b>                               | 32,58   | 24,39  | 19,58   |
| <b>% a caja 2</b>                               | 33,17   | 24,79  | 19,88   |
| <b>% a caja 3</b>                               | 34,25   | 25,00  | 19,94   |
| <b>% a caja 4</b>                               |   | 25,83  | 19,96   |
| <b>% a caja 5</b>                               |   |  | 20,65   |

Tabla 33: Distribución del flujo másico al aumentar número de cajas en altura en el sistema cabezal de la Caja 1.

|                        |  |  |  |
|------------------------|---|--|---|
| <b>Δm de entrada %</b> |   | +32,57   | +64,15  |
| <b>% a caja 1</b>      | 32,31   | 24,20  | 19,46   |
| <b>% a caja 2</b>      | 33,45   | 24,68  | 19,72   |
| <b>% a caja 3</b>      | 34,23   | 25,49  | 19,84   |
| <b>% a caja 4</b>      |   | 25,63  | 19,85   |
| <b>% a caja 5</b>      |   |  | 21,13   |

Se estudia la razón del aumento de masa, de lo que se obtiene un aumento de presión al aumentar la altura, y de este mismo modo una reducción en la velocidad (Tabla 34), lo que coincide con la ecuación de Bernoulli, presentada a continuación.

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 + P_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 + P_2 \quad (23)$$

Tabla 34: Presión y velocidad para el sistema lateral de 4 cajas en altura.

| <b>Caja en altura</b> | <b>Presión [Pa]</b> | <b>Velocidad [m·s<sup>-1</sup>]</b> |
|-----------------------|---------------------|-------------------------------------|
| <b>1</b>              | 101.730,06          | 45,70                               |
| <b>2</b>              | 101.731,29          | 44,13                               |
| <b>3</b>              | 101.732,55          | 44,07                               |
| <b>4</b>              | 101.733,81          | 43,94                               |
| <b>5</b>              | 101.735,07          | 43,26                               |

### **Caja 2**

Se realiza el mismo estudio para la *Caja 2*. En la Tabla 35 y Tabla 36 se presentan los resultados al aumentar el número de filas.

Tabla 35: Distribución del flujo másico al aumentar número de filas en el sistema lateral de la Caja 2.

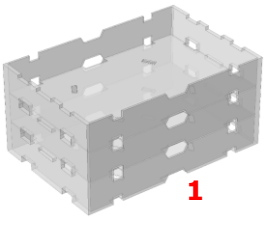
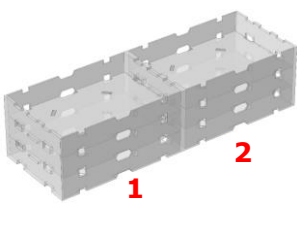
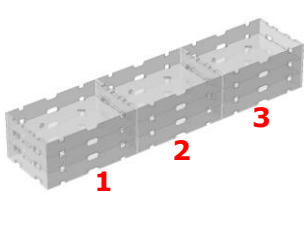
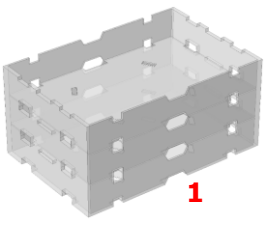
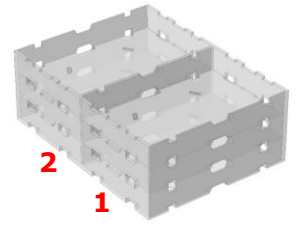
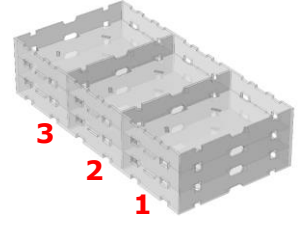
|  |   |  |   |
|--|---|--|---|
|  |  |  |  |
| <b><math>\Delta\dot{m}</math> de entrada %</b> |   | -1,80  | -2,10   |
| <b>% a fila 1</b>                              | 100   | 50,47  | 34,12   |
| <b>% a fila 2</b>                              |   | 49,53  | 33,09   |
| <b>% a fila 3</b>                              |   |  | 32,79   |

Tabla 36: Distribución del flujo másico al aumentar número de filas en el sistema cabezal de la Caja 2.

|  |  |   |  |
|--|--|---|--|
|  |  |  |  |
| <b><math>\Delta\dot{m}</math> de entrada %</b> |  | -2,10   | -1,30  |
| <b>% a fila 1</b>                              | 100  | 51,03   | 34,19  |
| <b>% a fila 2</b>                              |  | 48,97   | 33,10  |
| <b>% a fila 3</b>                              |  |   | 32,71  |

En estas tablas se observa un comportamiento similar que en la *Caja 1*, por lo que se asume una distribución equitativa entre las filas de cajas.

Posteriormente, se realiza el análisis al aumentar el número de cajas en altura, lo que se presenta en la Tabla 37 y Tabla 38. En estas tablas se aprecia lo mismo que en la *Caja 1*, al aumentar la altura el flujo másico es proporcional al aumento de la sección transversal, mientras que, para cada caja existe una pequeña variación, lo que se puede despreciar y asumir una distribución equitativa para cada caja. De igual modo, se obtiene la presión y velocidad, lo que se muestra en la Tabla 39.

Tabla 37: Distribución del flujo másico al aumentar número de cajas en altura en el sistema lateral de la Caja 2.

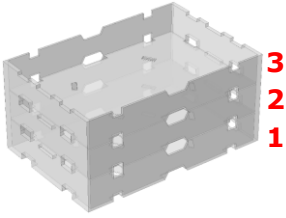
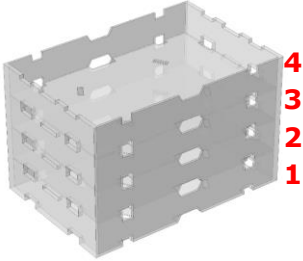
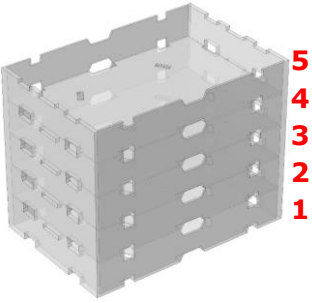
|  |   |  |   |
|--|---|--|---|
|  |  |  |  |
| <b><math>\Delta\dot{m}</math> de entrada %</b> |   | +33,79   | +67,20  |
| <b>% a caja 1</b>                              | 32,58   | 24,55  | 19,68   |
| <b>% a caja 2</b>                              | 33,17   | 25,02  | 19,98   |
| <b>% a caja 3</b>                              | 34,25   | 25,13  | 20,00   |
| <b>% a caja 4</b>                              |   | 25,30  | 20,12   |
| <b>% a caja 5</b>                              |   |  | 20,22   |

Tabla 38: Distribución del flujo másico al aumentar número de cajas en altura en el sistema cabezal de la Caja 2.

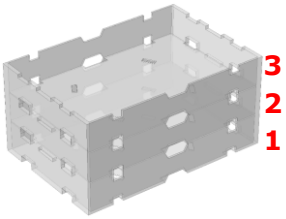
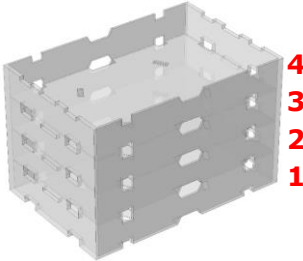
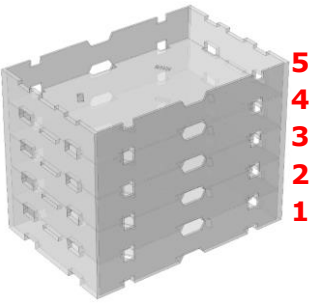
|  |   |  |   |
|--|---|--|---|
|  |  |  |  |
| <b><math>\Delta\dot{m}</math> de entrada %</b> |   | +31,11   | +65,37  |
| <b>% a caja 1</b>                              | 33,00   | 24,52  | 19,91   |
| <b>% a caja 2</b>                              | 32,34   | 24,82  | 19,98   |
| <b>% a caja 3</b>                              | 35,66   | 25,30  | 20,02   |
| <b>% a caja 4</b>                              |   | 25,37  | 20,03   |
| <b>% a caja 5</b>                              |   |  | 20,06   |

Tabla 39: Presión y velocidad para el sistema lateral de 4 cajas en altura.

| Caja en altura | Presión [Pa] | Velocidad [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] |
|----------------|--------------|--|
| 1              | 101.684,93   | 35,31                                      |
| 2              | 101.686,00   | 35,27                                      |
| 3              | 101.687,12   | 35,25                                      |
| 4              | 101.688,19   | 35,15                                      |
| 5              | 101.689,26   | 35,05                                      |

De este modo, se utiliza un sistema con solo 1 fila de cajas y 3 en altura, por lo que el flujo másico debe ser equivalente a lo que ingresa a una fila de caja. Considerando que en 5 pallets hay 10 cajas, el flujo másico se divide en estas 10 unidades, y como se utiliza el supuesto de densidad constante, la velocidad entrada del flujo de aire también corresponde a una décima parte de lo original, es decir  $v_{in}=0,35[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$

## ANEXO G. DIFERENCIA DE TEMPERATURA DEL AIRE

Se calcula la diferencia de temperatura entre la temperatura del aire que ingresa al sistema ( $T_{in}$ ) y del que sale ( $T_{out}$ ). Esto se realiza con los datos experimentales, obteniendo el resultado de la Figura 50, donde la mayor diferencia es de  $10,1[^\circ\text{C}]$  [28].

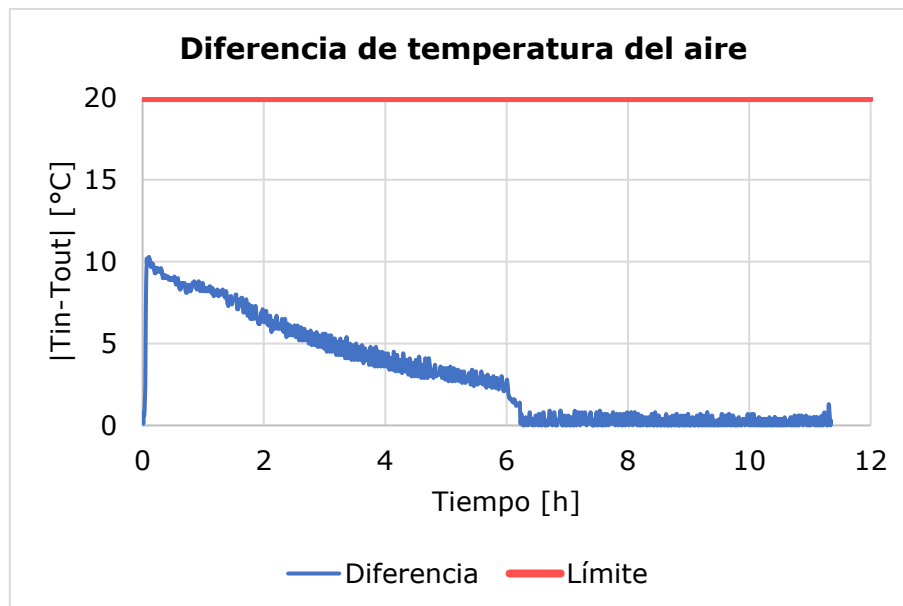


Figura 50: Variación de la temperatura del aire en el tiempo.

## ANEXO H. SIMPLIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA FRUTA

Se analizan distintas geometrías para determinar la que permite aproximar de mejor manera el modelo a los datos experimentales.

### 5 placas

Se estudia con 5 placas, como muestra la Figura 51, obteniendo los resultados de la Figura 52 y Tabla 40. Resultados por lo que se decide estudiar otra geometría, pues el coeficiente de determinación indica que el modelo no representa gran parte de los fenómenos presentes en el proceso, además de tener un alto ECM.

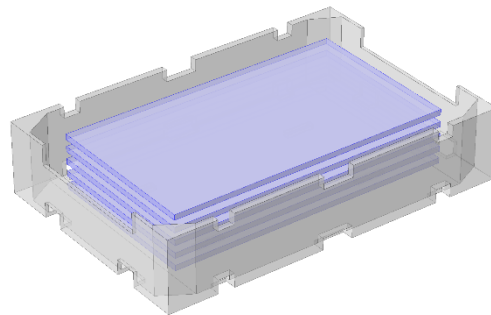


Figura 51: Configuración de la uva en 5 placas.

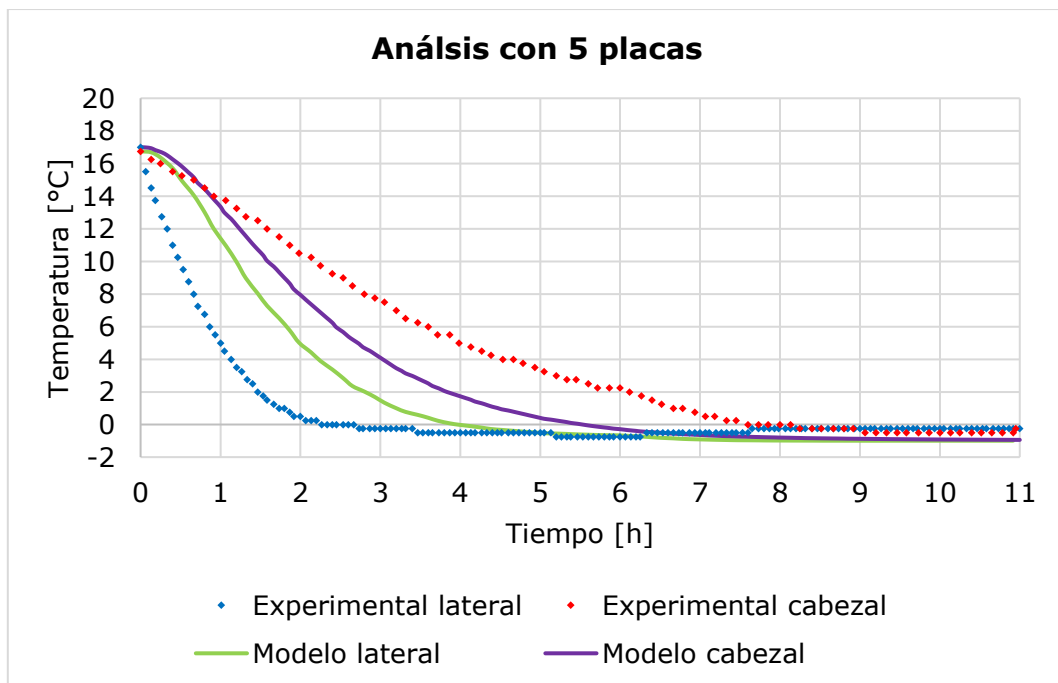


Figura 52: Comparación entre los datos experimentales de temperatura con los datos del modelo para una configuración de la fruta en 5 placas.

Tabla 40: Coeficiente de determinación y error cuadrático medio para el modelo matemático con 5 placas.

| Parámetro | Lateral | Cabezal |
|-----------|---------|---------|
| $R^2$     | 0,56    | 0,75    |
| ECM       | 14,16   | 11,3    |

### 1 bloque

Se procede a estudiar con un bloque, como muestra la Figura 53, obteniendo los resultados de la Figura 54 y Tabla 41.

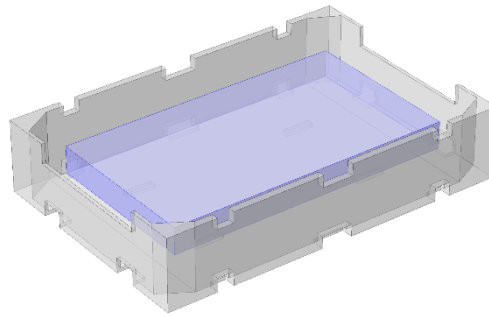


Figura 53: Configuración de la uva en 1 bloque.

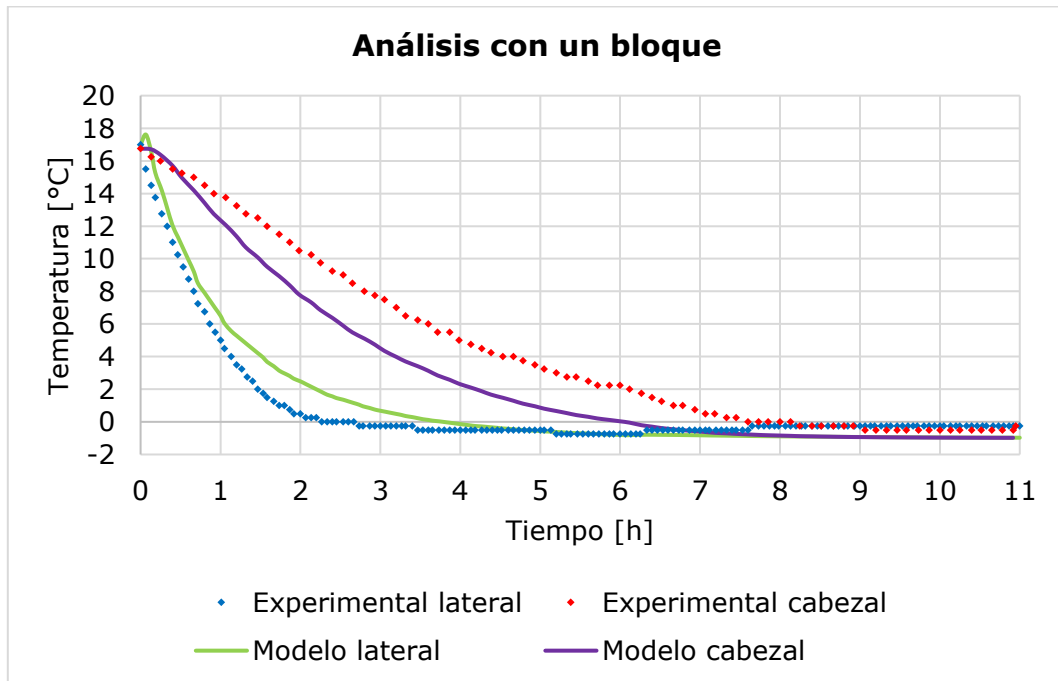


Figura 54: Comparación entre los datos experimentales de temperatura con los datos del modelo para una configuración de la fruta en 1 bloque.

Tabla 41: Coeficiente de determinación y error cuadrático medio para el modelo matemático con 1 bloque.

| Parámetro | Lateral | Cabezal |
|-----------|---------|---------|
| $R^2$     | 0,90    | 0,88    |
| ECM       | 1,93    | 3,57    |

El coeficiente de determinación obtenido para cada sistema, indican que el modelo captura de mejor manera los fenómenos que el uso de placas, aun así, se decide buscar una nueva geometría para aproximar más el modelo, y así realizar un estudio más preciso en los pasos siguientes.

### 5 bloques

Se analiza el uso de 5 boques, como muestra la Figura 55, obteniendo los resultados de la Figura 56 y Tabla 42.

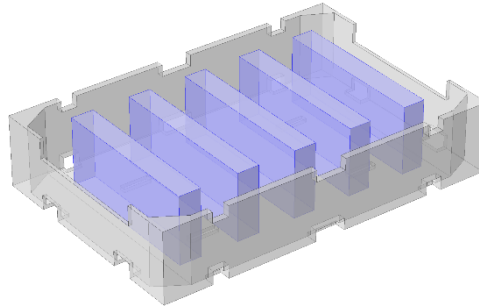


Figura 55: Configuración de la uva en 5 bloques.

Tabla 42: Coeficiente de determinación y error cuadrático medio para el modelo matemático con 5 bloques.

| Parámetro | Lateral | Cabezal |
|-----------|---------|---------|
| $R^2$     | 0,96    | 0,79    |
| ECM       | 0,44    | 6,16    |

En este caso se obtiene un buen  $R^2$  y ECM para el sistema lateral, pero en el caso del cabezal no es así, por lo que se decide mantener esta geometría para el sistema lateral y estudiar otra geometría para el sistema cabezal, que permita ajustar la mayor parte de los fenómenos presentes en el proceso.



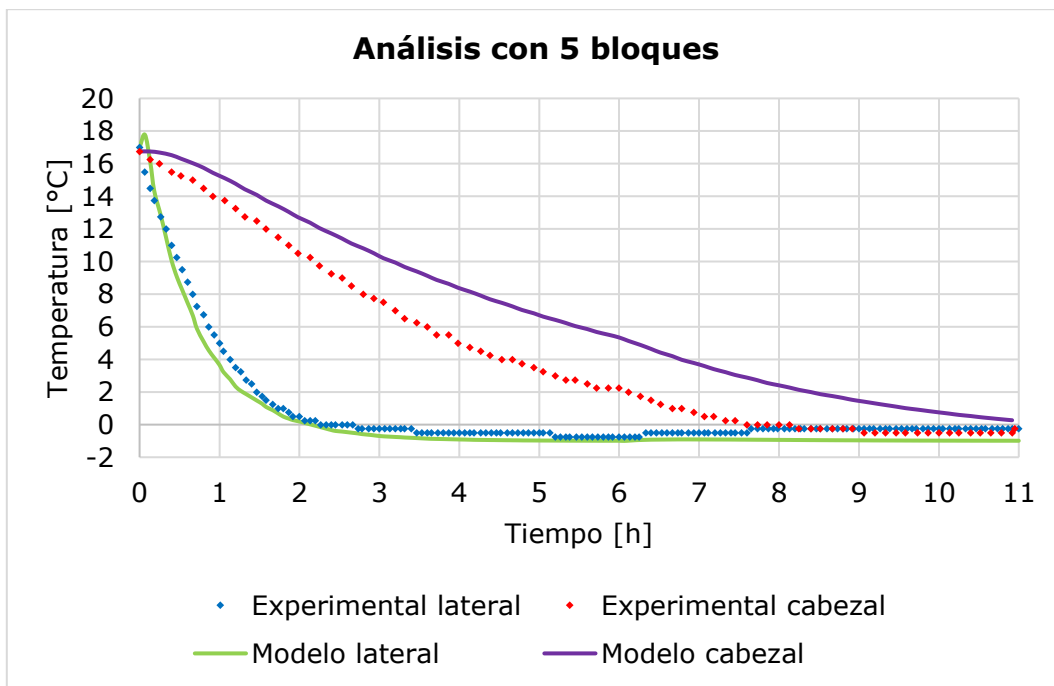


Figura 56: Comparación entre los datos experimentales de temperatura con los datos del modelo para una configuración de la fruta en 5 bloques.

### 3 bloques en sistema cabezal

Se decide estudiar la caja con 3 bloques de uva para el sistema cabezal, como muestra la Figura 57, con lo que se obtienen los resultados de la Figura 58 y Tabla 43.

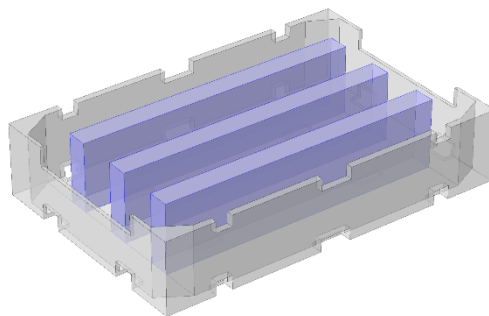


Figura 57: Configuración de la uva en 3 bloques.

Tabla 43: Coeficiente de determinación y error cuadrático medio para el modelo matemático con 5 bloques en sistema lateral y 3 bloques en sistema cabezal.

| Parámetro | Lateral | Cabezal |
|-----------|---------|---------|
| $R^2$     | 0,96    | 0,99    |
| ECM       | 0,44    | 0,36    |

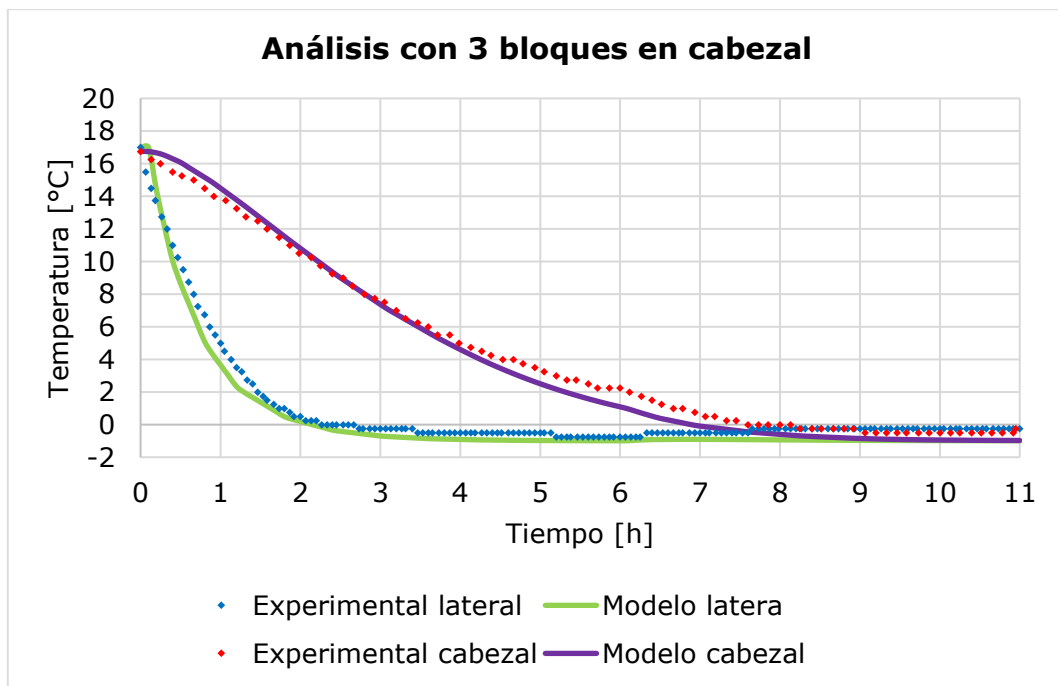


Figura 58: Comparación entre los datos experimentales de temperatura con los datos del modelo para una configuración de la fruta en 5 bloques para el sistema lateral y 3 bloques para el sistema cabezal.

Estos resultados del coeficiente de determinación y ECM, permiten escoger las geometrías para los distintos sistemas. Así se utilizan 5 bloques para el sistema lateral y 3 bloques para el sistema cabezal, ya que se está capturando gran parte de los fenómenos presentes en el proceso.

## ANEXO I. BALANCE DE ENERGÍA

Se calcula el calor neto transferido por unidad de tiempo entre la fruta y el aire, es decir, el calor que pierde la fruta para llegar a la temperatura deseada, donde se utiliza:

$$Q = \frac{m \cdot cp_s \cdot \Delta T}{t} \quad (24)$$

Lo que resulta para la *Caja 1* en el sistema lateral:

$$Q_s = \frac{8,2 \cdot 3.810 \cdot (17 - -0,5)}{3.600 \cdot 11} = 13,806$$

De manera análoga, se obtiene lo de la Tabla 44.

Tabla 44: Calor transferido entre aire y fruta de los datos experimentales y calor entregado por la simulación del modelo.

| Parámetro | $Q_{exp}$ [W] | $Q_m$ [W] | $\Delta Q$ [%] |
|-----------|---------------|-----------|----------------|
| Caja 1 L  | 13,806        | 14,191    | 2,71           |
| Caja 1 C  | 13,609        | 13,982    | 2,67           |
| Caja 2 L  | 11,836        | 12,353    | 4,19           |
| Caja 2 C  | 12,806        | 13,149    | 2,61           |

De este modo, se puede calcular la temperatura que adquiere el flujo de aire al intercambiar calor con la fruta. Donde se realiza un balance entre el calor perdido por la fruta ( $Q_s$ ) y el calor adquirido por el aire ( $Q_a$ ). Para el caso del  $Q_{exp}$  de la Caja 1 en el sistema, se tiene:

$$Q_s = Q_a \quad (25)$$

Donde:

$$Q_a = v_{in} \cdot A \cdot \rho \cdot C_{pa} \cdot \Delta T \quad (26)$$

Así se tiene:

$$\frac{m_s \cdot c_{ps} \cdot \Delta T_s}{t} = v_{in} \cdot A \cdot \rho_a \cdot C_{pa} \cdot \Delta T_a$$

$$\Delta T_a = \frac{Q_s}{v_{in} \cdot A \cdot \rho \cdot C_{pa}}$$

$$\Rightarrow \Delta T_a = \frac{13,806[W]}{0,35[m \cdot s^{-1}] \cdot 0,231[m^2] \cdot 1,297[kg \cdot m^{-3}] \cdot 1.006[J \cdot kg^{-1}K^{-1}]} = 0,131[^\circ C]$$

De forma análoga, se obtiene la diferencia de temperatura del flujo de aire:

Tabla 45: Diferencia de temperatura del flujo de aire.

| Parámetro | $\Delta T_{a\_exp}$ [°C] | $\Delta T_{a\_m}$ [°C] |
|-----------|--------------------------|------------------------|
| Caja 1 L  | 0,131                    | 0,135                  |
| Caja 1 C  | 0,129                    | 0,133                  |
| Caja 2 L  | 0,189                    | 0,197                  |
| Caja 2 C  | 0,204                    | 0,201                  |

Con los resultados de la Tabla 45, se obtiene la temperatura del flujo del aire luego del intercambio de calor:

$$T_f = T_0 + \Delta T$$

Tabla 46: Temperatura del flujo de aire luego del intercambio de calor.

| <b>Parámetro</b> | <b><math>T_{af\_exp}</math> [°C]</b> | <b><math>T_{af\_m}</math> [°C]</b> |
|------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Caja 1 L         | -0,869                               | -0,865                             |
| Caja 1 C         | -0,871                               | -0,867                             |
| Caja 2 L         | -0,811                               | -0,803                             |
| Caja 2 C         | -0,796                               | -0,799                             |