

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CALEFACCIÓN Y VENTILACIÓN DE UN SECADOR
TECNIFICADO DE CARDAMOMO.

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por
Moris Alberto Polanco Serrano para optar al grado académico de Licenciado
en Ingeniería Mecánica.

Guatemala,

2019

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CALEFACCIÓN Y VENTILACIÓN DE UN SECADOR
TECNIFICADO DE CARDAMOMO.

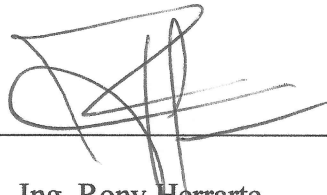
Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por
Moris Alberto Polanco Serrano para optar al grado académico de Licenciado
en Ingeniería Mecánica.

Guatemala,

2019

Vo.Bo.:

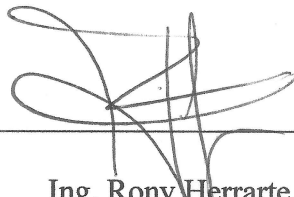
(f)



Ing. Rony Herrarte.

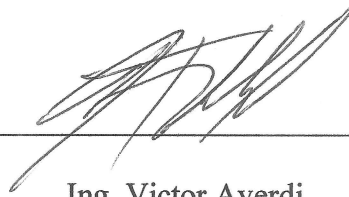
Tribunal Examinador:

(f)



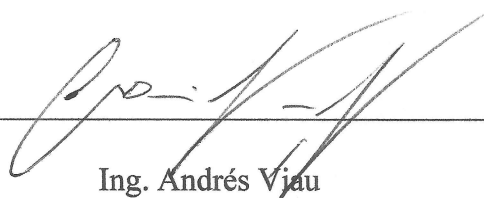
Ing. Rony Herrarte.

(f)



Ing. Victor Ayerdi.

(f)



Ing. Andrés Vjau

Fecha de aprobación: Guatemala, 13 de diciembre de 2019.

PREFACIO

Este documento se desarrolló con el fin de proponer e implementar un diseño de secador tecnificado de cardamomo orientado al uso por pequeños productores del departamento de Alta Verapaz, Guatemala. El mismo se desarrolló en conjunto con el Centro de Estudios Agrícolas y Alimenticios (CEAA) de la Universidad del Valle de Guatemala.

Mediante el presente agradezco primeramente a Dios por ser la luz de mi vida y a quien todo debo.

Así agradezco infinitamente a mi padre Milton Polanco, madre Carmen Serrano y hermanos Milton y Sofia por su apoyo y amor incondicional.

A mis amigos Rodrigo Cabrera, Marcos Vielman y David Sanchinelli por su amistad y ayuda durante toda la carrera.

A mis docentes y guías durante mi preparación universitaria.

CONTENIDO

PREFACIO	IX
LISTA DE CUADROS.....	XV
LISTA DE ILUSTRACIONES	XVII
RESUMEN.....	XXI
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	3
III. JUSTIFICACIÓN.....	5
IV. MARCO TEÓRICO	7
A. EL CARDAMOMO EN GUATEMALA.....	7
B. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL CARDAMOMO.	10
C. IMPORTANCIA DEL SECADO DE ALIMENTOS	11
1. La importancia del agua en los alimentos	11
2. Mecanismos de deterioro y preservación de alimentos.....	13
3. Características de sólidos húmedos.....	15
D. PRINCIPIOS DE SECADO DE ALIMENTOS.	18
1. Secado convectivo.....	18
2. Secado conductivo.	19
3. Deshidratación osmótica.....	19
4. Liofilización.....	19
5. Descomposición del agua por medios químicos.	19
6. Adsorción.....	19
7. Absorción.....	20
8. Separación mecánica.	20
E. TIPOS DE SECADORES DE ALIMENTOS.....	20
1. Secador tipo gabinete.	21
2. Secador tipo túnel.....	22
3. Secador por banda transportadora (flujo paralelo).....	23
4. Secador por banda transportadora (flujo atravesado).....	23

5. Secador rotativo.	24
6. Secador tipo contenedor.	24
7. Secador tipo aerosol.	25
8. Secador de lecho fluidizado.	26
9. Secador neumático.	26
10. Secador tipo barril.	26
11. Secado al sol.	27
12. Secador solar.	27
F. SECADO POR CONVECCIÓN	28
1. Transferencia de calor y masa.....	28
2. Curva de secado.	31
3. Fase de secado en aumento.....	33
4. Fase de secado constante.	33
5. Fase de secado en reducción.....	34
6. Tiempo de secado.....	35
G. PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL PROCESO DE SECADO POR CONVECCIÓN.....	36
1. Factores internos.	36
2. Factores externos.....	37
H. ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE DINÁMICA DE FLUÍDOS.	44
1. Volúmenes de control finitos y ecuaciones que gobiernan el movimiento de fluidos.....	44
2. Métodos de discretización espacial.	46
3. Mallado.....	49
4. Condiciones iniciales y de frontera.	53
5. Modelos de turbulencia.	53
6. Resultados y parámetros de convergencia.....	55
V. ANTECEDENTES	57
A. SECADORES DE CARDAMOMO EN GUATEMALA.....	57
1. Secadores tipo contenedor cilíndrico.	57
2. Secadores tipo contenedor rectangular.....	59
VI. METODOLOGÍA.....	63
A. REQUERIMIENTOS DEL SECADOR.....	63
B. SELECCIÓN DE TIPO DE SECADOR.	63

C. DISEÑO DE GEOMETRÍA.....	65
1. Diseño 1.....	68
2. Diseño 1.1.....	70
3. Diseño 1.4.....	71
4. Diseño 2.....	72
5. Diseño 3.....	73
6. Diseño 3.1.....	74
7. Diseño 4.....	76
8. Diseño 4.1.....	78
9. Diseño 5.....	80
10. Diseño final.....	81
D. PROCESO DE SECADO.....	85
1. Condiciones ambientales.....	85
2. Cálculo de tiempo de secado.....	85
3. Definición psicrométrica de proceso de secado.....	89
4. Consumos de gas.....	91
E. ESTRUCTURA DE PRUEBAS.....	92
1. Prueba de flujo.....	92
2. Prueba de temperatura y humedad de flujo inducido.....	92
3. Prueba de efectividad de secado.....	93
VII. RESULTADOS.....	95
A. DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS.....	95
B. SELECCIÓN DE TIPO DE SECADOR.....	95
C. DISEÑO DE GEOMETRÍA DE DUCTOS DE VENTILACIÓN DE SECADOR.....	96
D. MANUFACTURA Y ACOPLE DE DUCTOS DE VENTILACIÓN.....	100
E. PARÁMETROS DE VENTILACIÓN Y CALEFACCIÓN DE FLUJO – PRUEBA 1.....	101
F. PRUEBAS DE VELOCIDAD – PRUEBA 1.....	104
G. PRUEBA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DE AIRE INDUCIDO – PRUEBA 1.....	105
H. PRUEBA DE HUMEDAD DE GRANO – PRUEBA 1.....	108
I. SECADO DE 5 QUINTALES DE CARDAMOMO – PRUEBA 1.....	108
J. PRUEBA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DE AIRE INDUCIDO – PRUEBA 2.....	110
K. PRUEBA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DE AIRE INDUCIDO – PRUEBA 3.....	113

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS	117
IX. CONCLUSIONES.....	123
X. RECOMENDACIONES	125
XI. BIBLIOGRAFÍA.....	127
XII. ANEXOS	129
A. IMÁGENES DE MODELOS PRELIMINARES	129
B. IMÁGENES DE CALCULADORA DE TIEMPOS DE SECADO.	133
C. IMÁGENES DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	134

LISTA DE CUADROS

1. Exportaciones de Guatemala por rubro (mayores a USD 100 millones) año 2016 (inicio).	7
2. Exportaciones de Guatemala por rubro (mayores a USD 100 millones) año 2016 (finalización).	8
3. Porcentaje de humedad típico de algunos alimentos.	11
4. Actividad acuosa de algunos alimentos.	12
5. Contenido de humedad de equilibrio de maíz amarillo según temperatura y humedad relativa de ambiente.	17
6. Contenido de humedad de equilibrio de soya según temperatura y humedad relativa de ambiente.	17
7. Clasificación de los tipos de secadores más comunes.	21
8. Difusividad efectiva de algunos alimentos.	37
9. Características de tipos de secadores (inicio).	64
10. Características de tipos de secadores (finalización).	64
11. Matriz de decisión de tipo de secador (inicio).	65
12. Matriz de decisión de tipo de secador (finalización).	65
13. Características de simulación de diseño 1.	68
14. Características de simulación de diseño 1.1.	70
15. Características de simulación de diseño 1.4.	71
16. Características de simulación de diseño 2.	72
17. Características de simulación de diseño 3.	73
18. Características de simulación de diseño 3.1.	74
19. Características de simulación de diseño 4.	76
20. Características de simulación de diseño 4.1.	78
21. Características de simulación de diseño 5.	80
22. Características de simulación de diseño final.	81
23. Tiempos de secado según velocidad de flujo inducido a 50 °C y carga de 10 quintales.	87
24. Tiempos de secado según temperatura de flujo inducido a 2.5 m/s y carga de 10 quintales.	88
25. Requerimientos de módulo de ventilación y calefacción para secador tecnificado.	95
26. Calificación y ponderación de secador tipo gabinete en matriz de decisión.	95
27. Parámetros de flujo de salida con flujo de entrada a 50 °C d.b.	101
28. Parámetros de flujo de salida con flujo de entrada a 55 °C d.b.	101
29. Parámetros de flujo de salida con flujo de entrada a 60 °C d.b.	102

30. Parámetros de flujo de salida con flujo de entrada a 65 °C d.b.....	102
31. Parámetros de flujo de salida con flujo de entrada a 70 °C d.b.....	102
32. Parámetros de flujo de salida con flujo de entrada a 75 °C d.b.....	103
33. Parámetros de flujo de salida con flujo de entrada a 80 °C d.b.....	103
34. Parámetro de flujo de salida teórico y experimental.....	103
35. Tiempos de secado según temperatura de flujo inducido a 1.25 m/s y carga de 5 quintales.....	104
36. Velocidad de flujo.....	104
37. Contenido de humedad base húmeda de grano.	108
38. Ejemplo de cálculos para aire a 65 °C.	133

LISTA DE ILUSTRACIONES

1. Histórico de exportaciones de cardamomo en Guatemala en USD.....	8
2. Distribución porcentual de la producción nacional de cardamomo del año 2016.....	9
3. Huella económica del cultivo de cardamomo en Alta Verapaz.	9
4. Isoterma de adsorción y desorción.	16
5. Curva de secado teórica.	18
6. Esquema general de un secador tipo gabinete.....	21
7. Secador tipo túnel.	22
8. Secador por banda transportadora de tres etapas.....	23
9. Esquema general de secador por banda transportadora (flujo atravesado).	23
10. Esquema general de un secador rotativo.....	24
11. Esquema general de un secador tipo contenedor.....	25
12. Esquema de secador tipo aerosol concurrente (izquierda) y contracorriente (derecha).	25
13. Esquema general de un secador tipo barril.....	27
14. Esquema general de un secador solar.	27
15. Curva de secado - Cantidad de agua a través del tiempo.....	32
16. Curva de secado – Tasa de secado según humedad base seca.	32
17. Capas de fluido durante proceso de secado.....	40
18. Gráfico log-log de Re y Nu para distintos Pr	42
19. Gráfico log-log de Re/Pr y Nu/Pr	42
20. Transición de flujo laminar a turbulento.....	43
21. Volumen de control finito.	44
22. Volumen de control centrado en la celda (izquierda) y vértices de celda (derecha).	48
23. Discretización espacial por volúmenes finitos.	48
24. Ejemplos de mallado estructurado.....	49
25. Ejemplo de mallado sin estructurar.	50
26. Parámetros de superficie de celda hexaédrica.....	51
27. Ángulo de distorsión de celda tetraédrica.	51
28. Secador tipo contenedor cilíndrico en Senahú, Alta Verapaz.....	58
29. Llenado de secador tipo contenedor cilíndrico en Senahú, Alta Verapaz.....	58
30. Componentes operacionales de secador tipo contenedor cilíndrico en Senahú, Alta Verapaz.....	59

31. Secador tipo contenedor rectangular en Senahú, Alta Verapaz.	59
32. Esquemático de secador tipo contenedor rectangular en Senahú, Alta Verapaz.....	60
33. Bandejas de acero inoxidable 304.	66
34. Estructura de cámara de secado.....	66
35. Comportamiento de contenido de humedad del aire y tasa de secado según posición en bandeja.	67
36. Diseño 1 - Geometría.	68
37. Diseño 1 – Plano XY de velocidad.....	69
38. Diseño 1 – Trazos de velocidad.....	69
39. Diseño 1.1 - Geometría.	70
40. Diseño 1.1 – Plano XY de velocidad.	70
41. Diseño 1.4 – Geometría.....	71
42. Diseño 1.4 – Plano XY de velocidad y trazos de velocidad.	71
43. Diseño 2 – Geometría.	72
44. Diseño 2 – Plano XY de velocidad.....	72
45. Diseño 3 – Geometría.	73
46. Diseño 3 – Plano XY de velocidad.....	73
47. Diseño 3.1 – Geometría.....	74
48. Diseño 3.1 – Plano XY de velocidad.	74
49. Diseño 3.1 - Trazos de velocidad.	75
50. Diseño 3.1 - Diagrama de funcionamiento ideal.	75
51. Diseño 4 – Geometría.	76
52. Diseño 4 – Plano XY de velocidad alineado a ducto de salida.	76
53. Diseño 4 – Plano YZ de velocidad alineado a mitad de cámara de secado.	77
54. Diseño 4 - Trazos de velocidad.	77
55. Diseño 4.1 – Geometría.....	78
56. Diseño 4.1 – Plano XY de velocidad alineado a ducto de salida.	78
57. Diseño 4.1 – Plano XY de velocidad alineado a ducto de entrada.....	79
58. Diseño 4.1 - Trazos de velocidad.	79
59. Diseño 5 – Geometría.	80
60. Diseño 5 – Plano XY de velocidad alineado a ducto de entrada.	80
61. Diseño final – Geometría.	81
62. Diseño final – Dimensiones.	81
63. Diseño final – Secciones internas.....	82

64. Diseño final - Mallado.	82
65. Diseño final – Plano XY de velocidad alineado a ducto de salida.	83
66. Diseño final – Plano XY de velocidad alineado a ducto de entrada.....	83
67. Diseño final – Plano YZ de velocidad alineado a mitad de columna 2 de bandejas.	84
68. Diseño final – Plano YZ de velocidad alineado a mitad de columna 1 de bandejas.	84
69. Proceso de psicrométrico de secado.	90
70. Diseño final – Geometría.	96
71. Diseño final – Plano XY de velocidad alineado a ducto de salida.	97
72. Diseño final – Plano XY de velocidad alineado a ducto de entrada.....	97
73. Diseño final – Plano YZ de velocidad alineado a mitad de columna 2 de bandejas.	98
74. Diseño final – Plano YZ de velocidad alineado a mitad de columna 1 de bandejas.	98
75. Diseño de construcción - Isométrico.....	99
76. Diseño de construcción – Frontal y nomenclatura de bandejas.	99
77. Implementación de ductos a cámara de secado – Trasero.	100
78. Implementación de ductos a cámara de secado – Interior.....	100
79. Velocidad de flujo a salida de ventilador, perímetro (izquierda), centro (derecha).	104
80. Temperatura y humedad relativa – Ambiente (Prueba 1).	105
81. Distribución de temperatura sobre columna de bandejas A a lo largo del tiempo (Prueba 1).	106
82. Distribución de temperatura sobre columna de bandejas B a lo largo del tiempo (Prueba 1).	106
83. Distribución de humedad sobre columna de bandejas A a lo largo del tiempo (Prueba 1).	107
84. Distribución de humedad sobre columna de bandejas B a lo largo del tiempo (Prueba 1).....	107
85. Inicio de secado.	108
86. Final de secado.	109
87. Final de secado – Ampliación.	109
88. Temperatura y humedad relativa – Ambiente (Prueba 2).	110
89. Distribución de temperatura sobre columna de bandejas A a lo largo del tiempo (Prueba 2).	111
90. Distribución de temperatura sobre columna de bandejas B a lo largo del tiempo (Prueba 2).	111
91. Distribución de humedad sobre columna de bandejas A a lo largo del tiempo (Prueba 2).	112
92. Distribución de humedad sobre columna de bandejas B a lo largo del tiempo (Prueba 2).....	112
93. Temperatura y humedad relativa – Ambiente (Prueba 3).	113
94. Distribución de temperatura sobre columna de bandejas A a lo largo del tiempo (Prueba 3).	114
95. Distribución de temperatura sobre columna de bandejas B a lo largo del tiempo (Prueba 3).	114
96. Distribución de humedad sobre columna de bandejas A a lo largo del tiempo (Prueba 3).	115

97. Distribución de humedad sobre columna de bandejas B a lo largo del tiempo (Prueba 3).....	115
98. Diseño 1.2.....	129
99. Diseño 1.3.....	130
100. Diseño 3.2.....	131
101. Diseño 3.3.....	132
102. Anemómetro – Extech Instruments CFM Thermo-Anemometer.....	134
103. Termómetro Winters TBM Series (-10 a 120 °C).....	134
104. Bitácoras de datos (Data Loggers) – LogTag HAX0-8.	135
105. Balanza digital.....	135

RESUMEN

En conjunto con el Centro de Estudios Agrícolas y Alimenticios (CEAA) de la Universidad del Valle de Guatemala, se buscó realizar un secador tecnificado de cardamomo orientado al uso por pequeños productores. Se realizó una observación de los secadores existentes en la región para determinar sus capacidades, requerimientos y modalidades de funcionamiento. Según la información recolectada y los requerimientos establecidos por el cliente, se determinó qué tipo de secador era el más adecuado por utilizar y se desarrolló un diseño buscando cumplir con todos los requerimientos. Se culminó con un prototipo de secador tecnificado que pretende responder a las necesidades más generales de los pequeños productores de cardamomo en regiones de Alta Verapaz, Guatemala.

El módulo de Sistema de Calefacción y Ventilación se encargó de dos segmentos complementarios en el diseño del secador, el análisis de transferencia de calor por convección, y análisis de flujo de aire a través del sistema que asegure la transferencia de calor requerida. El segmento de transferencia de calor involucró determinar la tasa de agregado de energía y tasa de remoción de agua. Según dichas tasas se establecen los parámetros de ventilación necesarios (flujos volumétricos, presiones, humedades relativas, tiempo de secado).

El segmento de análisis de flujo de aire buscó asegurar que los requerimientos del sistema de calefacción sean cumplidos mediante un flujo de aire que responda a las condiciones estructurales y de potencia establecidas. Para ello se determinaron las condiciones estructurales y de flujo a través de las cuales se obtuvieran distribuciones de flujo lo más homogéneas posibles, lo cual implicó diseñar e implementar ductos y ventilas con un sistema de introducción, extracción y recirculación de flujo.

Al realizarse las pruebas de 5 quintales de cardamomo húmedo (80% base húmeda) planificadas para 20 horas a 65 °C, se obtuvo un 65% del cardamomo esperado con un porcentaje de humedad del 10%. El cardamomo restante se secó en diferentes grados, y se concluye que uno de los aspectos más influyentes en la falta de uniformidad del secado fueron la ausencia de investigación del proceso de secado de la especie *Elettaria Cardamomum* (curva de secado), entrega de flujo no uniforme desde salida de ventilador centrífugo, entre otros. Así mismo, se determinó que las bandejas con menores temperaturas a lo largo de la prueba (y menor tasa de secado) son A5, A7, A9, A10, B5, B6, B7 y B8; mientras que las bandejas A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3 y B4 son las de mayor tasa de secado, nomenclatura que se desarrolla en la sección VII.

I. INTRODUCCIÓN

El cardamomo es un grano con gran importancia a nivel nacional, ya que es el decimotercer producto de bienes de exportación más importante de Guatemala. Así mismo, Guatemala es el productor más importante de cardamomo a nivel mundial, con países árabes como los principales consumidores. El cultivo de cardamomo en Guatemala ha sido una actividad económicamente importante desde hace varias décadas; sin embargo, el desarrollo tecnológico que se ha brindado al sector ha sido muy pobre, tanto en áreas de investigación y caracterización, como de tecnologías para mejorar la calidad del producto y de su operación.

Tales desarrollos en la mejora de la calidad del cardamomo van ligados principalmente al proceso del secado de este, ya que el cardamomo es un grano con un alto contenido de humedad y, por lo tanto, de actividad acuosa, lo que causa que mecanismos de deterioro, principalmente bacterial y enzimático, se potencien y causen que el cardamomo se deteriore en pocos días después de haber sido cosechado. Es por ello por lo que después de cosechado el cardamomo este se somete a un proceso de secado en el cual se busca reducir su contenido de humedad base húmeda del 80% hasta un porcentaje objetivo del 10%. Para tal proceso se utilizan secadores de café adaptados para secar cardamomo, utilizando principalmente leña como combustible y en algunos otros secadores, gas propano. Sin embargo, estos han sido desarrollados para cantidades de carga grande (aprox. 50 – 60 quintales de cardamomo por secado) lo cual representa un problema para aquellos pequeños productores que no pueden recolectar gran cantidad de grano y, por lo tanto, no pueden utilizar el secador de forma rentable. Es por ello por lo que en este trabajo se muestra el proceso de desarrollo de propuesta de diseño de un secador de pequeña escala (10 quintales) modular, que busca cumplir con los requerimientos más importantes para un correcto proceso de secado para pequeños productores.

El proceso de desarrollo del secador se divide en áreas y en la presente se muestra el desarrollo del proceso de diseño, implementación y pruebas de una propuesta de secador tecnificado de cardamomo tipo gabinete, el cual se lleva a cabo con base en el análisis del proceso de calefacción y ventilación, enfocándose en análisis termodinámicos, transferencia de calor y masa, así como de análisis de flujo de aire mediante herramientas computacionales (software de análisis de dinámica de fluidos).

II. OBJETIVOS

A. General

Diseñar e implementar un sistema de calefacción y ventilación para un secador de cardamomo, capaz de realizar el proceso de secado de las variantes de cardamomo en Cobán, Alta Verapaz.

B. Específicos

1. Definir especificaciones del secador según los requerimientos del cliente.
2. Establecer el sistema y mecanismo de secado por implementar en el secador.
3. Determinar los parámetros de calefacción y ventilación que permitan realizar el proceso de secado por convección que aseguren la humedad relativa final del grano menor o igual al 10%.
4. Determinar los parámetros de calefacción y ventilación que permitan realizar el proceso de secado por convección que aseguren ausencia de condensación durante el mismo y permitan que el grano se encuentre libre del contacto al condensado.
5. Diseñar un sistema de distribución de aire con recirculación parcial que busque la uniformidad del proceso de secado en los granos, y busque asegurar las condiciones de calefacción establecidas.
6. Asegurar la compatibilidad de los diseños con las condiciones ambientales de las localidades, así como con las posibilidades del módulo Estructura, materiales y fabricación; y el módulo Sistema de potencia y combustión, y análisis de vibraciones mecánicas.
7. Manufacturar segmentos del sistema de ventilación, destacando sistema de ductos, ventilas, admisión, extracción y recirculación de flujo.
8. Ensamblar el sistema de ventilación con la estructura principal, así como con el sistema de potencia.
9. Realizar pruebas de secado y los ajustes necesarios para verificar el cumplimiento de requerimientos en el grano de cardamomo.

III. JUSTIFICACIÓN

La creación de un secador tecnificado para pequeños productores de cardamomo fue un planteamiento del CEAA al Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), con el fin de estimular el empoderamiento de las comunidades con actividad económica con énfasis en el cultivo de cardamomo. La importancia del proyecto se fundamenta en varios pilares. Guatemala es el mayor exportador mundial de cardamomo (ca. 60% de las exportaciones totales de cardamomo en 2015), y lo ha sido por décadas (Banco de Guatemala, 2017). El cardamomo es el decimotercer producto de exportación más importante del país. A pesar de su historial en el sector, se carece de tecnología que permita llevar a cabo el proceso de secado de cardamomo (necesario para evitar su descomposición y proceder a su venta) de una manera controlada y con menor dependencia de operadores, o factores climáticos. Al 2015, aproximadamente 350 mil familias guatemaltecas (1.5 millones de personas) contaban con el cultivo y venta del cardamomo como principal actividad económica, ubicándose la mayoría de ellos en Alta Verapaz (Asociación de Exportadores de Guatemala, 2016). Por tal, se sugiere el diseño, fabricación e implementación de un secador tecnificado que sea provisto a la Asociación de Cardamomeros (ADECAR), brindando así una opción de proceso de secado controlado, y de menor dependencia de factores climáticos. Esto con el fin último de brindar una alternativa a familias de pequeños productores de cardamomo y que con tal puedan mejorar sus ingresos y condiciones de vida.

Para que el secador tecnificado pueda ofrecer una respuesta a las necesidades planteadas, este debe ser capaz de brindar resultados, como mínimo, iguales a los obtenidos con los métodos alternativos. Esto depende grandemente de la ingeniería con la que se diseñe tal dispositivo. Uno de los aspectos más importantes a considerar en el diseño de este es el proceso de secado como tal, el cual se desarrolla en el módulo Sistema de Calefacción y Ventilación. Este módulo se centra en diseñar un sistema de calefacción y ventilación capaz de realizar el proceso de secado entregando cardamomo en condiciones de 10% o menos de humedad relativa y tasas de transferencia de calor que no dañen el grano. Estos resultados serán alcanzables a medida que se determinen los sistemas mecánicos de flujo (ductos, ventilas, válvulas, etc.) y mecanismos de transferencia de calor, mediante la definición de los estados requeridos en el fluido (Berk, 2018).

IV. MARCO TEÓRICO

A. EL CARDAMOMO EN GUATEMALA.

Cardamomo es el nombre común que se le atribuye a distintas especies de hierbas de la familia *Zingiberaceae*, de la cual se derivan tres géneros *Alframomum*, *Amomum* y *Elettaria*. Las dos especies que destacan son el cardamomo verde (*Elettaria cardamomum*) y el cardamomo negro (*Amomum subulatum*). El cardamomo verde (y sus variedades) es la especie que se cultiva en Guatemala, así como en India y regiones del sudeste asiático (Ravindran y Madhusoodanan, 2002). La misma es la especie de mayor consumo a nivel global, concentrándose su demanda en oriente medio y otras regiones del continente asiático. Durante el año 2015, aprox. 60% de la demanda mundial de cardamomo se concentró en Arabia Saudita (28%), Emiratos Árabes Unidos (20%) e India (12%), mientras que el resto de los países no superaron una cuota del 5% (Asociación de Exportadores de Guatemala, 2016).

Guatemala posee una economía con gran dependencia de la exportación de bienes de consumo no duraderos, es decir, productos agrícolas. En el año 2016 los productos agrícolas representaron aproximadamente el 30% del valor de las exportaciones del país (Banco de Guatemala, 2017). Junto al banano, café, cacao y azúcar, el cardamomo es uno de los principales productos de exportación. Durante el año 2016 se situó como el decimotercer producto más importante para el país según su recaudación monetaria (ca. USD 230 millones o el 0.6% del PIB nacional), tal como se observa en el Cuadro 1. Durante el mismo año, Guatemala representó el 61% de la oferta mundial de cardamomo, seguido por India con una cuota del mercado de 18% y Nepal con un 11%, por lo que se hace evidente la relevancia del cardamomo guatemalteco a nivel mundial (Asociación de Exportadores de Guatemala, 2016).

Cuadro 1. Exportaciones de Guatemala por rubro (mayores a USD 100 millones) año 2016 (inicio).

No.	Rubro	Valor [USD]
1	Artículos de vestuario	1,268,911,647
2	Azúcar	817,051,356
3	Banano	707,114,874
4	Café	649,074,480
5	Grasas y aceites comestibles	471,039,790
6	Bebidas alcohólicas y vinagres	328,359,735
7	Plomo	328,018,885
8	Materiales plásticos y sus manufacturas	322,602,902
9	Productos farmacéuticos	317,827,981
10	Frutas frescas, secas o congeladas	313,820,786
11	Piedras y metales preciosos y semi preciosos	252,329,542
12	Manufacturas de papel y cartón	245,176,468
13	Cardamomo	229,079,093
14	Preparados a base de cereales	200,715,462
15	Hierro y acero	191,306,998
16	Materiales textiles (tejidos o telas)	189,909,277
17	Legumbres y hortalizas	171,896,768

Fuente: Asociación de Exportadores de Guatemala, 2016.

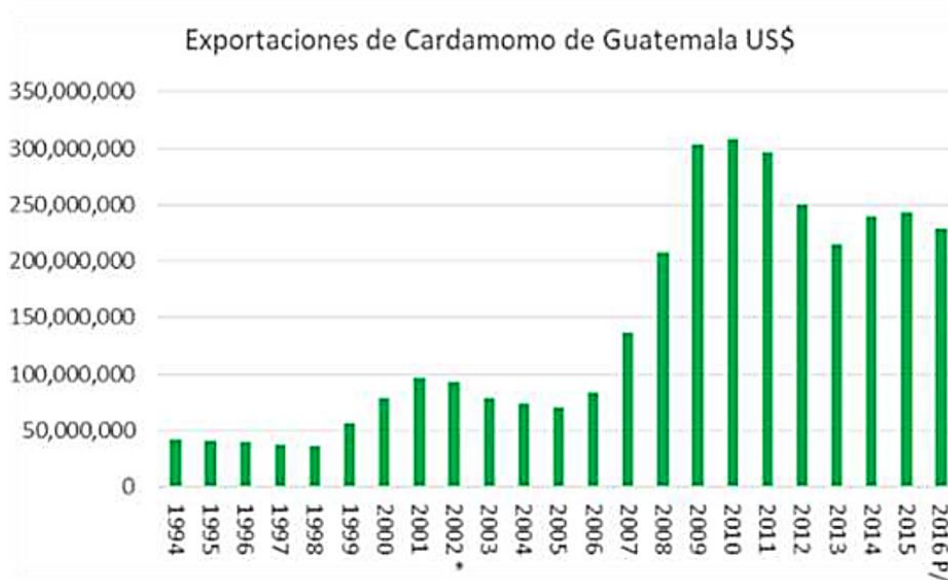
Cuadro 2. Exportaciones de Guatemala por rubro (mayores a USD 100 millones) año 2016 (finalización).

No.	Rubro	Valor [USD]
18	Preparados de carne, pescado, crustáceos y moluscos	170,796,174
19	Insecticidas, fungicidas y desinfectantes	169,962,806
20	Detergentes y jabones	156,381,618
21	Productos diversos de la industria química	138,694,527
22	Productos de perfumería, tocador y cosméticos	129,970,460
23	Caucho natural (hule)	120,925,327
24	Máquinas y aparatos mecánicos para usos electrotécnicos	109,553,091

Fuente: Asociación de Exportadores de Guatemala, 2016.

El histórico de las exportaciones de cardamomo desde el año 1994 hasta el año 2016 se muestra en la Ilustración 1.

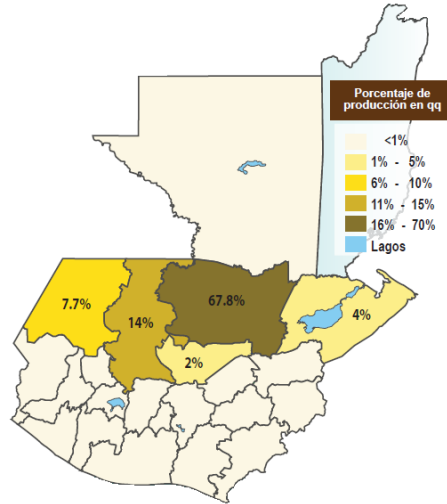
Ilustración 1. Histórico de exportaciones de cardamomo en Guatemala en USD.



Fuente: Asociación de Exportadores de Guatemala, 2016.

A partir de un estudio llevado a cabo por la Asociación de Exportadores de Guatemala (AGEXPORT), se determinó que el cultivo del cardamomo impacta a aprox. 350 mil familias, que implican a cerca de 1.5 millones de personas. Estas se concentran principalmente en 5 departamentos: Alta Verapaz, Baja Verapaz, Izabal, Huehuetenango y Quiché (Asociación de Exportadores de Guatemala, 2016). El Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) estima que aprox. 85% del territorio cultivado se concentra en Alta Verapaz (ca. 70%) y Quiché (ca. 15%) tal como se muestra en la Ilustración 2.

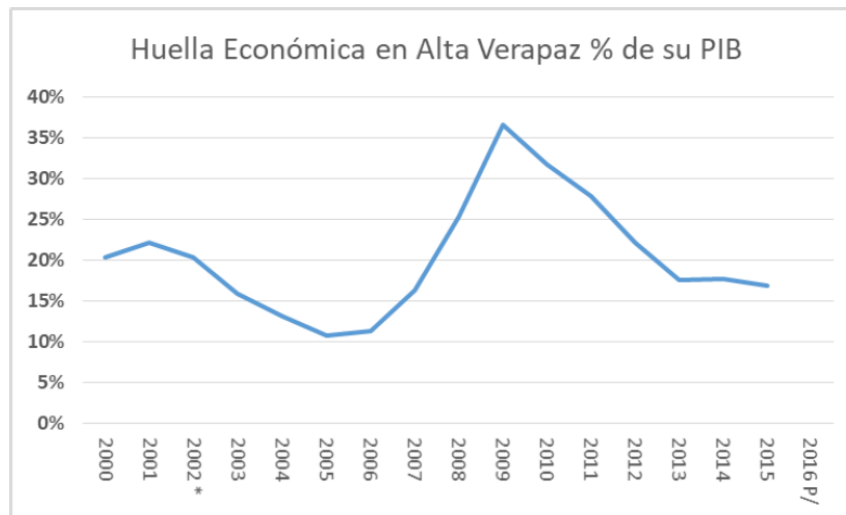
Ilustración 2. Distribución porcentual de la producción nacional de cardamomo del año 2016.



Fuente: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, 2017

A partir de las dos ilustraciones anteriores, se hace evidente que Alta Verapaz es el departamento con mayor porcentaje de cosecha del país, por lo que es de esperar que sea el mismo con mayores ingresos debidos al cultivo. En la Ilustración 3 se muestra el impacto económico del cardamomo en el departamento, representado como porcentaje de su PIB.

Ilustración 3. Huella económica del cultivo de cardamomo en Alta Verapaz.



Fuente: Asociación de Exportadores de Guatemala, 2016.

De la ilustración anterior se denota la gran importancia que posee el cardamomo en el departamento, representando en los últimos años entre un 15 y 20% de su PIB, lo cual se refleja en la cantidad de personas involucradas en dicha actividad económica.

B. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL CARDAMOMO.

El cardamomo verde (*Elettaria cardamomum*) junto a sus diversas variedades, es la especie que se cultiva y se exporta desde Guatemala. Debido a que el cardamomo es un producto de mera exportación, su adecuada preparación para esta es un muy importante. El método más común para la preservación del cardamomo es el secado o deshidratación. El cardamomo recién cosechado (cardamomo cereza) suele poseer una humedad entre el 70 - 80% (base de peso húmedo), el cual para poder ser almacenado sin que el fruto se dañe, requiere que su humedad se reduzca a niveles entre el 8 – 10% de humedad (cardamomo pergamino) (Ravindran y Madhusoodanan, 2002).

Según AGEXPORT, el cardamomo pergamino exportado se clasifica en las siguientes categorías, en orden descendente según su valor (Asociación de Exportadores de Guatemala, 2016).

- *Jumbo green.*
- *Imperial Best green.*
- *Fancy green extra.*
- *Fancy green.*
- *Imperial mixed green.*
- *Mixed green.*
- *Mixed green split.*
- *Yellow mixed.*
- *MYQ.*
- *Seeds.*

Dichas clasificaciones denotan la importancia de ciertas características del cardamomo, donde las más relevantes son el tamaño y color de la cápsula. A mayor tamaño de la cápsula, mayor será el valor de esta. Mientras que, en el color, se desea que este se mantenga lo más verde posible (especialmente valorado en el medio oriente). Debido a la delicadeza del cultivo este tiende a amarillarse, o bien blanquearse según cómo se manipule el fruto y las condiciones ambientales a las que se exponga.

Por lo tanto, entre mayor tamaño y de mejor manera mantenga su color verde, a mejor precio podrá ser comercializado el cultivo. Para lograrlo se han implementado muchas técnicas; respecto al tamaño, la forma principal de obtener cápsulas más grandes es mediante el uso de fertilizantes, y proveer las condiciones ambientales adecuadas (zonas con sombra, suelo con pH ligeramente ácido, temperaturas entre 18 y 22 °C, niveles de humedad entre 70 y 80%, entre otras) así como cuidar las plantaciones de plagas como Trips (*Sciothrips cardamomi*) (Barillas, 2017).

La retención del color verde en las cápsulas de cardamomo se define principalmente en las actividades posteriores a la cosecha del cultivo, donde las principales son operaciones de pre-secado y, principalmente, el proceso de secado (curación); debido a que este último es el proceso que busca reducir los mecanismos de deterioro del cardamomo, los cuales afectan no solo su consistencia, sino también, tamaño, color y demás características (Ravindran y Madhusoodanan, 2002).

Las operaciones de pre-secado son muy dependientes de cada agricultor, no todos realizan todas las actividades clasificadas dentro de este rubro. A continuación, se listan algunas de dichas actividades:

- Lavado de las cápsulas recién cosechadas (cardamomo cereza), con el fin de remover partículas de suelo adherido a la misma.
- Inmersión en agua tibia (30 – 35 °C), con el fin de aumentar la retención del color verde.
- Agregado de aditivos como carbonato de sodio (2%) a agua tibia y posterior inmersión del cardamomo.
- Otro tipo de tratamientos con aditivos como compuestos de cobre, sulfato de magnesio o urea.

De dichas operaciones anteriores, cabe destacar que, aunque muchas de ellas buscan ayudar a retener el color de la cápsula, estas no han demostrado resultados consistentes que demuestren su efectividad, de ahí que sean muy pocos los agricultores que apliquen dichas prácticas, exceptuando la primera (Ravindran y Madhusoodanan, 2002).

C. IMPORTANCIA DEL SECADO DE ALIMENTOS

1. La importancia del agua en los alimentos

Todos los alimentos se constituyen como una mezcla de diversos compuestos y elementos. El agua es uno de los constituyentes más importantes y abundantes en los alimentos, los cuales se pueden clasificar en tres grupos, según su contenido de agua: alimentos de alto, medio y bajo contenido de humedad. Alimentos como frutas, vegetales, jugos y carnes pertenecen al grupo de alimentos con alto contenido de humedad, mientras que alimentos como vegetales deshidratados y granos pertenecen al grupo de bajo contenido de humedad; en el Cuadro 3 se muestra el porcentaje de humedad típico de algunos alimentos.

Cuadro 3. Porcentaje de humedad típico de algunos alimentos.

Alimento	Porcentaje de humedad típico [%]
Pepinos	95 – 96
Tomates	93 – 95
Repollo	90 – 92
Jugo de naranja	86 – 88
Manzanas	85 – 87
Huevos enteros	74
Pollo asado	68 – 72
Queso duro	30 – 50
Jamones preservados	30 – 35
Miel	15 – 23
Trigo	10 – 13
Nueces	4 – 7
Cebolla deshidratada	4 – 5
Leche en polvo	3 – 4

Fuente: Berk, 2018.

En la mayoría de los alimentos el contenido de agua es el principal responsable de características como textura y apariencia, sobre todo en vegetales y frutas; pero también es un componente esencial para llevar a cabo las reacciones químicas que permiten el crecimiento de microbios, que a su vez propician el deterioro del alimento mediante mecanismos enzimáticos, químicos y microbiarios.

Los alimentos, tal como se observa en el Cuadro 3, poseen diferentes porcentajes de agua usuales, y su deterioro por efectos de esta varía radicalmente de alimento a alimento. El parámetro que se utiliza principalmente para determinar la interacción entre un alimento y el ambiente es conocido como actividad acuosa, la cual se define como la relación entre la presión de vapor parcial de agua en el alimento, respecto a la presión de equilibrio de vapor del agua a la misma temperatura, como se observa en la siguiente ecuación.

$$a_w = \frac{p}{p_o} \quad (\text{ec. 1})$$

Donde:

- a_w es la actividad acuosa.
- p es la presión de vapor parcial de agua en el alimento [Pa].
- p_o es la presión de equilibrio de vapor de agua [Pa].

De la ecuación 1 se intuye que alimentos con una actividad acuosa menor a la del medio expuesto, absorberá agua de dicho medio; por lo contrario, si el alimento posee una actividad acuosa mayor a la del medio en el que se encuentra, este liberará agua en forma de vapor, hasta equiparar sus actividades acuosas, lo que usualmente sucede cuando la actividad acuosa del alimento iguala la humedad relativa del ambiente. Este último hecho permite expresar la actividad acuosa en términos de la humedad relativa de equilibrio (ERH por sus siglas en inglés), tal como se ve en la ecuación 2 (Berk, 2018).

$$a_w = \frac{ERH}{100} \quad (\text{ec. 2})$$

En el Cuadro 4 se muestran valores usuales de actividad acuosa para algunos alimentos.

Cuadro 4. Actividad acuosa de algunos alimentos.

Alimento	Rango de actividad acuosa
Frutas frescas, vegetales, leche, carne, pescado.	0.95 – 1
Quesos semi duros, pescado salado, pan.	0.90 – 0.95
Quesos duros, embutidos, mantequilla.	0.85 – 0.90
Concentrado de jugos, jaleas, comida de mascotas húmeda.	0.80 – 0.85
Quesos secos, legumbres, conservas.	0.70 – 0.80
Pasas, miel, granos.	0.50 – 0.70
Almendras.	0.40 – 0.50
Leche descremada en polvo.	0.20 – 0.40
Café instantáneo, azúcar.	Menores a 0.20

Fuente: Berk, 2018.

Un aspecto importante por resaltar es que el crecimiento bacterial y muchas reacciones enzimáticas requieren de actividad acuosa mayores a 0.85, exceptuando el caso de especies osmóticas (aquellas que pueden desarrollarse en ambientes con baja actividad acuosa) (Berk, 2018).

2. Mecanismos de deterioro y preservación de alimentos

El deterioro de alimentos se define como cualquier proceso que conlleve a la degradación de la seguridad, calidad sensorial (como sabor, olor, textura, color, apariencia), o valor nutricional de los alimentos (Berk, 2018). Los mecanismos de deterioro se pueden clasificar como se muestra:

- Deterioro microbial: Se da cuando el deterioro es causado por actividades causadas o en presencia de microorganismos.

- Deterioro enzimático: Constituye a todos aquellos cambios indeseables causados por enzimas.

- Deterioro químico: Todos aquellos cambios indeseables causados por reacciones químicas no enzimáticas entre componentes de los alimentos, o entre estos últimos y el ambiente.

- Deterioro físico: Son los cambios indeseables de la estructura física del alimento (e.g. separación de emulsiones, cristalización de conservas, etc.).

De estos mecanismos, el deterioro por microorganismos es el más importante, debido a que este daña tanto la calidad como la seguridad de ingesta de los alimentos. Dicha actividad bacterial se da en frutos con alta actividad acuosa (Berk, 2018).

La preservación de alimentos, como su nombre lo indica, posee como finalidad el retrasar lo más posible el deterioro de los alimentos. Para poder cumplir tal objetivo se han desarrollado diversos procesos de preservación.

- Preservación por calor (procesos térmicos): Este método se basa en el hecho que muchos microorganismos y bacterias no poseen resistencia a altas temperaturas, por lo que los alimentos se suelen calentar a dichas temperaturas durante tiempos considerables, pero esto implica otros procesos químicos que provocan cambios en la textura, sabor, color; a este método se le conoce coloquialmente como cocina.

- Preservación por remoción de calor: Al contrario de la cocina, este método no elimina los microorganismos ni enzimas, ya que lo que busca es simplemente ralentizar sus procesos químicos, aspecto que se mantiene mientras la temperatura sea lo suficientemente baja. De este mecanismo se desarrollan dos tecnologías: la refrigeración, que consiste en mantener los alimentos a temperaturas

bajas, pero sobre el punto de congelación; y la congelación, que como su nombre indica congela los alimentos. La diferencia entre estas tecnologías radica no solamente en la temperatura, sino también en el cambio de fase, que en el caso de la fase sólida resulta en una reducción drástica de la actividad acuosa y movilidad molecular, así como cambios indeseables y permanentes a la textura del alimento.

- Preservación por reducción de actividad acuosa: Como se mencionó anteriormente, tanto la actividad química de los microorganismos y enzimas es altamente dependiente de la actividad acuosa del alimento. Si dicho parámetro es demasiado bajo, tanto los microorganismos como las enzimas no podrán realizar reacciones químicas que deterioren el alimento. Por lo tanto, este mecanismo se enfoca en la reducción de la actividad acuosa del alimento, y del cual se derivan distintas tecnologías como el secado o el agregado de solutos (azúcar o sal).

- Preservación por radiación ionizante: Esta tecnología permite la destrucción de microorganismos y la desactivación de enzimas, por lo que posee un gran potencial, pero la percepción por parte de los consumidores es uno de los problemas que más le afectan.

- Preservación química: Este proceso se fundamenta en la reducción del pH de los alimentos, lo cual puede ser logrado por la adición de ácidos (e.g. vinagre, ácido cítrico) o por la inducción de la producción de estos por parte del alimento (i.e. fermentación). Así también, se han desarrollado químicos sintéticos que ayudan a la preservación de los alimentos frente a deterioros causados por microorganismos o enzimas, como antioxidantes.

Debido a la naturaleza de los métodos de preservación y su campo de acción, se suele usar no solamente uno sino la combinación de algunos de dichos métodos para poder garantizar una adecuada preservación según el alimento y el ambiente en el que se espere que se almacene. Un ejemplo claro de ello es la carne seca, la cual hace uso de la preservación por reducción de actividad acuosa (secado y sal como soluto) y de la preservación química (bajo pH).

Adicionado a los efectos de los métodos de preservación, el empaçado provee una barrera protectora entre el ambiente y alimento, que lo protege de contaminación por microorganismos, contaminación por agentes de intercambio como agua u oxígeno (Berk, 2018).

3. Características de sólidos húmedos.

El contenido de humedad en sólidos es un indicador directo de la cantidad de agua contenida en dicho sólido, que a la vez es un indicador indirecto de la calidad del producto, así como un parámetro definitivo para determinar el método de almacenamiento y el tiempo antes de la degradación del alimento, especialmente por los mecanismos de deterioro microbial y enzimático (Bala, 2017).

Debido a la relevancia de este parámetro se han especificado definiciones estándar sobre la cuantificación del contenido de humedad, así como de métodos para su correcta medición.

a. Representaciones de humedad.

El contenido de humedad presente en un grano es representado según dos estándares: contenido de humedad en base húmeda (w.b. por sus siglas en inglés), y contenido de humedad en base seca (d.b. por sus siglas en inglés) (Bala, 2017).

- Base húmeda: El contenido de humedad del grano es expresado como la razón entre la masa de agua presente en el grano y el peso total del grano. Por lo que usualmente se suele expresar en porcentaje, lo que permite una interpretación simple e intuitiva, lo que ha causado que sea el estándar entre agricultores y mercaderes.

$$M_{wb} = \frac{M_{agua}}{M_{agua} + M_{seco}} \quad (\text{ec. 3})$$

- Base seca: El contenido de humedad del grano se expresa como la razón entre la masa de agua presente en el grano y el peso de la masa del grano seco (sin humedad). Este tipo de estándar suele ser utilizado por investigadores e ingenieros por su facilidad de operación en cálculos.

$$M_{db} = \frac{M_{agua}}{M_{seco}} \quad (\text{ec. 4})$$

Debido a la utilidad de ambas representaciones de humedad es común que se realicen conversiones entre ambos sistemas, mediante las siguientes expresiones.

$$M_{db} = \frac{M_{wb}}{1 - M_{wb}} \quad (\text{ec. 5})$$

$$M_{wb} = \frac{M_{db}}{1 + M_{db}} \quad (\text{ec. 6})$$

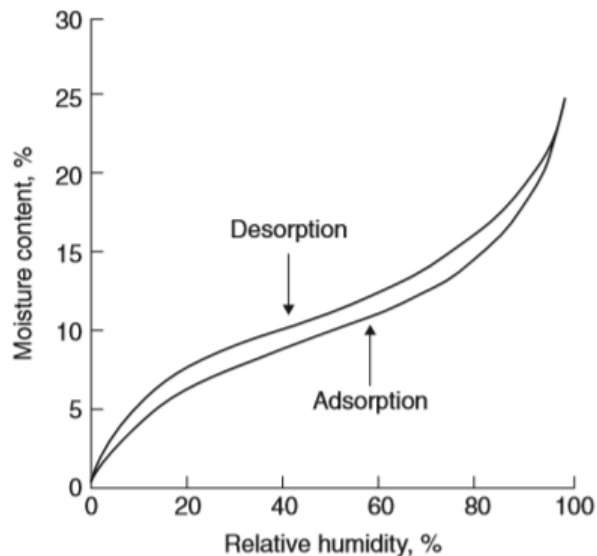
Es usual que se realicen conversiones entre sistemas de representación de humedad debido a la utilidad que posee cada sistema de representación, siendo el sistema base seca (d.b.) el más utilizado en cálculos y procesos de diseño; mientras que el sistema base húmedo (w.b.) es el más utilizado para representación de entendimiento común.

b. Contenido de humedad de equilibrio.

El contenido de humedad de equilibrio (EMC por sus siglas en inglés) de un grano se define como el contenido de humedad del grano después de ser expuesto al ambiente durante un tiempo infinito o lo suficientemente largo que el gradiente de humedad entre el ambiente y el grano no cause una transferencia de humedad neta, este se suele representar como X_e (Bala, 2017).

Por lo tanto, el contenido de humedad de equilibrio del grano es dependiente de las propiedades psicrométricas del ambiente, tales como temperatura de bulbo seco, humedad relativa, presión atmosférica, etc. A partir de la relación que existe entre el contenido de humedad de un grano y su contenido de humedad de equilibrio a temperatura constante, se desarrollan curvas llamadas isotermas, en las cuales se denota dicha relación en proceso de adsorción y desorción (ver Ilustración 4).

Ilustración 4. Isotherma de adsorción y desorción.



Fuente: Bala, 2017.

La curva de adsorción relaciona el valor de EMC que corresponde a cierto porcentaje de humedad relativa del ambiente al que se expone durante un proceso de aumento de humedad en el grano. Por otro lado, la curva de desorción denota la misma relación entre variables en un proceso de reducción de humedad en el grano. Ambas curvas se desarrollan a presión y temperatura de ambiente constantes.

La diferencia que existe entre ambas curvas señala que no solo las condiciones ambientales definen dichos procesos de aumento o reducción de humedad en el grano, dicha diferencia es el resultado del efecto histéresis, del cual se teoriza, que depende del contenido de humedad anterior del grano y propiedades de este como encogimiento molecular, mecanismo de transporte interno (difusividad efectiva) y formación de grietas en la superficie del grano (Bala, 2017).

Con fin de facilitar el acceso a los datos provistos por las isoterms, se han desarrollado tablas para distintos alimentos como maíz amarillo (Cuadro 5), granos de soya (Cuadro 6), entre otros (McNeill, 2012).

Cuadro 5. Contenido de humedad de equilibrio de maíz amarillo según temperatura y humedad relativa de ambiente.

Temperatura [°F]	Humedad relativa [%]									
	10	20	30	40	50	60	65	70	80	90
	Contenido de humedad de equilibrio [% base húmeda]									
35	6.5	8.6	10.3	11.8	13.3	14.8	15.7	16.6	18.7	21.7
40	6.2	8.3	9.9	11.5	12.9	14.5	15.3	16.2	18.3	21.3
50	5.7	7.8	9.4	10.9	12.3	13.8	14.7	15.5	17.6	20.5
60	5.3	7.3	8.9	10.3	11.8	13.3	1.1	15.0	17.0	19.9
70	4.9	6.9	8.4	9.9	11.3	12.8	13.6	14.4	16.4	19.4
80	4.6	6.5	8.0	9.4	10.8	12.3	13.1	14.0	16.0	18.8
90	4.2	6.1	7.7	9.1	10.5	11.9	12.7	13.5	15.5	18.4

Fuente: McNeill, 2012.

Cuadro 6. Contenido de humedad de equilibrio de soya según temperatura y humedad relativa de ambiente.

Temperatura [°F]	Humedad relativa [%]									
	10	20	30	40	50	60	65	70	80	90
	Contenido de humedad de equilibrio [% base húmeda]									
35	4.2	5.3	6.5	7.8	9.4	11.5	12.8	14.4	19.1	28.9
40	4.1	5.3	6.4	7.7	9.3	11.3	12.6	14.2	18.9	28.7
50	4.0	5.2	6.3	7.6	9.1	11.1	12.4	14.0	18.6	28.2
60	4.0	5.1	6.2	7.4	8.9	10.9	12.2	13.7	18.3	27.8
70	3.9	5.0	6.1	7.3	8.8	10.7	11.9	13.5	17.9	27.3
77	3.8	4.9	6.0	7.2	8.6	10.6	11.8	13.3	17.7	27.0
90	3.7	4.8	5.8	7.0	8.4	10.3	11.5	13.0	17.3	26.5

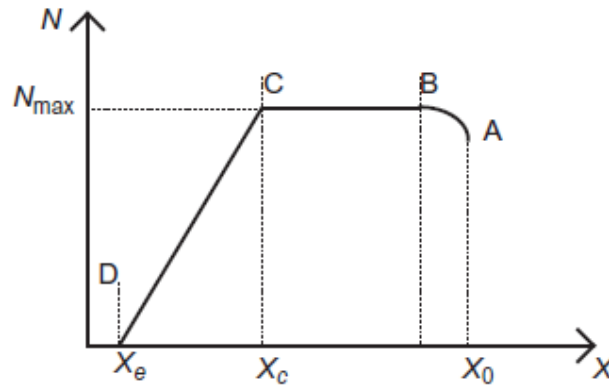
Fuente: McNeill, 2012.

c. Contenido de humedad crítico.

El contenido de humedad crítico (CMC por sus siglas en inglés) es un concepto que nace de la construcción de curvas de secado, las cuales se detallan en la sección F del presente documento. Se define como contenido de humedad crítico al contenido de humedad presente en el alimento que denota el fin de la fase de secado constante y el inicio de la fase de secado en reducción. Aunque se defina un punto de transición entre ambas fases, es usual que en procesos de secado de alimentos no se observe una transición tan marcada, sino un aumento gradual de la pendiente de la curva; sin embargo, para propósitos de modelado el concepto es muy útil.

El contenido crítico de humedad se suele representar como X_c , tal como se denota en la ilustración siguiente.

Ilustración 5. Curva de secado teórica.



Fuente: Berk, 2018.

Dicho contenido de humedad crítica es totalmente dependiente del alimento por secar y parcialmente de las condiciones del proceso de secado al que se someta. Al igual que el coeficiente de convección, el contenido crítico de humedad usualmente es obtenido de forma experimental (Berk, 2018).

D. PRINCIPIOS DE SECADO DE ALIMENTOS.

Características como textura, estructura, color, sabor, olor y valor nutricional están sujetas a cambio como resultado del proceso de secado. En dicho proceso, la transferencia de calor y transferencia de masa juegan un rol muy importante en la definición de las propiedades anteriormente descritas. Algunos de los fenómenos más importantes resultantes de la transferencia de calor y masa son la reducción de tamaño del alimento (en productos porosos), desnaturalización de proteínas, entre otros.

Durante el secado muchos solutos como proteínas o azúcares son liberados junto a las moléculas de vapor de agua, lo que resulta en un alimento con una composición distinta a la inicial. Para poder controlar los efectos del secado en cada uno de los alimentos se han desarrollado diferentes tecnologías con base en distintos principios físicos que permiten lograr mejores resultados según el método de aplicación y el alimento objetivo.

1. Secado convectivo.

Este método se basa en la transferencia de calor suficiente para inducir la evaporación de agua en la superficie del alimento. Usualmente se utiliza la combustión de un gas para calentar aire que luego se hace pasar rodeando la superficie del alimento objetivo. Con este método se desarrollan procesos de transferencia de calor y de masa, siendo estos del tipo convectivo principalmente, ya que transferencia conductiva y radiante se dan, aunque a una escala menos significativa (Berk, 2018).

2. Secado conductivo.

A diferencia del secado convectivo, este método se basa en el mecanismo de transferencia de calor conocido como conducción. Este consiste en colocar el alimento en contacto con una superficie caliente, la cual, por conducción, calienta el agua hasta evaporarla del alimento. Al igual que en el secado convectivo, el vapor de agua lleva consigo microorganismos, enzimas y demás componentes importantes del alimento. Algunos métodos como secado al vacío o secado por vapor sobrecalentado son derivados de este principio (Berk, 2018).

3. Deshidratación osmótica.

Consiste en la remoción de agua del alimento al ser este sumergido en una solución con gran presión osmótica (e.g. salmuera). Su nombre deriva del principio en el que se basa, ósmosis, el cual supone la transición del medio soluble a través de una membrana semipermeable hasta equiparar la presión osmótica del sistema en cuestión (Berk, 2018).

4. Liofilización.

También conocido como secado por congelación, es un método que consiste en la remoción de agua mediante la sublimación de esta del alimento congelado en presiones muy por debajo de la atmosférica, esto en el caso de alimentos sólidos. En el caso de líquidos, el método por utilizar consiste en la congelación de dicho alimento y someterlo a un proceso de centrifuga buscando que los cristales de agua congelada sean exteriorizados y posteriormente derretidos y drenados (Berk, 2018).

5. Descomposición del agua por medios químicos.

Consiste en la remoción de agua del alimento mediante reacciones químicas, tales como el carburo de calcio que al reaccionar con el agua produce hidróxido de calcio y acetileno. El principio de descomposición química consiste en la formación de dos sustancias a partir de un compuesto químico y, usualmente, un agente externo. Dicho proceso puede ser causado por efectos térmicos, electrolíticos o catalíticos, según la molécula y agentes involucrados en el mismo (IUPAC, 2014).

6. Adsorción.

Este método consiste en la remoción de agua del medio mediante el uso de un material poroso con gran capacidad de retención de esta. Usualmente este material poroso es un sólido que mantiene una película de líquido o gas en su superficie, de la cual remueve el agua. Materiales aptos para ser utilizados bajo este principio son el gel de sílice o la alúmina (Guillén, 2019).

7. Absorción.

Según la capilaridad del fluido y la capacidad de retención de agua del material poroso, este método implica la remoción de agua a través de la superficie del material absorbente y la distribución a través de este (Guillén, 2019).

8. Separación mecánica.

Este principio de secado se fundamenta en la aplicación de fuerzas (principalmente centrífuga y gravitacional) como medios de separación de agua del cuerpo. Ejemplos de este son el secado por centrifugación de textiles y algunos alimentos (Guillén, 2019).

E. TIPOS DE SECADORES DE ALIMENTOS.

Los distintos secadores son tecnologías desarrolladas con base en los principios de secado anteriormente expuestos. Debido a que existen gran cantidad de tipos de secadores, estos pueden ser clasificados según diversas propiedades tales como:

- i. Mecanismo de operación: Secado de lotes o secado continuo.
- ii. Mecanismo de transferencia de calor: Secado por convección con aire, convección con vapor, conducción, o radiación.
- iii. Estado físico del alimento: Sólido, líquido, pasta.
- iv. Movimiento del alimento durante el proceso: Estático, en movimiento, o fluidizado.
- v. Presión de operación: Atmosférico, al vacío, o a altas presiones.

Se hace notar que un secador puede ser adaptado de un tipo a otro según la clasificación que se tome. Por ejemplo, un secador puede admitir procesos de secado donde el alimento sea estático o en movimiento. En el Cuadro 7 se detallan las posibles clasificaciones de algunos de los secadores más comunes.

Cuadro 7. Clasificación de los tipos de secadores más comunes.

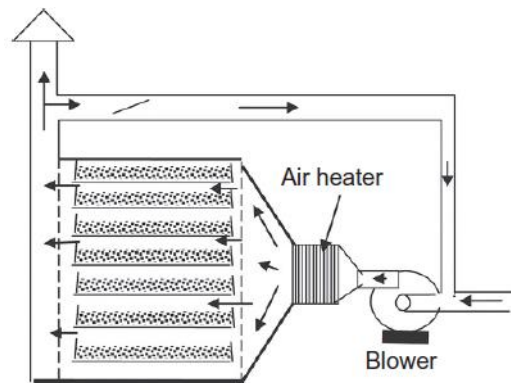
Tipo de secador	Mecanismo de operación	Estado físico del alimento	Ejemplos de alimentos aptos
Gabinete	Lote.	Sólido.	Frutas, vegetales, carnes, pescado.
Túnel	Continuo.	Sólido.	Frutas, vegetales.
Banda transportadora (flujo paralelo)	Continuo.	Sólido, pasta.	Frutas, vegetales.
Banda transportadora (flujo atravesado)	Continuo.	Sólido.	Vegetales.
Rotativo	Lote, continuo.	Sólido.	Forraje, desechos.
Contenedor	Lote.	Sólido.	Vegetales.
Aerosol	Continuo.	Líquido, pasta.	Leche, café, té.
Lecho fluidizado	Lote, continuo.	Sólido.	Vegetales, granos, levadura.
Neumático	Continuo.	Sólido.	Harina.
Barril	Lote, continuo.	Líquido, pasta.	Sopas, puré de papa.
Solar	Lote, continuo.	Todo.	Todo.
Al sol	Lote.	Sólido.	Frutas, vegetales, pescado.

Fuente: Berk, 2018.

1. Secador tipo gabinete.

Este tipo de secador se utiliza principalmente en alimentos sólidos, sin movimiento, los cuales se procesan por lotes. Se suele utilizar para procesos de pequeña a media escala (entre 2,000 a 20,000 kg por día). Suelen ser sencillos de fabricar y de bajo costo. Su estructura es en esencia una cámara cerrada donde se colocan bandejas que contienen los alimentos por secar, tal como se muestra en la Ilustración 6.

Ilustración 6. Esquema general de un secador tipo gabinete.



Fuente: Berk, 2018.

El mecanismo de funcionamiento se basa en colocar las bandejas apiladas en columnas con un correcto espaciamiento entre ellas. Mediante un ventilador y un medio de calefacción de aire, se hace circular este fluido sobre, debajo y, a través, de las bandejas. En este tipo de secador, la geometría general del equipo es definitivo en la definición de uniformidad de flujo, temperatura y por ende de la tasa de secado del alimento. Por ejemplo, por la condición geométrica de las bandejas y el flujo transversal a estas, los alimentos colocados al extremo de la entrada del flujo de aire se secarán más rápido que aquellos localizados en el extremo opuesto.

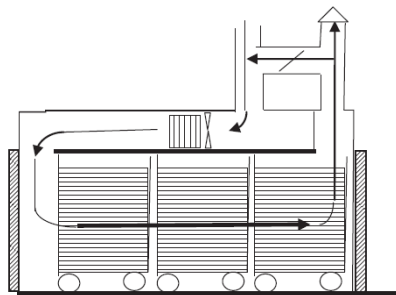
Por sus características de construcción e implicación económica, este tipo de secadores se suele encontrar en áreas rurales, usualmente enfocado en el secado de frutos como uvas o manzanas, así como vegetales y distintos tipos de hierbas. En este tipo de secador es común encontrar configuraciones con temperaturas de admisión entre los 50 y 80 °C, así como velocidades de pocos m/s, propiedades las cuales pueden diferir mucho entre distintos alimentos, y que deben ser ajustados según el tamaño, forma y densidad de los alimentos por secar (Berk, 2018).

2. Secador tipo túnel.

Tal como se especifica en el Cuadro 7, este tipo de secador se utiliza de forma continua en alimentos sólidos sin movimiento. Este tipo de secador consiste principalmente en una gran cámara de secado (túnel) dentro de la cual se colocan una serie de bandejas en la que se coloca el alimento por secar. A diferencia del secador tipo gabinete, el tipo túnel se suele utilizar para cargas mucho mayores, y el proceso de secado se realiza de forma continua, que divide el proceso en etapas, que permiten la variación de parámetros como velocidad y otras condiciones de flujo.

Este secador permite diversas configuraciones según la distribución de las bandejas dentro del túnel, y la dirección del flujo relativo a las bandejas. Las configuraciones de flujo son: concurrente, contracorriente y mixto. El primero hace referencia a la configuración donde el aire y el alimento fluyen en la misma dirección; la segunda implica lo contrario; y la última se refiere a cualquier otra configuración de flujo. En la Ilustración 7 se muestra un esquema sencillo de un secador tipo túnel con flujo concurrente (Berk, 2018).

Ilustración 7. Secador tipo túnel.



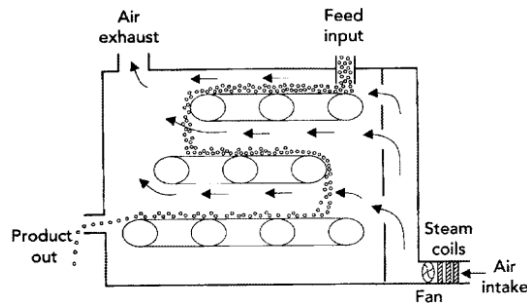
Fuente: Berk, 2018.

3. Secador por banda transportadora (flujo paralelo).

Considerado como uno de los secadores más versátiles, este tipo de secador se utiliza de forma continua en alimentos sólidos y pastosos estáticos. Su mecanismo de funcionamiento es similar al del secador tipo túnel, con la principal diferencia que en lugar de utilizar bandejas se utilizan bandas transportadoras. Esto permite nuevas configuraciones de flujo tales como concurrente, contra corriente o las combinaciones de estos.

Suelen ser utilizados, debido a su naturaleza de secado continuo, en procesos de deshidratación de gran escala, principalmente de vegetales. Algunas características que hacen que este tipo de secador se prefiera sobre el tipo túnel son: carga y descarga menos laboriosa del alimento a las bandas (comparado al proceso en bandejas), permite configuraciones donde el grano cambie de posición relativa a la entrada de flujo y su posición relativa a la capa de alimento, además, permite el uso de bandas en serie que pueden ser adaptadas a las distintas etapas de secado, optimizado flujos de aire y espacio por utilizar, tal como se muestra en la Ilustración 8 (Fellows, 2000).

Ilustración 8. Secador por banda transportadora de tres etapas.

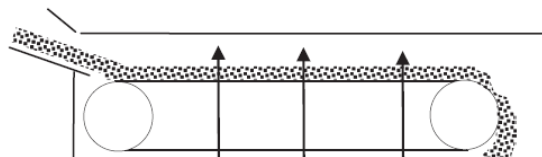


Fuente: Fellows, 2000.

4. Secador por banda transportadora (flujo atravesado).

Este tipo de secador es una variación de la banda transportadora común (flujo paralelo), de la cual se diferencia principalmente por el flujo del aire, el cual atraviesa la banda transportadora de forma perpendicular a su superficie, tal como se muestra en la Ilustración 9.

Ilustración 9. Esquema general de secador por banda transportadora (flujo atravesado).



Fuente: Berk, 2018.

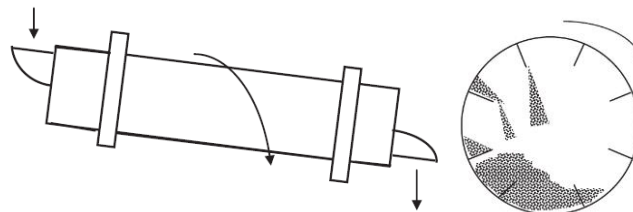
Este tipo de secador fue diseñado para secar vegetales en trozos y demás alimentos de tamaños pequeños, los cuales se colocan sobre una banda transportadora con ranuras que permitan el flujo de aire y mueva los alimentos de forma paulatina. Este tipo de secador está cercano al principio de fluidización, sin embargo, dicho fenómeno no ocurre durante el proceso (Berk, 2018).

5. Secador rotativo.

Estos secadores son cilindros metálicos con una pequeña inclinación de su eje principal, tal como se muestra en la Ilustración 10. Internamente posee paletas que le permiten al aire fluir en de forma paralela o contracorriente respecto al grano, lo cual provee una gran área de contacto entre el grano y el aire que aumenta la tasa de secado, lo cual, unificado a la rotación del cilindro, se alcanza un secado más uniforme.

Aunque se ven muchas ventajas en este tipo de secador, posee algunas claras desventajas tales como el daño causado al alimento por el impacto y la abrasión causado por el constante movimiento de la cámara de secado, es por ello por lo que se utiliza grandemente en forraje o desechos. Sin embargo, se han desarrollado algunas variaciones que permiten el secado de alimentos como nueces y otros alimentos con suficiente resistencia al desgaste en su superficie (Barr y Baker, 1997).

Ilustración 10. Esquema general de un secador rotativo.



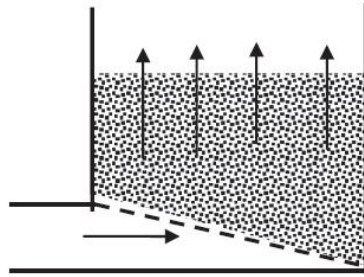
Fuente: Berk, 2018.

6. Secador tipo contenedor.

Debido a que muchos secadores especializan su operación en las primeras etapas de secado, estos presentan dificultades en las últimas etapas de secado, donde la tasa de remoción de agua presenta una gran disminución de su magnitud. El secador tipo contenedor es una respuesta a esta problemática, por lo que se especializa en secar alimentos con contenidos de humedad inicial entre 15 – 20% y reduciéndolo hasta un 3 – 6% (Berk, 2018).

Este secador se denomina tipo contenedor, ya que su mecanismo de funcionamiento consiste en colocar el alimento dentro de un contenedor, el cual posee orificios en su base, a través de los cuales se hace fluir aire a bajas velocidades y temperaturas moderadas (ver Ilustración 11), hasta que se alcance la humedad deseada del alimento. Además, debido a su naturaleza, este suele requerir movimientos manuales del alimento, buscando que el secado sea más uniforme, razón que suma a los largos periodos que suele tomar este proceso.

Ilustración 11. Esquema general de un secador tipo contenedor.



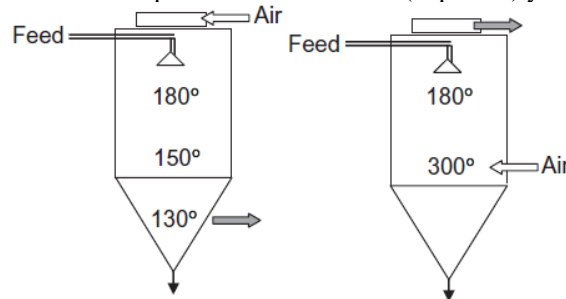
Fuente: Berk, 2018.

7. Secador tipo aerosol.

El secador tipo aerosol (spray en inglés) es utilizado principalmente para secar alimentos en estado líquido o pastoso en movimiento y de forma continua y transformarlos en polvos. Usualmente estos alimentos en estado líquido o pastoso son atomizados en forma de pequeñas gotas las cuales son inyectadas en un flujo de aire caliente ($150 - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) en dirección concurrente o contracorriente respecto al alimento (ver Ilustración 12). Según el propósito del secador se utilizan distintos tipos de boquilla en el atomizador, algunas de estas son: atomizador centrífugo, atomizador de boquilla de presión, atomizador de boquillas de dos fluidos, y atomizador de boquilla ultrasónica.

Este método suele desarrollar tiempos de secado muy cortos, debido a la gran cantidad de área superficial disponible para el secado, así como las altas temperaturas y velocidades del fluido. Este método es el utilizado de forma estándar en la producción de leche en polvo, cremora para café, café instantáneo, y demás productos en polvo. Dentro de sus principales ventajas se encuentran los tiempos de secado cortos, su capacidad de secado continuo, baja intensidad laboral, y una operación y mantenimiento relativamente simple. Aunque se enfrenta a retos como altas sumas de inversión inicial, y la constante inyección de humedad que permita atomizar los alimentos para posteriormente removerla. En muchas industrias los secadores de lecho fluidizado o de banda transportadora están comenzado a sustituir a los secadores tipo aerosol (Fellows, 2000).

Ilustración 12. Esquema de secador tipo aerosol concurrente (izquierda) y contracorriente (derecha).



Fuente: Berk, 2018.

8. Secador de lecho fluidizado.

La principal característica que distingue a este tipo de secador es la cámara que permite crear una región homogénea de aire, previniendo así focos de aire con velocidades muy bajas o altas, lo que se traduce en una mayor uniformidad de secado. El mecanismo de funcionamiento se constituye principalmente del soplado de aire caliente a alta presión a través de un lecho poroso que permite que el alimento se suspenda sobre dicho lecho, generando así una mayor área de contacto y por ende una mayor transferencia de calor y finalmente una mayor tasa de secado. Durante el proceso es común que se cuente con un mecanismo de mezclado, buscando que la fluidización del alimento permita una exposición lo más uniforme posible.

Este tipo de secadores suelen ser compactos y ofrecen un gran control sobre las condiciones de secado y son típicamente utilizados en procesos con altas tasas de remoción de agua, aplicable a aglomeración de alimentos en polvo o el recubrimiento de partículas (Fellows, 2000).

9. Secador neumático.

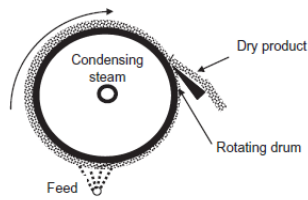
El mecanismo de este secador consiste en el flujo de aire que permiten suspender las partículas de los alimentos en dicho medio, donde el aire suele ir a altas temperaturas y velocidades, lo que induce una tasa de secado muy alta. Por la naturaleza del secador, los alimentos tratados con este suelen estar durante tiempos muy cortos dentro del mismo, y dichos alimentos suelen poseer una humedad menor al 40%, y con partículas de tamaño entre 10 – 500 μm (e.g. harinas, gluten en polvo, etc.).

Es por ello por lo que se han desarrollado dos variantes de este secador, el primero es conocido como “*flash dryer*” el cual coincide con la descripción del secador anteriormente presentada, es por ello por lo que esta variante suele ser utilizada como un método de pre-secado, ya que al ser en tiempos de secado tan corto (2 – 10 s) la humedad por remover es significativa mas no suficiente para ser considerado un proceso completo de secado. La segunda variante es conocida como “secadores de aro neumático”, el cual añade recirculación a la primera variante del secador. (Fellows, 2000).

10. Secador tipo barril.

Este tipo de secador se constituye principalmente por un cilindro metálico rotativo, del cual se calienta la superficie hasta 120 – 155 °C mediante la condensación de vapor en el interior del cilindro. Se hace recorrer al alimento húmedo por la superficie de dicho cilindro, secado así principalmente por conducción entre la superficie del cilindro y las finas capas de alimento sobre dicha superficie, tal como se muestra en la Ilustración 13. Estos secadores se suelen clasificar en dos: secadores de barril simple, y secadores de barril doble. La principal diferencia entre ambos es el número de cilindros que se hacen girar durante el proceso. En ambos casos, una pequeña capa del alimento se adhiere a la superficie del cilindro y este se seca en el proceso de la revolución del barril (Berk, 2018).

Ilustración 13. Esquema general de un secador tipo barril.



Fuente: Berk, 2018.

11. Secado al sol.

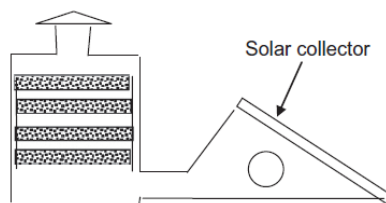
Con secado al sol se hace referencia principalmente al proceso de secado llevado a cabo por la irradiación solar sobre el alimento, la cual es una de las prácticas más comunes en muchas regiones del mundo, se estima que 250 millones de toneladas de frutas y granos son secados mediante este método en todo el planeta (Fellows, 2000).

Guatemala no es ajena a este método, ya que es uno de los principales en lo que respecta el secado de cardamomo, el cual se coloca en superficies irradiadas y el grano es movido constantemente por un operario con el fin de lograr uniformidad de secado hasta que se haya alcanzado la humedad deseada.

12. Secador solar.

Contrario al método de secado al sol, el término “secador solar” se suele utilizar exclusivamente para referirse a aquellos dispositivos que utilizan la energía solar para calentar aire y con este aplicar un secado convectivo en el alimento. Estos pueden ser clasificados en: Secadores directos de flujo natural, secadores directos con colector por separado (ver Ilustración 14), y secadores indirectos de flujo forzado. Este tipo de secadores suelen ser muy baratos y sencillos de fabricar y operar, pero poseen grandes limitaciones como el bajo o nulo control de las condiciones del proceso de secado, gran dependencia de las condiciones meteorológicas de la localidad y época, así como una intensiva labor sobre otros métodos disponibles. Aunque esta tecnología sigue desarrollándose y usualmente combinándose con otras tecnologías para fomentar el ahorro de combustibles y el uso de secadores con combustibles de gran impacto ambiental (como la leña o el carbón) (Fellows, 2000).

Ilustración 14. Esquema general de un secador solar.



Fuente: Berk, 2018.

F. SECADO POR CONVECCIÓN

1. Transferencia de calor y masa.

El fenómeno de transporte se define como todo intercambio de masa, energía, carga, momento lineal o momento angular entre los sistemas bajo estudio. Todo fenómeno de transporte es resultado de la ausencia de equilibrio entre las partes de los sistemas, dicha ausencia de equilibrio, que en la naturaleza se expresa como un gradiente, se denomina fuerza motriz. En el presente documento se analiza el fenómeno de transporte de masa y energía en forma de calor, donde las ecuaciones que gobiernan dicho proceso en un medio sin movilidad interna son las siguientes (Berk, 2018).

Transferencia de calor – Primera ley de Fourier

$$q = -k\nabla T \quad (\text{ec. 7})$$

Donde:

- q es el flujo de calor [W/m^2].
- k es la conductividad térmica [$\text{W}/\text{m K}$].
- ∇T es el gradiente de temperatura [K/m].

Transferencia de masa – Primera ley de Fick

$$J = -D\nabla\varphi \quad (\text{ec. 8})$$

Donde:

- J es el flujo de difusión [$\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$].
- D es el coeficiente de difusión de las especies de la sustancia a través del medio [m^2/s].
- $\nabla\varphi$ es el gradiente de concentración de sustancia [mol/m^4].

De las ecuaciones anteriores, un término que resulta de gran importancia es el coeficiente de difusión (o difusividad de masa). Dicho coeficiente depende del objeto que se esté analizando, en concreto de sus solutos, el medio en el que los dichos se encuentran y la temperatura del medio. Esta variable se determina fácilmente en gases, mediante la cinética de teoría de gases. Por otro lado, en líquidos se utiliza la ecuación Einstein-Stokes que define la difusión Browniana de un soluto, la cual se discute en la sección G del presente.

En el escenario de un proceso de secado tanto el flujo de calor como de masa varían respecto al tiempo, por lo que son escenarios de fenómenos de transporte transitorios, los cuales se definen con la segunda ley de Fourier (transferencia de calor) y la segunda ley de Fick (transferencia de masa) (Berk, 2018).

Transferencia de calor transitoria – Segunda ley de Fourier

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (\text{ec. 9})$$

Donde:

- α es la difusividad térmica [m^2/s].
- $\nabla^2 T$ es laplaciano de temperatura [K/m^2].

Transferencia de masa transitoria – Segunda ley de Fick

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) \quad (\text{ec. 10})$$

Donde:

- C es la concentración molar de la sustancia [mol/m^3].
- D es el coeficiente de difusión de las especies de la sustancia a través del medio [m^2/s].
- ∇C es el gradiente de concentración molar [mol/m^4].

Soluciones a estas ecuaciones se han desarrollado para geometrías simples como esferas, cilindros o bloques. Sin embargo, para geometrías más complejas, el uso de métodos computacionales se vuelve necesario.

Dichas ecuaciones son el fundamento de los mecanismos que dan lugar al proceso de secado, donde uno de los principales mecanismos de transferencia de calor es la convección. Convección es el término que se utiliza para describir un proceso de transferencia de energía entre una superficie y la superficie de un fluido en movimiento sobre dicha superficie. Dentro de esta definición de convección se encapsulan la transferencia de energía por el mecanismo de advección y el mecanismo de conducción o difusión; donde advección es la transferencia de energía por el movimiento del fluido, y difusión es la transferencia de energía causada por el movimiento aleatorio de las moléculas del fluido (Bergman, *et. al.* 2011).

La transferencia de calor por convección entre una superficie y el fluido en contacto se puede definir como:

$$q = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (\text{ec. 11})$$

Donde:

- q es la tasa de transferencia de calor.
- h es el coeficiente promedio de convección
- A_s es el área superficial en contacto con el fluido.
- T_s es la temperatura de la superficie de contacto.
- T_∞ es la temperatura del fluido lejano a la superficie de contacto.

Dicha ecuación es de gran importancia en los procesos secado por convección ya sea natural o forzado. Aunque es de gran utilidad, presenta un problema, el coeficiente promedio de convección. Dicho término, además de depender de las propiedades y estado del fluido (como densidad, viscosidad, conductividad térmica, calor específico, etc.), también depende en la geometría y propiedades del material por secar. La gran cantidad de variables independientes que influyen en la determinación de dicho coeficiente hacen que el obtener un coeficiente de convección adecuado sea una tarea ardua y muy específica según el escenario que se esté considerado. Es por ello por lo que el método más común para determinar dicho coeficiente sea la experimentación en condiciones que se asemejen lo más posible a las que se intentan analizar (Bergman, *et. al.* 2011).

La transferencia de masa correspondiente al proceso anteriormente descrito se modela matemáticamente con las siguientes igualdades.

$$-\frac{dW}{dt} = k_g A(p_s - p_a) = k'_g A(H_s - H_a) \quad (\text{ec. 12})$$

Donde:

- $\frac{dW}{dt}$ es la tasa de transferencia de masa de agua [kg/s].
- k_g es el coeficiente de convección de transferencia de masa [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s Pa}$].
- k'_g es el coeficiente de convección de transferencia de masa [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$].
- A es el área activa de transferencia [m^2].
- p_s es la presión parcial de vapor de agua en la superficie húmeda [Pa].
- p_a es la presión parcial de vapor de agua del aire inducido [Pa].
- H_s es el contenido de humedad base húmeda en la superficie húmeda [-].
- H_a es el contenido de humedad base húmeda en el aire inducido [-].

A partir de la ecuación anterior se definen dos tasas de secado:

Tasa de remoción de masa de agua por unidad de tiempo y unidad de masa de materia seca (ϕ).

$$\phi = -\frac{dW}{M dt} = -\frac{dX}{dt} \quad (\text{ec. 13})$$

Donde:

- $\frac{dW}{dt}$ es la tasa de transferencia de masa de agua [kg/s].
- M es la cantidad de masa seca del alimento [kg].
- X es la cantidad de humedad base seca del alimento [$\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{seco}}$].

Tasa de remoción de masa de agua por unidad de tiempo y unidad de área (N).

$$N = -\frac{dW}{A dt} \quad (\text{ec. 14})$$

Donde:

- $\frac{dW}{dt}$ es la tasa de transferencia de masa de agua [kg/s].
- A es el área activa de transferencia [m²].

Dentro del proceso de secado es importante determinar la cantidad de energía necesaria por añadir para evaporar las películas de agua sobre los alimentos. De acuerdo con Bergman, *et. al* (2011) dicha tasa de agregado de calor es dependiente del calor latente de vaporización del fluido por evaporizar y la tasa de fluido que se desee evaporar, lo cual se detalla en la siguiente expresión

$$q_{evap} = \dot{m}h_{fg} \quad (\text{ec. 15})$$

Donde:

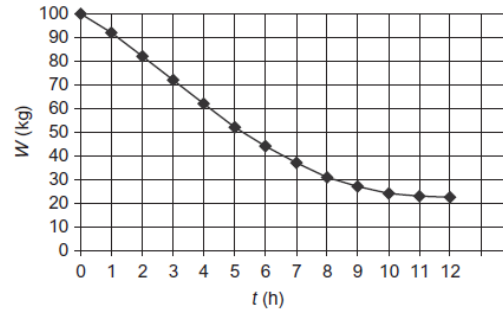
- q_{evap} es la tasa de agregado de calor necesario para evaporar.
- \dot{m} es el flujo másico de fluido por evaporizar.
- h_{fg} es la diferencia entre entalpía específica de vapor saturado y entalpía específica de líquido saturado.

2. Curva de secado.

El objetivo de todo secador es la disminución de contenido de humedad del alimento en cuestión. La forma en la que dicho proceso de secado se lleve a cabo determina características del secador como su capacidad máxima de secado, tiempos de secado, etc. Dichas características son dependientes tanto de condiciones externas como internas, las cuales se desarrollan a mayor profundidad en la sección H (Parámetros influyentes en el proceso de secado por convección) del presente documento. Sin embargo, el conjunto del efecto de dichos parámetros se puede resumir en las curvas de secado.

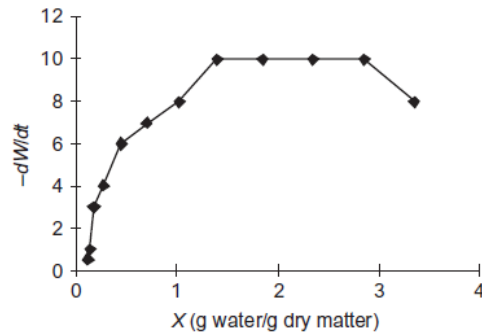
Las curvas de secado representan el proceso de secado, considerando todos los parámetros dependientes del secador, así como del alimento. Existen dos tipos de curvas de secado, un tipo consiste en graficar la relación entre el contenido de masa de agua presente en el alimento a través del tiempo de secado (Ilustración 15); el otro tipo relaciona la tasa de remoción de agua con la razón de cantidad de agua presente en el alimento y el peso de masa seca del alimento (humedad base seca) (Ilustración 16).

Ilustración 15. Curva de secado - Cantidad de agua a través del tiempo



Fuente: Berk, 2018.

Ilustración 16. Curva de secado – Tasa de secado según humedad base seca.



Fuente: Berk, 2018.

En la Ilustración 15 se denota que la disminución de contenido de agua no es constante (pendiente variable), la cantidad de agua que se remueve por unidad de tiempo disminuye con el avanzar del tiempo, es decir, la pendiente de la curva tiende a cero cuando el tiempo tiende a infinito.

El mismo efecto se hace notar en la Ilustración 16 (interpretación mediante lectura de derecha a izquierda en eje de abscisas). Cuando existe gran contenido de agua presente en el grano (X mayor) existe un valor de remoción de agua ($-dW/dt$) mayor. A medida que el contenido de agua disminuye respecto al contenido de masa seca del alimento, la tasa de remoción de agua también disminuye drásticamente. Se hace notar que existe un subdominio de la curva que denota un leve aumento en la tasa de remoción de agua, dicho subdominio presenta una duración muy corta. Por otro lado, el subdominio que le continúa presenta una tasa de remoción de agua constante, a partir de un valor de humedad de base seca, dicha tasa obtiene una pendiente negativa que disminuye el valor de tasa de remoción de agua hasta alcanzar un valor de 0 que se obtiene al lograr el equilibrio de presión de vapor entre el alimento y el fluido de secado. Al primer subdominio se le conoce como fase de secado en aumento; al segundo subdominio donde la tasa de remoción de agua es constante, se le conoce como fase de secado constante; al tercer subdominio se le conoce como fase de secado en reducción (Berk, 2018).

3. Fase de secado en aumento.

La fase de secado en aumento, también conocida como Región I, se caracteriza por presentar un aumento en la tasa de remoción de agua de forma instantánea. Este fenómeno es atribuido al periodo de acondicionamiento del alimento, donde se activan diversos mecanismos como apertura de poros, calentamiento, etc. Usualmente esta fase posee una duración muy corta y no siempre se presenta en todos los alimentos, por lo que suele omitirse en cálculos relacionados a diseño de secadores (Berk, 2018).

4. Fase de secado constante.

También conocida como Región II, se caracteriza principalmente por mantener una tasa de remoción de agua prácticamente constante, es decir, independiente del nivel de humedad del alimento. Esta fase ocurre cuando las condiciones externas principales (temperatura, humedad y velocidad del flujo) se mantienen constantes.

El hecho que la tasa de remoción de agua sea constante es debido a que el alimento se encuentra cubierto por una película de agua en su superficie en todo momento. De dicha película se evapora cierta cantidad de agua la cual es extraída mediante el flujo de aire caliente y a la misma tasa que el agua se evapora, esta se repone por agua dentro del alimento, respondiendo a los efectos de su naturaleza higroscópica. Por lo tanto, durante esta fase, la tasa de secado se ve únicamente limitada por la capacidad de vaporización por parte del flujo de aire inducido.

Al considerar esta fase en los cálculos se realizan las siguientes suposiciones:

- La superficie del alimento es agua saturada.
- La temperatura, humedad y velocidad del aire son constante.
- Convección es el único mecanismo de transferencia de calor entre el aire y la superficie húmeda.

Durante esta fase el alimento nunca superará la temperatura de saturación adiabática del aire, aun cuando la temperatura de bulbo seco del mismo sea muy superior (Berk, 2018).

Aunque esta fase permite modelar matemáticamente un subdominio del proceso de secado, es solamente una simplificación de la realidad, ya que no considera los siguientes aspectos:

- La superficie de los alimentos no se comporta como agua saturada, aun cuando el alimento sea de gran contenido de humedad. Esto es porque la presión de vapor de dicha película se reduce por solutos disueltos en la misma, entre otros.
- La transferencia de calor, en procesos reales, se da mediante los mecanismos de conducción, convección y radiación, no solamente convección, lo que resulta en una temperatura de superficie levemente superior a la temperatura de bulbo húmedo del aire.

- La energía añadida por transferencia de calor no solo se utiliza en el proceso de evaporación de agua, parte de esta es utilizada en efectos de calor sensible del agua (aumento de temperatura).
- El área superficial del alimento no es constante debido a encogimiento de este conforme pierde contenido de humedad.

La ausencia de dichas consideraciones provoca que la tasa de remoción de humedad no sea constante y se comporte como una recta con una leve pendiente decreciente en la tasa de remoción de humedad. Sin embargo, durante las fases de cálculo y modelado, se suele asumir que dicha fase presenta un comportamiento constante (Berk, 2018).

5. Fase de secado en reducción.

También llamada Región III, esta fase se diferencia principalmente por implicar una tasa de secado variable, donde a medida que la cantidad de humedad presente en el alimento se reduce, la tasa de secado también se reduce de forma considerable. Al contenido de humedad presente en el alimento que denota el fin de la fase de secado constante y el inicio de la fase de secado en reducción se le conoce como contenido de humedad crítico, tal como se desarrolla en la sección C de este documento. Aunque se defina un punto de transición entre ambas fases, es usual que en procesos de secado de alimentos no se observe una transición tan marcada, sino un aumento gradual de la pendiente de la curva; sin embargo, para propósitos de modelado el concepto es muy útil.

Esta fase encuentra sus causas en que la limitante de la tasa de secado deja de ser la capacidad de vaporización por parte del flujo y se vuelve la tasa de transporte interno de agua hacia la corteza del alimento que repone la película de agua en la superficie. Por lo tanto, el alimento deja de estar cubierto por agua en toda su superficie y por consecuencia, la tasa de vaporización se reduce, lo que reduce la remoción neta de agua del alimento y provoca que el alimento se acerque al contenido de humedad de equilibrio correspondiente a la humedad relativa y temperatura del aire inducido.

Durante esta etapa la temperatura del alimento tiende a aumentar de forma asintótica a la temperatura de bulbo seco del aire inducido. El proceso de secado se detendrá cuando el alimento alcance su contenido de humedad de equilibrio correspondiente a la temperatura y humedad del aire inducido.

La gran cantidad de variables vuelven a esta etapa del secado una fase altamente dependiente del alimento por analizar. Se han desarrollado diversos modelos matemáticos, empíricos y semi-empíricos con el fin de ser conceptos de modelado de dichas curvas, tomando como base diversos mecanismos de transporte interno, como difusión molecular, difusión por gradientes de presión de vapor, transporte capilar, etc. Es muy probable que varios tipos de mecanismos ocurran de forma simultánea y sean los responsables del movimiento interno de las moléculas de agua durante el proceso de secado.

Uno de los métodos más utilizados en modelado es el que asume la difusión molecular con base en las leyes de Fick como el principal mecanismo de transferencia molecular. Sin embargo, aunque se asuma que la difusión molecular es el principal mecanismo en acción, se presentan dificultades al considerar que la difusividad del agua en alimentos es altamente dependiente de la temperatura y composición de este. A lo anterior se le añaden fenómenos como migración de solutos, encogimiento y efectos térmicos que desvían los resultados provistos por la simplificación del modelo con base en las leyes de Fick.

Algunas soluciones propuestas son considerar una difusividad molecular promedio, también conocida como difusividad efectiva, la cual se desarrolla más a detalle en la sección G.

6. Tiempo de secado.

Uno de los parámetros más importantes por definir en un proceso de secado y el dispositivo por diseñar, es el tiempo de operación, es decir, el tiempo de secado del alimento. Para definir dicho parámetro se utiliza la definición de las tasas de remoción de agua (ecuaciones 16 y 17).

$$\phi = -\frac{dW}{M dt} = -\frac{dX}{dt} \Rightarrow -dW = -MdX = \phi M dt$$

Integrando ambos lados de la igualdad, se obtiene que el tiempo que transcurre entre un contenido de humedad base seca X_1 y X_2 es:

$$t = -\int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{\phi} \quad (\text{ec. 16})$$

De la ecuación 16 se hace evidente que la tasa de remoción de humedad base seca por unidad de tiempo se debe expresar como una función de la humedad base seca, es decir $\phi(X)$ debe ser conocida. Es en esta etapa donde las fases II y III de la curva de secado se vuelven de gran utilidad.

Durante la fase II (fase de secado constante), ϕ posee un valor constante, por lo que la ecuación 16 se resuelve y se obtiene:

$$t = \frac{X_1 - X_2}{\phi_0} \quad (\text{ec. 17})$$

La ecuación 17 es útil cuando el proceso de secado toma lugar solamente en la fase de secado constante, es decir, el contenido de humedad inicial y final del proceso de secado son ambos mayores al contenido de humedad crítico del alimento.

Si el proceso de secado se diera solamente en la fase III (fase de secado en reducción), se asume que ϕ posee un comportamiento lineal y se obtiene la siguiente expresión para el tiempo de secado:

$$t = \frac{X_c - X_e}{\phi_0} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{X - X_e} = \frac{X_c - X_e}{\phi_0} \cdot \ln \left(\frac{X_1 - X_e}{X_2 - X_e} \right) \quad (\text{ec. 18})$$

A partir de la ecuación 17 (fase de secado constante) y la ecuación 18 (fase de secado en reducción) se desarrolla la ecuación 19, la cual es válida para todo proceso de secado que involucre las fases de secado constante y secado en reducción.

$$t = \frac{X_1 - X_c}{\phi_0} + \frac{X_c - X_e}{\phi_0} \cdot \ln \left(\frac{X_c - X_e}{X_2 - X_e} \right) \quad (\text{ec. 19})$$

G. PARÁMETROS INFLUYENTES EN EL PROCESO DE SECADO POR CONVECCIÓN

Tal como se detalla en la sección F, los parámetros de un proceso de secado por convección se determinan mediante modelos matemáticos, los cuales involucran gran cantidad de variables, las cuales suelen representar un reto de determinar de forma suficientemente exacta. En la presente sección se detalla la influencia de dichas variables, clasificadas en dos grupos: factores internos, aquellos que son dependientes solamente del alimento por secar; y factores externos, aquellos que no dependen del alimento, sino del flujo del fluido inducido durante el proceso.

1. Factores internos.

a. Difusividad molecular.

Tal como se introdujo en la sección F, la difusividad molecular (o coeficiente de difusión) es una constante que se utiliza como proporcionalidad en la primera ley de Fick. Dicha constante se determina de forma sencilla para gases y mezclas de ellas, sin embargo, en fluidos se utiliza el modelo de difusión Browniana de Einstein-Stockes (Berk, 2018).

$$D = \frac{k T}{6\pi r \mu} \quad (\text{ec. 20})$$

Donde:

- D es el coeficiente de difusión [m^2/s].
- T es la temperatura [K].
- k es la constante de Boltzmann [J/K].
- r es el radio molecular [m].
- μ es la viscosidad dinámica del fluido [Pa s].

Aunque su uso es aceptado, en muchos escenarios el asumir esfericidad en las partículas es una gran desviación de la realidad.

La difusividad de sólidos es extremadamente baja. En materiales como metales, la difusividad se expresa principalmente a través de defectos atómicos en las estructuras de los cristales que componen los granos del material.

En sólidos porosos el transporte de masa ocurre gracias a los gases o líquidos que llenan los poros, por lo que la matriz del sólido no interviene en dicho fenómeno de transporte. Para dichos materiales la difusividad cambia y se utiliza la difusividad efectiva (D_{eff}), la cual se define en la siguiente expresión (Berk, 2018).

$$D_{eff} = D \frac{\varepsilon}{\tau} \quad (\text{ec. 21})$$

Donde:

- ε es la porosidad del material [-].
- τ es el factor de tortuosidad (debido a ruta tortuosa de porosidad) [-].

Debido a que dichos factores son extremadamente difíciles de determinar para cada tipo material (y en especial alimentos) por analizar, la difusividad efectiva se suele derivar de curvas de secado experimentales de diversos alimentos, tal como se muestra en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Difusividad efectiva de algunos alimentos.

Alimento	Temperatura [°C]	D_{eff} [m ² /s]
Aguacate	50	2.3×10^{-9}
Remolacha azucarera	50	5×10^{-10}
Yuca	50	3×10^{-10}
Manzana	50	1.1×10^{-9}
Papa	50	2×10^{-10}
Manzana verde	76	1.15×10^{-10}
Pepperoni (13.3% grasa)	12	5.7×10^{-11}

Fuente: Berk, 2018.

2. Factores externos.

a. Localización y clima

Cuando se especifica una localización se establecen parámetros que definen el ambiente del lugar, tales como presión atmosférica, temperaturas promedio según periodos de tiempo, humedades relativas promedio, etc. Estos parámetros son de vital importancia en procesos de secado, ya que definen las características del principal fluido por utilizar en el proceso, aire. Sus características: Temperatura de bulbo seco, humedad y presión, cuantifican las etapas de los procesos a los que se somete el aire en condiciones atmosféricas para poder entrar en las condiciones deseadas.

Usualmente el aire atmosférico es deshumidificado y calentado, dependiendo de la cantidad de humedad en el ambiente, este puede ser solamente calentado. Esto se realiza con el fin de proveer al secador un aire con las condiciones requeridas para un proceso de secado adecuado.

Debido a que dichos parámetros presentan variaciones estacionales, es importante considerar las variaciones de los parámetros según las épocas de operación, ya que las temperaturas y humedades promedio del aire atmosférico no serán las mismas en invierno y verano, por ejemplo.

La presión atmosférica es un parámetro que afecta de forma directa el proceso de evaporación, lo cual se observa en la relación de presión de vapor del ambiente respecto a la presión de vapor del agua en el alimento. Además, este parámetro también influye en el equipamiento por utilizar en el proceso de secado, por ejemplo, los ventiladores por utilizarse cuentan con presiones de succión y expulsión específicas, las cuales son totalmente dependientes de la presión atmosférica (Berk, 2018).

En el caso del cardamomo (*Elettaria Cardamomum*) la altitud óptima de cultivo es entre los 600 y 1,500 m.s.n.m. En Guatemala se suelen realizar cultivos de la especie desde los 90 hasta los 1300 m.s.n.m. (Ravindran & Madhusoodanan, 2002).

Respecto a temperaturas, Guatemala ofrece un ambiente ideal, ya que las temperaturas promedio anuales de las regiones sur de cultivo rondan los 17 - 25 °C, y las regiones norte de cultivo se encuentran entre los 18 – 23.5 °C (Ravindran & Madhusoodanan, 2002).

b. Efectos de flujo volumétrico, temperatura y humedad del fluido.

Los parámetros de localización y clima, que definen las propiedades de estado del aire ambiental son necesarias de conocer con el fin de determinar el proceso por llevar a cabo y así obtener un aire con las propiedades requeridas para el proceso de secado. Las condiciones del flujo inducido del secador se determinan según el tiempo requerido de secado y la tasa de secado máxima del alimento el fin de evitar el fenómeno conocido como “endurecido de cápsula” (“*Case Hardening*”) donde la corteza del alimento se encuentra muy seca pero el centro de este aún tiene un alto contenido de agua, el cual es muy indeseado en el caso del secado de cardamomo.

1) Humedad del aire.

La humedad del aire es el factor más importante durante todo el proceso de secado, ya que es el gradiente entre la humedad del aire y la humedad de la superficie del grano lo que causa la fuerza conducida para el proceso de transferencia de masa de agua (Bergman, *et. al.* 2011).

Dicho gradiente es el factor más importante en la tasa de secado durante la fase de secado constante, ya que es la capacidad del aire de remover agua la limitante del proceso, por lo que, a menor gradiente, menor será la tasa de secado (Berk, 2018).

2) Temperatura del aire.

La temperatura del aire se relaciona directamente al proceso de secado y su efecto se hace evidente al desarrollar la ecuación 12 (descrita en la sección F).

$$-\frac{dW}{dt} = k_g A(p_s - p_a) = k'_g A(H_s - H_a) \quad (\text{ec. 12})$$

Se divide entre el área para obtener así la tasa de remoción de masa de agua por unidad de tiempo y unidad de área (N) y se relaciona el coeficiente de convección de transferencia de masa y la diferencia entre humedad del ambiente y la superficie del grano, con el coeficiente de convección de transferencia de calor, el diferencial de temperaturas y el calor latente de evaporización del agua, lo cual se expresa en la ecuación 22.

$$N = -\frac{dW}{A dt} = k'_g (H_s - H_a) = \frac{h(T_a - T_s)}{\lambda} \quad (\text{ec. 22})$$

Donde:

- h es el coeficiente de convección de transferencia de calor [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$].
- T_a es la temperatura de bulbo seco del aire inducido [$^{\circ}\text{C}$].
- T_s es la temperatura de bulbo húmedo del aire inducido [$^{\circ}\text{C}$].
- λ es el calor latente de evaporización del agua a la temperatura de bulbo húmedo del aire inducido [kJ/kg].

De la ecuación 22 se observa que la tasa de secado en la fase de secado constante es proporcional al gradiente de temperaturas del aire inducido y de la superficie. Durante la fase de secado en reducción, el efecto de la temperatura es mayormente indirecto, ya que se manifiesta principalmente en su influencia en la difusividad efectiva del grano (Berk, 2018).

3) Velocidad del aire.

La velocidad del aire es el segundo factor más importante durante el proceso de secado, ya que, al aumentar la velocidad del aire, tanto la transferencia de calor como la transferencia de masa en la interfaz se ven acelerados también, lo que se expresa en un aumento en la tasa de secado. Esto último es válido en la fase de secado constante, ya que en la misma es la capacidad de evaporización del aire el mecanismo limitante.

A partir de experimentación y correlaciones empíricas, se han desarrollado expresiones para determinar el coeficiente de convección de transferencia de calor como función de la velocidad del aire inducido, donde las principales utilizadas para el diseño de secadores en la industria alimenticia son la ecuación 23 y 24.

$$h = 20G^{0.8} \quad (\text{ec. 23})$$

Donde:

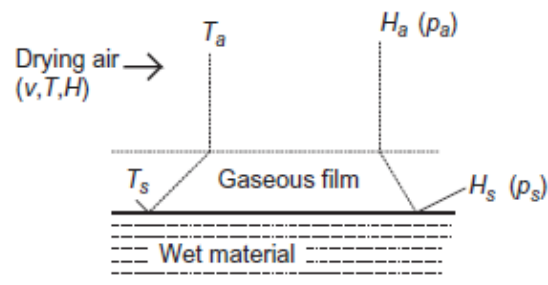
- h es el coeficiente de convección de transferencia de calor [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$].
- $G = v\rho$ es el flujo másico superficial del aire [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{s}$] (obtenido multiplicando la velocidad del aire por su densidad a la temperatura y presión dominante durante el proceso).

La ecuación 23 ha demostrado ser de gran utilidad en procesos de diseño, sobre todo en la fase de secado constante de la curva de secado. Debido a que la velocidad del aire inducido no denota un efecto directo en el mecanismo de transporte del agua del grano, se considera que no tiene efecto en la fase de secado en reducción, por lo que se ha ajustado la ecuación 23 para poder ser utilizada durante todo el proceso de secado (fase de secado constante y fase de secado en reducción). La ecuación recomendada para expresar el coeficiente de convección durante todo el proceso de secado es la ecuación 24 (Berk, 2018).

$$h = 20 G^{0.5} \quad (\text{ec. 24})$$

En la Ilustración 17 se muestra un esquema de la capa límite del aire inducido y su contacto con la película de humedad en la superficie del grano húmedo, expresando las principales propiedades del aire durante el proceso de secado.

Ilustración 17. Capas de fluido durante proceso de secado.



Fuente: Berk, 2018.

c. Flujo laminar y turbulento

Los flujos pueden ser laminares, de transición o turbulentos, dicha característica es dictada por el número de Reynolds (Re). Esta propiedad del flujo tiene una gran influencia en la capacidad de transferencia de calor y de masa del flujo, efectos que se intuyen al relacionar algunas de las constantes más importantes en la transferencia de calor y masa.

Constantes importantes en la transferencia de calor.

El número de Prandtl (Pr) se define como la razón entre la viscosidad cinemática (ν) (también denominada difusividad de momento) y la difusividad térmica (α). Por lo tanto, es una propiedad del fluido, que indica la efectividad relativa de la transferencia de momento y energía, por difusión, en las capas límite de velocidad y temperatura, respectivamente (Bergman, *et. al.* 2011).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

Donde:

- ν es la viscosidad cinemática del fluido [m^2/s].
- α es la difusividad térmica [m^2/s].

El número de Nusselt (Nu) es un parámetro que expresa la razón entre la transferencia de calor por convección y la transferencia de calor por conducción pura en la superficie de una geometría. Dicho parámetro es función de la posición analizada en la geometría, el número de Reynolds del fluido y el número de Prandtl (Bergman, *et. al.* 2011).

$$Nu = \frac{hL}{k_f} + \left. \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \right|_{y^*=0}$$

Donde:

- h es el coeficiente de convección de transferencia de calor [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$].
- k_f es la conductividad térmica del fluido [$\text{W}/\text{m K}$]
- L es la longitud característica [m].
- T es la temperatura en la posición y en la capa límite [K].
- y es la posición en la capa límite [m].

Constantes importantes en la transferencia de masa.

El número de Schmidt (Sc) es el análogo al número de Prandtl, ya que se define como la razón entre la viscosidad cinemática (ν) y la difusividad másica (D_{AB}). Que, análogo al número de Prandtl, indica la efectividad relativa de la transferencia de momento y concentración másica, por difusión, en las capas límites de velocidad y concentración, respectivamente (Bergman, *et. al.* 2011).

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}}$$

Donde:

- ν es la viscosidad cinemática del fluido [m^2/s].
- D_{AB} es la difusividad másica [m^2/s].

El número de Sherwood (Sh), análogo al número de Nusselt, es un parámetro adimensional que indica el gradiente de concentración en la superficie de contacto de una geometría con el fluido (Bergman, *et. al.* 2011).

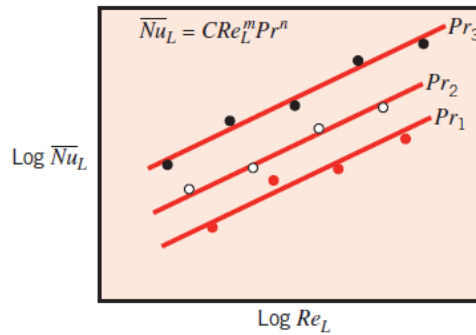
$$Sh = \frac{h_m L}{D_{AB}} + \left. \frac{\partial C_A^*}{\partial y^*} \right|_{y^*=0}$$

Donde:

- h_m es el coeficiente de convección de transferencia de masa [m/s].
- D_{AB} es la difusividad másica [m²/s].
- L es la longitud característica [m].
- C_A es la concentración de la sustancia A en la posición y en la capa límite [mol/m³].
- y es la posición en la capa límite [m].

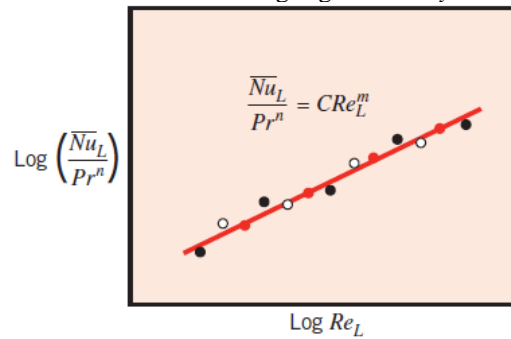
Dichas constantes son altamente dependientes del número de Reynolds, lo cual puede ser obtenido de sus definiciones matemáticas o bien desde correlaciones empíricas en gráficos *log-log* del valor del parámetro en el eje de ordenadas y el número de Reynolds en el eje de las abscisas.

Ilustración 18. Gráfico log-log de Re y Nu para distintos Pr .



Fuente: Bergman, *et. al.* 2011.

Ilustración 19. Gráfico log-log de Re/Pr y Nu/Pr .

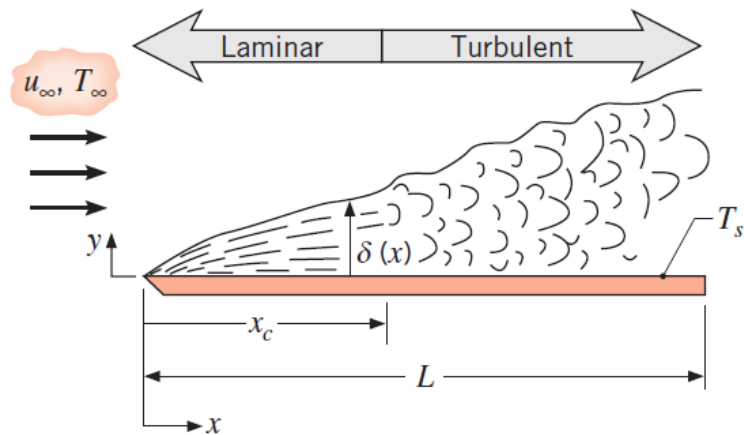


Fuente: Bergman, *et. al.* 2011.

De la ilustración 18 y la 19 se confirma que el logaritmo del número de Nusselt aumenta con el logaritmo del número de Reynolds de forma lineal. Por lo tanto, si la geometría donde circula el fluido es constante, un aumento de Un implica un aumento en el coeficiente de convección de transferencia de calor. Lo mismo aplica para el número de Sherwood, implicando un aumento en el coeficiente de convección de transferencia de masa (Bergman, *et. al.* 2011).

Por lo tanto, para maximizar la tasa de secado, se requiere maximizar la tasa de transferencia de calor y de masa, y una forma sencilla de hacerlo es aumento el número de Reynolds del flujo inducido, es decir que el flujo sea lo más turbulento posible.

Ilustración 20. Transición de flujo laminar a turbulento.



Fuente: Bergman, *et. al.* 2011.

H. ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE DINÁMICA DE FLUÍDOS.

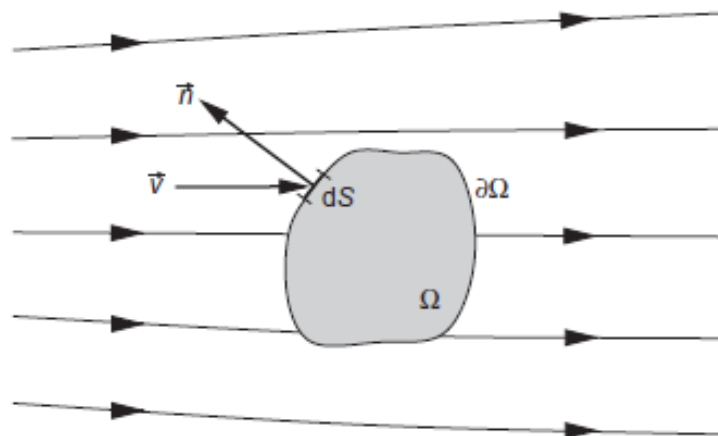
La dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) se centra en solución de ecuaciones de movimiento de fluidos, así como las correspondientes a su interacción con sólidos. Este campo de estudio surge como derivado del estudio de elementos finitos, campo que tomó auge con el aumento de la capacidad computacional de las herramientas de cómputo personales (Blazek, 2015).

1. Volúmenes de control finitos y ecuaciones que gobiernan el movimiento de fluidos

Todas las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos son derivadas a partir de las leyes de la conservación: conservación de masa, conservación de momento, conservación de energía.

Un volumen de control se define como una región finita de flujo, la cual se encuentra rodeada por una superficie cerrada y fija en el espacio.

Ilustración 21. Volumen de control finito.



Fuente: Blazek, 2015.

Cuando al volumen de control se le aplican las leyes de conservación, considerando las contribuciones del flujo convectivo (descritas por las leyes de Fick), se obtiene la ley de conservación en términos de un vector general de cualquier volumen U (Blazek, 2015).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega + \oint_{\partial\Omega} [U(\vec{v} \cdot \vec{n}) - k\rho(\nabla U^* \cdot \vec{n})] dS = \int_{\Omega} Q_V d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\vec{Q}_S \cdot \vec{n}) dS$$

(ec. 25)

Donde:

- U es una cantidad escalar por unidad de volumen.
- Ω es el volumen de control.
- $\partial\Omega$ es la superficie de frontera.
- dS es el segmento de superficie de frontera donde atraviesa el flujo.
- \vec{v} es el vector velocidad de flujo que atraviesa la frontera en dS .
- \vec{n} es el vector normal al segmento dS que atraviesa el flujo.
- k es el coeficiente de difusividad térmica (también α).
- Q_V representa todas las fuentes de fluido provenientes del volumen.
- Q_S representa todas las fuentes de fluido provenientes de la superficie.

La ecuación 25 es una de las más utilizadas en la mayoría de software CFD debido a sus propiedades de validez y al estar basada en una forma integral.

Cuando la ecuación de flujo de volumen de control y las ecuaciones de conservación de masa, energía y momento, se combinan en un solo sistema se obtiene la ecuación de Navier-Stokes (Blazek, 2015).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \vec{W} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\vec{F}_c - \vec{F}_v) dS = \int_{\Omega} \vec{Q} d\Omega$$

(ec. 26)

Donde:

- \vec{W} es el vector de variables conservativas
- \vec{F}_c es el vector de flujos convectivos.
- \vec{F}_v es el vector de flujos viscosos.
- \vec{Q} es el vector que de fuentes de volumen por fuerzas de cuerpo y calentamiento volumétrico.

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

$$\vec{W} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{bmatrix}$$

$$\vec{F}_c = \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho uV + n_x p \\ \rho vV + n_y p \\ \rho wV + n_z p \\ \rho HV \end{bmatrix}$$

$$V = \vec{v} \cdot \vec{n} = n_x u + n_y v + n_z w$$

$$\vec{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ n_x \tau_{xx} + n_y \tau_{xy} + n_z \tau_{xz} \\ n_x \tau_{yx} + n_y \tau_{yy} + n_z \tau_{yz} \\ n_x \tau_{zx} + n_y \tau_{zy} + n_z \tau_{zz} \\ n_x \Theta_x + n_y \Theta_y + n_z \Theta_z \end{bmatrix}$$

$$\Theta_x = u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} + k \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\Theta_y = u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} + k \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$\Theta_z = u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz} + k \frac{\partial T}{\partial z}$$

2. Métodos de discretización espacial.

El primer paso para aplicar la ecuación de Navier-Stokes a un sistema es la discretización espacial, la cual puede ser realizada por tres esquemas diferentes: diferenciación finita, volúmenes finitos, elementos finitos. Aunque, independientemente del esquema o método que se utilice, la discretización espacial puede categorizarse en dos: mado estructurado y mado sin estructurar, los cuales se detallarán más adelante. Al aplicarse el mado, se procede a diferenciarlo y aplicar los métodos de solución para las ecuaciones diferenciales que gobiernan la dinámica de fluidos.

a. Diferenciación finita.

El método de diferenciación finita fue uno de los primeros métodos en aplicarse como aproximación a las soluciones de ecuaciones diferenciales. Este se aplica directamente a las ecuaciones gobernantes en su forma diferencial. En esencia, el método consiste en aplicar una expansión de series de Taylor para discretizar las derivadas de las variables de flujo, donde el objetivo es encontrar el valor de la función (ϕ_k) para cada uno de los nodos (Mazumder, 2016).

$$\sum_{k=1}^N A_{i,k} \phi_k = S_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, N.$$

Una de las principales ventajas de este método es que es muy simple, por lo que permite obtener aproximaciones de grados muy altos sin perder exactitud en la discretización espacial. Sin embargo, este método requiere un mallado sumamente estructurado, lo cual restringe mucho su aplicación (tal como se discutirá en la siguiente sección). Por lo tanto, este método no puede ser directamente aplicado en mallados con elementos curvilíneos sin antes tener que ser transformado de un sistema de coordenadas cilíndricas a un sistema de coordenadas cartesianas. Las condiciones anteriormente descritas hacen que el método sea práctico de utilizar en geometrías simples (Blazek, 2015).

b. Elementos finitos.

Este método fue desarrollado para ser utilizado en análisis estructurales, aunque algunos investigadores empezaron a utilizarlo para análisis de medios continuos (como flujos). Este método, aplicado a la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes y Euler, supone subdividir el espacio físico en elementos discretos, usualmente tetraedros o hexaedros, por lo que un mallado no estructurado es lo más probable por utilizar. Posteriormente se agregan las condiciones de frontera a los elementos. El producto entre el número de nodos y el número de incógnitas determina el número de grados de libertad del sistema.

Al aplicar este método es necesario transformar las ecuaciones gobernantes de su forma diferencial a su forma integral, lo cual se lleva a cabo mediante el principio variacional o el método de residuos ponderados, donde el último suele ser el más utilizado. En general, este método es atractivo por permitir usar la formulación integral de las ecuaciones gobernantes, así como el uso de un mallado no estructurado, lo cual es más útil en el caso del flujo de fluidos que impliquen geometrías complejas. Aunque comparte cierto grado de similitud con el método de volúmenes finitos, el método de elementos finitos suele implicar un esfuerzo de cálculo mucho mayor, siendo esta una de las razones principales por la que se prefiera el uso de volúmenes finitos para el análisis de flujos (Blazek, 2015).

c. Volúmenes finitos.

Este método se basa en la aplicación de las leyes de conservación (de masa, energía, momento) en su formulación integral de la ecuación de Navier-Stokes y Euler. El método discretiza las ecuaciones gobernantes al dividir las según el espacio físico que ocupan, usualmente en un número arbitrario de poliedros como volúmenes de control. Dichos volúmenes de control se suelen definir con respecto al mallado por realizarse, el cual suele dividirse en dos métodos: centrado en la celda, vértices de celda.

El método de posición centrado en la celda consiste en almacenar el valor de las propiedades de flujo en el centroide de los elementos creados en el mallado, por lo tanto, el volumen de control es idéntico a los elementos del mallado.

Por otro lado, el método de vértices de celda, como su nombre lo indica, almacena el valor de las propiedades de flujo en los nodos de intersección del mallado, por lo que el volumen de control puede ser la unión de elementos que compartes nodos, o bien un volumen centrado en nodos comunes de elementos.

Ilustración 22. Volumen de control centrado en la celda (izquierda) y vértices de celda (derecha).

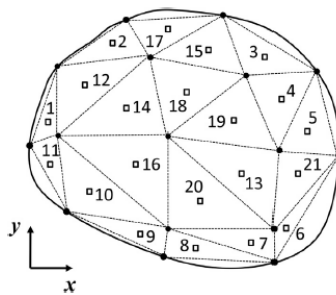


Fuente: Blazek, 2015.

Posteriormente la integral de superficie descrita en la ecuación 26 se aproximada por la suma de los flujos que atraviesan las caras individuales de los volúmenes de control. La precisión de la discretización espacial es altamente dependiente del esquema particular con el que se evalúan los flujos.

La principal ventaja del método de discretización espacial por volúmenes finitos es que se basa directamente en el espacio físico, por lo que no se presenta ningún tipo de problemas en el proceso de transformación de coordenadas físicas a coordenadas computacionales, lo cual si ocurría en el método de diferenciación finita. Esto hace que el método de volúmenes finitos sea muy flexible y pueda utilizar mallados estructurados como no estructurados, lo que hace que sea el método preferido en la simulación de flujos relacionados a geometrías complejas. Además, al basarse en las leyes de conservación, el método permite computar con gran certeza, evitando fenómenos no físicos que violen alguna ley de la termodinámica, por ejemplo. En la siguiente ilustración se muestra la versatilidad de una discretización espacial por volúmenes finitos (Blazek, 2015).

Ilustración 23. Discretización espacial por volúmenes finitos.



Fuente: Blazek, 2015.

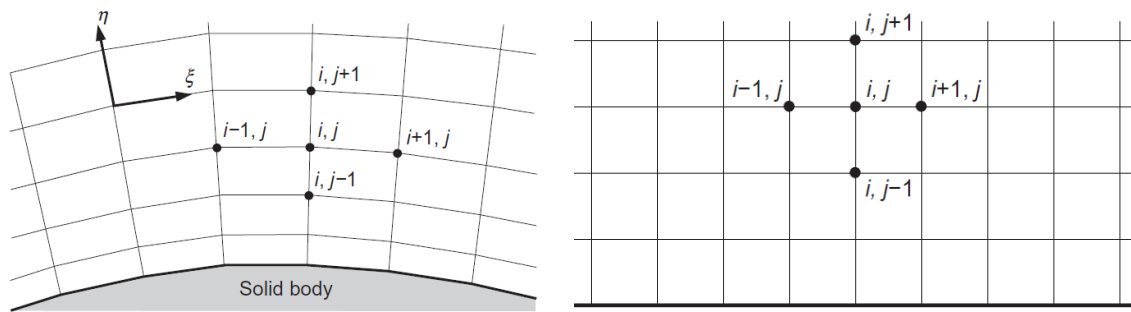
3. Mallado.

El mallado se define como un arreglo de un número de puntos discretos que cubren el dominio completo de una geometría. A través de la subdivisión de dicho dominio, cierta cantidad de celdas son generadas, por lo que es de suma importancia que la discretización espacial sea la adecuada para poder capturar de forma correcta las físicas del problema, dicha discretización puede realizarse principalmente de dos formas: estructurado y no estructurado (Liu, Yeoh, & Tu, 2018).

a. Mallado estructurado.

El mallado estructurado consiste en que cada punto de la malla (vértices y nodos) están identificados de forma única con base cartesiana (subíndices i, j, k), y su posición relativa al resto de puntos es importante, tal como se muestra en las siguientes ilustraciones.

Ilustración 24. Ejemplos de mallado estructurado.



Fuente: Blazek, 2015.

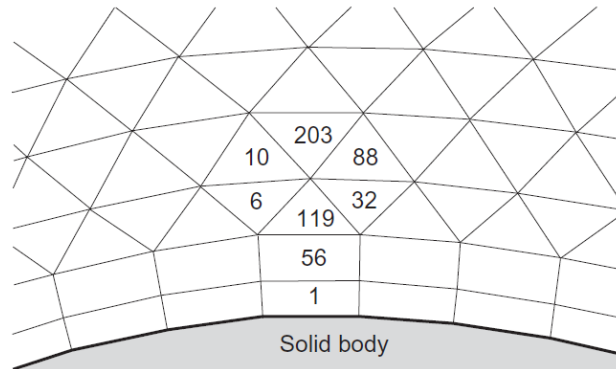
La principal ventaja de un mallado estructurado deriva de la relación de sus índices (también llamado espacio computacional), ya que dicha propiedad permite acceder rápidamente a los nodos adyacentes, simplemente añadiendo o sustrayendo un entero del índice actual. Las implicaciones de tal característica hacen que evaluar gradientes, flujos y la aplicación de condiciones de frontera se vean grandemente simplificados.

Aunque un mallado estructurado provee muchos beneficios, no siempre se suelen trabajar este tipo de mallados, principalmente por la gran dificultad y tiempo de trabajo que implica generarlos en geometrías complejas, tales como las que se trabajan en el estudio de fluidos. Existen algunos métodos para facilitar el la generación de un mallado estructurado, como el método multibloque, el cual consiste en dividir la geometría en segmentos más simples en los cuales se pueda aplicar con mayor facilidad un mallado estructurado; sin embargo, la implementación de este método requiere de lógicas especiales por parte de los software de trabajo, característica que no todos ofrecen (Blazek, 2015).

b. Mallado sin estructurar.

Los mallados sin estructurar se caracterizan por no otorgar un orden particular a las celdas ni a los puntos de la malla, por lo tanto, ni elementos, ni nodos, ni vértices pueden ser identificados fácilmente por sus índices. Tal como se ve en la ilustración siguiente, la celda 6 está al lado de la celda 119, y debajo de la celda 10; no se cuenta con un orden.

Ilustración 25. Ejemplo de mallado sin estructurar.



Fuente: Blazek, 2015.

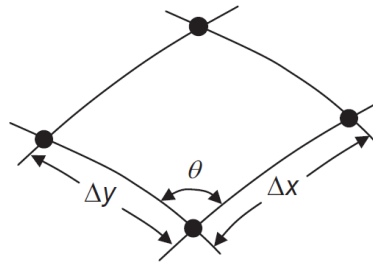
Por su naturaleza, este tipo de mallado suele consistir en una mezcla de tipos de elementos, entre ellos cuadriláteros y triángulos en análisis 2D, y hexaedros, tetraedros, prismas y pirámides en análisis 3D. Este tipo de mallados con mezcla de elementos se suelen denominar mallados híbridos o mallados mezclados. Dicha característica vuelve al mallado sin estructurar el tipo de mallado más flexible al momento de tratar geometrías complejas, donde los elementos tetraédricos suelen ser los más utilizados, lo cual suele reducir el número total de elementos, vértices, caras y posiblemente hasta nodos. Aunque el mallado se genere de forma automática, en su aplicación, aún es necesario tener en cuenta ciertos parámetros, con el fin de obtener un mallado de calidad. Además, se hace evidente que una de sus principales desventajas, es una de las principales ventajas del mallado estructurado, la eficiencia computacional. Debido a que los índices de las celdas no poseen correlación entre sí, las estructuras de datos por utilizar deben ser más sofisticadas, lo que resulta una mayor dependencia de la potencia de hardware con la que se disponga. Sin embargo, la capacidad de manejar geometrías mucho más complejas posee un peso mucho mayor, aspecto que hace que no sea sorprendente que la mayoría de los softwares comerciales de CFD hayan migrado a solucionadores de flujo para mallados no estructurados (Blazek, 2015).

c. Métricas de calidad

Al completarse la discretización espacial, es necesario comprobar que esta capture de forma adecuada las físicas del flujo y propiedades del fluido, para ello se utilizan métricas de calidad de mallado, de las cuales se distinguen algunas de las más populares como skewness, razón de aspecto nodal, ortogonalidad, valor Y^+ , o métodos como estudios de sensibilidad.

Skewness, también llamado distorsión, este parámetro consiste en relacionar el ángulo que se forma entre dos vértices de la celda (θ) y lo compara respecto al valor que debería poseer según su estructura geométrica, por ejemplo, en el caso de una celda hexaédrica, el valor del ángulo debería ser 90° (ortogonal), tal como se ve en la siguiente ilustración.

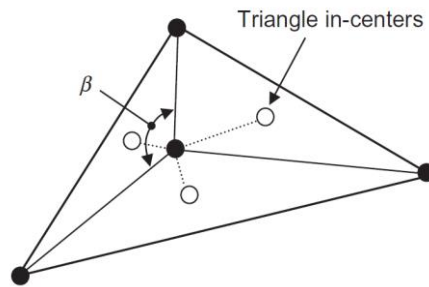
Ilustración 26. Parámetros de superficie de celda hexaédrica.



Fuente: Liu, Yeoh & Tu, 2018.

Si el valor del ángulo de dicha celda fuera menor a 45° o mayor a 135° se dice que el mallado posee celdas muy distorsionadas, lo cual deteriora los resultados computacionales y provoca inestabilidad numérica en el proceso de cálculo. En el caso de un mallado no estructurado es común que las celdas posean una geometría tetraédrica, por lo que se debe considerar el ángulo (β) buscando que este no supere los 75° , como se ve en la Ilustración 27 (Liu, Yeoh, & Tu, 2018).

Ilustración 27. Ángulo de distorsión de celda tetraédrica.



Fuente: Liu, Yeoh & Tu, 2018.

La escala común para detallar la distorsión es de 0 a 1, donde 0 indica ausencia de distorsión de la celda, mientras que 1 indica una distorsión total de la celda. Como regla general, un buen mallado debe poseer como mínimo 70% de los elementos con una distorsión no mayor a 0.3 (Liu, Yeoh, & Tu, 2018).

La razón de aspecto nodal (NAR por sus siglas en inglés) es otro parámetro de calidad de mallado, el cual es la razón entre el vértice de mayor longitud respecto al de menor longitud; parámetro que es utilizado grandemente por la empresa distribuidora de software CFD Autodesk, Inc. Al igual que el parámetro de distorsión, el NAR indica que, como regla general, idealmente se deben buscar valores menores a 150, sobre todo en áreas de interés; sin embargo, valores muy superiores son aceptables en regiones que no tengan contacto con paredes o área de grandes flujos térmicos. Una de las principales ventajas de poseer valores NAR bajo es que, además de representar de forma más adecuada las físicas de flujo, también reduce el uso de memoria RAM del equipo (Autodesk, 2016).

Ortogonalidad es un parámetro muy utilizado por softwares como OpenFOAM o ANSYS, el cual indica lo contrario a la distorsión, es decir, que tanto se asemeja la geometría del elemento a la geometría sin distorsión que presenta el polígono utilizado. El valor ideal de ortogonalidad es 1, ya que indicaría que el elemento no presenta distorsión en la geometría del polígono, sin embargo, se considera que si la mayoría de los elementos presentan valores de ortogonalidad mayores a 0.7 se puede proceder con el análisis.

Valor Y^+ , métrica que se utiliza especialmente en análisis de dinámica de fluidos, ya que este controla la distancia de la capa límite del fluido (desde la pared hasta el final de la capa límite). Dicho valor depende totalmente del modelo de turbulencia que se utilice. Por ejemplo, para el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ se desean valores de Y^+ entre 35 y 300, donde 300 es el preferido y valores menores a 35 deberían evitarse. Por otro lado, si se utiliza el modelo SST el valor deseado de Y^+ debería ser menor a 1 (Autodesk, 2016).

Los estudios de sensibilidad de mallado son uno de los parámetros más importantes para determinar si el mallado es adecuado o no. Este consiste principalmente en determinar si los resultados de la simulación son independientes al mallado, lo cual se comprueba realizando los siguientes pasos:

1. Con el mallado actual simular hasta alcanzar convergencia.
2. Refinar el mallado (multiplicando por un factor de 0.7) y simular hasta convergencia.
3. Seleccionar variables de interés y comparar los valores de dichas variables y si la diferencia entre ambos es menor al 5% entonces se dice que los resultados son independientes del mallado. Caso contrario se debe repetir el proceso con un mallado de mayor calidad (Autodesk, 2016).

4. Condiciones iniciales y de frontera.

Al definirse el método de discretización espacial, y el mallado por utilizar, se deben aplicar las condiciones iniciales y de frontera. Las condiciones iniciales son las que dictan las propiedades del fluido en el tiempo 0 del análisis, o bien en la primera iteración de un esquema iterativo.

Por otro lado, las condiciones de frontera son aquellas que se mantendrán constantes durante todo el análisis, y son aquellas condiciones que dictarán el estado del fluido en el resto de los nodos. En el análisis de fluidos, es muy común que las condiciones iniciales y de frontera sean valores de presión, flujos volumétricos o velocidades. De dichas condiciones, es importante considerar que estas deben cumplir las condiciones implícitas en las leyes que gobiernan el flujo (leyes de conservación), así como las relaciones termodinámicas.

Existen diversos escenarios de gran complejidad como la interfaz entre dos fluidos, o cambios de fase entre distintos mallados, que vuelen la aplicación de condiciones de frontera un proceso muy delicado. Por lo que, la aplicación de las condiciones de frontera de forma correcta y en los nodos correctos es un factor decisivo para cada software de CFD, influyendo directamente en la precisión de los resultados, el tiempo de convergencia y la robustez de la simulación en general (Blazek, 2015).

5. Modelos de turbulencia.

Tal como se mencionó en el inciso 3 de esta sección, existen varios modelos desarrollados con el fin de describir de mejor manera el escenario que se desea desarrollar en la simulación. A continuación, se presenta una breve descripción de los modelos disponibles en el software CFD Ultimate de Autodesk, Inc, resaltando los aspectos más importantes del modelo, así como sus usos más frecuentes (Autodesk, 2016).

Modelo $k - \varepsilon$

Es el modelo más utilizado debido a que funciona muy bien en la mayoría de las aplicaciones por lo que se dice que es un modelo de turbulencia de propósito general y usualmente el predeterminado en muchos softwares de CFD.

Modelo $k - \varepsilon$ (*Bajo Re*)

Como su nombre lo indica, este modelo se utiliza en flujos turbulentos con velocidades muy bajas (número de Reynolds entre 1500 y 5000). También se suele utilizar en flujo con regios de alta y baja velocidad; flujos que pasan de ser laminar a turbulentos y viceversa; flujos por boyante (convección natural). Este modelo suele ser menos estable que el modelo $k - \varepsilon$ y suele requerir más iteraciones para alcanzar convergencia.

Modelo $SST\ k - \Omega$

Este modelo se suele utilizar en análisis de aerodinámica externa, en flujos separados y flujos con gradientes de presión adversos. Este modelo simula la turbulencia hasta las paredes (no considera capa límite), además, requiere de un mallado muy fino en las capas de la región de frontera.

Modelo $SST\ k - \Omega\ SAS$

El modelo SST con simulación adaptativa a escala (SAS por sus siglas en inglés) es una variante del modelo anterior, y se suele utilizar en casos de generación de vórtices oscilatorios y estructuras de flujo de orientación variable. Este modelo es mejor que el modelo $k - \varepsilon$ en la predicción de la formación y forma de las estructuras turbulentas.

Modelo $SST\ k - \Omega\ RC\ (Smirnov-Menter)$

Utilizado en flujos con curvaturas muy pronunciadas, como los flujos que se desarrollan en los separadores de ciclón. El modelo se caracteriza por corregir la rotación y curvatura; también requiere de un mallado muy fino y suele ser muy intenso computacionalmente, por lo que requiere muchas iteraciones para converger (en el rango de las miles de iteraciones).

Modelo $SST\ k - \Omega\ RC\ (Hellsten)$

Utilizado para analizar perfiles de alas como el NACA0012 y el perfil Coanda. También se suele utilizar en dispositivos de baja y altas velocidades de rotación, o bien en flujos de alta curvatura y flujos sobre superficies convexas. Su utilidad más popular es la predicción de flujo sobre superficies convexas y determinar los puntos de separación de flujo, aspecto que suele ser muy difícil de evaluar con otros modelos de turbulencia.

Modelo $SST\ k - \Omega\ DES$

Modelo Detached Eddy Simulation (DES) se utiliza para evaluar flujos externos separados y flujos externos con altos números de Reynolds. El modelo es muy exigente en términos de potencia computacional y demuestra gran sensibilidad a la distribución del mallado, por lo que suele ser más fácil de utilizar con una distribución uniforme del mallado.

Modelo RNG

Este modelo se especializa un analizar los puntos de reencuentro de flujos inicialmente separados. Mucho más exigente computacionalmente que el modelo $k - \varepsilon$ pero también mucho más exacto. Si se desea utilizar este modelo, es recomendable utilizar el modelo $k - \varepsilon$ como primera iteración y cuando la mayoría del flujo haya convergido, hacer el cambio al modelo RNG.

Modelo *Longitud Mezclada*

Se utiliza para predecir el flujo en sistemas de convección natural interna. Se utiliza porque suele reducir las iteraciones necesarias para alcanzar la convergencia y aumenta la exactitud de los resultados, sobre todo en casos de flujos por boyante interna, aunque solamente para gases.

Modelo *Viscosidad Eddy*

El modelo se utiliza para flujos turbulentos de bajas velocidades y algunos flujos por boyante. Es muchos menos riguroso que el modelo $k - \varepsilon$ pero también es mucho más estable, por lo que suele ser muy útil cuando otros modelos no alcanzan la convergencia (divergen) (Autodesk, 2016).

6. Resultados y parámetros de convergencia.

Al proceder a resolver la simulación con métodos numéricos, existen dos parámetros muy importantes a considerar: la consistencia y la estabilidad. Consistencia es un parámetro que se utiliza en la discretización de las ecuaciones diferenciales parciales, específicamente en puntos donde estas deben poseer errores mínimos o ser exactas. Por lo tanto, se dice que un método numérico es consistente cuando su diferencia entre la ecuación diferencial parcial discretizada y la ecuación exacta es cero. Los puntos de interés son aquellos donde se aplican condiciones de frontera, nodos compartidos y nodos dentro la capa límite.

La estabilidad de un método numérico se relaciona directamente con el crecimiento o decaimiento del error inducido en cada iteración computada. Dichos errores se refieren no a aquellos relacionados a lógicas incorrectas de software, sino a aquellos inducidos por el redondeo de cifras en cada iteración. Se dice que un proceso de método numérico es estable cuando el error no aumenta durante el curso del proceso de resolución (Liu, Yeoh, & Tu, 2018).

Si el proceso de resolución de un método numérico es consistente y estable, se dice que alcanzará un estado de convergencia. Dicho estado de convergencia se obtiene cuando la solución al sistema algebraico de ecuaciones se aproxima a la solución real de la ecuación diferencial parcial, cumpliendo con las condiciones iniciales y condiciones de frontera establecidas en el sistema. En la mayoría de los códigos de software CFD comerciales, los sistemas algebraicos de ecuaciones son resueltos mediante métodos iterativos, por lo que la convergencia iterativa depende de la convergencia de las leyes de conservación en los nodos de los elementos, así como de la ausencia de cambio de resultados con iteraciones adicionales. Durante el proceso de resolución iterativo de dichos códigos se crean errores de las ecuaciones discretizadas de las leyes de conservación, errores que son denominados residuos del sistema algebraico de ecuaciones. En cada iteración se busca minimizar dichos residuos hasta alcanzar una tolerancia adecuada. Si el comportamiento de los residuos se denota inestable, es decir, aumenta según las iteraciones realizadas, se dice que el método numérico es divergente y por lo tanto nunca alcanzará una solución representativa del sistema físico (Liu, Yeoh, & Tu, 2018).

V. ANTECEDENTES

A. Secadores de cardamomo en Guatemala.

Debido a que el cultivo y trabajo del cardamomo se desarrolla en la región norte del país, especialmente en el departamento Alta Verapaz, se realizó un viaje al poblado de Senahú, ubicado en dicho departamento. Durante dicho viaje se observó que, en Guatemala, el proceso de secado de cardamomo se lleva a cabo principalmente de tres formas: secado al sol, secado convectivo con leña y por secado convectivo forzado con gas (secadores).

El proceso de secado al sol consiste en:

- Sobre una lona de nailon se coloca el cardamomo húmedo de forma esparcida.
- En periodos de tiempo constante (ej. Par de horas) se debe voltear el cardamomo, buscando una exposición uniforme de las superficies del grano a la irradiación solar.
- Al notarse que el cardamomo posea un aspecto seco, este se retira de la lona de nailon.

Dicho proceso es simple, pero cuenta con una importante serie de desventajas:

- El proceso de secado es altamente dependiente de las condiciones climáticas (no permite la planificación y puede provocar abortos de proceso espontaneos).
- El proceso puede durar días para completarse.
- No se posee certeza del contenido de humedad del grano al finalizarse el proceso.
- Por la naturaleza del proceso el secado no es uniforme, requiere de una gran extensión de área y de esfuerzo humano para realizar el proceso de volteo.
- Por el proceso de colocación, volteo y recolección, el grano suele sufrir impactos físicos que dañan su presentación.

Debido a la serie de inconvenientes, muchos agricultores de la región han optado por desarrollar secadores por convección forzada, de los cuales se distinguen dos modelos importantes: el tipo contenedor cilíndrico, y el tipo contenedor rectangular.

1. Secadores tipo contenedor cilíndrico.

Tal como su nombre lo menciona, este pertenece al secador de tipo contenedor, que como se menciona en secciones anteriores, estos se especializan en reducir el contenido de humedad a valores tan bajamos como 6 a 3% base húmeda.

Estos son secadores de flujo abierto, y su estructura se compone principalmente de un contenedor con orificios en su base, por donde fluye aire a bajas velocidades y temperaturas moderadas. Por su naturaleza, requieren de un movimiento manual de los granos, buscando volver uniforme la tasa de remoción de humedad a lo largo del eje axial del contenedor.

Este tipo de secador fue el que más se presentó durante la visita a Senahú. Los componentes operacionales de dichos secadores son: motor de combustión interna (Diesel), ventilador centrífugo, quemador, sistema de gas y ductos. Su estructura y componentes operacionales principales se muestran en las siguientes ilustraciones.

Ilustración 28. Secador tipo contenedor cilíndrico en Senahú, Alta Verapaz.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 29. Llenado de secador tipo contenedor cilíndrico en Senahú, Alta Verapaz.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 30. Componentes operacionales de secador tipo contenedor cilíndrico en Senahú, Alta Verapaz.



Fuente: Elaboración propia.

2. Secadores tipo contenedor rectangular.

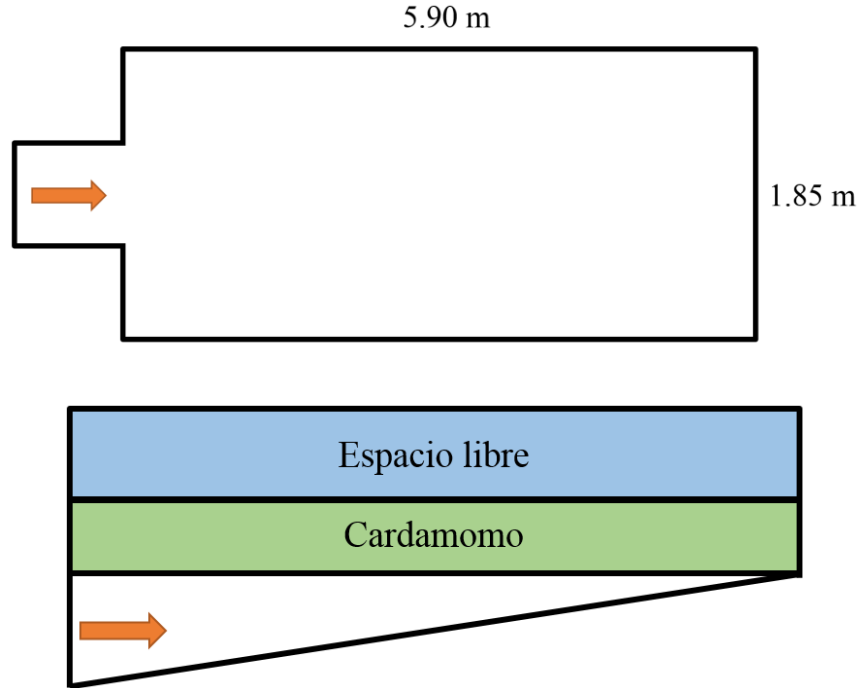
Al igual que los secadores de tipo contenedor cilíndrico, estos funcionan bajo el mismo principio, exceptuando la geometría del contenedor, donde el actual posee una geometría rectangular en lugar de cilíndrica, como se observa en las siguientes ilustraciones.

Ilustración 31. Secador tipo contenedor rectangular en Senahú, Alta Verapaz.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 32. Esquemático de secador tipo contenedor rectangular en Senahú, Alta Verapaz.



Fuente: Elaboración propia.

Ambos modelos de secadores fueron desarrollados buscando obtener un dispositivo capaz de proveer un proceso de secado efectivo en grandes cantidades de cardamomo, aspecto que se hace evidente al observar las dimensiones del secador rectangular (también llamado tipo pila), así como al tomar en cuenta que el diámetro del secador cilíndrico es de 3 m. Aunque ambos secadores cuentan con configuraciones geométricas distintas, ambos son de flujo abierto lo que hace que sean muy ineficientes en términos energéticos, así también, el secador cilíndrico cuenta con una estructura fabricada de metal, sin ningún tipo de aislamiento térmico en las paredes de los ductos o del contenedor.

El proceso de secado en ambos secadores consiste en crear un flujo de aire a una temperatura entre un rango de 40 a 50 °C, que se hace fluir en un flujo forzado a través del cardamomo, con el objetivo de evaporar el contenido de agua de los granos y extraerla del sistema. El proceso inicia con el depósito de los granos de cardamomo al secador (entre 35 a 70 quintales de peso húmedo). Se inicia el proceso de secado y transcurrida cierta cantidad de horas (variable según secador, aproximadamente 20 horas), se deben voltear los granos de cardamomo para que el secado sea uniforme, ya que aquellos granos situados al fondo se exponen a temperaturas superiores respecto a los que se encuentran en la superficie.

El tiempo de secado es de alrededor de 36 horas, sin embargo estos pueden extenderse de forma indefinida, ya que los tiempos para el volteo y de finalización de secado dependen de la experiencia empírica del operador del secador. Durante la visita, un proceso de secado estimado a durar 36 horas fue extendido hasta un total de 43 horas, por criterio de operadores.

Respecto a los recursos consumidos para la operación del secador se puede mencionar que para un proceso de secado completo (corrida) se requieren de 11 a 12 galones de combustible Diesel, así como 70 galones de gas propano por cada 40 quintales de cardamomo seco (pergamino).

Por lo tanto, se puede establecer que algunas de los aspectos por mejorar más notables de los diseños de dichos secadores son:

- Proceso de secado no uniforme.
- Requiere intervención de operadores de forma constante (volteos).
- Por el proceso de colocación, volteo y recolección, el grano suele sufrir impactos físicos que dañan su presentación.
- El contenido de humedad final es altamente dependiente del criterio del operador, el cual suele basarse en el aspecto de los granos en la sección superior, lo cual no es representativo.
- Ausencia de aislamiento en estructura contenedora.
- Proceso de secado de flujo abierto, característica que provoca grandes ineficiencias energéticas, especialmente en la fase de secado en reducción.
- El secador requiere de gran cantidad de cardamomo para iniciar su proceso de funcionamiento de forma rentable, lo cual representa una de las principales problemáticas de los pequeños productores.

VI. METODOLOGÍA

A. Requerimientos del secador.

A partir de la visita realizada al departamento Alta Verapaz, así como de diversas reuniones con miembros de AGEXPORT e investigadores miembros del CEAA se establecieron los requerimientos del secador por ser diseñado:

- El secador tendrá una capacidad máxima de 10 quintales de cardamomo húmedo.
- El secador utilizará como fuente de potencia mecánica un motor de combustión interna y un ventilador.
- El secador utilizará como fuente de energía térmica gas propano y los sistemas necesarios para su combustión e inyección al flujo de aire.
- El secador debe ser funcional sin utilizar electricidad, por lo que debe evitarse el uso de tecnología sofisticada (sistemas de control, etc.).
- El secador debe poseer elementos modulares, siendo los módulos principales: cámara de secado, ductos, ventilador, motor, sistema de gas; sin que estos superen a un tamaño transportable en pick-up.
- El secador debe ser capaz de realizar el proceso de secado sin necesidad de operar a máxima capacidad.
- El secador debe otorgar un cardamomo sin daños por tasa de secado excesiva.
- El secador debe contar con sistema de recirculación parcial de flujo de aire.
- El flujo de aire debe asegurar que no se genere condensado que dañe al cardamomo.

Los requerimientos anteriormente descritos fueron las directrices utilizadas en el proceso de decisión, diseño y manufactura durante todo el proyecto.

B. Selección de tipo de secador.

De acuerdo con los requerimientos del secador, se procedió a seleccionar el tipo de secador más adecuado, haciendo énfasis en que este fuera para capacidades de carga pequeña, que no requiera uso de energía eléctrica, y permita un uso modular sencillo. En el siguiente cuadro se muestran las características más importantes de los tipos de secadores.

Cuadro 9. Características de tipos de secadores (inicio).

Parámetro	Gabinete	Túnel	Banda transportadora (flujo paralelo)	Banda transportadora (flujo atravesado)	Rotativo
Mecanismo de operación.	Lote.	Continuo.	Continuo.	Continuo.	Lote, continuo.
Estado de alimento.	Sólido.	Sólido.	Sólido, Pasta.	Sólido.	Sólido.
Rango de capacidades de carga.	Bajo - Medio.	Alto.	Medio - Alto.	Medio - Alto.	Bajo - Medio.
Fluido de trabajo.	Aire.	Aire.	Aire.	Aire.	Aire.
Rango de temperaturas de operación.	50 - 80 °C	50 - 100 °C	50 - 80 °C	50 - 80 °C	40 - 60 °C
Tipo de presión de operación	Atmosférico.	Atmosférico.	Atmosférico.	Atmosférico.	Atmosférico.

Fuente: Berk, 2018.

Cuadro 10. Características de tipos de secadores (finalización).

Parámetro	Contenedor	Aerosol	Lecho fluidizado	Neumático	Barril	Solar
Mecanismo de operación.	Lote.	Continuo.	Lote, continuo.	Continuo.	Lote, continuo.	Lote, continuo.
Estado de alimento.	Sólido.	Líquido, Pasta.	Sólido.	Sólido.	Líquido, Pasta.	Todo.
Rango de capacidades de carga.	Medio - Alto.	Medio - Alto.	Alto.	Alto.	Medio - Alto.	Todo.
Fluido de trabajo.	Aire.	Aire	Aire	Aire	Vapor	Aire
Rango de temperaturas de operación.	50 - 80 °C	150 - 300 °C	100 - 300 °C	150 - 300 °C	120 - 155 °C	35 - 80 °C.
Tipo de presión de operación	Atmosférico.	Altas presiones.	Altas presiones.	Altas presiones.	Atmosférico.	Atmosférico.

Fuente: Berk, 2018.

De acuerdo con los dos cuadros anteriores y los requerimientos del diseño del secador, se determina que los tipos de secadores de operación únicamente continua, que no admitan alimentos en estado sólido, así como aquellos de altas presiones, de rango de capacidades únicamente alto, y fluido de trabajo diferente a aire quedan descartados, los cuales son: túnel, banda transportadora (flujo paralelo), banda transportadora (flujo atravesado), aerosol, lecho fluidizado, neumático y barril. Por lo tanto, los tipos de secadores restantes son: gabinete, rotativo, contenedor y solar.

Para los tipos de secador aún no descartados, se desarrolló un matriz de decisión, en la cual se evaluaron los siguientes parámetros: uniformidad de secado, modularidad, tiempo de secado, impacto físico del grano, con un peso en orden descendente. Todos los secadores fueron evaluados según dichos parámetros de 1 a 10 en conjunto con el equipo de trabajo. Finalmente se sumaron las ponderaciones de los secadores en cada categoría y así obtener un puntaje total de 1 a 10, optando así por aquel con el puntaje más alto.

Cuadro 11. Matriz de decisión de tipo de secador (inicio).

Parámetro	Peso	Gabinete		Rotativo	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
Uniformidad de secado.	30%	7	2.1	9	2.7
Impacto físico del grano.	30%	10	3	1	0.3
Modular.	20%	10	2	10	2
Tiempo de secado.	20%	6	1.2	6	1.2
Total.	100%		8.3		6.2

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 12. Matriz de decisión de tipo de secador (finalización).

Parámetro	Peso	Contenedor		Solar	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
Uniformidad de secado.	30%	3	0.9	4	1.2
Impacto físico del grano.	30%	1	0.3	7	2.1
Modular.	20%	7	1.4	10	2
Tiempo de secado.	20%	8	1.6	1	0.2
Total.	100%		4.2		5.5

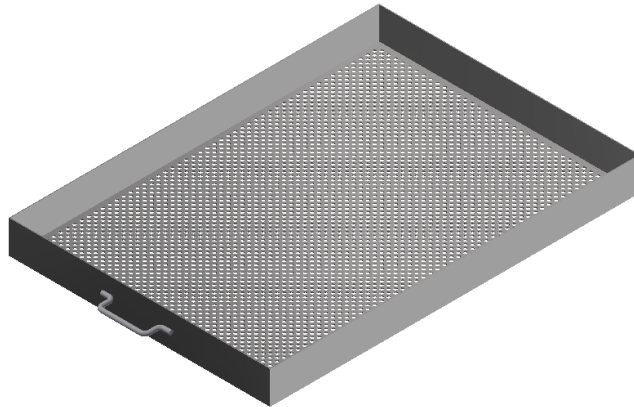
Fuente: Elaboración propia.

A partir del cuadro anterior, se denota que el secador de tipo gabinete es el más adecuado según los parámetros de decisión y el peso asignado a cada uno de ellos. Como se mencionó anteriormente, los parámetros de calidad más relevantes del cardamomo son el tamaño de cápsula, el color de esta y su consistencia física. Aunque el secador rotativo presente una buena alternativa, por su naturaleza este suele causar mucho daño a los alimentos por impacto y abrasión, de ahí el por qué se suele utilizar en forraje y desechos. Además, el hecho de mover el cardamomo en sus primeras etapas de secado provoca alteraciones en su color, generalmente hacia un color blanquecino (por la caída de gotas de agua), aspecto que es determinante en su precio de exportación.

C. Diseño de geometría

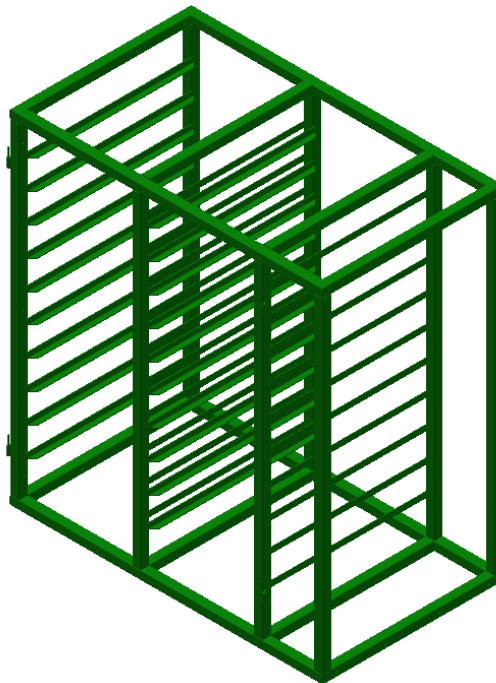
Según los requerimientos establecidos y tipo de secador seleccionado (secador tipo gabinete), el módulo de Estructura, materiales y fabricación definió que se utilizarían 20 bandejas cada una con las siguientes dimensiones: 75 mm de altura, 600 mm de largo y 850 mm de profundidad, utilizando laminas perforadas (agujeros de 6 mm) de acero inoxidable grado 304; así también definió una distancia entre bandejas de 85 mm. A partir de tales valores, dicho módulo definió un espacio de cámara de secado de 1.6 m de largo, 1.9 m de altura, y 1.0 m de ancho (Archila, 2019).

Ilustración 33. Bandejas de acero inoxidable 304.



Fuente: Archila, 2019.

Ilustración 34. Estructura de cámara de secado.



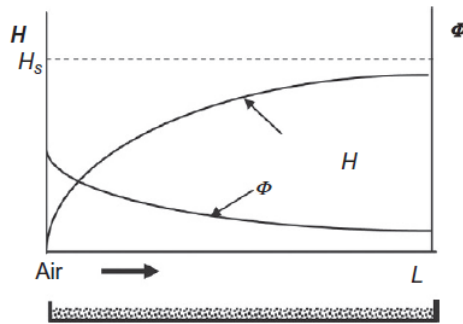
Fuente: Archila, 2019.

Todos los diseños realizados y que se presentan a continuación consisten en el diseño de ductos alrededor de la cámara de secado propuesta, los cuales deben adaptarse para proveer un flujo lo mayor uniforme posible sobre cada una de las bandejas, además de cumplir con la limitante de que dicho sistema de ductos debe ser transportable en pick – up, debe incluir la inducción de flujo, la recirculación y expulsión de este.

La primera etapa al realizar el proceso de diseño de geometría consistió en la selección de un software de análisis de dinámica de fluidos adecuado. Algunos de los softwares CFD más populares en el mercado son: ANSYS Fluent, ANSYS CFX, Autodesk CFD, COMSOL, OpenFOAM y MSC Software. De los anteriores, solamente aquellos pertenecientes a ANSYS Inc. y Autodesk, Inc. proveen licencias a estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala. Sin embargo, las licencias provistas por parte de ANSYS, Inc. se encuentran muy limitadas en la cantidad de nodos y elementos, en su versión estudiantil el límite es 512 mil elementos o nodos (aquel que se alcance primero) (ANSYS, 2018). Caso contrario con el software CFD de Autodesk, el cual provee licencias estudiantiles sin límite de nodos o elementos. Aunque el software de la empresa ANSYS es muy bien calificado, la limitante en operación a estudiantes es un impedimento sustancial para su implementación. Por lo tanto, es el software CFD Ultimate de Autodesk, Inc. el seleccionado para ser utilizado en este proyecto, el cual posee muy buenas críticas, pero también implica otras limitantes, sobre todo en lo que respecta al nivel de control de mallado.

Definido el software por utilizar, se procedió a realizar las primeras propuestas de diseño de geometría del secador. Se buscó que estas fueran de flujo horizontal (paralelo) respecto a las bandejas y no transversal. Un flujo paralelo provee una mejor uniformidad de secado, ya que todas las filas de bandejas obtienen aire de entrada en las mismas condiciones, variando solamente la humedad conforme este recorre la bandeja, tal como se observa en la siguiente ilustración.

Ilustración 35. Comportamiento de contenido de humedad del aire y tasa de secado según posición en bandeja.



Fuente: Berk, 2018.

Debido a que el cambio en las propiedades del aire es solamente respecto a la longitud de la bandeja, el cambio no es tan radical como el que se presenta en proceso de secado de flujo transversal, como el caso del secado tipo contenedor, siendo este uno de los tipos de secadores que menor uniformidad de secado proveen.

A partir de dichas observaciones se realiza la primera propuesta de diseño y se evalúa en CFD Ultimate, para obtener el comportamiento de flujo y observar su respuesta respecto a cambios geométricos en la salida. Cabe resaltar que las siguientes simulaciones se realizaron considerando una presión atmosférica de 86.66 kPa, que corresponden a las condiciones atmosféricas promedio de Alta Verapaz (1,300 m.s.n.m), la cual fue calculada con el software de cálculo psicrométrico “CYTSoft Psychrometric chart 2.2”

1. Diseño 1.

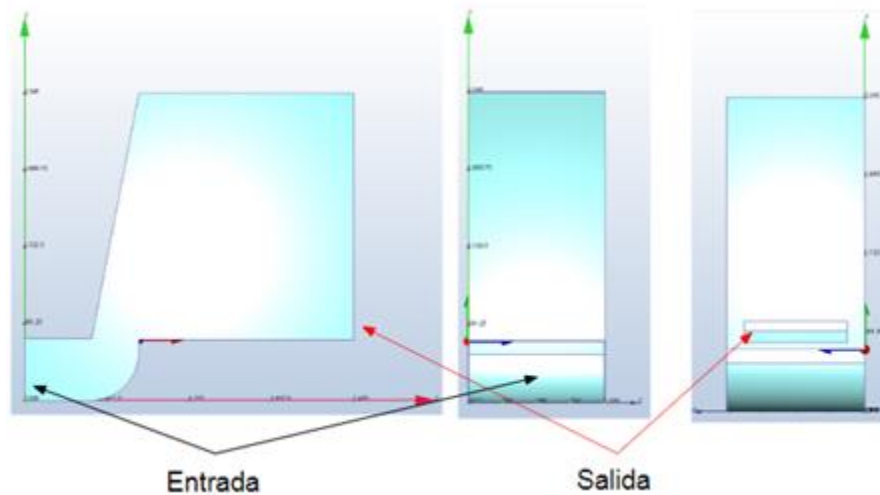
La presentación de diseños se realiza al indicar las características de simulación más relevantes, siendo estos el flujo volumétrico de entrada, el número de elementos en mallado y el número de iteraciones realizadas. Posteriormente se muestra una ilustración con la geometría propuesta del secador, y en una última ilustración se muestra el plano XY de velocidad del fluido. Para el diseño 1, en el Cuadro 13 se indican las características de simulación, y le prosiguen las ilustraciones de la geometría, del plano de velocidad y de trazos de partículas según velocidad.

Cuadro 13. Características de simulación de diseño 1.

Parámetro	Valor
Flujo volumétrico de entrada	2.65 m ³ /s
Número de elementos en mallado	100 mil
Número de iteraciones	500

Fuente: Elaboración propia.

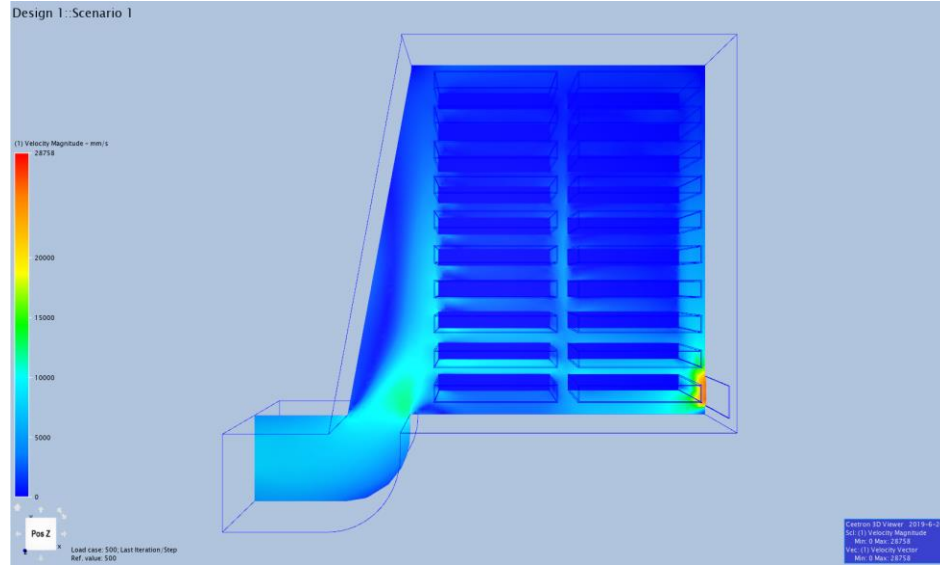
Ilustración 36. Diseño 1 - Geometría.



Fuente: Elaboración propia.

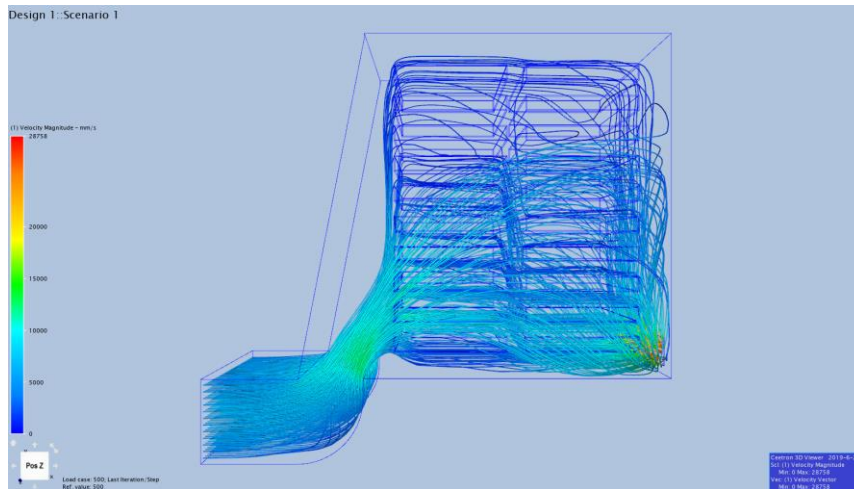
En la Ilustración 36 se muestra la primera propuesta de geometría de un secador tipo gabinete en el cual se busca obtener un secado uniforme. A la izquierda se observa una vista lateral, al medio una vista frontal y a la derecha una vista trasera. De este diseño se denota que la entrada de aire, así como la salida se encuentran en la sección inferior del modelo. La entrada de aire busca redirigir el aire hacia arriba, con el fin de secar aquellas bandejas en la sección superior, mientras que la salida de aire busca que ese aire que ha subido baje de nuevo por el diferencial de presión causado. Así mismo, la salida de aire cuenta con un área mucho menor ya que se busca que el fluido se acelere y otorgue una mayor velocidad con el fin de tener una mayor tasa de secado.

Ilustración 37. Diseño 1 – Plano XY de velocidad.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 38. Diseño 1 – Trazos de velocidad.



Fuente: Elaboración propia.

De la Ilustración 37 se obtiene una distribución de velocidad a la mitad del secador en el plano XY, de este cabe destacar que en efecto, la redirección del flujo hace que este alcance las bandejas superiores, sin embargo la posición de la salida provoca un diferencial de presión suficiente para concentrar la mayoría de flujo en transición directa hacia esta última, dejando que muy poca cantidad de flujo alcance las regiones superiores del secador. A partir de este diseño se derivan variaciones de este con el fin de corregir dichos problemas, principalmente la concentración de flujo en la sección inferior del secador.

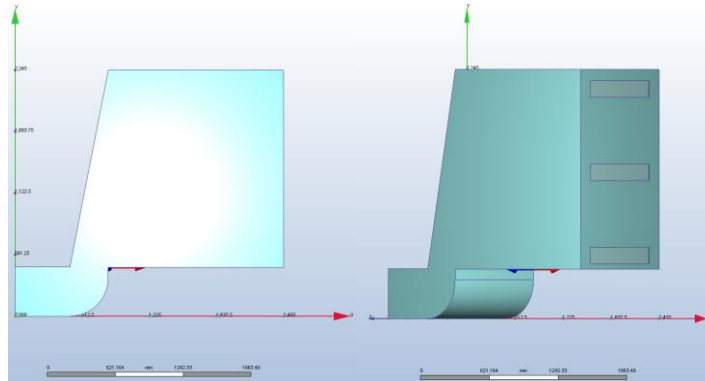
2. Diseño 1.1

Cuadro 14. Características de simulación de diseño 1.1.

Parámetro	Valor
Flujo volumétrico de entrada	2.65 m ³ /s
Número de elementos en mallado	170 mil
Número de iteraciones	500

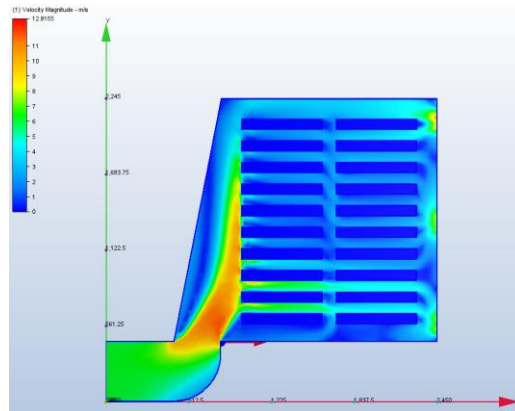
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 39. Diseño 1.1 - Geometría.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 40. Diseño 1.1 – Plano XY de velocidad.



Fuente: Elaboración propia.

Como variación al diseño 1, se propone el diseño 1.1, en el cual se conserva todo, excepto que se agregan tres salidas igualmente espaciadas en el eje vertical, esto con el fin de aumentar la velocidad de flujo, así como de distribuir mayor cantidad de flujo en la sección superior del secador. Cabe resaltar que este diseño cuenta con aprox. 70 mil elementos de mallado más, ya que al haber regiones con cambios de velocidad más abruptos esperados, dichas regiones se refinan. Como se observa en la Ilustración 40 las bandejas inferiores siguen denotando velocidades muy superiores (6 m/s) respecto a las superiores (3 – 4 m/s) y las de la sección media (0.25 – 3 m/s).

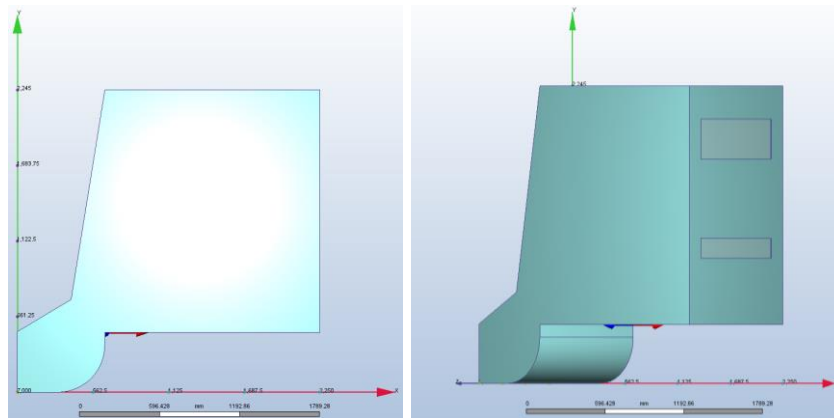
3. Diseño 1.4

Cuadro 15. Características de simulación de diseño 1.4.

Parámetro	Valor
Flujo volumétrico de entrada	2.65 m ³ /s
Número de elementos en mallado	130 mil
Número de iteraciones	500

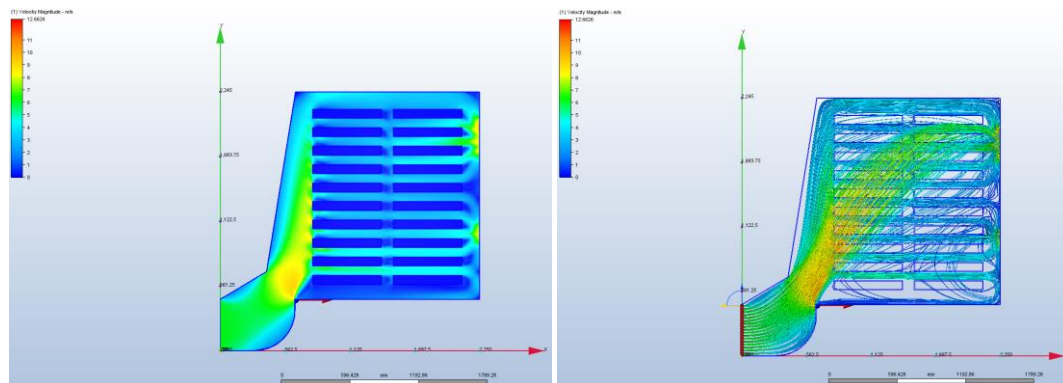
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 41. Diseño 1.4 – Geometría.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 42. Diseño 1.4 – Plano XY de velocidad y trazos de velocidad.



Fuente: Elaboración propia.

El diseño 1.4 fue la última variación derivada del diseño 1 (para diseños 1.2 y 1.3 referirse a Anexos sección A). A través de las iteraciones de diseño 1 hasta 1.4, se varió principalmente la posición y tamaño de las salidas de flujo, las cuales denotaron ser decisivas en el comportamiento de este dentro de la cámara de secado. Sin embargo, a través de las iteraciones no se obtuvo un diseño que se acercara a un flujo uniforme; además, por la posición de la entrada a un nivel inferior de la cámara, este diseño se descartó por complejidad de fabricación indicada por el módulo de Estructura, materiales y fabricación.

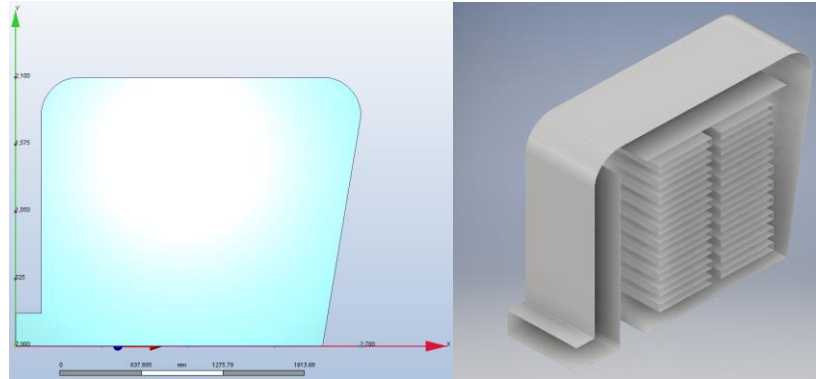
4. Diseño 2

Cuadro 16. Características de simulación de diseño 2.

Parámetro	Valor
Flujo volumétrico de entrada	2.65 m ³ /s
Número de elementos en malla	230 mil
Número de iteraciones	500

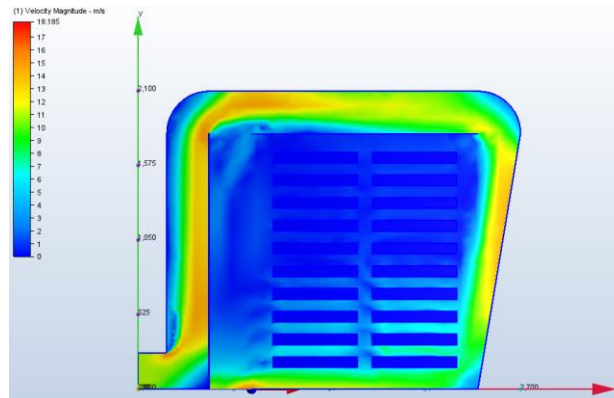
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 43. Diseño 2 – Geometría.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 44. Diseño 2 – Plano XY de velocidad.



Fuente: Elaboración propia.

Considerando ubicar la entrada de flujo a nivel de la cámara de secado, y que los ductos de entrada no deben ser de gran tamaño, ya que añadiría mucha longitud al secador (cámara de secado cuenta con 1.335 m y este debe ser transportable en pick-up), se propone el diseño de las tres ilustraciones anteriores. Este diseño buscó que con una curva se redujera el área e indujera flujo en dirección -X, así también, se añadió una abertura en la región superior con el fin de crear vacío, e inducir aire a esa región, haciendo que este recirculara. Sin embargo, aunque el diseño es compacto, la distribución de aire se concentra solamente en la sección inferior del secador, dejando la sección media y superior sin flujo suficiente para un secado efectivo.

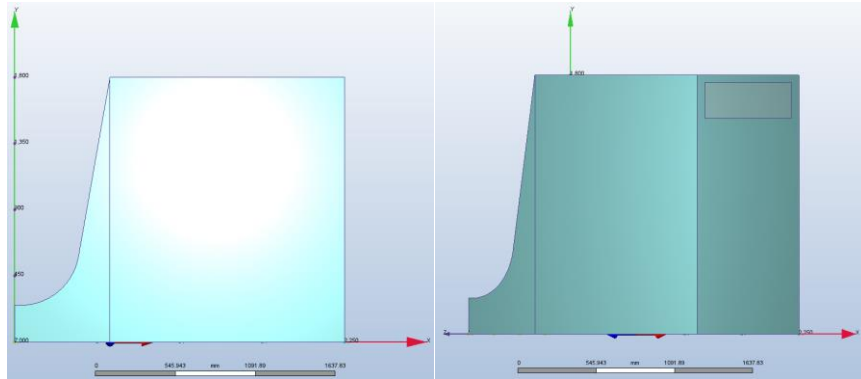
5. Diseño 3

Cuadro 17. Características de simulación de diseño 3.

Parámetro	Valor
Flujo volumétrico de entrada	1.50 m ³ /s
Número de elementos en malla	900 mil
Número de iteraciones	500

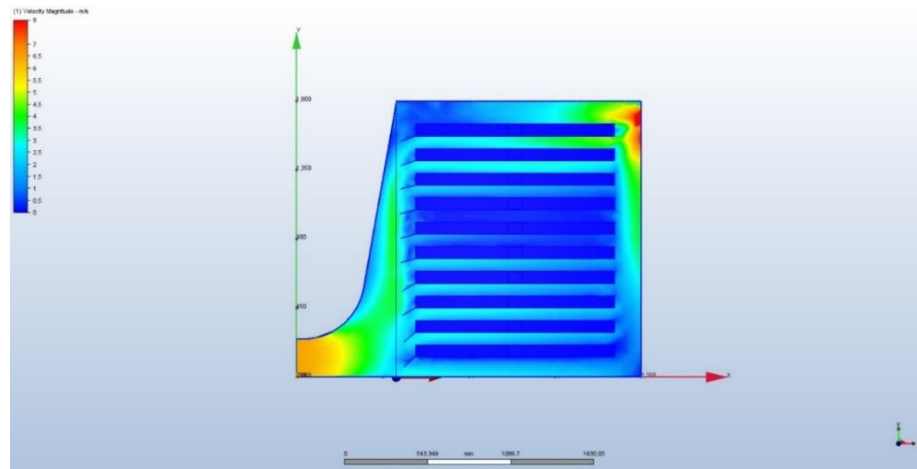
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 45. Diseño 3 – Geometría.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 46. Diseño 3 – Plano XY de velocidad.



Fuente: Elaboración propia.

El diseño 3, en contraste al diseño 2, entrega un flujo de forma directa (sin ingresos por vías extensas de ductos). En este diseño se busca redirigir el flujo mediante ventilas ubicadas al frente de cada bandeja, de estas se denota que las bandejas superiores e inferiores poseen mayor flujo (2 – 3.5 m/s), sin embargo, dos bandejas de la sección media cuentan con flujos mínimos (0.5 – 1 m/s), lo cual se espera regular con la configuración de la posición de las ventilas.

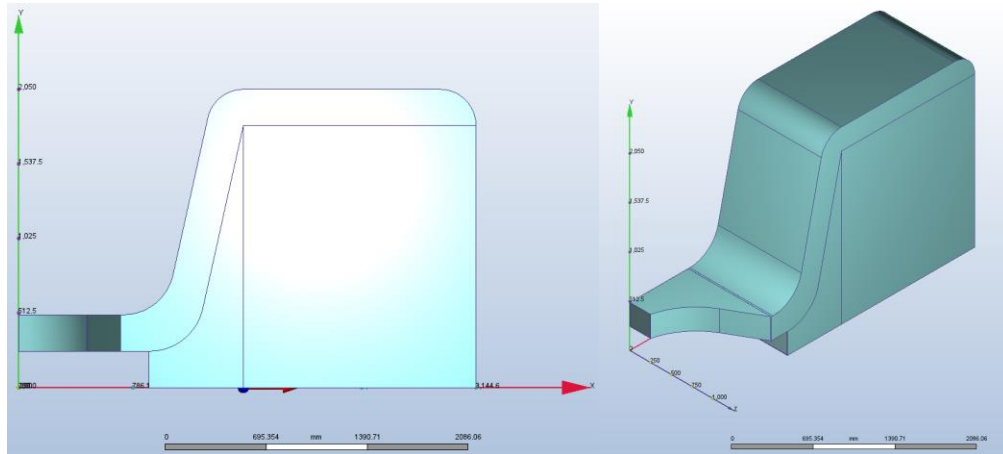
6. Diseño 3.1

Cuadro 18. Características de simulación de diseño 3.1.

Parámetro	Valor
Flujo volumétrico de entrada	1.25 m ³ /s
Número de elementos en mallado	1.1 millones
Número de iteraciones	750

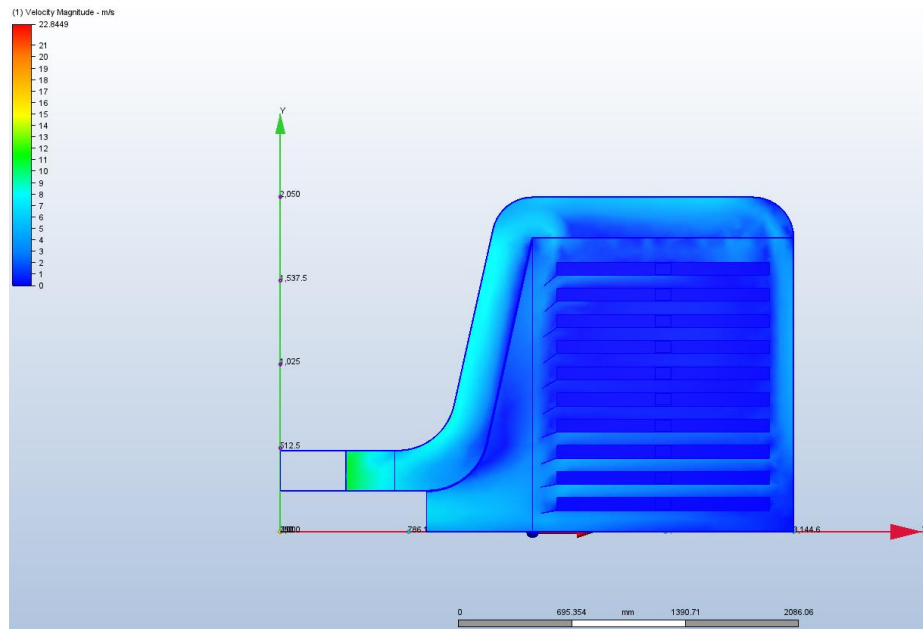
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 47. Diseño 3.1 – Geometría.



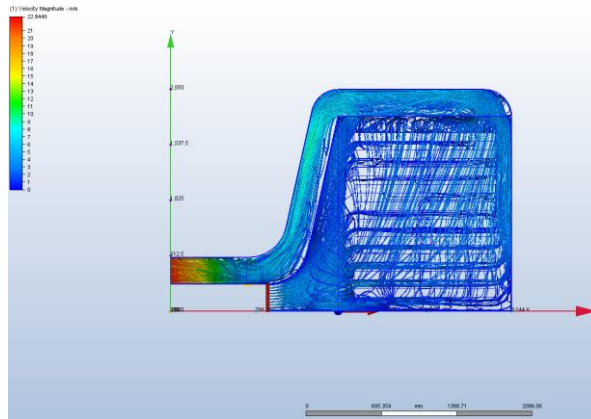
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 48. Diseño 3.1 – Plano XY de velocidad.



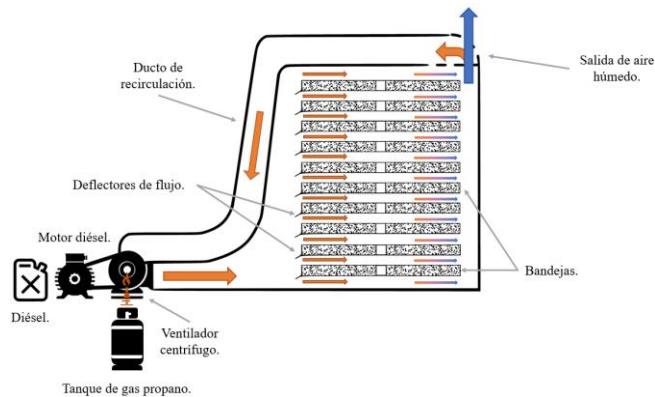
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 49. Diseño 3.1 - Trazos de velocidad.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 50. Diseño 3.1 - Diagrama de funcionamiento ideal.



Fuente: Elaboración propia.

Como variación al diseño 3, en el diseño actual se añade una salida más y se consideran los efectos añadidos del ducto de recirculación, el cual se hace pasar sobre la cámara de secado. En el desarrollo de este diseño cabe resaltar que se consideraron muchas de las observaciones realizadas en las iteraciones anteriores, siendo de las más importantes: la sección de reducción de área a la entrada del flujo, efecto de posición de salidas, posición de entrada respecto a cámara de secado y tamaño máximo de ductos. Sin embargo, al analizar la distribución de flujo mediante un plano de velocidad, así como de las trazas del fluido, se hace notar que son las bandejas superior e inferior las que más flujo reciben (4 – 5 m/s), sin embargo, las bandejas de la sección media no reciben flujo significativo (0 – 1.5 m/s). Además, cabe resaltar que la primera apertura (izquierda) es una de las que mayor flujo recibe, lo cual era lo esperado, sin embargo, se buscaba que dicho flujo fuera redirigido por las ventilas ubicadas al inicio de la bandeja, lo cual es algo que no se ve reflejado ni en el plano de velocidad ni en las trazas, lo que indica que dicho flujo está siendo expulsado sin haber tenido contacto siquiera con el grano. Al presente diseño se le realizaron diversas modificaciones geométricas, de las cuales las más relevantes se presentan en Anexos sección A.

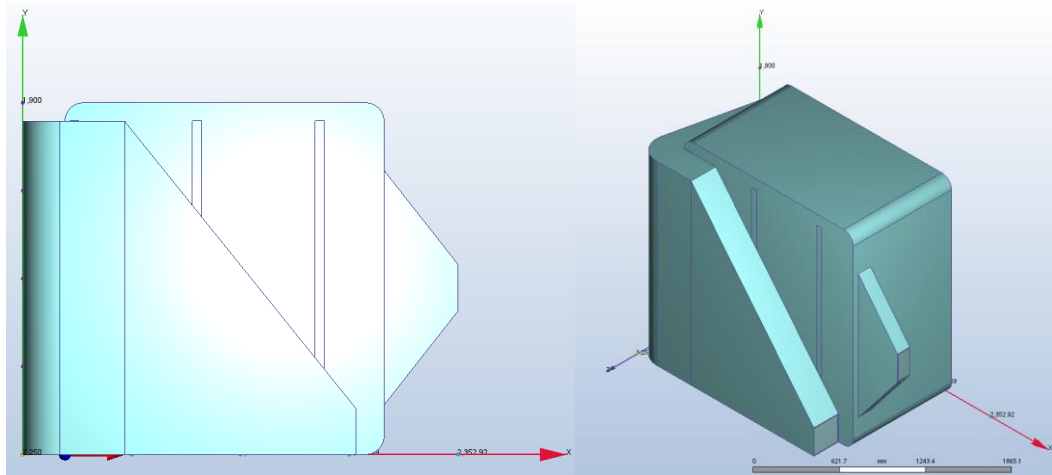
7. Diseño 4.

Cuadro 19. Características de simulación de diseño 4.

Parámetro	Valor
Flujo volumétrico de entrada	1.75 m ³ /s
Número de elementos en malla	350 mil
Número de iteraciones	500

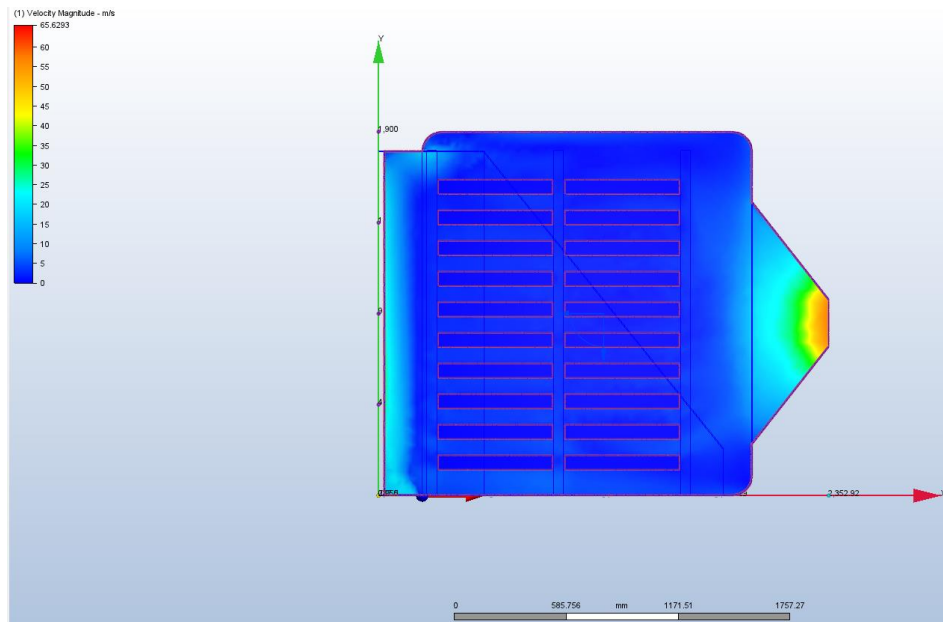
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 51. Diseño 4 – Geometría.



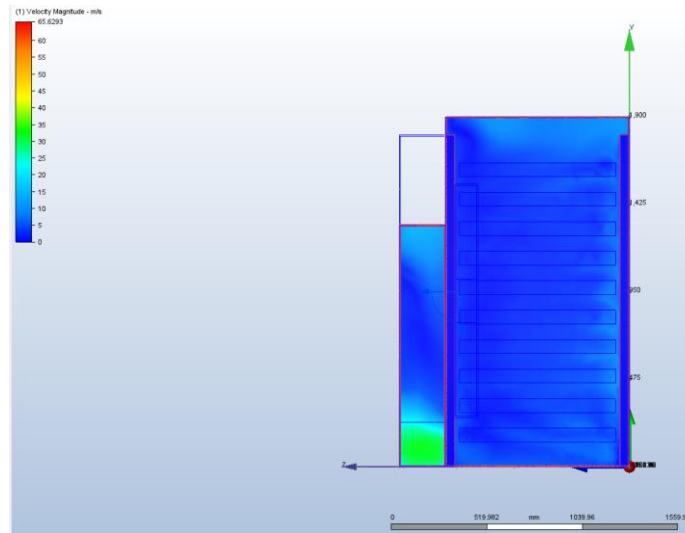
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 52. Diseño 4 – Plano XY de velocidad alineado a ducto de salida.



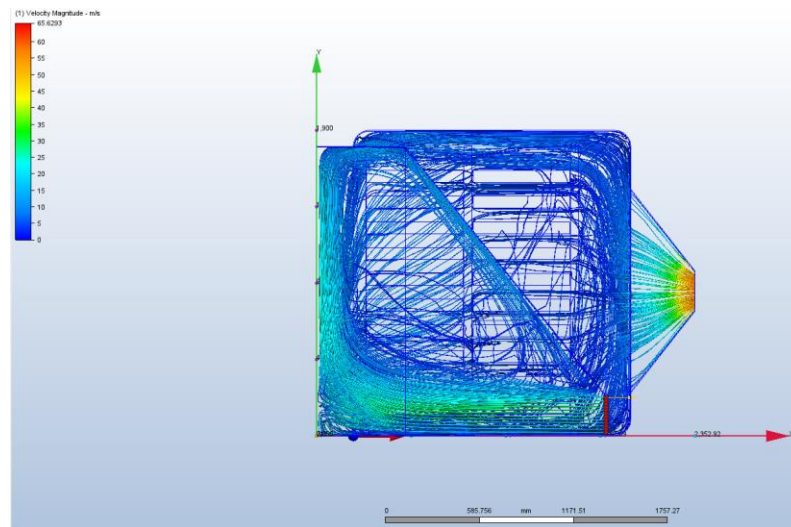
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 53. Diseño 4 – Plano YZ de velocidad alineado a mitad de cámara de secado.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 54. Diseño 4 - Trazos de velocidad.



Fuente: Elaboración propia.

El diseño 4 surge como una propuesta que se enfoca en la reducción de tamaño de los ductos requeridos para el redireccionamiento del flujo dentro de la cámara de secado. En este se hace notar que se agrega un ducto de entrada a un costado de la cámara de secado, contrario al resto que han sido anteriores a la misma. Así mismo se agrega un ducto de salida al centro con el fin de enfocar el flujo en las bandejas intermedias. Sin embargo, este diseño denota varios inconvenientes como la gran cantidad de vórtices que se forman en el ducto de entrada del secador, así como una distribución muy pobre de las velocidades en las bandejas medias en su eje vertical (Y). De la misma forma, en la Ilustración 53 se hace notar una distribución pobre en lo que respecta al eje horizontal (Z).

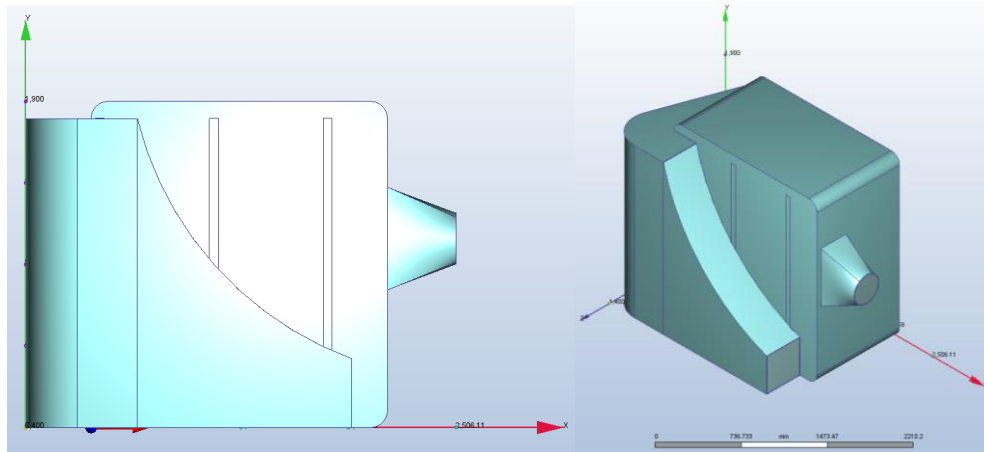
8. Diseño 4.1

Cuadro 20. Características de simulación de diseño 4.1.

Parámetro	Valor
Flujo volumétrico de entrada	1.5 m ³ /s
Número de elementos en mallado	460 mil
Número de iteraciones	500

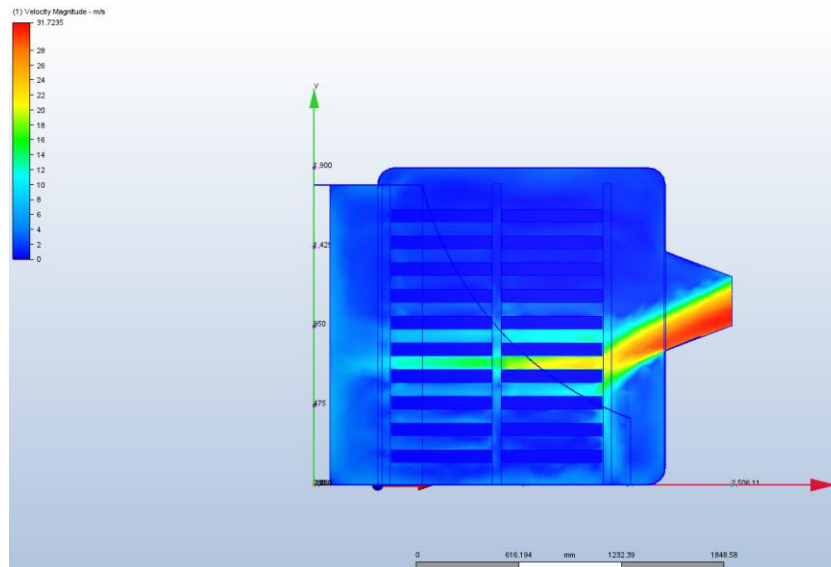
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 55. Diseño 4.1 – Geometría.



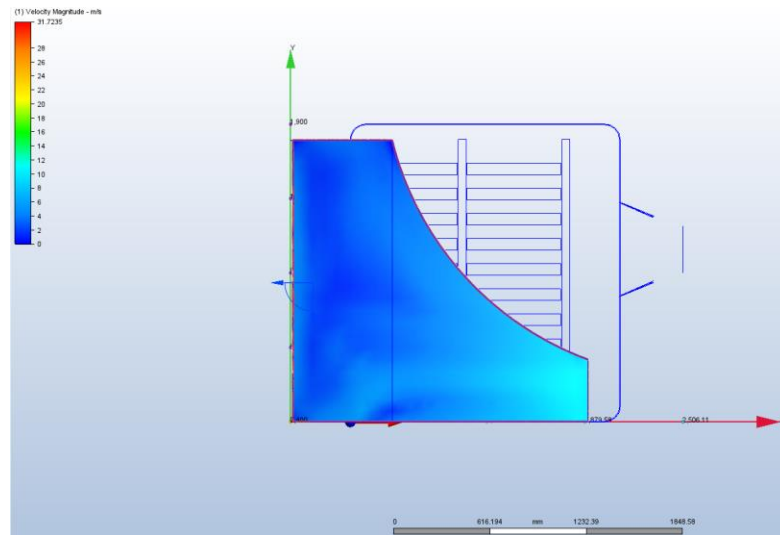
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 56. Diseño 4.1 – Plano XY de velocidad alineado a ducto de salida.



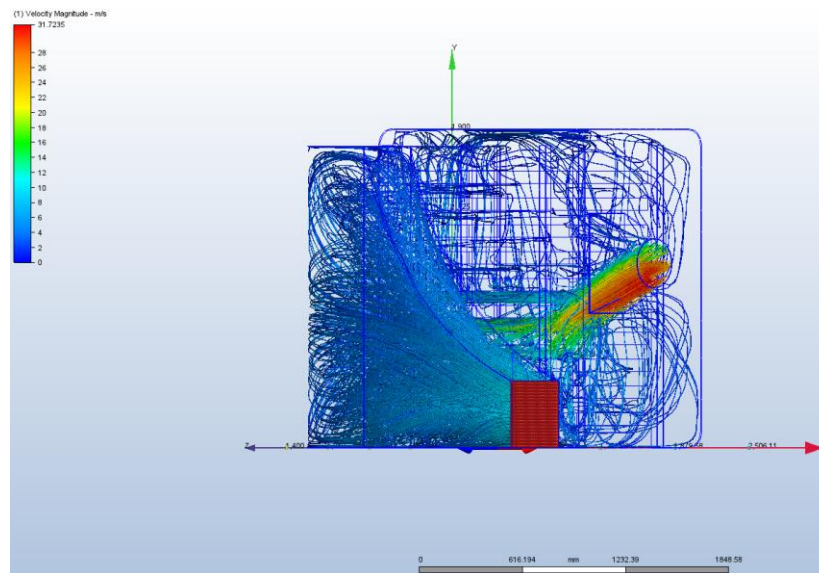
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 57. Diseño 4.1 – Plano XY de velocidad alineado a ducto de entrada.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 58. Diseño 4.1 - Trazos de velocidad.



Fuente: Elaboración propia.

Del diseño 4.1 cabe resaltar que aunque la distribución de aire dentro de la cámara de secado es muy pobre (ver Ilustración 56), lo más importante de este diseño es que la distribución de aire en el eje vertical (Y) se puede mejorar sustancialmente agregando la curvatura en la entrada del flujo, tal como se muestra en la Ilustración 57, por lo que es un aspecto a conservar en futuras iteraciones. Así mismo, cabe mencionar que la posición de la salida y su tamaño lograron concentrar el flujo en la sección media de las bandejas, aspecto que no se había logrado en iteraciones anteriores. Aunque no sea la distribución buscada, provee indicios de la influencia y apertura correcta de la salida.

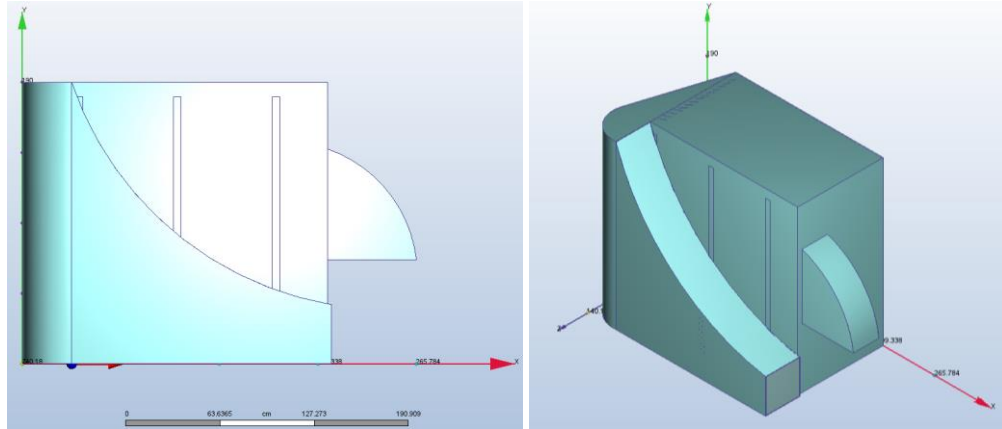
9. Diseño 5

Cuadro 21. Características de simulación de diseño 5.

Parámetro	Valor
Flujo volumétrico de entrada	2,840 CFM (1.34 m ³ /s)
Número de elementos en malla	1.8 millones
Número de iteraciones	750

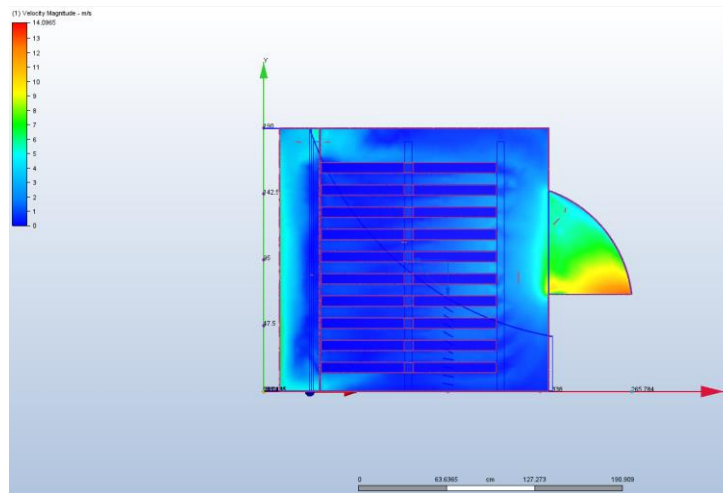
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 59. Diseño 5 – Geometría.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 60. Diseño 5 – Plano XY de velocidad alineado a ducto de entrada.



Fuente: Elaboración propia.

El diseño 5 es una de las iteraciones previas al diseño final, ya que la distribución que se busca se alcanza con suficiente satisfacción. Las iteraciones del modelo 5 varían muy poco respecto al diseño final, siendo los más significativos la simplificación de geometrías como el ducto de recirculación, ajuste de ventilas y otras pequeñas simplificaciones de geometría buscando simplificar manufactura.

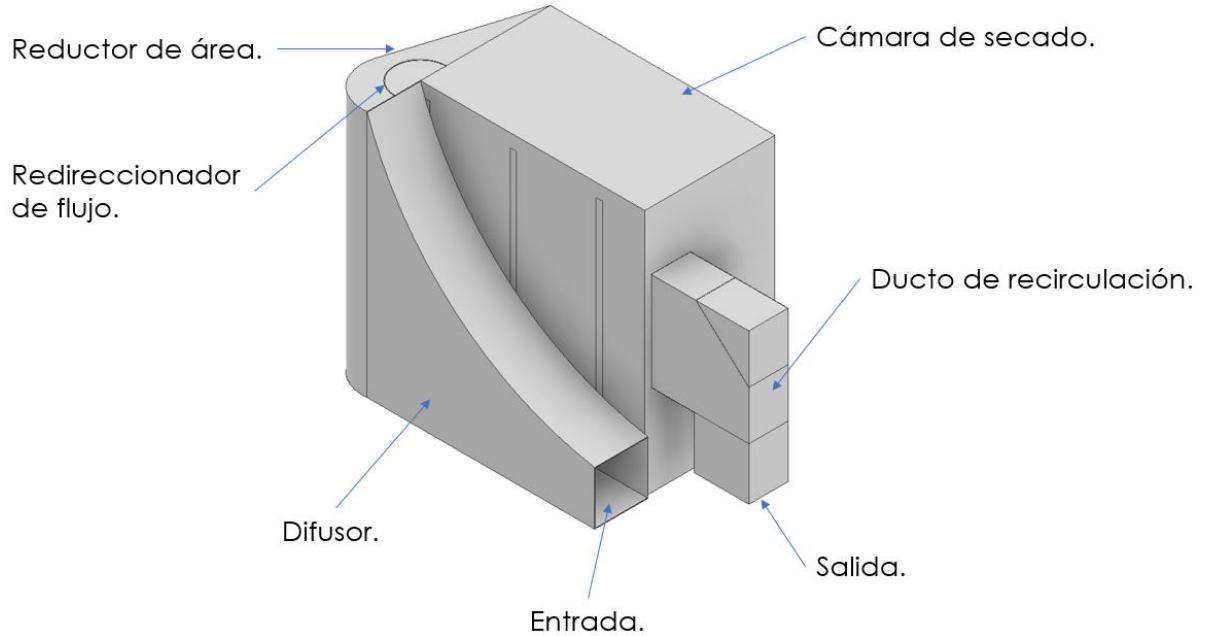
10. Diseño final

Cuadro 22. Características de simulación de diseño final

Parámetro	Valor
Flujo volumétrico de entrada	2,840 CFM (1.34 m ³ /s)
Número de elementos en mallado	2.4 millones
Número de iteraciones	724

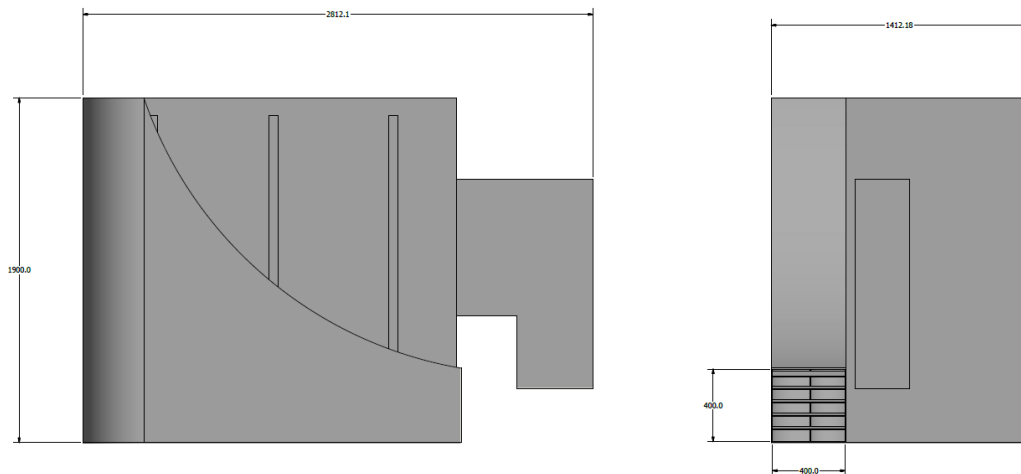
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 61. Diseño final – Geometría.



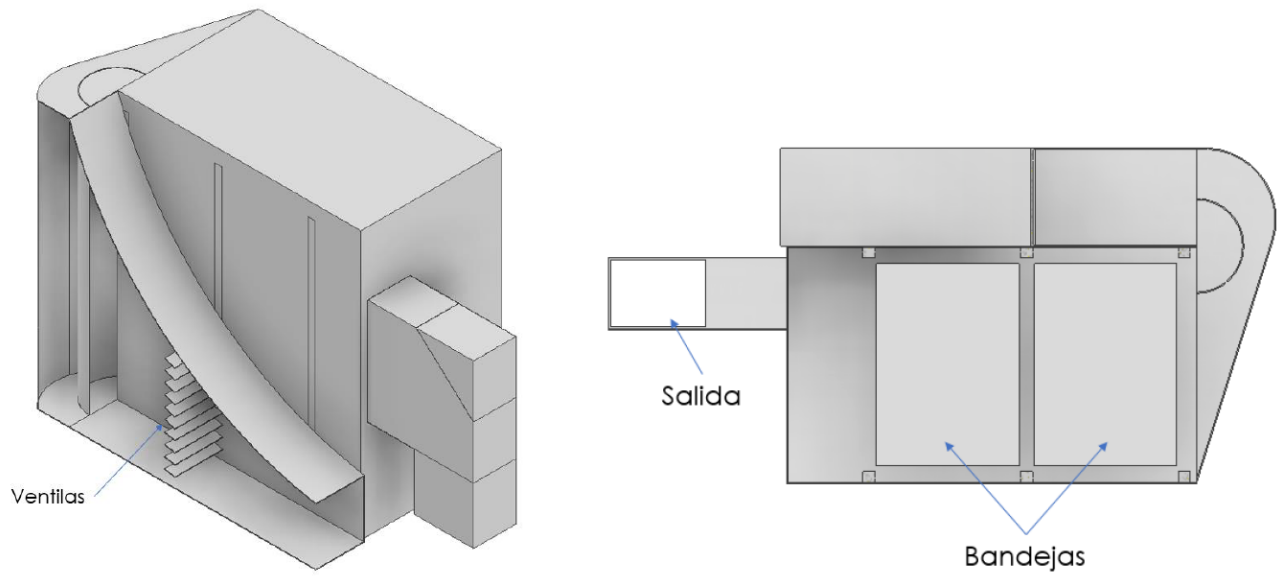
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 62. Diseño final – Dimensiones.



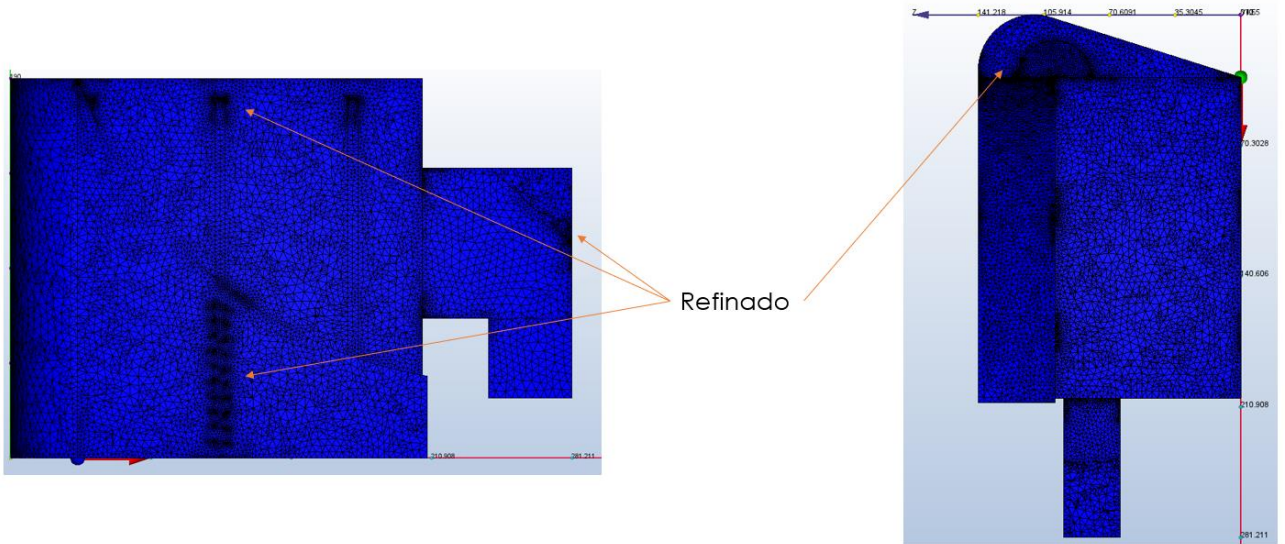
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 63. Diseño final – Secciones internas.



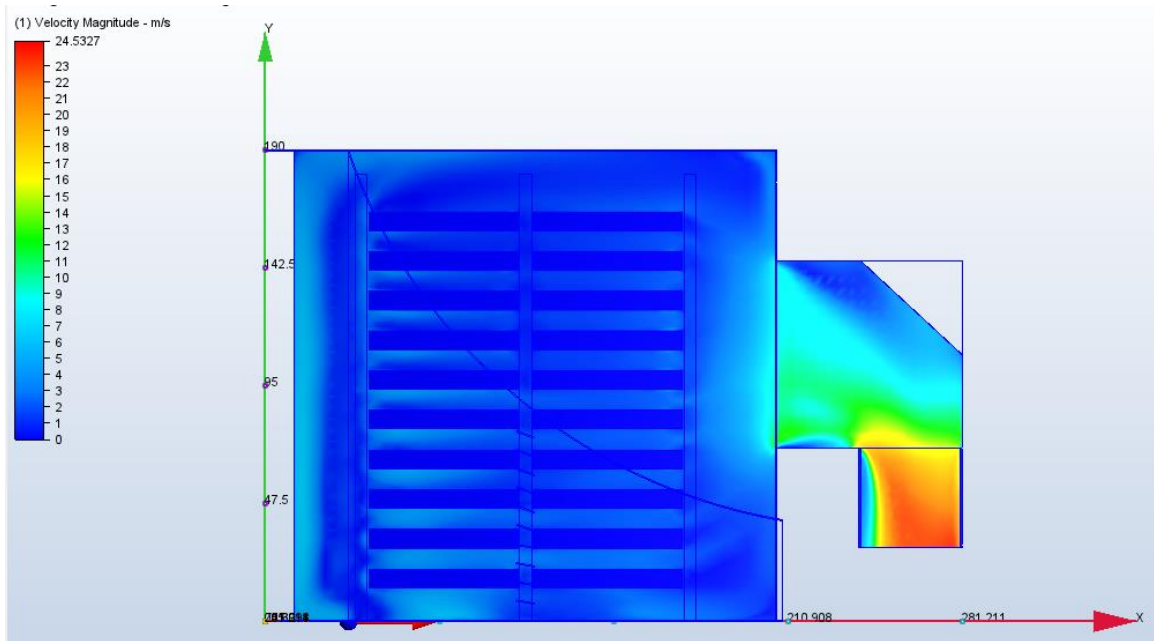
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 64. Diseño final - Mallado.



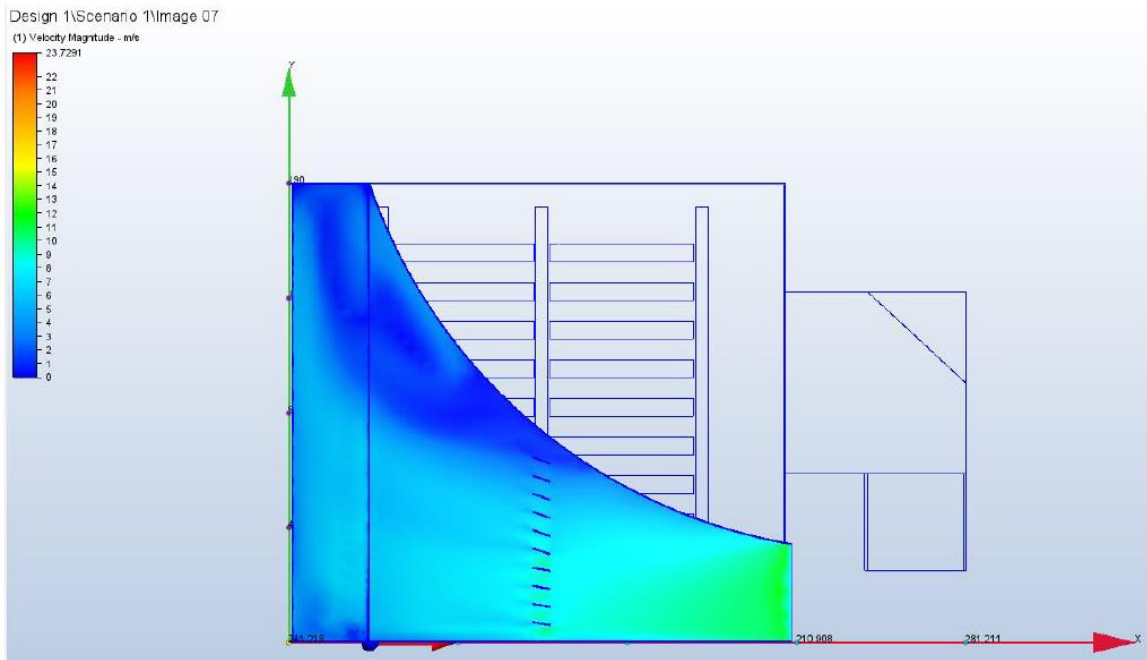
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 65. Diseño final – Plano XY de velocidad alineado a ducto de salida.



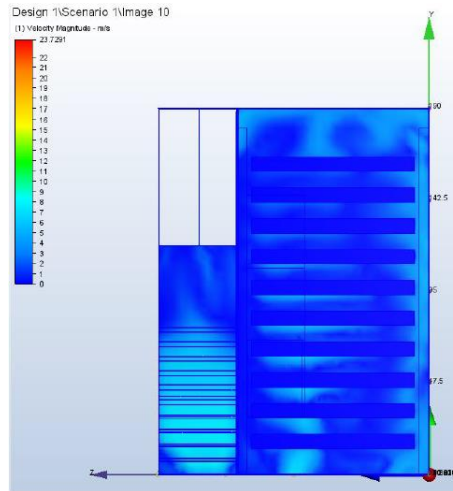
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 66. Diseño final – Plano XY de velocidad alineado a ducto de entrada.



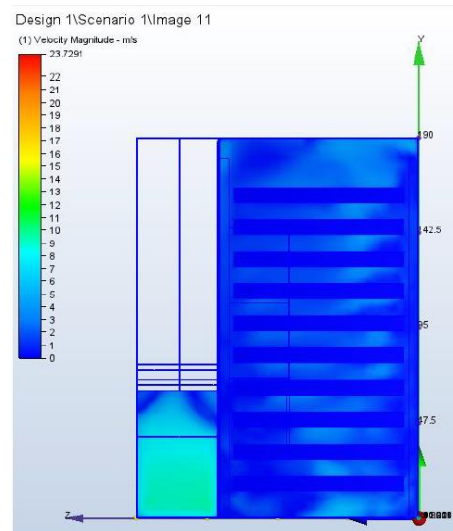
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 67. Diseño final – Plano YZ de velocidad alineado a mitad de columna 2 de bandejas.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 68. Diseño final – Plano YZ de velocidad alineado a mitad de columna 1 de bandejas.



Fuente: Elaboración propia.

El diseño final que se desarrolló minimiza la cantidad de ductos por añadir, utilizando principalmente el difusor que se obtuvo del diseño 4. Además, se le agrega un reductor de área, un redireccionador de flujo y un ducto de recirculación. Además, cabe mencionar que el redireccionador de flujo y las ventilas agregadas son configurables dentro de un rango, lo que permite reajustar el flujo en el eje vertical (Y) así como el flujo en dirección horizontal (Z). El diseño presente denota un flujo homogéneo a través del plano transversal a las bandejas (YZ), tal como se denota en la Ilustración 67 y la Ilustración 68; así como un flujo semi-homogéneo a lo largo del plano (XY), tal como se muestra en la Ilustración 65.

D. Proceso de secado.

1. Condiciones ambientales.

Cobán es la cabecera departamental de Alta Verapaz, departamento que cuenta con una altura promedio de 1316 m.s.n.m. La temperatura media anual de Cobán, Alta Verapaz es de 18.7 °C. Durante los meses de cosecha de cardamomo en Guatemala (septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero) la temperatura media es de 17.8 °C. Así mismo, el promedio anual de humedad relativa fue de 81.5% en el 2016, y de acuerdo con históricos este mantiene un valor muy cercano al 80% (Instituto Nacional de Estadística, 2016). Las propiedades del aire a una altura de 1300 m.s.n.m., una temperatura de bulbo seco de 18 °C y un porcentaje de humedad relativa del 80%, fueron obtenidas con el software de cálculo psicrométrico “CYTSoft Psychrometric chart 2.2” y estas son:

- Presión atmosférica: 86,651.88 Pa
- Densidad: 1.0297 kg/m³.
- Densidad de bulbo seco: 1.0174 kg_{Seco}/m³.
- Temperatura de bulbo húmedo: 15.67 °C.
- Humedad absoluta: 0.012338 kg_{Agua}/kg_{Seco}.
- Entalpía: 48.8643 kJ/kg_{Seco}.

El mismo software se utiliza como método de cálculo y obtención de propiedades de estado del aire durante los distintos procesos psicrométricos calculados.

2. Cálculo de tiempo de secado.

De acuerdo con las observaciones durante la visita a Senahú, los secadores de tipo contenedor trabajaron flujos de aire inducido a temperaturas entre los 40 – 50 °C; así mismo, experimentos llevados a cabo en India por Rao y Mande (2009), demostraron procesos de secado en cardamomo negro (*Amomum subulatum*) con temperaturas entre los 70 – 90 °C y flujos entre 460 – 690 l/m (16.25 – 24.37 CFM). De estos se toma como punto de iteración inicial 50 °C como temperatura de bulbo seco del aire inducido, así como una velocidad de flujo de 1 m/s sobre las bandejas, y así valuar el tiempo de secado.

Debido a que se busca que el flujo se distribuya uniformemente sobre cada fila de bandejas, se considera que lo que suceda en una bandeja, suceda en las demás. Así mismo, debido a que el flujo de aire recorre las dos bandejas de cada fila en serie, se modelan ambas bandejas como una sola bandeja (bandeja modelada). Cabe mencionar que las humedades representativas se denotan en base húmeda (w.b. por sus siglas en inglés) y las utilizadas en cálculos en base seca (d.b. por sus siglas en inglés).

Propiedades de bandeja modelada:

- Área superficial: 1.02 m².
- Masa de cardamomo húmedo: 1 quintal (100 lbs, 45.5 kg).
- Contenido de humedad inicial (w.b.): 80%.
- Contenido de humedad crítico (w.b.): 45%.
- Contenido de humedad de equilibrio (w.b.): 4%.
- Contenido de humedad objetivo (w.b.): 10%.

Propiedades de aire inducido:

- Temperatura bulbo seco: 50 °C.
- Temperatura bulbo húmedo: 24.44 °C.
- Humedad absoluta: 0.012127955 kg_{Agua}/kg_{Seco}.
- Velocidad sobre bandeja: 1 m/s.
- Densidad bulbo seco: 0.9164 kg_{Seco}/m³.
- Calor específico de aire húmedo: 1027.46 J/kg_{Seco} °C.
- Calor latente de evaporización a 24.44 °C: 2443 kJ/kg_{Agua}.

Como primer paso para determinar el tiempo de secado requerido se convierten todas las humedades de base húmeda (w.b.) a base seca (d.b.), aplicando la ecuación 5.

$$M_{db} = \frac{M_{wb}}{1 + M_{wb}}$$

- Contenido de humedad inicial (d.b.): 4 kg_{Agua}/kg_{Seco}.
- Contenido de humedad crítico (d.b.): 0.8181 kg_{Agua}/kg_{Seco}.
- Contenido de humedad de equilibrio (d.b.): 0.04167 kg_{Agua}/kg_{Seco}.
- Contenido de humedad objetivo (d.b.): 0.1111 kg_{Agua}/kg_{Seco}.

Posteriormente se calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección utilizando la ecuación 24.

$$h = 20G^{0.5} = 20 \left[\left(0.91644472 \frac{\text{kg}_{\text{seco}}}{\text{m}^3} \right) \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \right]^{0.5} = 19.15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Con dichos datos se calcula la tasa de remoción de masa de agua por unidad de tiempo y unidad de área (N) con la ecuación 22.

$$N = \frac{19.15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} (50.00 \text{ °C} - 24.44 \text{ °C})}{2,443,000 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} = 0.000200318 \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{m}^2 \text{ s}}$$

Se procede a obtener la tasa de remoción de masa de agua por unidad de masa de materia seca y tiempo (ϕ). Para ello se observa la definición de N y ϕ y se concluye que para obtener ϕ a partir N se requiere la siguiente transformación.

$$\phi = 0.000200318 \frac{kg_{agua}}{m^2 s} \cdot \frac{1.02 m^2}{9.1 kg_{seco}} = 2.24533 \times 10^{-5} \frac{kg_{agua}}{kg_{seco} s}$$

Con estos datos ya es posible realizar el cálculo del tiempo de secado para un proceso de secado que involucra fase de secado constante y fase de secado en reducción, por lo que se aplica la ecuación 19.

$$t = \frac{X_1 - X_c}{\phi_0} + \frac{X_c - X_e}{\phi_0} \cdot \ln \left(\frac{X_c - X_e}{X_2 - X_e} \right)$$

$$t = \frac{4 \frac{kg_{agua}}{kg_{seco}} - 0.8181 \frac{kg_{agua}}{kg_{seco}}}{2.24533 \times 10^{-5} \frac{kg_{agua}}{kg_{seco} s}} + \frac{0.8181 \frac{kg_{agua}}{kg_{seco}} - 0.04167 \frac{kg_{agua}}{kg_{seco}}}{2.24533 \times 10^{-5} \frac{kg_{agua}}{kg_{seco} s}} \cdot \ln \left(\frac{0.8181 \frac{kg_{agua}}{kg_{seco}} - 0.04167 \frac{kg_{agua}}{kg_{seco}}}{0.1111 \frac{kg_{agua}}{kg_{seco}} - 0.04167 \frac{kg_{agua}}{kg_{seco}}} \right)$$

$$t = 225,203.4 s = 62.55 hrs$$

El resultado de la primera iteración indica que se requieren 62.55 horas de secado para completar el proceso y llevar el cardamomo de un contenido de humedad base húmeda de 80% a 10%. Dicho tiempo de secado es demasiado. Para poder reducir dicho tiempo se pueden variar dos parámetros, la temperatura del aire inducido, o la velocidad del flujo sobre las bandejas. Debido a que 50 °C es una temperatura de operación común, se opta por aumentar la velocidad de flujo, obteniendo así los siguientes estimados.

Cuadro 23. Tiempos de secado según velocidad de flujo inducido a 50 °C y carga de 10 quintales.

Velocidad de flujo [m/s]	Tiempo de secado [hrs]
1.0	62.55
1.5	51.08
2.0	44.23
2.5	39.56
3.0	36.12
3.5	33.44
4.0	31.28
4.5	29.49
5.0	27.98

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el cuadro anterior, se denota que, a mayor velocidad de flujo, menor es el tiempo de secado teórico. Como primera propuesta, se solicitó al módulo de Sistema de potencia y combustión, y análisis de vibraciones mecánicas a cargo de Oscar Fuentes, que se otorgará 5 m/s como velocidad de flujo entre cada una de las bandejas. De dicho módulo se obtuvo que el flujo máximo por proveer sería 2,840 CFM.

A partir de simulaciones de flujo en CFD Ultimate se obtuvo que la velocidad promedio entre bandejas correspondientes a un flujo volumétrico de 2,840 CFM es de 2.5 m/s. que corresponde a un tiempo de secado de 39.56 hrs. Dicho tiempo aún puede ser reducido, variando ahora la temperatura de ingreso del aire inducido.

Tal como se mencionó anteriormente, las temperaturas usuales de secado de cardamomo verde (*Elettaria cardamomum*) se encuentra entre los 40 – 60 °C. Sin embargo, en el caso de cardamomo negro (*Amomum subulatum*) se han registrado temperaturas de secado de hasta 90 °C, por lo que para un flujo de 2.5 m/s, se calculan los tiempos de secado.

Cuadro 24. Tiempos de secado según temperatura de flujo inducido a 2.5 m/s y carga de 10 quintales.

Temperatura de bulbo seco de flujo [°C]	Tiempo de secado [hrs]
40	55.50
45	46.21
50	39.56
55	34.58
60	30.71
65	27.62
70	25.10
75	23.00
80	21.23
85	19.71
90	18.41

Fuente: Elaboración propia.

A partir del cuadro anterior se delimita que la temperatura de bulbo seco por operar en el proceso de secado será no inferior a 50 °C y no mayor a 75 °C. La temperatura máxima se delimita a 75 °C debido a que dichas temperaturas han sido utilizadas con especies de cardamomo distintas a la presente en Guatemala, así también, una tasa de secado excesiva puede causar endurecimiento de cápsula (“*case hardening*”), aspecto que simplemente dañaría el cardamomo. Por lo tanto, la temperatura final de operación fue un parámetro que se definió con base en las observaciones durante las pruebas de secado.

Así mismo, cabe resaltar que el coeficiente de convección de transferencia de calor es un parámetro altamente dependiente del proceso y escenario individual de secado, tal como se detalla en la sección del marco teórico. Sin embargo, al no contarse con estudios de curvas características de secado de cardamomo verde, se utiliza la expresión propuesta por Berk (2018); que, aunque se recomienda para procesos de diseño de secadores, las estimaciones de tiempo de secado realizadas a partir de dicho valor pueden diferir de forma significativa respecto a los tiempos de secado reales.

3. Definición psicrométrica de proceso de secado.

Tal como se definió anteriormente, la temperatura de bulbo seco promedio en Cobán, Alta Verapaz, es de aproximadamente 18 °C, con un porcentaje de humedad relativa del 80%.

Propiedades de aire ambiental:

- Temperatura bulbo seco: 18 °C.
- Temperatura bulbo húmedo: 15.67 °C.
- Humedad absoluta: 0.012127955 kg_{Agua}/kg_{Seco}.
- Densidad bulbo seco: 1.01735 kg_{Seco}/m³.
- Entalpía: 48.8643 kJ/kg_{Seco}.

Considerando el caso que requiere más energía (temperatura máxima) se obtienen las siguientes propiedades.

Propiedades de aire inducido:

- Temperatura bulbo seco: 75 °C.
- Temperatura bulbo húmedo: 29.58 °C.
- Humedad absoluta: 0.012127955 kg_{Agua}/kg_{Seco}.
- Densidad bulbo seco: 0.85052 kg_{Seco}/m³.
- Entalpía: 107.5567 kJ/kg_{Seco}.

Conociendo las propiedades del aire de entrada, el flujo volumétrico, y la tasa de remoción de agua, se realiza un balance de potencia y flujo másico, considerando como sistema el flujo de aire inducido, obteniendo así las propiedades del aire de salida.

Balance de energía:

$$\dot{E}_{Entrada} = \dot{E}_{Salida}$$

$$\dot{m}_{Seco} h_1 = \dot{m}_{Seco} h_2 + \dot{Q}_{Salida}$$

$$h_2 = \frac{\dot{m}_{Seco} h_1 - \dot{Q}_{Salida}}{\dot{m}_{Seco}} = \frac{\dot{V} \rho_{Seco} h_1 - \dot{Q}_{Salida}}{\dot{V} \rho_{Seco}}$$

$$h_2 = \frac{\left(0.134033 \frac{m^3}{s}\right) \left(0.85051810 \frac{kg_{Seco}}{m^3}\right) \left(107.56 \frac{kJ}{kg_{Seco}}\right) - 1.46 \frac{kJ}{s}}{\left(0.134033 \frac{m^3}{s}\right) \left(0.85051810 \frac{kg_{Seco}}{m^3}\right)} = 94.753 \frac{kJ}{kg_{Seco}}$$

Donde

$$\dot{Q}_{Salida} = \dot{m}_{Agua} \lambda = \phi M \lambda = 6.10762 \times 10^{-5} \frac{kg_{Agua}}{kg_{Seco} s} \cdot 9.81 kg_{Seco} \cdot 2430.8 \frac{kJ}{kg_{Agua}} = 1.46 kW$$

Balance de masa de agua:

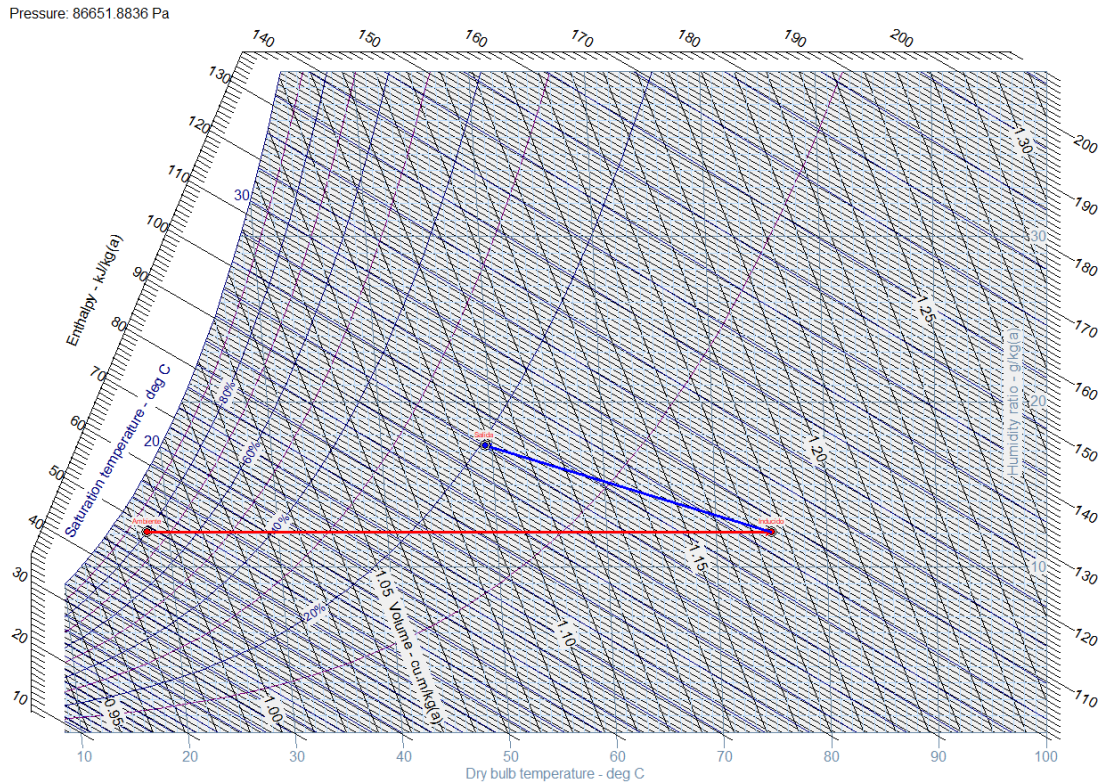
$$\dot{m}_{Seco}\omega_1 + \dot{m}_{Agua-Extraida} = \dot{m}_{Seco}\omega_2$$

$$\omega_2 = \frac{\dot{m}_{Seco}\omega_1 + \dot{m}_{Agua-Extraida}}{\dot{m}_{Seco}}$$

$$\omega_2 = \frac{\left(0.1139975 \frac{kg_{Seco}}{s}\right) \left(0.012127955 \frac{kg_{Agua}}{kg_{Seco}}\right) + \left(5.991575 \times 10^{-4} \frac{kg_{Agua}}{s}\right)}{\left(0.1139975 \frac{kg_{Seco}}{s}\right)} = 0.01738384 \frac{kg_{Agua}}{kg_{Seco}}$$

A partir de los datos obtenidos de las ecuaciones anteriores, se desarrolla el proceso de secado en la carta psicrométrica mediante el software CYTSoft Psychrometric Chart 2.2.

Ilustración 69. Proceso de psicrométrico de secado.



Fuente: Elaboración propia.

Propiedades de aire de salida:

- Temperatura bulbo seco: 49.39 °C.
- Temperatura bulbo húmedo: 27.05 °C.
- Humedad absoluta: 0.01738384 kg_{Agua}/kg_{Seco}.
- Densidad bulbo seco: 0.91068221 kg_{Seco}/m³.
- Entalpía: 94.753 kJ/kg_{Seco}.

4. Consumos de gas.

El consumo de gas se calcula mediante análisis de potencia, para el caso más conservador (temperatura máxima, 75 °C).

$$\dot{E}_{Entrada} = \dot{E}_{Salida}$$

$$\dot{m}_{Húmedo} h_1 + \dot{Q}_{Entrada} = \dot{m}_{Húmedo} h_2$$

$$\dot{Q}_{Entrada} = \dot{m}_{Seco} C_H (T_2 - T_1)$$

$$\dot{Q}_{Entrada} = \dot{V} \rho_{Seco} C_{Húmedo} (T_2 - T_1)$$

$$\dot{Q}_{Entrada} = \left(0.67017 \frac{m^3}{s}\right) \left(0.85052 \frac{kg_{Seco}}{m^3}\right) \left(1.027083 \frac{kJ}{kg_{Seco} \text{ } ^\circ C}\right) (75 \text{ } ^\circ C - 18 \text{ } ^\circ C) = 33.37 \text{ kW}$$

Considerando gas propano como combustible se obtiene:

- Tanque de 100 lb equivale a 22.50 gal.
- Valor calorífico neto: 11080 kcal/kg (12.8864 kWh/kg).

Ya que se requieren 33.37 kW (113,863.17 BTU/hrs), para determinar la cantidad de gas por utilizar se multiplica la potencia por el tiempo de secado (caso conservador).

$$33.37 \text{ kW} (23 \text{ hrs}) = 767.51 \text{ kWh}$$

Determinando el consumo de gas:

$$\frac{767.51 \text{ kWh}}{12.8864 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = 59.56 \text{ kg} (131.03 \text{ lb})$$

Aplicando un factor de seguridad de 1.25 (debido a efectos de combustión incompleta, pérdidas, etc.):

$$131.03 \text{ lb} (1.25) = 163.79 \text{ lb} \approx 165 \text{ lb}$$

E. Estructura de pruebas

Al culminarse la fase de manufactura e instalación del secador, se procedió a realizar las siguientes pruebas de operación, las cuales buscaron verificar los parámetros más importantes en el proceso de secado.

La primera prueba consistió en secar 5 quintales (w.b.) de cardamomo, los cuales se buscaron llegar a un contenido de humedad del 10%. Dentro de esta prueba se destacan las pruebas de flujo, las pruebas de temperatura y humedad de flujo inducido, así como la prueba de efectividad de secado.

Posterior a la primera prueba (cardamomo), se realizaron dos pruebas adicionales, las cuales contenían una cama de aprox. 40 mm de granos de café verde. Estas se realizaron con la finalidad de que las curvas de temperatura sobre cada bandeja fueran lo más similar posible y se mantuvieran dentro de un rango de temperaturas específico. En estas dos pruebas adicionales (prueba 2 y 3) el enfoque fue en determinar las curvas de temperatura y humedad del flujo inducido, obviando así la eficiencia de secado, ya que el objetivo de estas fue modificar las curvas de temperatura.

Las pruebas que se describen a continuación son las partes que constituyen a una prueba de secado completa, tal como la prueba 1 (cardamomo).

1. Prueba de flujo

Objetivo: Determinar flujo volumétrico de aire inducido en regiones de importancia para un proceso de secado uniforme.

Instrumentos de medición: Anemómetro – Extech Instruments CFM Thermo-Anemometer.

Proceso: Con el sistema de gas desactivado y la cámara de secado vacía y cerrada, se inició el sistema de ventilación. Con el fin de obtener la medida de flujo volumétrico, el flujómetro se colocó en las siguientes posiciones:

- Entrada a difusor.
- Al inicio de cada fila de bandejas (10 medidas).

2. Prueba de temperatura y humedad de flujo inducido.

Objetivo: Determinar la temperatura de bulbo seco y contenido de humedad base húmeda del aire inducido en regiones de importancia para un proceso de secado.

Instrumentos de medición: Bitácoras de datos (*Data Loggers*) – LogTag HAX0-8.

Proceso: El siguiente proceso se realizó a media capacidad del secador, es decir 5 quintales. Con todos los sistemas del secador desactivados, se cargó el secador con la cantidad de cardamomo requerida (5 quintales).

Posteriormente se colocaron los loggers en las siguientes posiciones, de las cuales se obtuvo la medida de temperatura de bulbo seco y contenido de humedad base húmeda del aire inducido a lo largo de la corrida:

- Entrada a difusor.
- En la mitad de cada bandeja, sobre los granos (20 puntos).
- Salida de ducto de recirculación.
- Ambiente (fuera del secador).

Al haberse colocado los loggers y cerrado la cámara de secado, se inició el sistema de potencia de flecha, el sistema de ventilación y el sistema de gas. De este último se modificó el flujo de inyección de gas a lo largo de la corrida. Así mismo, al ducto de recirculación se le modificó el ángulo de compuerta de redireccionamiento, con el fin de modificar el porcentaje de flujo por ser recirculado.

Al culminarse cada una de las corridas, se retiraron los loggers de sus posiciones, se descargaron sus datos a una computadora y con la misma se reconfiguraron para la siguiente prueba.

3. Prueba de efectividad de secado.

Objetivo: Determinar la efectividad del proceso de secado llevado a cabo por el secador.

Instrumentos de medición: Balanza digital.

Proceso: Se pesó el cardamomo por cargar, a partir del cual se calcula cuál es el peso de cardamomo seco por obtener si todo se secara hasta un contenido de humedad del 10% base húmeda. Posteriormente este se compara con el peso del cardamomo seco (contenido de humedad del 10 +/- 3% base húmeda). Con dichos datos se calcula el peso del cardamomo secado contra el peso que debería de haberse secado, y se obtiene el porcentaje de efectividad.

VII. RESULTADOS

A. Definición de requerimientos.

Los requerimientos que se establecieron para el presente módulo se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 25. Requerimientos de módulo de ventilación y calefacción para secador tecnificado.

No.	Requerimiento
1	El secador tendrá una capacidad máxima de 10 quintales de cardamomo húmedo.
2	El secador utilizará como fuente de potencia mecánica un motor de combustión interna y un ventilador.
3	El secador utilizará como fuente de energía térmica gas propano y los sistemas necesarios para su combustión e inyección al flujo de aire.
4	El secador debe ser funcional sin utilizar electricidad, por lo que debe evitarse el uso de tecnología sofisticada (sistemas de control, etc.).
5	El secador debe poseer elementos modulares, siendo los módulos principales: cámara de secado, ductos, ventilador, motor, sistema de gas; sin que estos superen a un tamaño transportable en pick-up.
6	El secador debe ser capaz de realizar el proceso de secado sin necesidad de operar a máxima capacidad.
7	El secador debe otorgar un cardamomo sin daños por tasa de secado excesiva.
8	El secador debe contar con sistema de recirculación parcial de flujo de aire.
9	El flujo de aire debe asegurar que no se genere condensado que dañe al cardamomo.

Fuente: Elaboración propia.

B. Selección de tipo de secador.

El tipo de secador se seleccionó con base en una matriz de decisión (ver Cuadro 11), a partir de la cual se obtiene el detalle del secador seleccionado y se muestra en el cuadro siguiente.

Cuadro 26. Calificación y ponderación de secador tipo gabinete en matriz de decisión.

Parámetro	Peso	Gabinete	
		Calificación	Ponderación
Uniformidad de secado.	30%	7	2.1
Impacto físico del grano.	30%	10	3
Modular.	20%	10	2
Tiempo de secado.	20%	6	1.2
Total.	100%		8.3

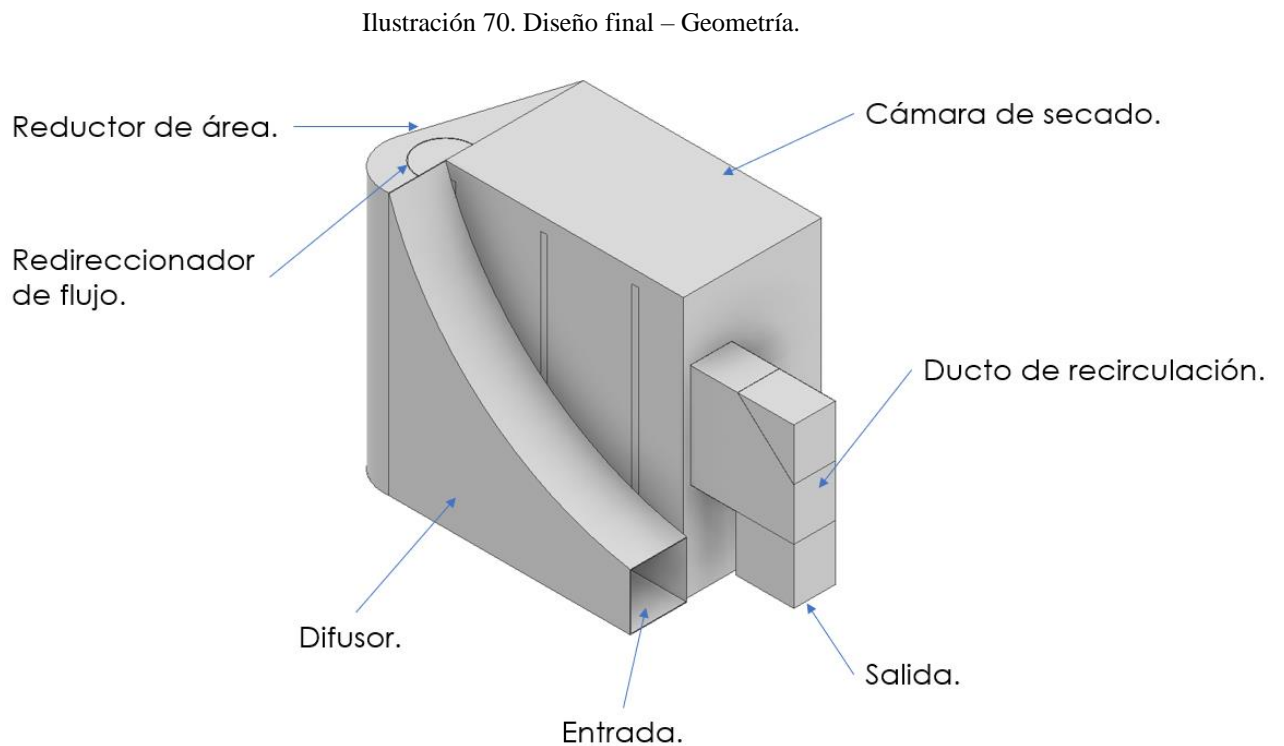
Fuente: Elaboración propia.

El secador con mayor puntuación de la matriz de decisión fue el tipo gabinete con 8.3 puntos de 10.

C. Diseño de geometría de ductos de ventilación de secador.

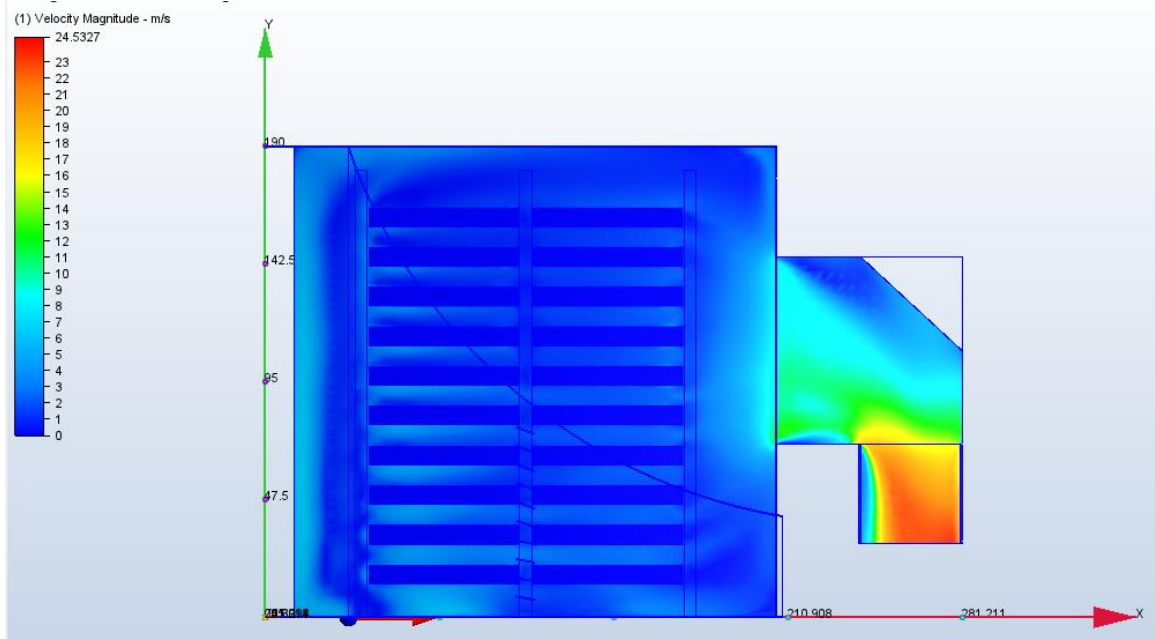
El diseño que se muestra en la Ilustración 70 fue el seleccionado por varios motivos, principalmente porque es aquel que provee la distribución más uniforme tanto en el eje vertical (Y), así como transversal a las bandejas (Z). Así también, este diseño permite un sistema de ductos compactos que permiten que la distribución del flujo sin necesidad de extender las dimensiones del secador de gran manera, por lo que no obstaculiza su transporte por pick-up.

Además, el ducto de extracción y recirculación es compacto y permite configurarse en diversos grados de recirculación y su acople al sistema de ventilación es simple. Otra ventaja de este modelo es que permite configurar, en cierto rango, la dirección del flujo tanto en el eje vertical por las ventilas en el difusor; así como en el eje transversal a las bandejas, por medio de redireccionador de flujo.



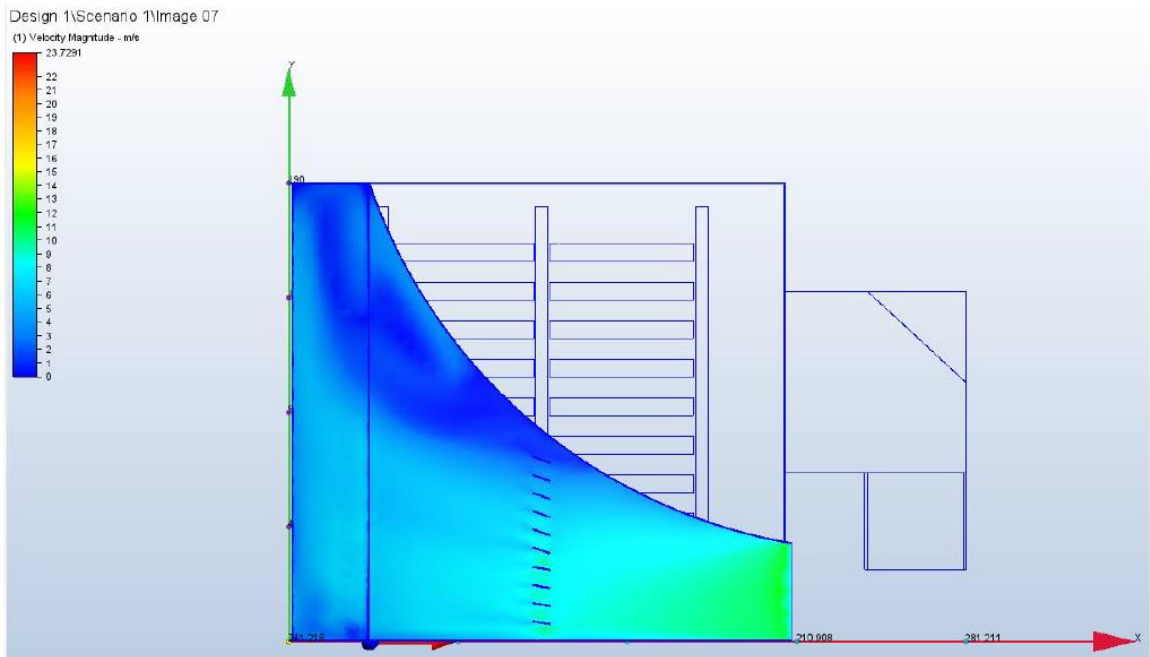
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 71. Diseño final – Plano XY de velocidad alineado a ducto de salida.



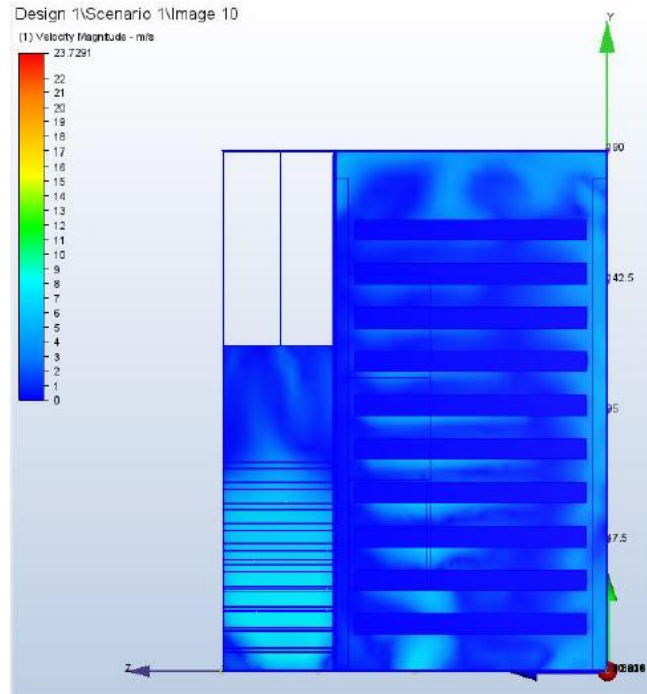
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 72. Diseño final – Plano XY de velocidad alineado a ducto de entrada.



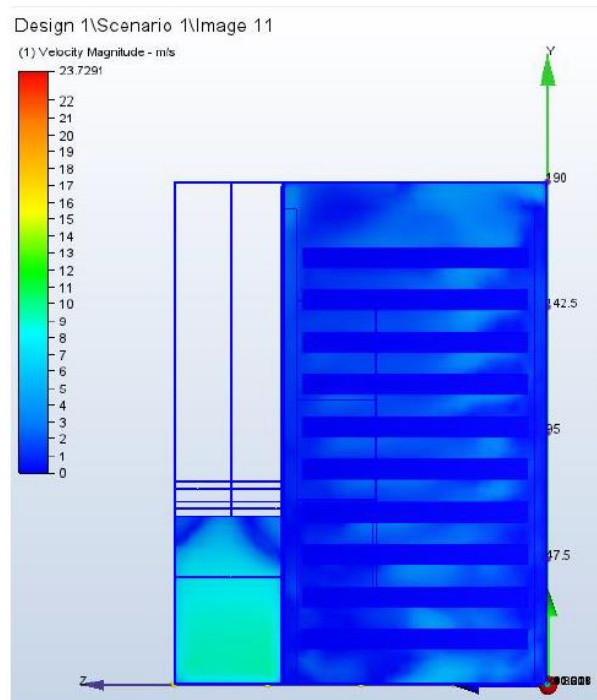
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 73. Diseño final – Plano YZ de velocidad alineado a mitad de columna 2 de bandejas.



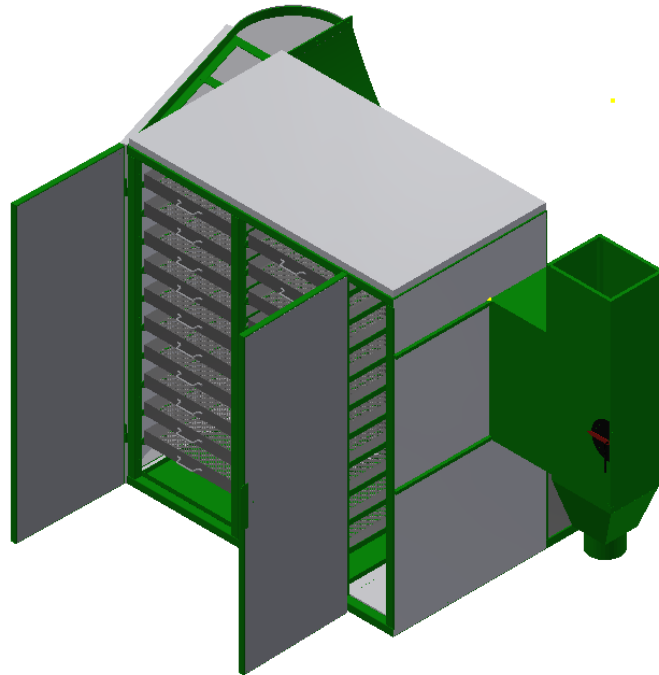
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 74. Diseño final – Plano YZ de velocidad alineado a mitad de columna 1 de bandejas.



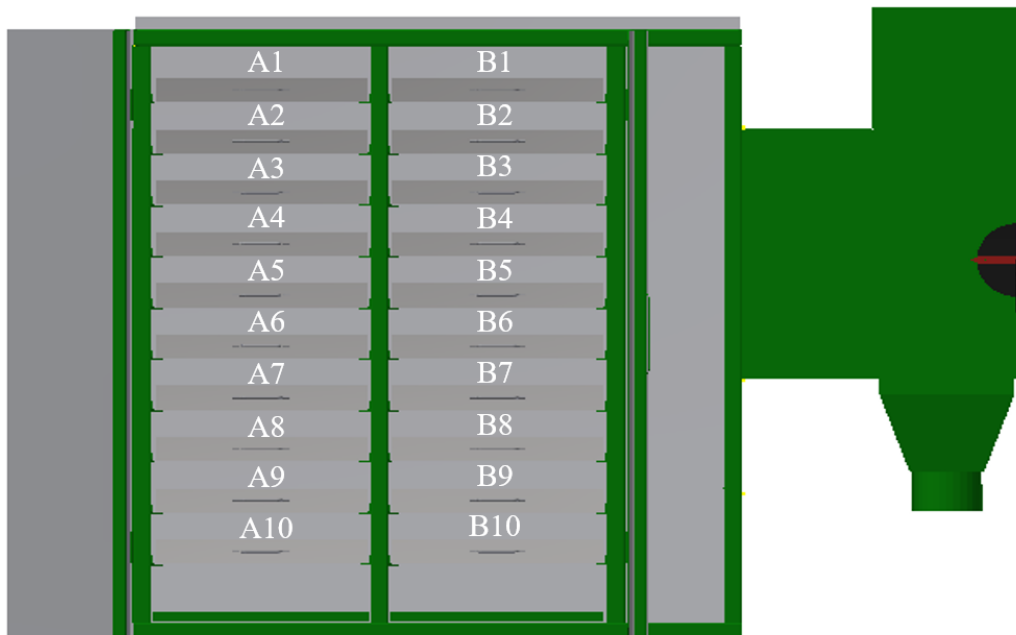
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 75. Diseño de construcción - Isométrico.



Fuente: Archila, 2019.

Ilustración 76. Diseño de construcción – Frontal y nomenclatura de bandejas.



Fuente: Archila, 2019.

D. Manufactura y acople de ductos de ventilación

En la Ilustración 77 se muestra la vista trasera del secador instalado en el sitio de pruebas. De esta cabe destacar la manufactura y acople del difusor al sistema de potencia y al reductor de área; así mismo, se denota el ducto de recirculación. En la Ilustración 78 se muestra la vista frontal del secador, donde se aprecian las bandejas y la cámara de secado.

Ilustración 77. Implementación de ductos a cámara de secado – Trasero.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 78. Implementación de ductos a cámara de secado – Interior.



Fuente: Elaboración propia.

E. Parámetros de ventilación y calefacción de flujo – Prueba 1.

Los cuadros Cuadro 27 al Cuadro 33 muestran los cálculos de estado del aire a la entrada y salida del proceso de secado. A partir de estos se definen que temperatura se espera en la salida del ducto de recirculación, si el flujo de entrada se encuentra a la temperatura establecida en la entrada. Dichos estados cubren el espectro de operación durante todo el proceso de secado.

Cuadro 27. Parámetros de flujo de salida con flujo de entrada a 50 °C d.b.

Parámetro	Entrada	Salida
Temperatura (d.b.) [°C]	50.00	40.77
Temperatura (w.b.) [°C]	23.99	22.865
Humedad relativa	0.1248	0.2333
Humedad absoluta [g _{H2O} / kg Seco]	11.32223041	13.21234206
Humedad absoluta [kg _{H2O} / kg Seco]	0.01132223	0.013212342
Densidad [kg _{Seco} /m ³]	0.91760496	0.94183146
Entalpía [kJ/kg _{Seco}]	79.68738804	75.06776616
Punto de rocío [°C]	13.46 °C	15.81 °C
Calor latente de evaporización @ T w.b. [kJ/kg]	2444.1	-
Tasa de remoción de agua [-dW/Mdt] [kg _{H2O} /kg _{Seco} s]	5.10909E-05	-

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 28. Parámetros de flujo de salida con flujo de entrada a 55 °C d.b.

Parámetro	Entrada	Salida
Temperatura (d.b.) [°C]	55.00	44.46
Temperatura (w.b.) [°C]	25.13	23.91
Humedad relativa	0.0978	0.1962
Humedad absoluta [g _{H2O} / kg Seco]	11.32223041	13.48029271
Humedad absoluta [kg _{H2O} / kg Seco]	0.01132223	0.013480293
Densidad [kg _{Seco} /m ³]	0.90360073	0.93048721
Entalpía [kJ/kg _{Seco}]	84.82964166	79.56094835
Punto de rocío [°C]	13.46	16.11
Calor latente de evaporización @ T w.b. [kJ/kg]	2441.4	-
Tasa de remoción de agua [-dW/Mdt] [kg _{H2O} /kg _{Seco} s]	5.74435E-05	-

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 29. Parámetros de flujo de salida con flujo de entrada a 60 °C d.b.

Parámetro	Entrada	Salida
Temperatura (d.b.) [°C]	60.00	48.08
Temperatura (w.b.) [°C]	26.22	24.90
Humedad relativa	0.077266	0.1664
Humedad absoluta [g _{H2O} / kg Seco]	11.32223041	13.7620053
Humedad absoluta [kg _{H2O} / kg Seco]	0.01132223	0.013762005
Densidad [kg _{Seco} /m ³]	0.90000883	0.91956934
Entalpía [kJ/kg _{Seco}]	89.977699	84.02757601
Punto de rocío [°C]	13.46	16.43
Calor latente de evaporización @ T w.b. [kJ/kg]	2438.8	-
Tasa de remoción de agua [-dW/Mdt] [kg _{H2O} /kg _{Seco} s]	0.000064684	-

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 30. Parámetros de flujo de salida con flujo de entrada a 65 °C d.b.

Parámetro	Entrada	Salida
Temperatura (d.b.) [°C]	65.00	51.40
Temperatura (w.b.) [°C]	27.26	25.82
Humedad relativa	0.0615	0.1445
Humedad absoluta [g _{H2O} / kg Seco]	11.32223041	14.10672807
Humedad absoluta [kg _{H2O} / kg Seco]	0.01132223	0.014106728
Densidad [kg _{Seco} /m ³]	0.87682586	0.90967199
Entalpía [kJ/kg _{Seco}]	95.12715727	88.34328563
Punto de rocío [°C]	13.46	16.81
Calor latente de evaporización @ T w.b. [kJ/kg]	2436.3	-
Tasa de remoción de agua [-dW/Mdt] [kg _{H2O} /kg _{Seco} s]	7.19218E-05	-

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 31. Parámetros de flujo de salida con flujo de entrada a 70 °C d.b.

Parámetro	Entrada	Salida
Temperatura (d.b.) [°C]	70.00	54.80
Temperatura (w.b.) [°C]	28.26	26.71
Humedad relativa	0.0494	0.1253
Humedad absoluta [g _{H2O} / kg Seco]	11.32223041	14.43207699
Humedad absoluta [kg _{H2O} / kg Seco]	0.01132223	0.014432077
Densidad [kg _{Seco} /m ³]	0.86402633	0.89975512
Entalpía [kJ/kg _{Seco}]	100.27816	92.70879344
Punto de rocío [°C]	13.46	17.16
Calor latente de evaporización @ T w.b. [kJ/kg]	2434	-
Tasa de remoción de agua [-dW/Mdt] [kg _{H2O} /kg _{Seco} s]	7.91528E-05	-

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 32. Parámetros de flujo de salida con flujo de entrada a 75 °C d.b.

Parámetro	Entrada	Salida
Temperatura (d.b.) [°C]	75.00	58.16
Temperatura (w.b.) [°C]	29.22	27.57
Humedad relativa	0.0399	0.1092
Humedad absoluta [g_{H_2O} / kg Seco]	11.32223041	14.76535775
Humedad absoluta [kg_{H_2O} / kg Seco]	0.01132223	0.014765358
Densidad [kg_{Seco}/m^3]	0.85159603	0.89014261
Entalpía [kJ/kg $_{Seco}$]	105.4308483	97.05819552
Punto de rocío [°C]	13.46	17.52
Calor latente de evaporización @ T w.b. [kJ/kg]	2431.7	-
Tasa de remoción de agua [-dW/Mdt] [kg_{H_2O}/kg_{Seco} s]	8.63748E-05	-

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 33. Parámetros de flujo de salida con flujo de entrada a 80 °C d.b.

Parámetro	Entrada	Salida
Temperatura (d.b.) [°C]	80.00	61.49
Temperatura (w.b.) [°C]	30.14	28.39
Humedad relativa	0.0325	0.0957
Humedad absoluta [g_{H_2O} / kg Seco]	11.32223041	15.10607768
Humedad absoluta [kg_{H_2O} / kg Seco]	0.01132223	0.015106078
Densidad [kg_{Seco}/m^3]	0.83951914	0.88081454
Entalpía [kJ/kg $_{Seco}$]	110.5853581	101.3925012
Punto de rocío [°C]	13.46	17.87
Calor latente de evaporización @ T w.b. [kJ/kg]	2429.5	-
Tasa de remoción de agua [-dW/Mdt] [kg_{H_2O}/kg_{Seco} s]	9.3576E-05	-

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 34 se muestran los valores de temperatura de entrada utilizados con mayor frecuencia durante el proceso de secado, así como la temperatura de salida teórica y experimental.

Cuadro 34. Parámetro de flujo de salida teórico y experimental.

Parámetro	Temperatura de salida teórica [°C]	Temperatura de salida experimental [°C]
Entrada a 55 °C d.b.	44.46	40
Entrada a 65 °C d.b.	51.40	54
Entrada a 70 °C d.b.	54.80	52

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que la velocidad obtenida en las pruebas de secado con carga indicó magnitudes menores a las esperadas, se recalcularon los tiempos de secado para dicha velocidad como función de temperatura en el rango utilizados durante la prueba, las cuales se muestran en el Cuadro 35.

Cuadro 35. Tiempos de secado según temperatura de flujo inducido a 1.25 m/s y carga de 5 quintales.

Temperatura de bulbo seco de flujo [°C]	Tiempo de secado [hrs]
50	27.98
55	24.45
60	21.72
65	19.53
70	17.75
75	16.26
80	15.01

Fuente: Elaboración propia.

F. Pruebas de velocidad – Prueba 1.

En el Cuadro 36 se muestra la magnitud de velocidad esperada sobre las bandejas, así como aquellas obtenidas durante la prueba de secado, las cuales denotan ser mucho menores, aspecto que tiene gran influencia en el tiempo de secado.

Cuadro 36. Velocidad de flujo.

Posición	Teórico [m/s]	Experimental [m/s]
Entrada a difusor.	12.14	9.05
Inicio de fila 1.	2.01	1.23
Inicio de fila 2.	2.21	1.51
Inicio de fila 3.	2.54	1.49
Inicio de fila 4.	2.43	1.53
Inicio de fila 5.	2.61	1.47
Inicio de fila 6.	2.74	1.49
Inicio de fila 7.	2.59	1.79
Inicio de fila 8.	2.47	1.78
Inicio de fila 9.	2.19	1.56
Inicio de fila 10.	2.34	1.39

Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 79 se denota la velocidad de flujo en el perímetro de la salida del ventilador, así como la velocidad en el centro de esta, aspectos que definen el flujo volumétrico obtenido y probablemente la distribución de flujo en el difusor.

Ilustración 79. Velocidad de flujo a salida de ventilador, perímetro (izquierda), centro (derecha).

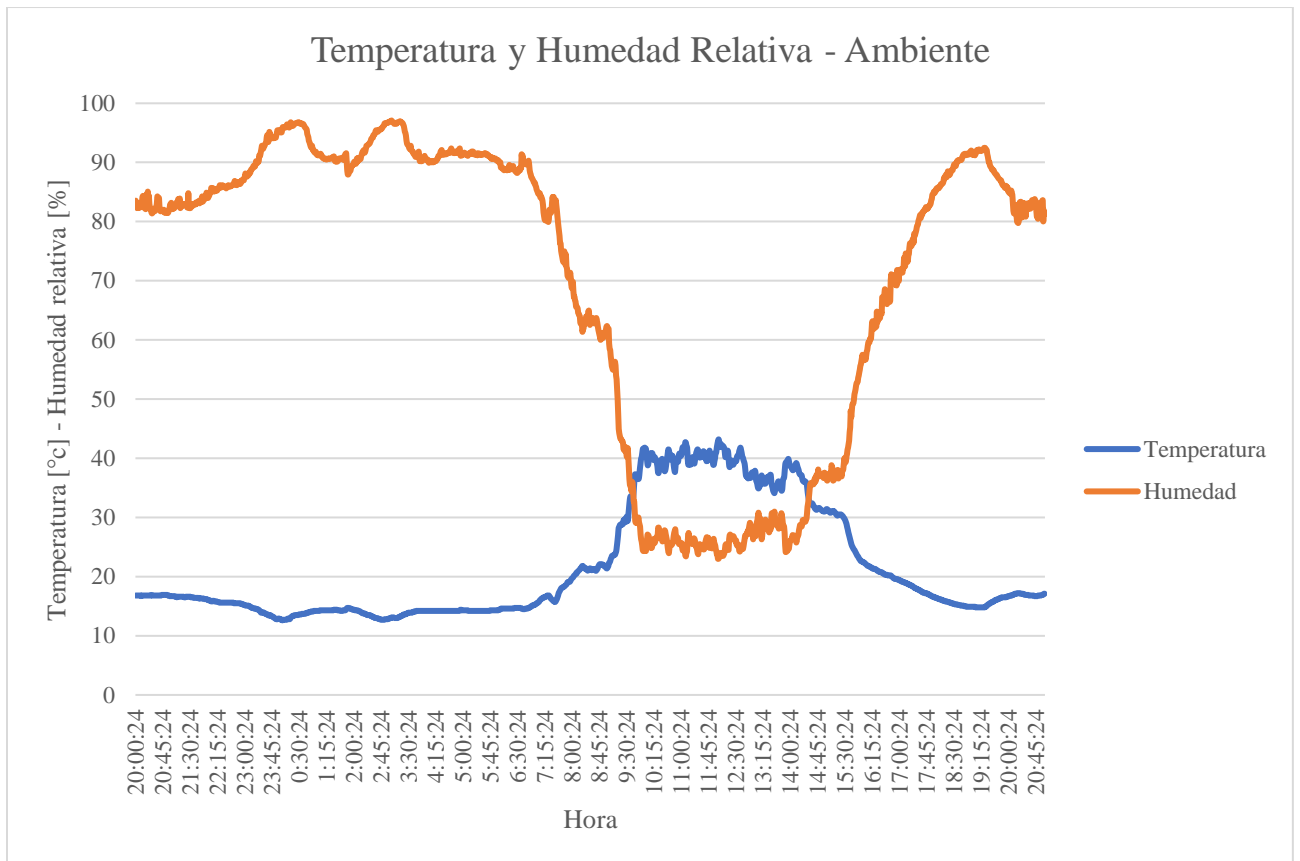


Fuente: Elaboración propia.

G. Prueba de temperatura y humedad de aire inducido – Prueba 1.

En la Ilustración 80 se muestra el comportamiento de la temperatura y humedad del ambiente en donde se realizaron las pruebas, lo cual define la cantidad de energía por agregar, humedad absoluta del aire y proceso psicrométrico durante el secado.

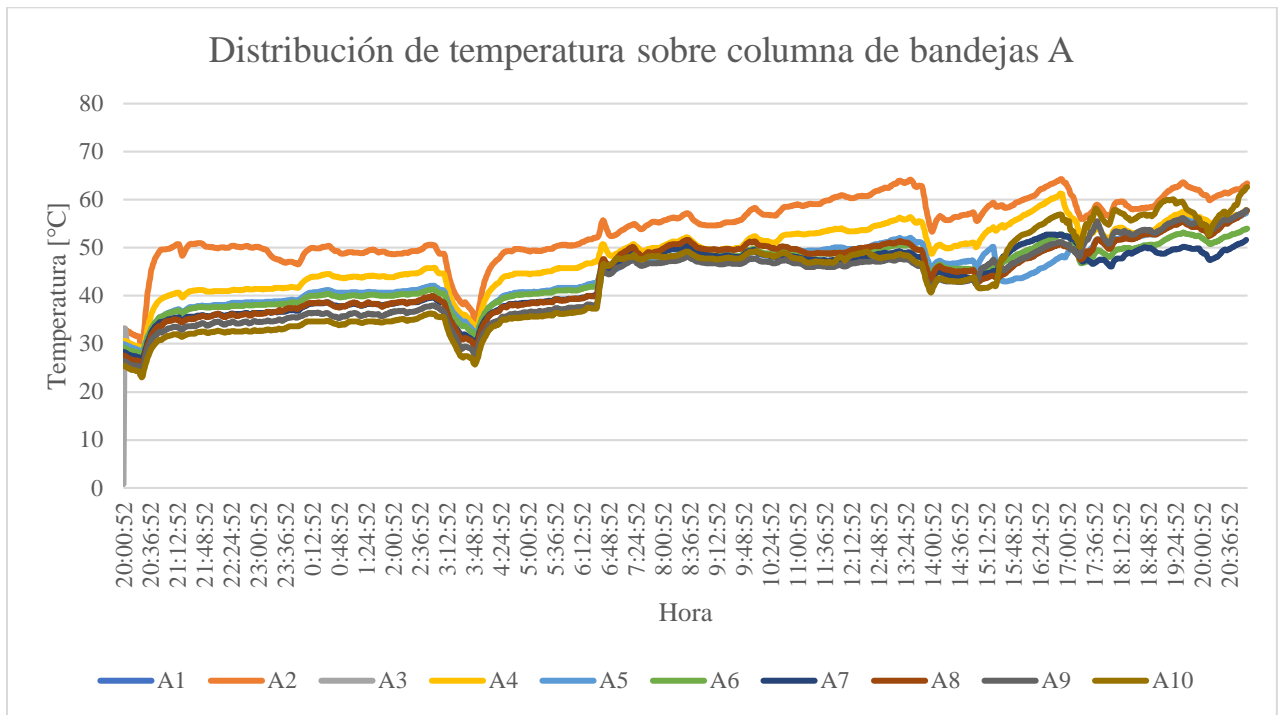
Ilustración 80. Temperatura y humedad relativa – Ambiente (Prueba 1).



Fuente: Elaboración propia.

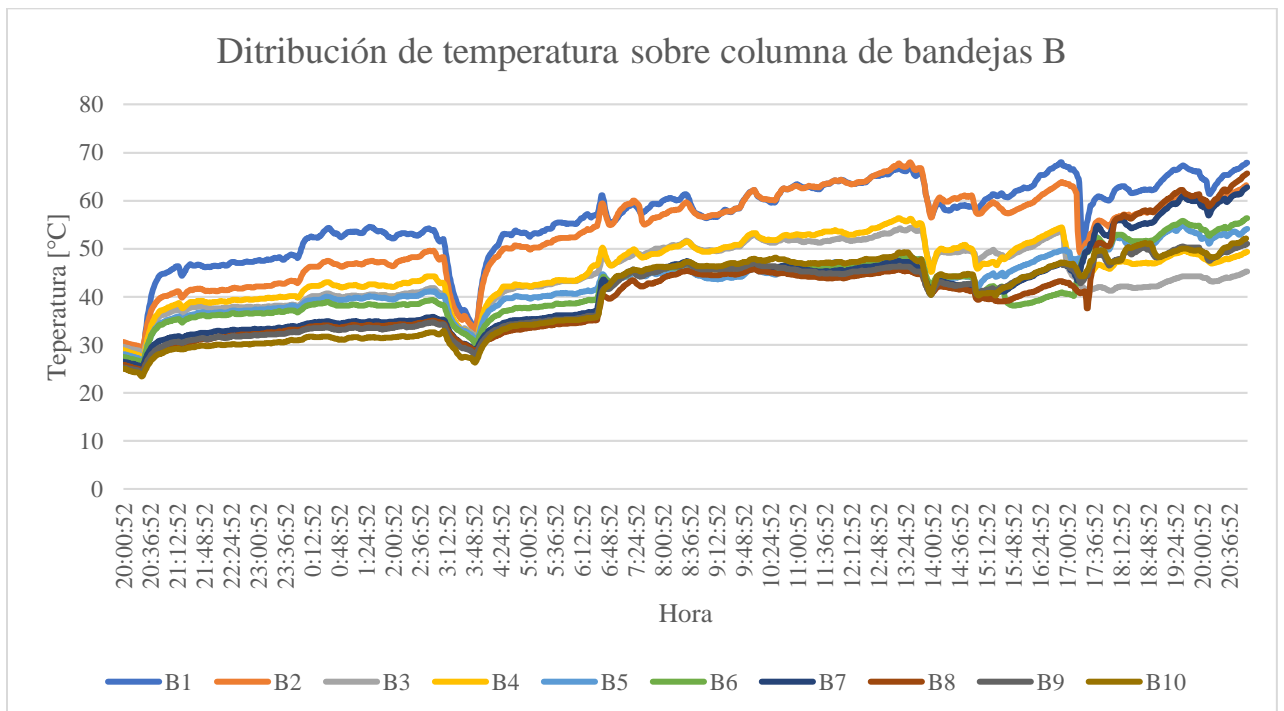
En la Ilustración 81 e Ilustración 82 se muestra la distribución de temperaturas a través de la prueba sobre las bandejas A y B respectivamente, con el fin de verificar el proceso psicrométrico y su relación a la temperatura.

Ilustración 81. Distribución de temperatura sobre columna de bandejas A a lo largo del tiempo (Prueba 1).



Fuente: Elaboración propia.

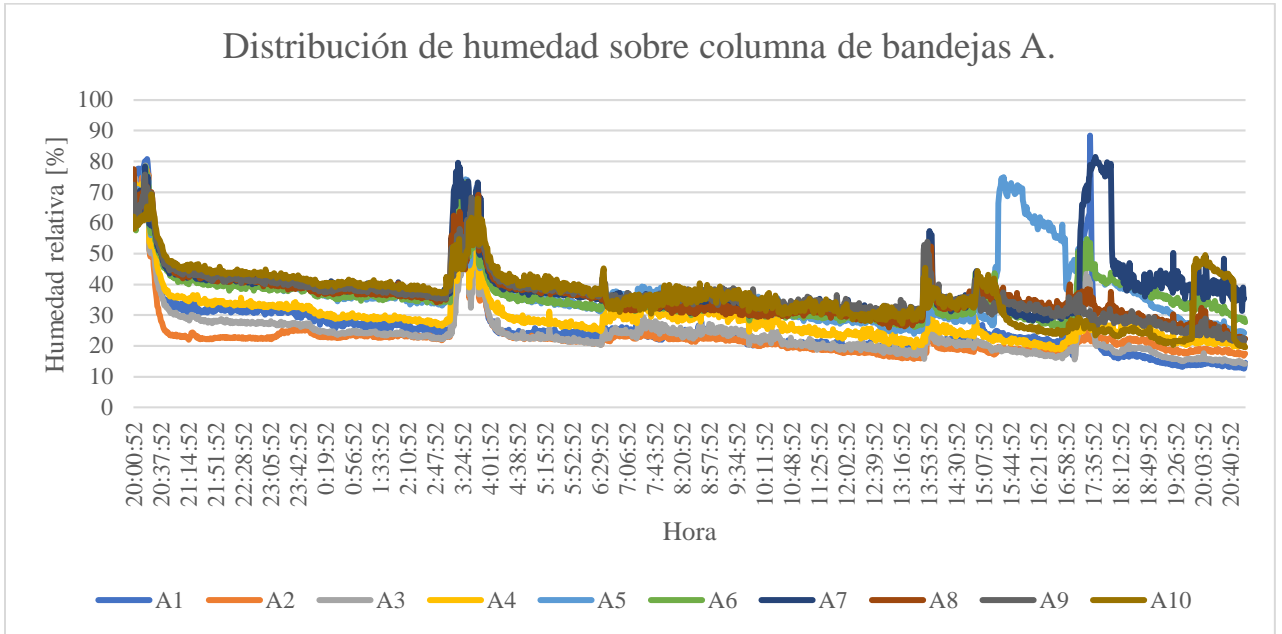
Ilustración 82. Distribución de temperatura sobre columna de bandejas B a lo largo del tiempo (Prueba 1).



Fuente: Elaboración propia.

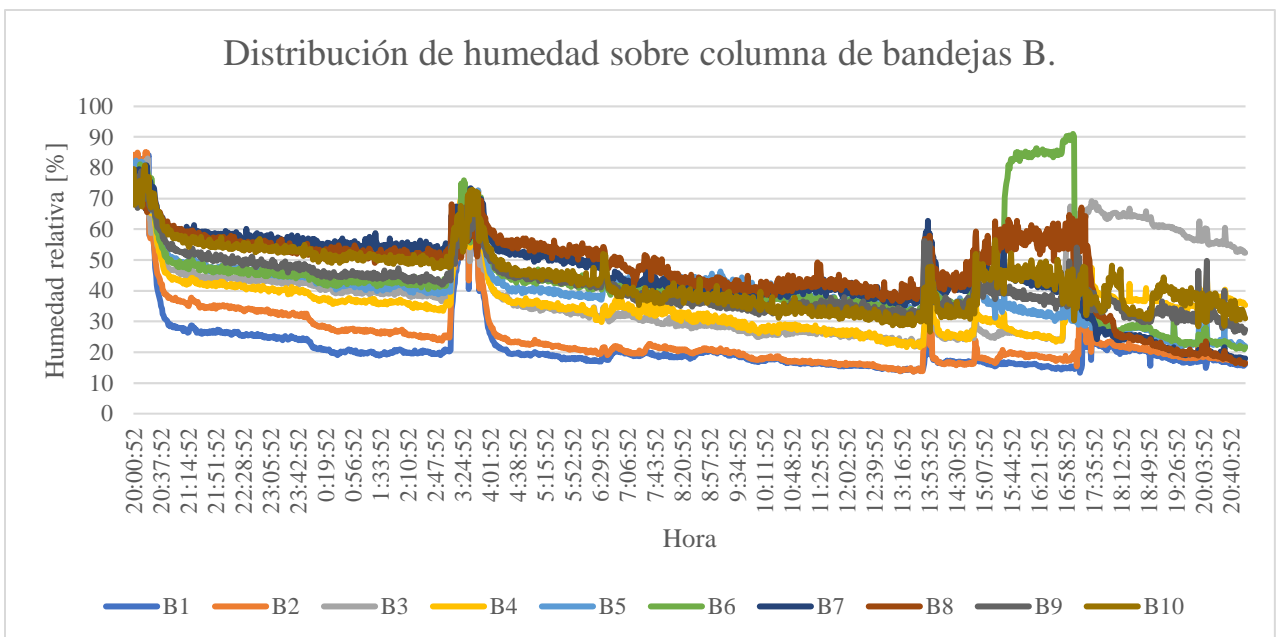
En la Ilustración 83 e Ilustración 84 se muestra la distribución de humedad a través de la prueba sobre las bandejas A y B respectivamente, con el fin de verificar el proceso psicrométrico y su relación a la humedad.

Ilustración 83. Distribución de humedad sobre columna de bandejas A a lo largo del tiempo (Prueba 1).



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 84. Distribución de humedad sobre columna de bandejas B a lo largo del tiempo (Prueba 1).



Fuente: Elaboración propia.

H. Prueba de humedad de grano – Prueba 1.

En el Cuadro 37 se muestran los valores del peso de cardamomo ingresado, el cardamomo seco esperado y el cardamomo seco obtenido; a partir de estos datos se calcula la efectividad del secador.

Cuadro 37. Contenido de humedad base húmeda de grano.

Parámetro	Valor [lb]	Valor [kg]
Peso de Cardamomo Húmedo	471.4	214.27
Peso de Cardamomo a 10% de humedad w.b. (teórico)	103.36	46.98
Peso de Cardamomo a 10% de humedad w.b. (experimental)	67.0	30.45
Efectividad [%]	64.82	

Fuente: Elaboración propia.

I. Secado de 5 quintales de cardamomo – Prueba 1.

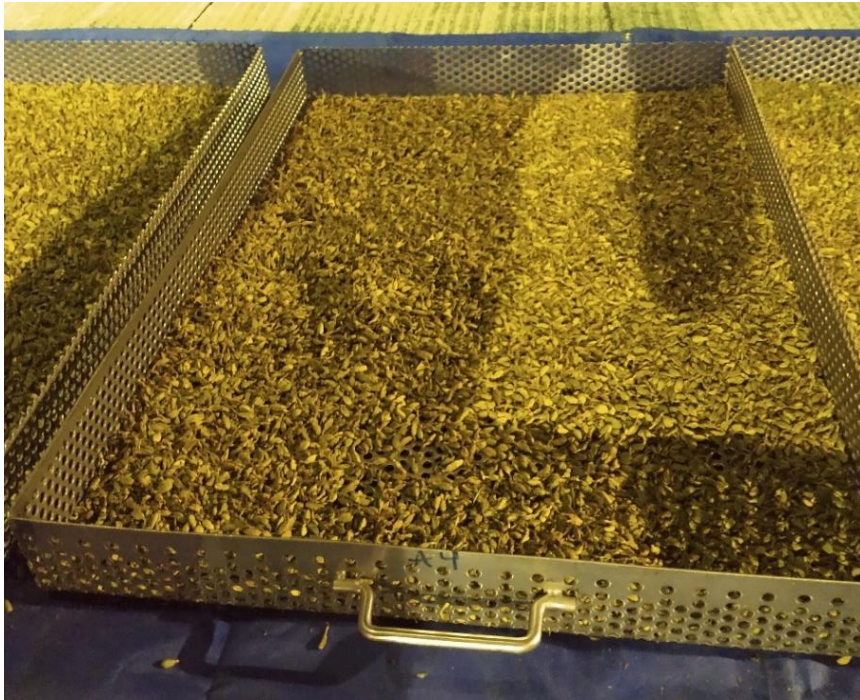
En la Ilustración 85, Ilustración 86 e Ilustración 87 se muestran imágenes del cardamomo al ingresar y al finalizar el proceso de secado. Mediante estas se hace evidente la reducción de volumen de este, así como de su peso. Además, la inspección visual permite evaluar si se presentaron tasas de secado agresivo o condensado que dañara el grano.

Ilustración 85. Inicio de secado.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 86. Final de secado.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 87. Final de secado – Ampliación.

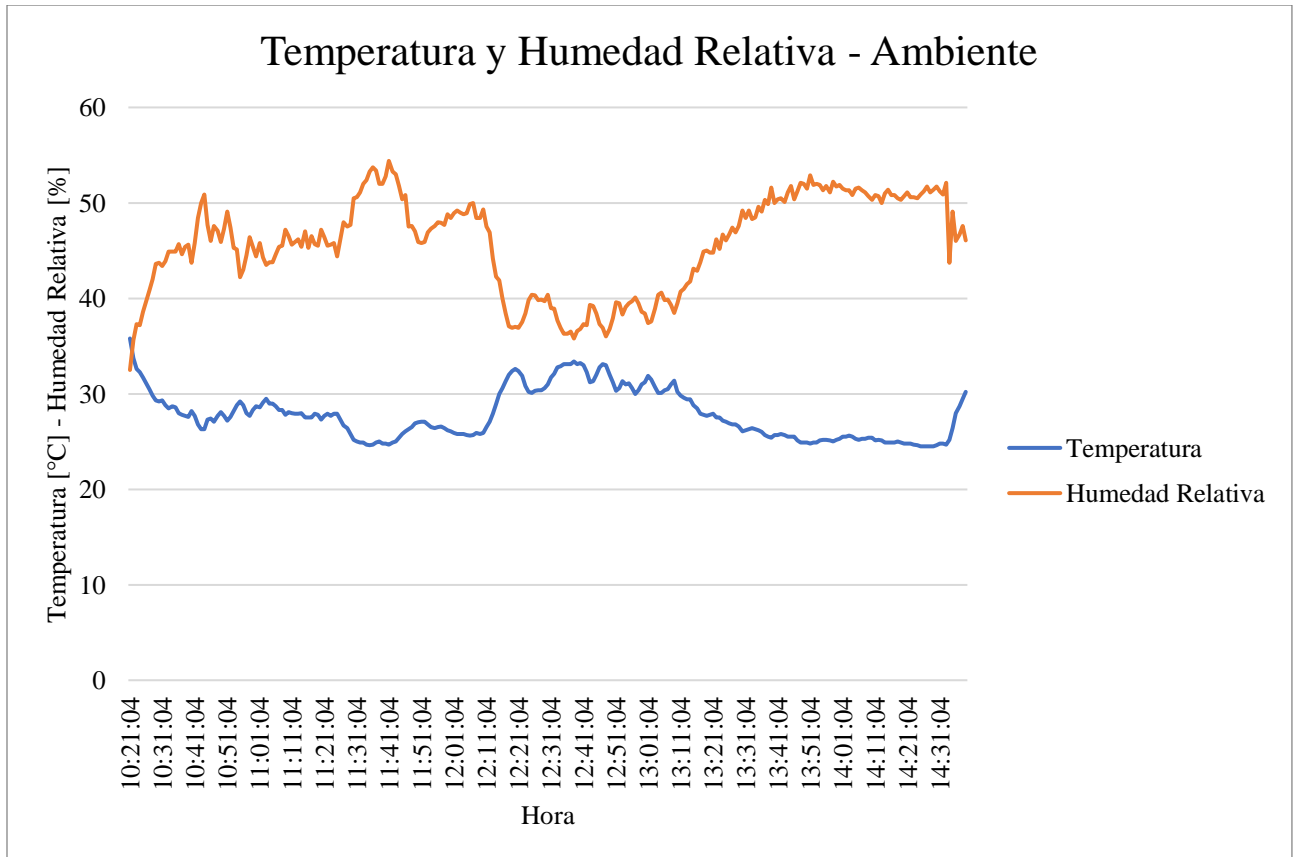


Fuente: Elaboración propia.

J. Prueba de temperatura y humedad de aire inducido – Prueba 2.

En la Ilustración 88 se muestra el comportamiento de la temperatura y humedad del ambiente durante la realización de la prueba 2 (café).

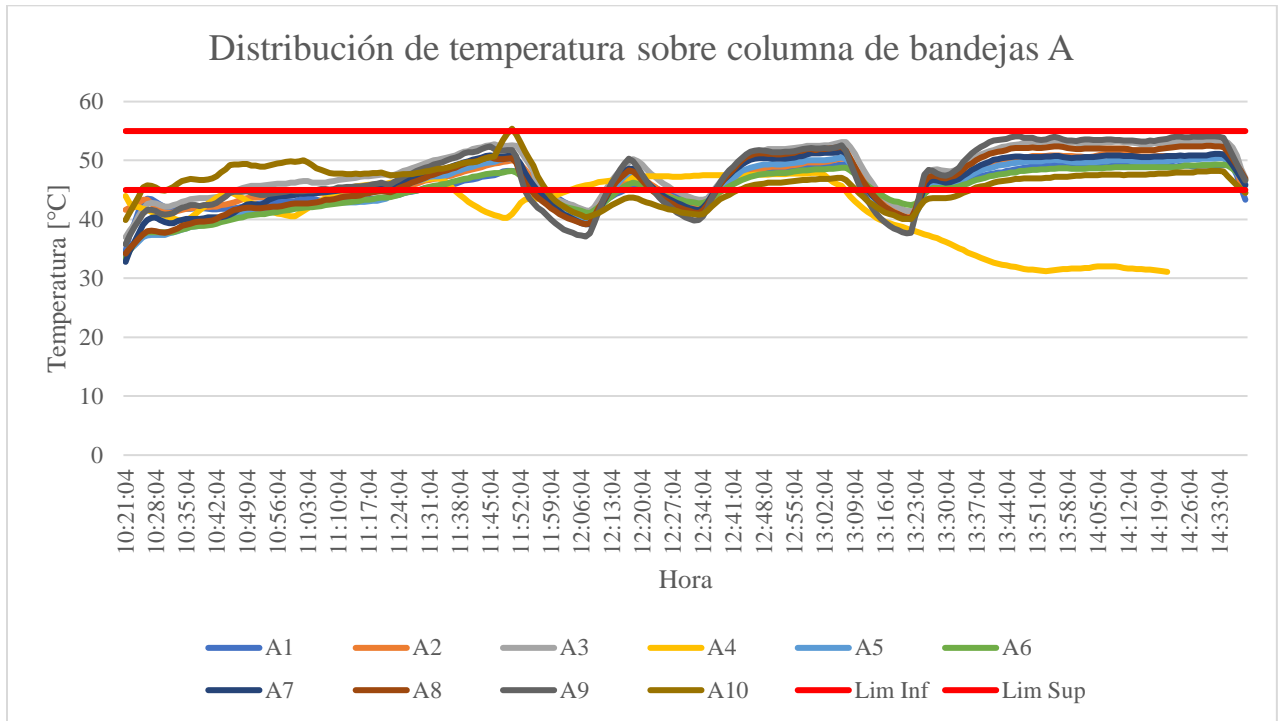
Ilustración 88. Temperatura y humedad relativa – Ambiente (Prueba 2).



Fuente: Elaboración propia.

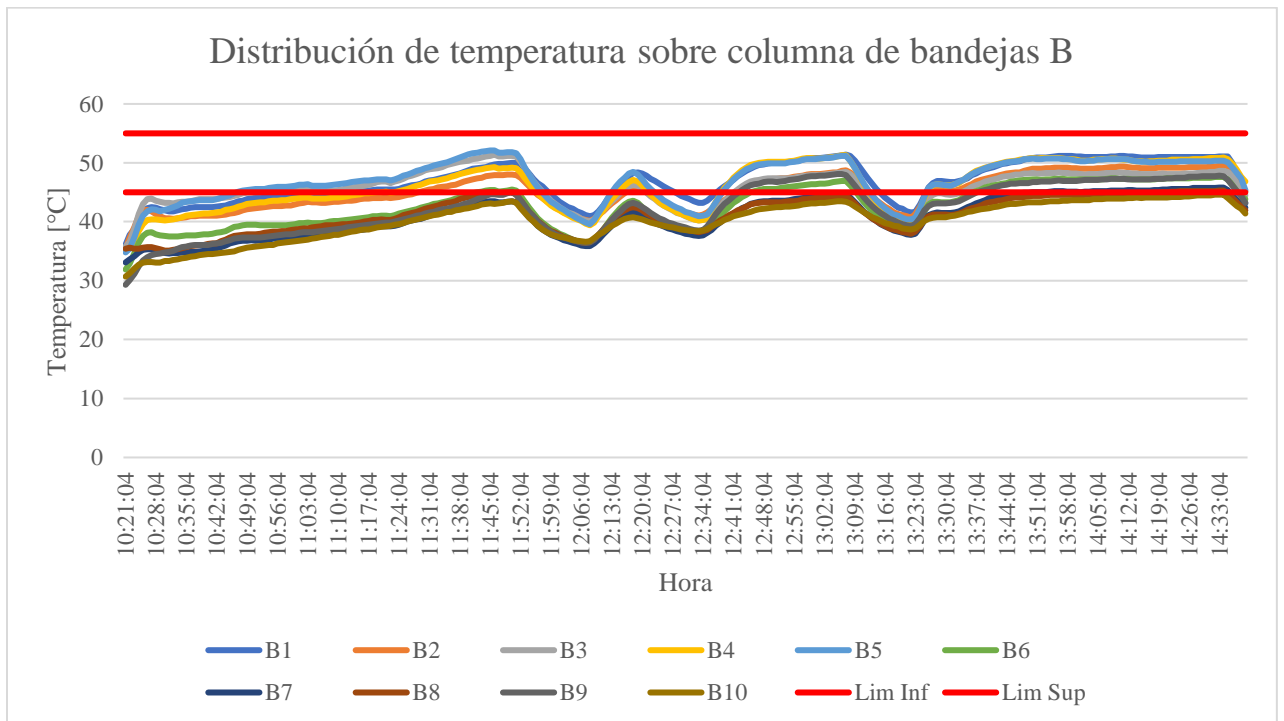
En la Ilustración 89 e Ilustración 90 se muestra la distribución de temperaturas a través de la prueba sobre las bandejas A y B respectivamente, durante la realización de la prueba 2 (café). En estas se muestran diversos comportamientos debido a que se realizaron calibraciones de ventilas durante la toma de datos.

Ilustración 89. Distribución de temperatura sobre columna de bandejas A a lo largo del tiempo (Prueba 2).



Fuente: Elaboración propia.

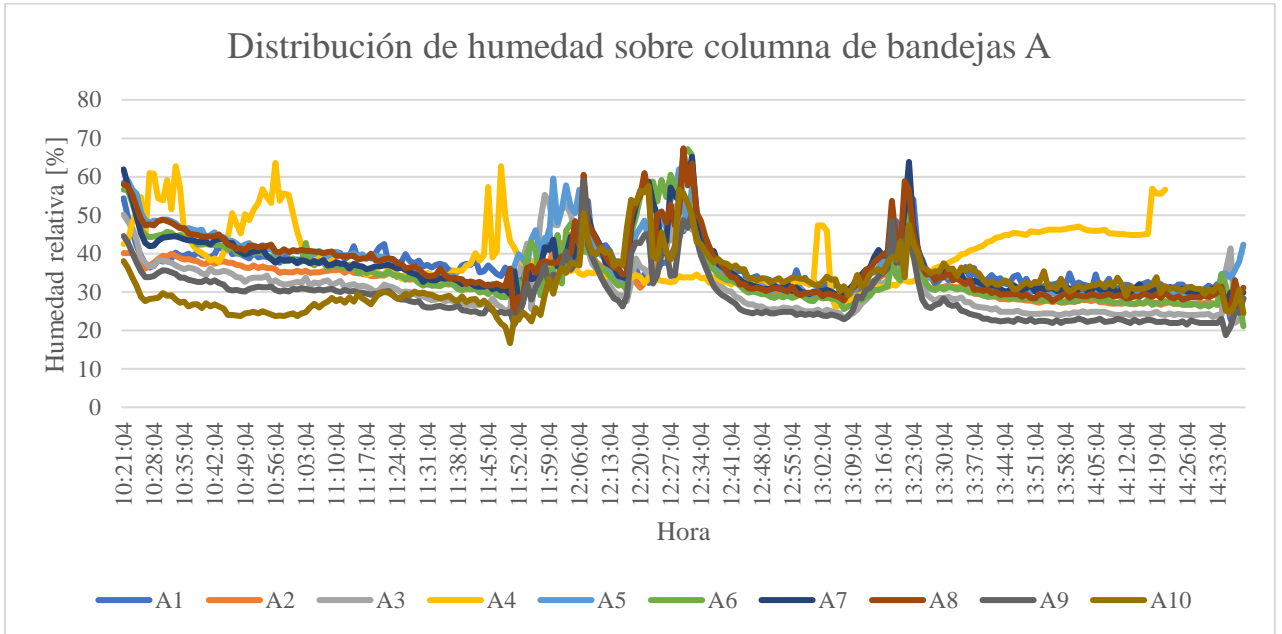
Ilustración 90. Distribución de temperatura sobre columna de bandejas B a lo largo del tiempo (Prueba 2).



Fuente: Elaboración propia.

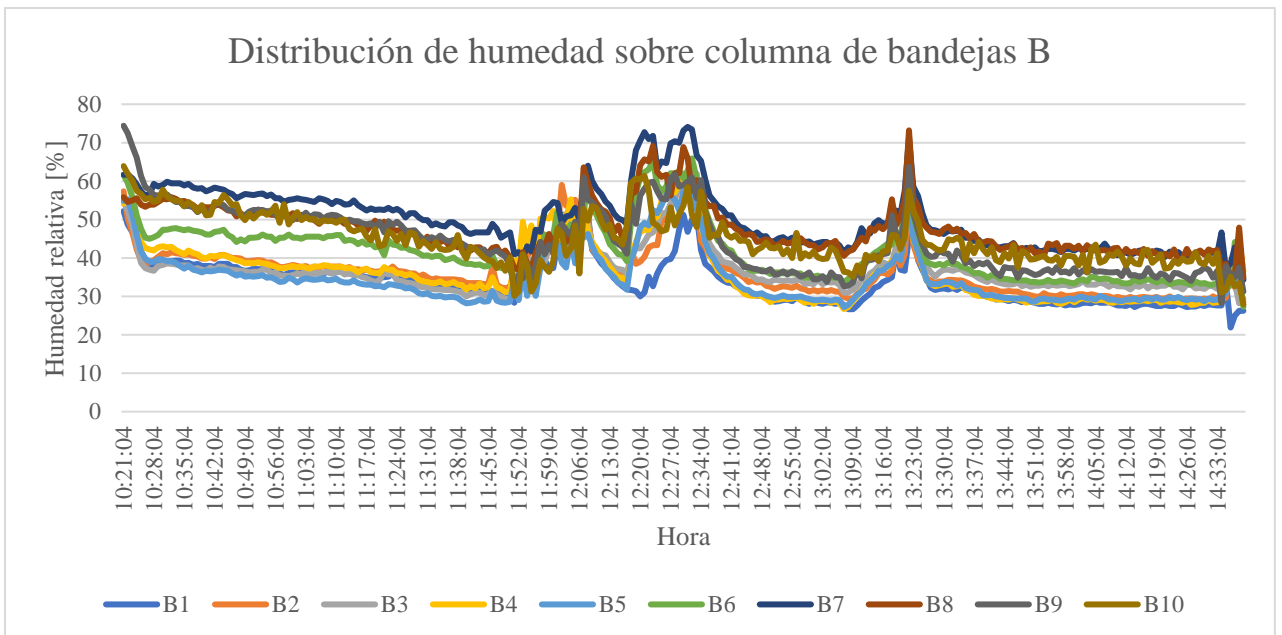
En la Ilustración 91 e Ilustración 92 se muestra la distribución de humedad relativa del aire inducido a través de la prueba sobre las bandejas A y B respectivamente, durante la realización de la prueba 2 (café). En estas se muestran diversos comportamientos debido a calibraciones de ventilas durante la toma de datos.

Ilustración 91. Distribución de humedad sobre columna de bandejas A a lo largo del tiempo (Prueba 2).



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 92. Distribución de humedad sobre columna de bandejas B a lo largo del tiempo (Prueba 2).

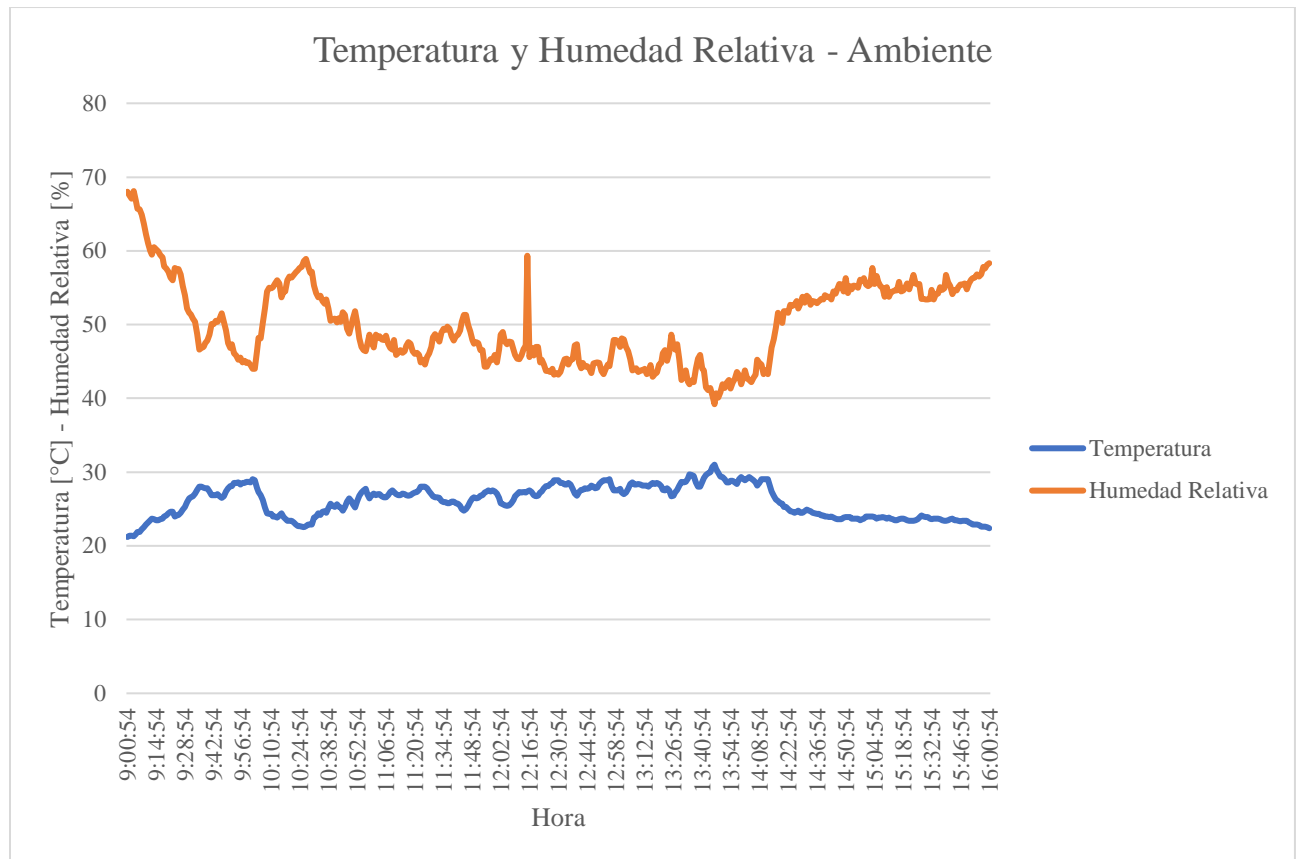


Fuente: Elaboración propia.

K. Prueba de temperatura y humedad de aire inducido – Prueba 3.

En la Ilustración 93 se muestra el comportamiento de la temperatura y humedad del ambiente durante la realización de la prueba 3 (café).

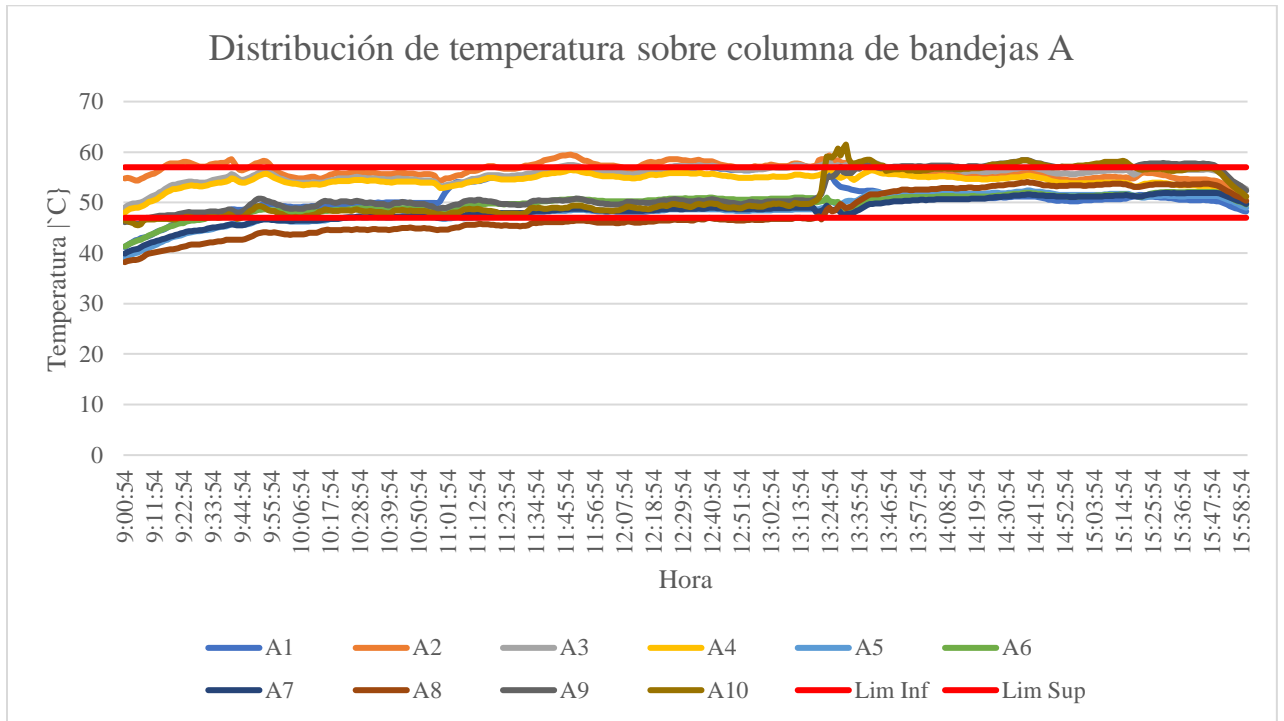
Ilustración 93. Temperatura y humedad relativa – Ambiente (Prueba 3).



Fuente: Elaboración propia.

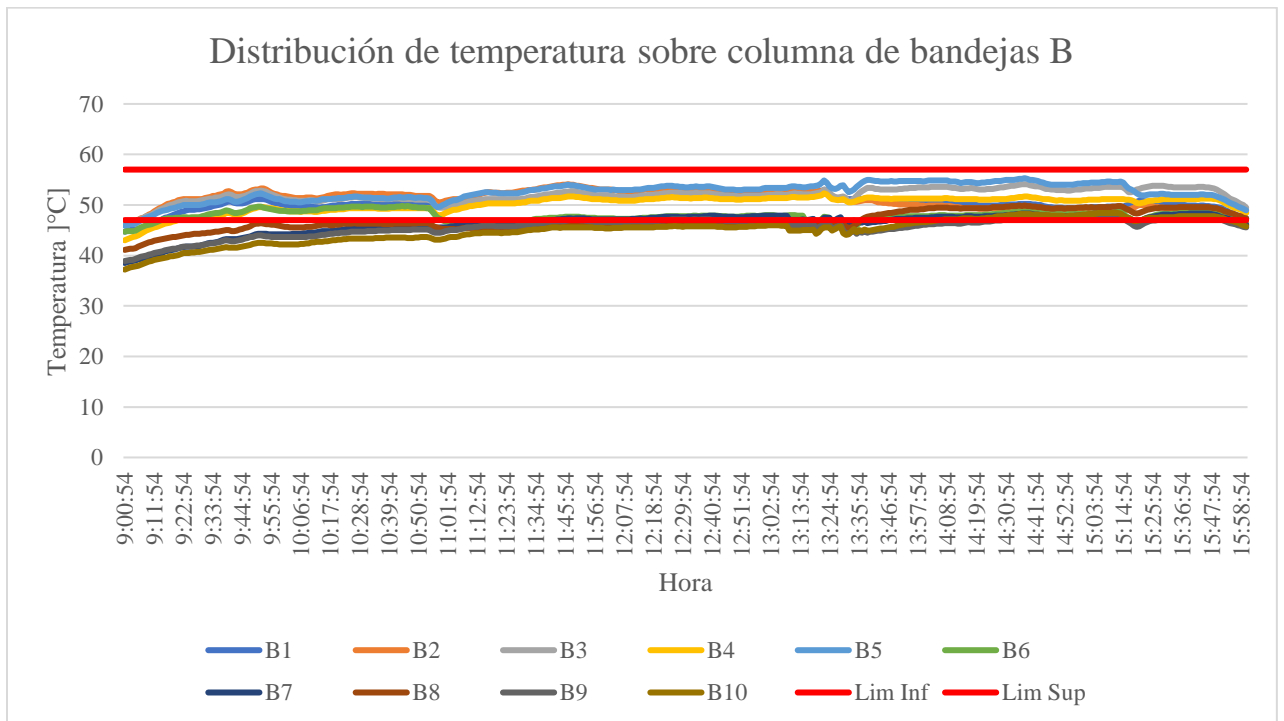
En la Ilustración 94 e Ilustración 95 se muestra la distribución de temperaturas a través de la prueba sobre las bandejas A y B respectivamente, durante la realización de la prueba 3 (café).

Ilustración 94. Distribución de temperatura sobre columna de bandejas A a lo largo del tiempo (Prueba 3).



Fuente: Elaboración propia.

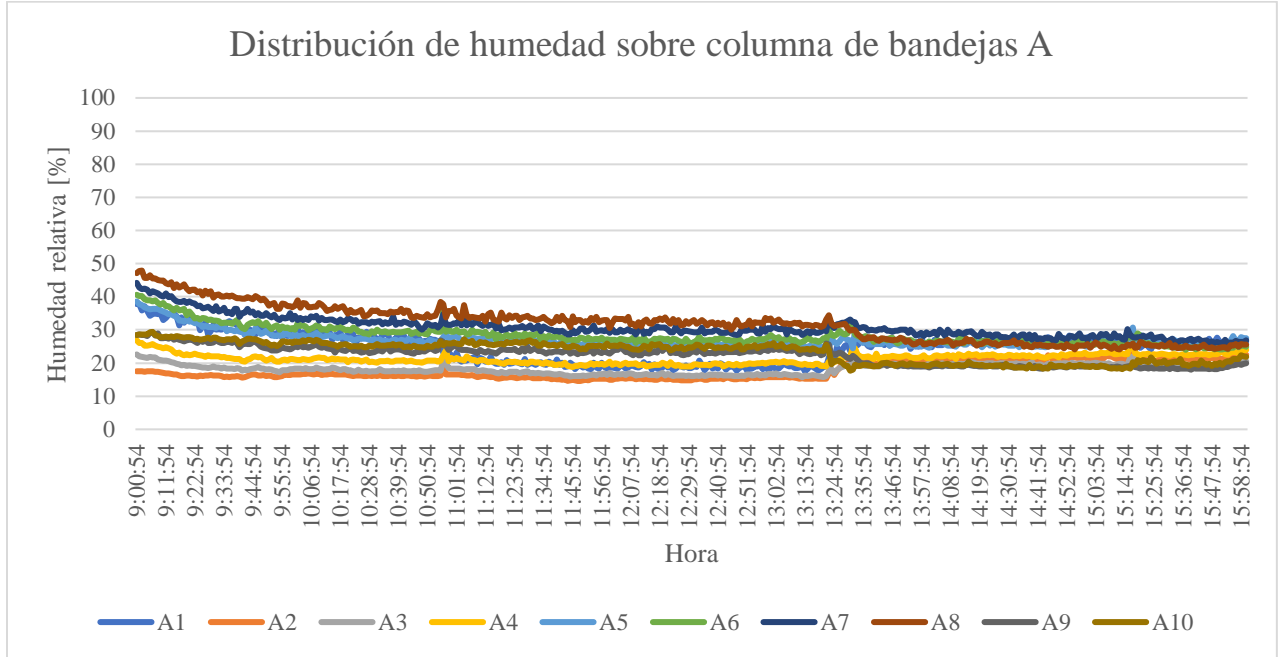
Ilustración 95. Distribución de temperatura sobre columna de bandejas B a lo largo del tiempo (Prueba 3).



Fuente: Elaboración propia.

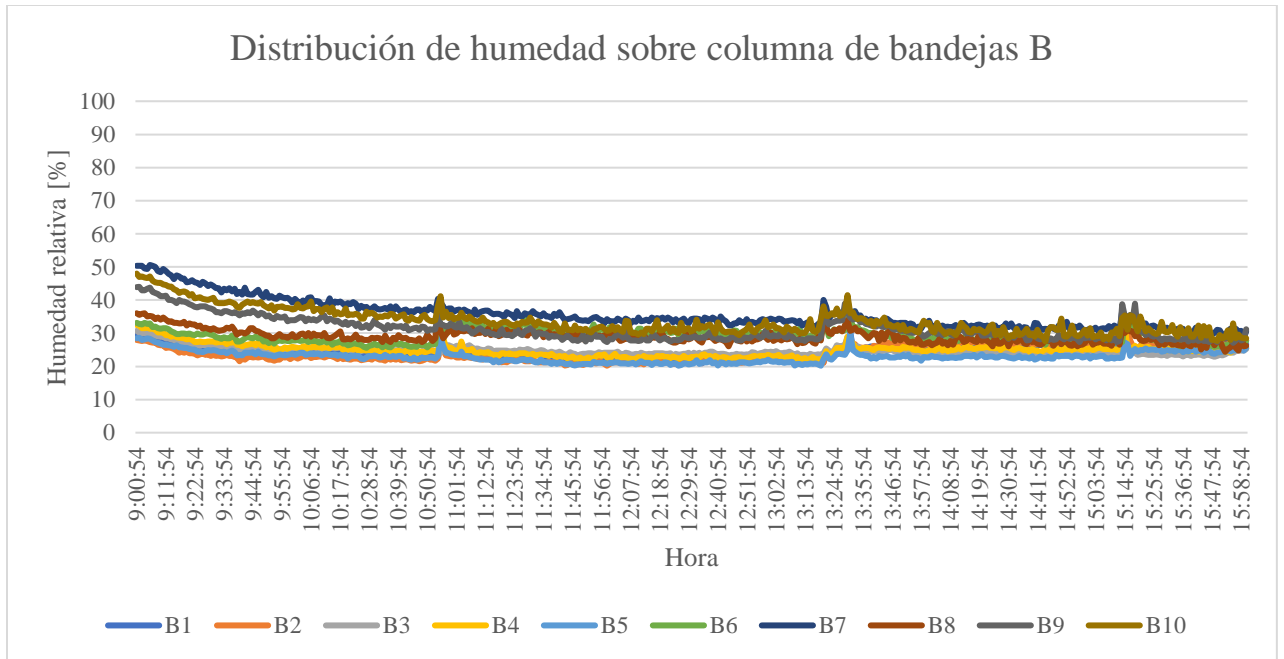
En la Ilustración 96 e Ilustración 97 se muestra la distribución de humedad relativa del aire inducido a través de la prueba sobre las bandejas A y B respectivamente, durante la realización de la prueba 3 (café).

Ilustración 96. Distribución de humedad sobre columna de bandejas A a lo largo del tiempo (Prueba 3).



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 97. Distribución de humedad sobre columna de bandejas B a lo largo del tiempo (Prueba 3).



Fuente: Elaboración propia.

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el Cuadro 25 se establecen los requerimientos del secador, donde uno de los principales retos son el garantizar que el sistema de ductos busque distribuir el flujo de la forma más uniforme sobre las bandejas sin agregar demasiado volumen al secador, de modo que esta pueda seguir siendo transportado por medio de pick-up, ya que para que el flujo sea uniforme, este debe contar con suficiente longitud de ducto para expandirse, sobre todo a velocidades altas como 10 – 15 m/s, que es a lo que entra al difusor. La longitud tan corta de ducto de entrada fue una de las razones principales de que los diseños iniciales (1 al 4 y sus variaciones) denotaran tan pobre distribución de flujo. Sin embargo, la solución propuesta en el diseño final lo que busca es brindar esa longitud de ducto que permita su distribución en el eje vertical, sin necesidad de que el ducto se extienda más allá de las limitantes de transporte; es por ello por lo que el ducto rodea la cámara de secado y posteriormente se redirecciona a lo largo del eje transversal a las bandejas (Z) mediante el reductor de área y el redireccionador de flujo. Este último elemento fue necesario debido a que a altas velocidades el flujo tiende a continuar adherido a la pared limitante externa, por lo que desde la salida del difusor (entrada a reductor de área), se agrega el redireccionador, con el fin de otorgar flujo a la sección más profunda de las bandejas respecto al eje transversal.

Así mismo, la salida del flujo, provista por el ducto de recirculación, es colocada lo más cercano posible a la entrada del difusor, esto con dos objetivos; el primero consiste en que el flujo que sale del reductor de área y entra a la cámara de secado sea atraído a la dirección más profunda de las bandejas en el eje transversal (apoyo a redireccionador de flujo); el segundo es que la salida del ducto de recirculación permita una conexión sencilla y lo más corta posible a la entrada del ventilador centrífugo que provee el flujo.

Con dicha geometría definida se procedió a manufacturar y debido a la característica de modularidad del sistema de ductos, estos fueron acoplados con relativa sencillez entre dos personas. Sin embargo, se notó que las ranuras entre los perfiles en contacto de los ductos entre sí y entre la cámara de secado, denotaron espacios significativos que provocaron pérdidas de flujo significativas. Muchas de ellas se solucionaron agregando tiras de foam sellante en todo el contorno de contacto de los componentes, lo cual redujo casi en su totalidad la pérdida.

La efectividad de los ductos del sistema de ventilación en la entrada a la cámara de secado se denota en el Cuadro 36, donde la distribución en el eje vertical (Y) denota poca variación en lo que respecta a la entrada de a la cámara de secado; sin embargo, denota una disminución considerable (aprox. 1 m/s menos) respecto al cálculo teórico tomado de las simulaciones que se muestran en la Ilustración 71. Esto se atribuye principalmente a dos factores, el primero consiste en que al momento de realizarse las pruebas de flujo muchas de las uniones del sistema de ductos entre sí y a la cámara de secado, no contaba con el sello en sus juntas, por lo que las pérdidas de flujo influyeron en la pérdida de velocidad esperada; la segunda razón es que la velocidad obtenida por parte del ventilador centrífugo concentró la velocidad esperada cercano al

contorno de sus paredes limitantes, mientras que en el centro del mismo la velocidad era mínima aprox. (1 – 2 m/s), tal como se muestra en la Ilustración 79.

En lo que respecta a los cálculos de parámetros de calefacción, en el proceso de secado se manejaron temperaturas de entrada de 55 °C en la etapa inicial de secado, 65 °C en la etapa media del proceso y 70 °C a 75 °C durante la etapa de recirculación. Las temperaturas de salida registradas fueron 40, 54 y 52 °C respectivamente variando en promedio 3.3 °C respecto a la temperatura estimada de forma teórica. Dichas temperaturas de forma teórica fueron determinadas con base en la tasa de secado calculada, la temperatura y humedad ambiente y la temperatura de entrada de flujo al difusor. A partir de dichos cálculos también se calcula que la temperatura de salida de la cámara de secado siempre será mayor a la temperatura de punto de rocío del aire en dichas condiciones, lo cual se cumple en todos los escenarios evaluados (ver cuadros 27 a 33), que se realiza para asegurar que no exista condensado en ningún momento durante la etapa del secado, que pueda dañar o manchar el cardamomo. Esto es algo que se verificó y cumplió durante todo el proceso de secado de la prueba realizada, incluso en las condiciones ambientales más adversas (temperatura de 13 °C y humedad relativa de 97% - ver Ilustración 80).

La prueba de secado de aprox. 5 quintales (471.4 lb) se inició el 19 de noviembre a 20:00 horas y culminó el 20 de noviembre a las 21:00 horas. Dicha prueba estaba estipulada para durar 20 horas, sin embargo, esta duró 5 horas más de lo estimado, secando en su totalidad aprox. 65% del cardamomo.

Las principales razones para esto es que las bandejas ubicadas en el centro-interior del secador, específicamente A5, A7, A9 y A10 de la columna A y B5, B6, B7 y B8 de la columna B, tal como se observa en los gráficos de distribución de temperatura y humedad del aire (ver Ilustración 81 a Ilustración 84). Así mismo, de dichas ilustraciones se denota que las bandejas que mayor temperatura, menor humedad y por ende mayor tasa de secado mostraron son A1, A2, A3 y A4 de la columna A, y B1, B2, B3 y B4 de la columna B.

Las razones posibles para este comportamiento son las discutidas sobre la distribución de flujo por parte del ventilador, las fugas en el sistema y más importante el aspecto que la calibración de las ventilas en el difusor se realizó cuando este operaba a temperatura ambiente y sin carga en las bandejas, aspectos geométricos que afectan de gran manera el comportamiento del flujo.

Por lo tanto, es importante considerar que al realizar configuraciones de ventilas estas se realicen en las condiciones más similares a las de operación posible (respecto a temperatura de flujo y geometría). Otra posible solución que se plantea es el intercambio de las bandejas de menor tasa de secado en la posición de mayor tasa de secado al finalizar la fase de secado constante, la cual depende de la temperatura de operación (para 65 °C después de 12 horas de secado), o en lapsos más cortos de tiempo que aseguren una mayor uniformidad (i.e. intervalos de 6 horas).

Así mismo, también se notó, al finalizar el proceso de secado, que la mayoría de cardamomo se secó más en las cercanías del perímetro de las bandejas, mientras que aquel cardamomo más al centro presentó un secado menor. Esto puede encontrar su fundamento en dos razones principales, la primera es que la distribución que provee el secador no es perfecta, es la solución que mayor homogeneidad provee, sin embargo, no es totalmente homogéneo, por lo que una recalibración del redireccionador de flujo podría resultar útil; la segunda razón es de fundamento de transferencia de calor, ya que las bandejas son metálicas también alcanzan temperaturas elevadas, por lo que el cardamomo también recibe calor por conducción, y al ser las secciones cercanas al borde aquellas que cuentan con dobleces y dos paredes, transmiten mayor calor, sobre todo en las esquinas.

Además, es importante resaltar que de los gráficos de temperatura y humedad del aire sobre las bandejas se denotan picos de humedad, así como valles de temperatura simultáneos, los cuales son el efecto de abrir la cámara del secador, lo cual se realizó durante la prueba con el fin de monitorear el proceso de secado, buscando confirmar la uniformidad de secado, la ausencia de condensado y ausencia de daños causados al cardamomo por tasas de secado muy agresivas; de las cuales las últimas dos se cumplieron en todo momento, mientras que la primera se hizo evidente después de las 12 horas de secado iniciales (fase de secado constante).

La anterior puede ser otra fuente de aumento de las horas de secado requeridas respecto a las estipuladas, ya que se denotan 6 picos de humedad y valles de temperatura significativos a lo largo de la prueba. Cada uno de ellos denotó un aumento de su valor inicial (e.g. 30%) hasta un valor uniforme de 70 – 75% por inspección. Así mismo el efecto de la temperatura denota una caída de 20 °C en el caso más significativo y de 10 °C en el caso de caída media y 5 °C en el de menor caída, aunque 10 °C fue la caída más usual en la mayoría de las bandejas.

Posterior a la prueba de secado de cardamomo, debido a la gran diferencia de tasa de secado obtenida en las distintas bandejas, se llevaron a cabo dos pruebas con el fin de minimizar la diferencia de tasas de secado entre las bandejas. Para ello, las siguientes dos pruebas (prueba 2 y 3) se centraron en asegurar que la distribución de temperaturas fuera lo más uniforme posible. Dichas pruebas fueron realizadas buscando simular las condiciones de flujo más cercanas a las condiciones actuales de secado con cardamomo. Debido al alto precio del cardamomo, se utilizaron granos de café verde como medio de simulación de la obstrucción que provoca el grano de cardamomo en el flujo de aire inducido en la cámara de secado. Para ambas pruebas se utilizaron camas de grano de aprox. 40 mm de café verde.

La primera prueba de secado con café (prueba 2) se realizó el 30 de noviembre de 2019. La prueba se llevó a cabo colocando una cama de aprox. 40 mm de café verde sobre cada una de las bandejas, y sobre dicha cama los data loggers. La primera fase de la prueba consistió en la calibración del ángulo de las ventilas en el difusor, utilizando para ello solo el anemómetro y flujo de aire sin calefacción. Al alcanzarse velocidades sobre las bandejas lo suficientemente uniformes se procedió a encender el quemador del sistema y reajustar las ventilas necesarias para obtener velocidades de flujo uniformes. Por último, con las velocidades

anteriores se procedió a realizar un registro de temperatura sobre las bandejas, con base en el cual se realizaron ajustes de las ventilas en tiempo real mientras se realizó la prueba. Cabe mencionar que en la primera fase de calibración de ventilas se realizaron modificaciones geométricas a la cámara de secado, concretamente, se agregaron dos piezas de 800 mm de largo, 38.1 mm de ancho y 2 mm de espesor cada una. Estas se agregaron en la frontera del reductor de área con la cámara de secado, a la altura de la fila 1 y de la fila 10, con la finalidad de reducir el área transversal de ingreso e igualarla a la que se posee en el resto de las filas.

En la Ilustración 88 se muestran los valores de temperatura y humedad relativa del ambiente desde las 10:20 hasta las 14:30 horas, lapso de duración de la prueba. Dichas condiciones se diferencian de las condiciones de la primera prueba, siendo los de la prueba 2 mucho menos exigentes al sistema de potencia (temperatura ambiente mayor y humedad relativa menor). Sin embargo, debido a que el objetivo de la prueba 2 y 3 solo fue el minimizar la diferencia de temperaturas entre bandejas, aspectos como la eficiencia y efectividad de secado no fueron sujetos a evaluación.

En la Ilustración 89 se muestra la distribución de temperaturas del aire inducido sobre las bandejas de la columna A. De esta curva cabe remarcar que las caídas súbitas que se observan a lo largo de esta se deben a las aperturas de la cámara de secado, con el fin de extraer datos de los loggers. Desde las 10:20 hasta las 13:10 horas se considera el periodo de calibración con condiciones de secado, es decir con el flujo de aire a temperatura de operación. Durante dicho periodo las calibraciones consistieron en cambios a los ángulos de las ventilas del difusor, dichos cambios fueron realizados según los datos observados en los loggers y el criterio del equipo desarrollador. La configuración final de las ventilas se denota en la curva desde las 13:20 horas. En la curva se denota que, a partir de dicho punto en el tiempo, los valores de temperatura sobre las bandejas se encuentran dentro de un rango de 45 a 55 °C, límites requeridos por el CEAA. Así mismo, se denota que el logger de la bandeja A4 indica temperaturas fuera de lo esperado, esto se debió a un error de procedimiento, ya que, al realizarse las calibraciones, este logger fue olvidado fuera de la cámara de secado. Sin embargo, el resto de las bandejas denotan una distribución con un diferencial máximo de 10 °C.

Dichos datos son similares para la columna B, los cuales se muestran en la ilustración 90. A diferencia de la columna A, la columna B denota una temperatura máxima de 51 °C (bandeja 1) y una temperatura mínima de aprox. 44 °C (bandeja 10), es decir, denota máximos y mínimos menores a los de la columna A, aspecto que se observó también en la prueba 1. Aunque, cabe resaltar que los diferenciales de temperatura entre bandejas son muy similares entre la columna A y la columna B, con lo que se alcanzó un resultado muy deseable como condición de operación de secado, aunque no ideal, ya que siempre existe un diferencial de aprox. 10 °C entre máximos y mínimos.

El comportamiento de la humedad relativa del aire inducido, mostrado en las Ilustraciones 91 y 92, para las bandejas de la columna A y B respectivamente, denotan una validación de la distribución de temperaturas de ambas columnas, ya que se corresponde a que, a mayor temperatura, menor el contenido de humedad relativa. De ambas ilustraciones resulta evidente que al inicio los diferenciales entre magnitudes de contenido

de humedad eran mucho mayores y se fueron disminuyendo hasta alcanzar el punto de calibración “final” (a las 13:20 horas). De igual forma, los valles en las curvas de temperatura corresponden a los picos que se encuentran en las curvas de humedad, tal como se discutió anteriormente en la prueba 1. Sin embargo, un aspecto que marca gran diferencia entre esta prueba y la prueba anterior es que, en la actual, los valores de humedad relativa del aire inducido sobre el grano no varían grandemente su valor a lo largo del tiempo. Esto último se debe principalmente a que el grano es cuestión no es cardamomo, sino café verde, el cual suele ser secado a temperaturas mucho mayores, por lo que un proceso de secado entre 45 y 55 °C y durante tan poco tiempo (aprox. 4 horas) hacen que la fase de secado constante prevalezca durante la prueba.

La segunda prueba de secado con café (prueba 3) se realizó el 5 de diciembre de 2019. Al igual que en la prueba 2, la prueba 3 se llevó a cabo colocando una cama de aprox. 40 mm de café verde sobre cada una de las bandejas, y sobre dicha cama los data loggers. Debido a los satisfactorios resultados de la prueba 2, se decidió realizar únicamente ajustes menores, siendo estos el reemplazar la pieza de obstrucción inferior, por una de igual dimensiones, difiriendo únicamente en su ancho que pasó de ser de 38.1 mm a 31.7 mm. Así mismo, se agregó una pieza similar a la anterior, con un ancho de 25.4 mm, en la posición correspondiente a la fila 5. Esto debido a los comportamientos observados de la prueba 2. En la ilustración 93 se muestra la curva de temperatura y humedad relativa del ambiente desde las 9:00 hasta las 16:00 horas, valores los cuales se asemejan a los de la prueba 2. Aunque, cabe resaltar un dato anómalo en la curva de humedad relativa de dicha ilustración, ya que a las 12:15 horas se registra un aumento súbito de 45% a aprox. 60%, y luego regresa a un valor cercano al 45%. Se cree que dicho dato puede haber sido causado por la caída de una gota de agua sobre o muy cercano al sensor del data logger, gota que pudo provenir de sudor o de las botellas de agua del equipo durante la prueba.

Habiéndose considerado que los cambios realizados con las piezas agregadas serían suficiente, se procedió a realizar la prueba 3. De esta prueba se esperaba replicar los resultados de la prueba anterior, así como el extender el periodo de prueba hasta 7 horas con el objetivo de asegurar que los resultados no varían de forma significativa respecto al tiempo. Así mismo, cabe mencionar que los límites requeridos por el CEEA fueron reestablecidos a 47 y 57 °C como límite inferior y superior respectivamente.

Las curvas de distribución de temperatura sobre las bandejas en la columna A se muestran en la ilustración 94 y los de la columna B en la Ilustración 95. De ambas ilustraciones se hace evidente que aquellas bandejas superiores (fila 1 a 4) denotan una tendencia al límite superior, mientras que las bandejas de filas inferiores (fila 5 a 10) denotan una tendencia al límite inferior. Esto pudo deberse a la pieza de obstrucción agregada a la fila 5, durante el montaje para la prueba actual. Sin embargo, en las curvas se denota un cambio importante en la distribución de temperaturas, particularmente a las 13:15 horas, que es justamente donde se activa la recirculación parcial del secador. Se hace notar que las curvas tienden a aproximarse unas con otras y disminuyen su diferencial con las bandejas aleñadas. De dichos cambios, lo más notables son los de la bandeja A1 y A10. La bandeja A10 fue una de las que más cambios mostró, pasando de ser una de las bandejas con temperaturas inferiores, a ser de las de mayor temperatura; mientras que la bandeja A1 denota

un comportamiento inverso, pasando de ser una de las bandejas de mayor temperatura a una de las bandejas con menor temperatura. Por otro lado, el resto de las bandejas denotan cambios, aunque no tan radicales como las mencionadas. El hecho que el activar la recirculación parcial tenga un efecto homogeneizador en la distribución de las temperaturas, es un aspecto que puede encontrar sus causas en la disminución de la presión estática a la salida de la cámara del secador (causado por succión), sin embargo, es algo que no se puede confirmar. Así también, se hace notar que, tanto en el caso de sistema abierto, como en el caso de sistema con recirculación parcial, las temperaturas sobre las bandejas de la columna B son menores a aquellas de la columna A, debido a lo discutido en la prueba 1 y 2.

Al analizarse las curvas de humedad, que se muestran en la ilustración 96 y 97, para la columna A y B respectivamente, se hace notar que la recirculación parcial denota el mismo efecto en la distribución de humedad relativa, como lo tuvo en la distribución de temperaturas. Tanto en la columna A como en la B, las bandejas inferiores tienden a mostrar mayores porcentajes de humedad relativa (relacionado a una menor temperatura), mientras que las bandejas superiores denotas porcentajes de humedad relativa menores (relacionado a una mayor temperatura). Sin embargo, al activarse la recirculación parcial en el sistema, en ambas columnas se denota un efecto de disminución de diferencial de magnitudes de unas respecto al resto.

IX. CONCLUSIONES

1. Se determinó que el secador debe cumplir con poseer una capacidad máxima de 10 quintales de cardamomo húmedo, utilizando gas propano, sin necesidad de utilizar energía eléctrica, componiéndose por elementos modulares, incluido un sistema de recirculación (sin que estos superen a un tamaño transportable en pick-up), y que todo el proceso de secado se realice sin dañar el cardamomo por tasa de secado excesivo o por agregado de agua por condensación.
2. Se estableció que el secador tipo gabinete es el que más se adecua a los requerimientos establecidos del secador y proceso de secado planteado.
3. Los parámetros de calefacción y ventilación determinados para un secado por convección del 60% de los granos a un contenido de humedad de 10% es de 65 °C por 25 horas.
4. Los parámetros que permiten un flujo sin condensado en el secador fabricado se denotan desde los 50 °C o más, con una velocidad de flujo mínima de 1.25 m/s sobre cada bandeja, considerando temperatura ambiente mínima de 20 °C y humedad relativa máxima de 65%.
5. El sistema de distribución diseñado y manufacturado incluye recirculación parcial regulable en 4 niveles; sin embargo, no asegura un proceso de secado uniforme, siendo las bandejas en posiciones superior las de proceso de secado más rápido y aquellas a la mitad – inferior del secador aquellas que denotan una tasa de secado de menor, aspecto altamente dependiente de la configuración de las ventilas.
6. Los sistemas de ductos diseñados y manufacturados se acoplan de forma modular a la cámara del secador, siendo compatibles en su totalidad con el módulo de Estructura, materiales y fabricación, así como con el módulo de Sistema de potencia, combustión y análisis de vibraciones mecánicas.
7. El sistema de ductos diseñados y manufacturados son difusor de entrada, ventilas de redireccionamiento vertical, reductor de área, redireccionador de flujo horizontal, ducto de recirculación.
8. Los ductos diseñados y manufacturados como sistema de ventilación fueron ensamblados y acoplados a la cámara de secado y al sistema de potencia, dentro del cual la principal ventaja fue el ajuste de acople sencillo y la mayor dificultad fueron las fugas encontradas en las secciones de unión que se corrigieron con foam de sello.

9. Se llevó a cabo una prueba con 4.7 quintales (471.4 lb) de cardamomo húmedo (80 % de humedad w.b.) de los cuales se esperaban obtener 103.36 lb de cardamomo seco (10% de humedad w.b.), de los cuales se obtuvieron 67.0 lb, lo que implica una efectividad de secado del 64.82%, así mismo, el grano seco no presentó descomposición en el tiempo, pero sí un leve amarillamiento, mientras que el cardamomo aún húmedo si sufrió descomposición.
10. Se determinó que las bandejas con menores temperaturas a lo largo de la prueba (y menor tasa de secado) A5, A7, A9, A10, B5, B6, B7 y B8; mientras que las A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3 y B4 son las de mayor tasa de secado.
11. Mediante la prueba 2 y 3, se determinó que es posible obtener una distribución de temperatura con límites separados por un diferencial de 10 °C, la cual se logra mediante exhaustiva calibración de las ventilas ubicadas en el difusor. Dicha distribución reduce su diferencial entre temperaturas de bandejas operar el sistema bajo recirculación parcial.
12. La tasa de agregado de calor requerida y el flujo de gas solicitado al módulo de Sistema de potencia, combustión y análisis de vibraciones mecánicas fue suficiente para aumentar la temperatura del aire hasta 80 °C; sin embargo, se considera que es posible que se entregue más.
13. La velocidad obtenida por parte del ventilador centrífugo concentró la velocidad esperada cercano al contorno de sus paredes limitantes, mientras que en el centro de este la velocidad era mínima.

X. RECOMENDACIONES

1. El proceso de diseño de un secador tipo gabinete que provea un flujo uniforme a todas las bandejas es un tema extenso y aún no logrado en su totalidad en la industria, por lo que debería desarrollarse en una etapa anterior al proceso de manufactura de un secador de este tipo.
2. Debido a la ausencia de investigación del proceso de secado de la especie *Elettaria Cardamomum*, se recomienda caracterizar la curva de secado de esta en condiciones ambientales de la región norte del país.
3. Debido a la ausencia de investigación del proceso de secado de la especie *Elettaria Cardamomum*, se recomienda caracterizar los efectos de las distintas tasas de secado en el color resultante a la finalización de un secado de 80% w.b. hasta un 10% w.b.
4. Al realizarse pruebas de secado o procesos de caracterización, se debe asegurar que el cardamomo cereza por utilizar posea características de madurez similares, ya que el estado de este repercute de forma significativa en las tasas de secado bajo las mismas condiciones de flujo y provoca irregularidades no dependientes del flujo provisto
5. Se recomienda que para un uso efectivo del secador las bandejas A5, A7, A9, A10, B5, B6, B7 y B8 sean intercambiadas con las bandejas A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3 y B4 después de culminar el proceso de secado en fase constante la cual depende de la temperatura de operación (para 65 °C después de 12 horas de secado) o en caso ideal en lapsos más cortos de tiempo que aseguren una mayor uniformidad (i.e. intervalos de 6 horas).
6. Se recomienda evaluar el comportamiento del flujo con las bandejas en la cámara de secado y de ser posible con granos o bien elementos que simulen la obstrucción de flujo que los granos representan.
7. Al utilizar el secador para el proceso de secado se recomienda comenzar el proceso al inicio de la mañana, donde la temperatura es baja y la humedad del ambiente es alta, pero comienzan a decaer, buscando operar el mayor tiempo posible durante el día, tomando ventaja de las condiciones de ambiente

XI. BIBLIOGRAFÍA

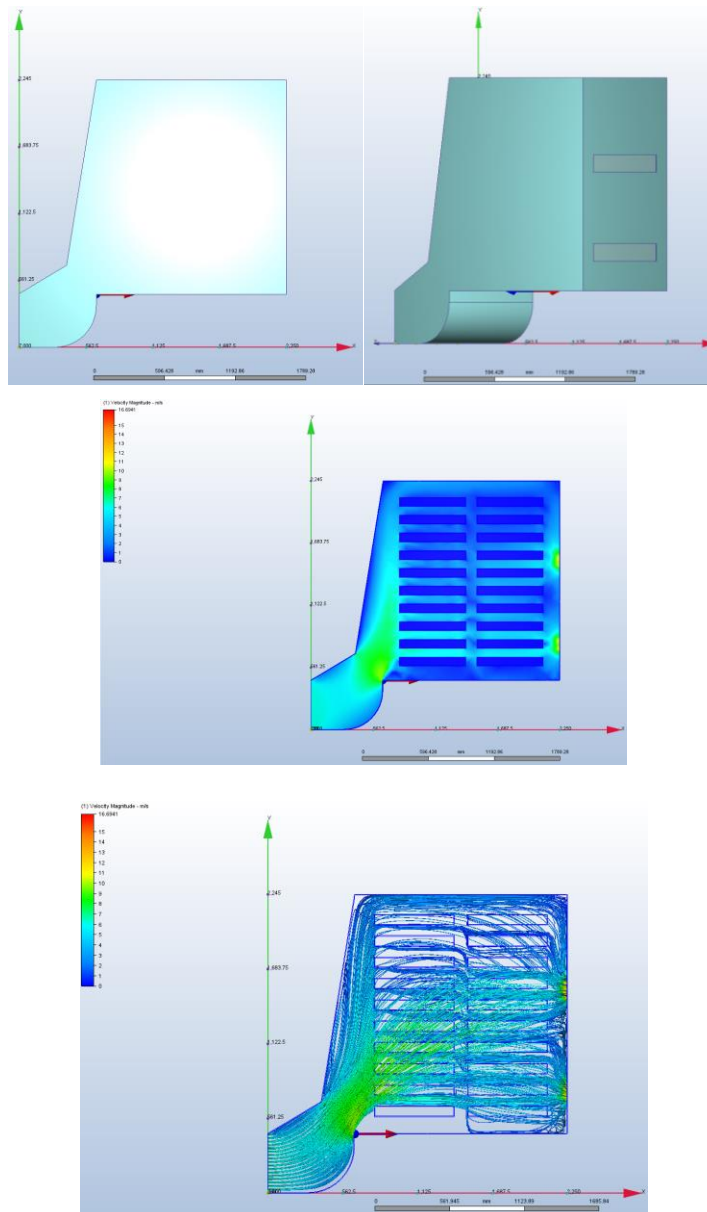
- ANSYS. (2018). *Limitations to student license?* Obtenido de <https://studentcommunity.ansys.com/thread/limitations-to-student-license/>
- Archila, M. (2019). *Estructura, materiales y fabricación*. Ciudad de Guatemala: Tesis Universidad del Valle de Guatemala.
- Asociación de Exportadores de Guatemala. (2016). *La importancia del cardamomo en la economía de Guatemala*. Obtenido de <https://agexporthoy.export.com.gt/sectores-de-exportacion/sector-agricola/1-millon-guatemaltecos-se-benefician-la-cadena-exportacion-cardamomo/>
- Autodesk. (2016). *Regarding nodal aspect ratio*. Obtenido de <https://forums.autodesk.com/t5/cfd-forum/regarding-nodal-aspect-ratio/m-p/5493395#M6725>
- Bala, B. (2017). *Drying and Storage of Cereal Grains*. Bangladesh: John Wiley & Sons.
- Banco de Guatemala. (2017). *Guatemala en cifras 2017*. Obtenido de http://www.banguat.gob.gt/Publica/guatemala_en_cifras_2017.pdf
- Barillas, L. (2017). *Evaluación de trampas etológicas para el control de trips (Sciothrips cardamomi) en el cultivo de cardamomo (Elettaria cardamomum) en Alta Verapaz, diagnóstico y servicios realizados con la Asociación de Cardamomeros de Guatemala, Cobán, Alta Verapaz*. Ciudad de Guatemala: Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Barr, D., & C, B. (1997). *Industrial drying of foods*. Inglaterra: Blackie academic & professional.
- Bergman, T., et, al. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* (7 ed.). Estados Unidos de América: John Wiley & Sons.
- Berk, Z. (2018). *Food process engineering and technology* (3 ed.). Israel: Elsevier.
- Blazek, J. (2015). *Computational fluid dynamics: Principles and applications*. Alemania.: Butterworth-Heinemann.
- Chen, X., & Mijumdar, A. (2008). *Drying Technologies in Food Processing*. Reino Unido: Blackwell Publishing.

- Fellows, P. (2000). *Food processing technology: Principles and practice* (2 a ed.). Inglaterra: CRC.
- Guillén, M. (2019). *Diseño, construcción y evaluación de un deshidratador solar para tomate*. Ciudad de Guatemala: Tesis Universidad del Valle de Guatemala.
- Instituto Nacional de Estadística. (2016). *Compendio Estadístico Ambiental*. Guatemala: Instituto Nacional de Estadística.
- IUPAC. (2014). *Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book")*. Recuperado el 19 de 07 de 2019, de <https://doi.org/10.1351/goldbook>.
- Liu, C., Yeoh, G., & Tu, J. (2018). *Computational fluid dynamics: A practical approach* (3ra ed.). India: Butterworth-Heinemann.
- Mazumder, S. (2016). *Numerical methods for partial differential equations: Finite difference and finite volume methods*. Estados Unidos de América.: Academic Press.
- McNeill, S. (2012). *Equilibrium moisture content for grains*. Estados Unidos de América.: Departamento de Agricultura, Universidad de Kentucky.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2016). *El agro en cifras 2016*. Obtenido de <https://precios.maga.gob.gt/archivos/agro-en-cifras/EI%20Agro%20En%20Cifras%20-%202016.pdf>
- Rao, V., & Mande, S. (2009). *Study of drying characteristics of large-cardamom*. India: Tata Energy Research Institute.
- Ravindran, P., & Madhusoodanan, K. (2002). *Cardamom: The genus Elettaria*. (R. Hardman, Ed.) Londres: Taylor & Francis.

XII. ANEXOS

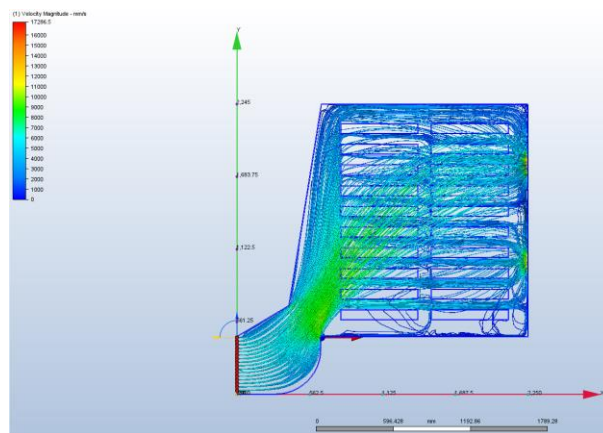
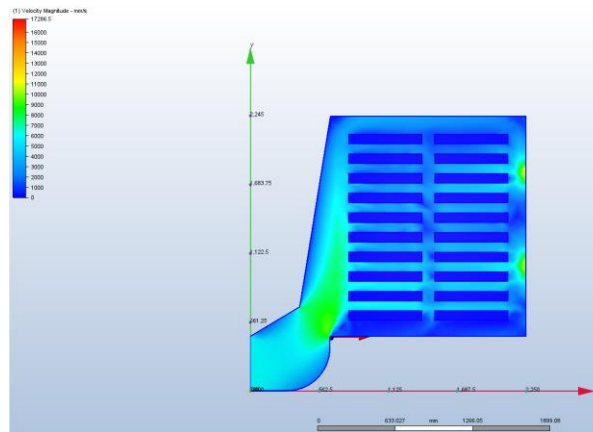
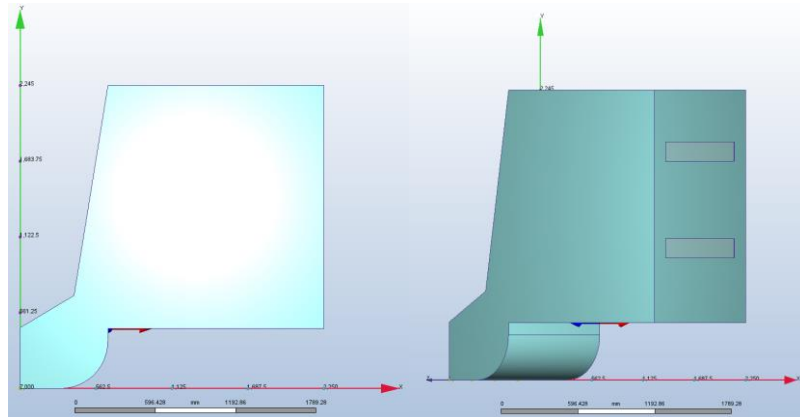
A. IMÁGENES DE MODELOS PRELIMINARES

Ilustración 98. Diseño 1.2.



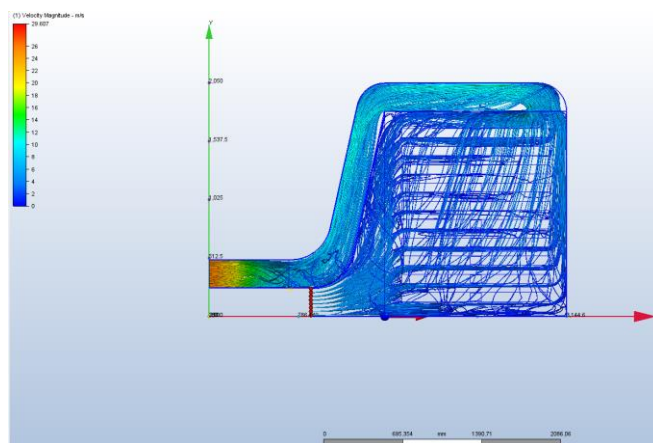
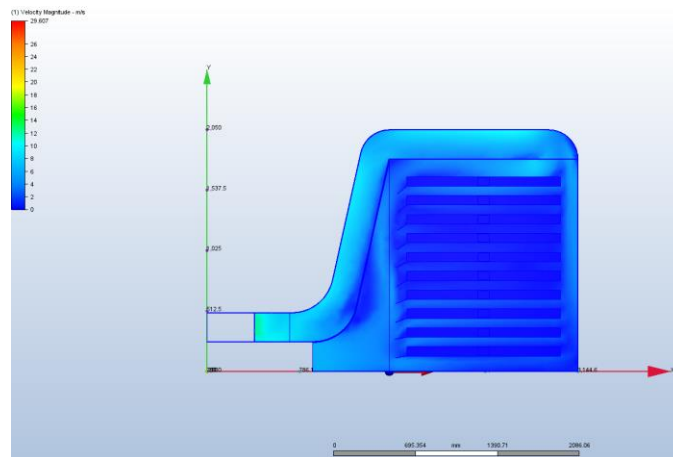
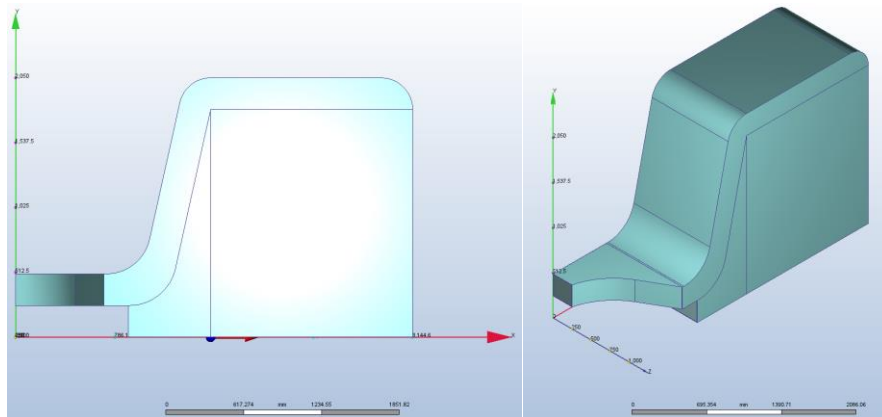
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 99. Diseño 1.3.



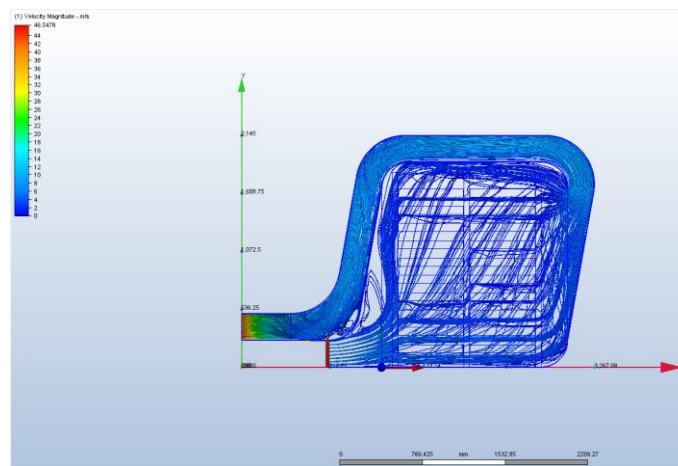
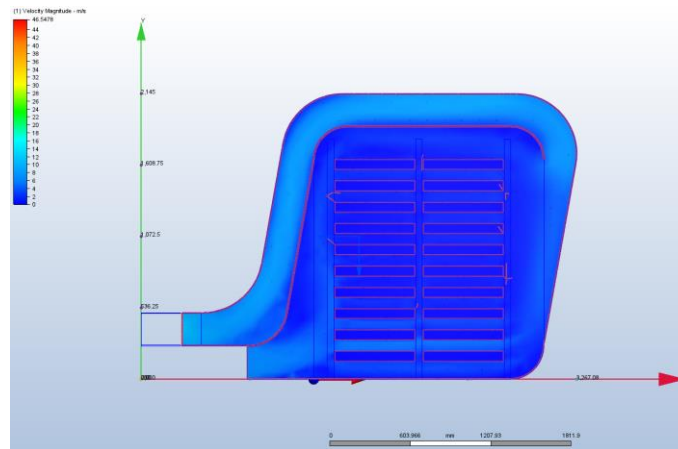
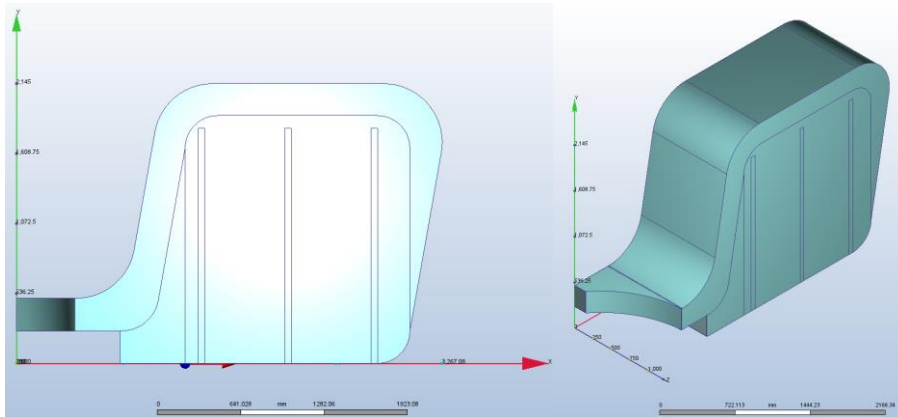
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 100. Diseño 3.2.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 101. Diseño 3.3.



Fuente: Elaboración propia.

B. IMÁGENES DE CALCULADORA DE TIEMPOS DE SECADO.

Cuadro 38. Ejemplo de cálculos para aire a 65 °C.

Datos de aire	
Temperatura DB [°C]	65
Temperatura WB [°C]	27.65992622
Velocidad [m/s]	1.25
Coefficiente de transferencia de masa convectivo (k'g) [g/m ² -s]	20.40262458
Densidad bulbo seco [kg/m ³]	0.87571657
Calor latente de evaporización @ T WB [kJ/kg]	2435.4
Capacidad calorífica de aire húmedo [J/Kg-seco °C]	1025.606459
Humedad absoluta [kg-H ₂ O / kg-seco]	0.01132223
Datos de alimento	
Humedad inicial WB (X ₁)	0.8
Humedad objetivo WB (X ₂)	0.1
Contenido de humedad crítico WB (X _c)	0.45
Humedad de equilibrio WB (X _e)	0.04
Masa total WB [kg]	21.1427
Área total [m ²]	1.02
Cálculos y resultados	
Humedad inicial DB	4
Humedad objetivo DB	0.111111111
Contenido de humedad crítico DB (X _c)	0.818181818
Humedad de equilibrio DB (X _e)	0.041666667
N [-dW/Adt] - Base Kg' [kg/m ² -s]	0.000312817
h - Base velocidad [W/m ² -K]	20.92506356
N [-dW/Adt] - Base velocidad [kg/m ² -s]	0.000320828
Masa de agua total [kg-H ₂ O]	16.91416
Masa de agua total por remover [kg-H ₂ O]	16.44432222
Total de masa seca [kg-seco]	4.22854
Masa seca por unidad de área [kg-seco/m ²]	4.145627451
Phi - [-dW/Mdt] [pérdida de kg H ₂ O por kg seco s] - Base Kg'	7.54572E-05
Phi - [-dW/Mdt] [pérdida de kg H ₂ O por kg seco s] - Base velocidad	7.73894E-05
Tiempo de secado fase constante [s] - Base Kg'	42167.19595
Tiempo de secado fase constante [hrs] - Base Kg'	11.71310999
Tiempo de secado fase constante [s] - Base velocidad	41114.4017
Tiempo de secado fase constante [hrs] - Base velocidad	11.42066714
Tiempo de secado fase en reducción [s] - Base Kg'	24844.9752
Tiempo de secado fase en reducción [hrs] - Base Kg'	6.901382001
Tiempo de secado fase en reducción [s] - Base velocidad	24224.66725
Tiempo de secado fase en reducción [hrs] - Base velocidad	6.729074235
Tiempo de secado total [hrs] - Base Kg'	18.61449199
Tiempo de secado total [hrs] - Base velocidad	18.14974137

Fuente: Elaboración propia.

C. IMÁGENES DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.

Ilustración 102. Anemómetro – Extech Instruments CFM Thermo-Anemometer.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 103. Termómetro Winters TBM Series (-10 a 120 °C).



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 104. Bitácoras de datos (Data Loggers) – LogTag HAX0-8.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 105. Balanza digital.



Fuente: Elaboración propia.