

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS

**JAIRO ALEXANDER CASTILLO PARADA
LUIS FELIPE PARRA GUTIERREZ
JORGE FERNANDEZ BELTRAN**



**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA
2008**

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS

**JAIRO ALEXANDER CASTILLO PARADA
LUIS FELIPE PARRA GUTIERREZ
JORGE FERNANDEZ BELTRAN**



**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA
2008**

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS

**JAIRO ALEXANDER CASTILLO PARADA
LUIS FELIPE PARRA GUTIERREZ
JORGE FERNANDEZ BELTRAN**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
OMAR A. GÉLVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECAÑICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA
2008**

DEDICATORIA

*A Dios por todo lo que me ha brindado
a mi madre por su Incondicional apoyo
a todas aquellas personas, que nunca
dejaron de creer en mi.
Y a Camilo Portilla un amigo que en este año se despidió.*

Jairo Alexander.

DEDICATORIA

A dios por su infinita misericordia

A mi madre por su fé

*A Nubia Esperanza Salcedo
por su lealtad, confianza y amor.*

Jorge

DEDICATORIA

*A Dios que me ha brindado todo lo que soy
A mis padres por su esfuerzo y apoyo
A mi esposa Luz Dary y a mi hijo Juan Felipe*

Luis Felipe

AGRADECIMIENTOS

A Omar Gélvez Arocha, Ingeniero mecánico, director de nuestro proyecto, que gracias a sus consejos, orientación y confianza nos motivo en la realización de este proyecto.

A nuestras familias por su constante motivación y apoyo, nos brindaron el combustible a nuestros corazones para seguir adelante y no decaer frente a los inconvenientes.

Al cuerpo docente de la escuela de ingeniería mecánica que gracias a la formación y orientación que nos brindaron a lo largo de nuestras carreras para ayudarnos en el sueño de ser profesionales uis.

A nuestros amigos, aquellos que directa o indirectamente fueron instrumento de nuestra formación como personas.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	24
1. SECADO	25
1.1 PRINCIPIO DE SECADO	25
1.2 MECANISMO DEL SECADO	27
1.3. CLASIFICACIÓN Y MÉTODOS DE SECADO	28
1.3.1 Según el flujo del producto.	30
1.3.2. Según el método de transmisión de calor a los sólidos húmedos.	30
2. DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROTOTIPO DE UN SECADOR	34
2.1 NECESIDADES DEL DISEÑO	35
2.1.1 Cámara de secado	35
2.1.2 Sistema de control y monitoreo	35
2.1.3 Sistema de impulsión del aire	35
2.1.4 Ductos de ventilación:	35
2.1.5 Sistema de humidificación	36
2.1.6 Energía utilizada	36
2.2 EJECUCIÓN DEL DISEÑO	36
2.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO PROTOTIPO FINAL.	39
2.3.1 Cámara de secado	40
2.3.2 Ductos de Ventilación	42
2.3.3 Sistema de impulsión de aire	43
2.3.4 Sistema de control.	44
2.3.5 Alimentación de vapor	45
2.3.6 Sistema de humidificación	49
2.3.7 Estructura.	52

3. DISEÑO TERMODINÁMICO Y TÉRMICO	53
3.1 DISEÑO TERMODINÁMICO	53
3.1.1 Requerimientos básicos del secado.	53
3.1.3 Cálculo del flujo mínimo de aire requerido.	57
3.2. DISEÑO TÉRMICO	60
3.2.1 Balance Termodinámico del secador.	60
3.2.2 Fórmulas para la Determinación de Calor específico de productos agrícolas.	62
3.2.3. Calculo de calor de pérdida y espesor de las paredes.	63
3.4 SELECCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.	68
4. ESTUDIO DE LAS CONDICIONES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE SECADO	73
4.1 CONDICIONES DE SECADO	73
4.1.1 Condiciones externas.	74
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS	102
5.1 Código Programa de Matlab:	105
5.2 RESULTADOS.	106
5.2.1 Madera ‘caracoli’	106
5.2.2. Arveja	119
5.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	126
5.3.1 Madera	126
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	131

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Requerimientos básicos de secado.	54
Tabla 2. Resultados en los diferentes puntos de potencia del aire.	56
Tabla 3. Proceso de Cálculo del flujo de masa	59
Tabla 4. Ecuaciones para determinar el calor específico de productos agrícolas	62
Tabla 5. Cálculo de los coeficientes de convección	64
Tabla 6. Resultados de diseño	67
Tabla 7. Características motor 1	71
Tabla 8. Características motor 2	72
Tabla 9. Características principales de las hélices.	72
Tabla 10. Composición del aire seco a 1 atmósfera.	76
Tabla 11. Temperaturas máximas utilizadas en el secado de granos condensación	81
Tabla 12. Condiciones de deshidratación según las diferentes etapas de secado	85
Tabla 13. Métodos experimentales para la medida de la difusividad	92
Tabla 14. Difusividad efectiva en algunos materiales.	94
Tabla 15. Influencia de la temperatura en la difusividad.	98
Tabla 16. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 1.	107
Tabla 17. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 2.	108
Tabla 18. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 3.	110
Tabla 19. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 4.	112
Tabla 20. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 5.	114
Tabla 21. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 6.	116
Tabla 22. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 7.	117
Tabla 23. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 8.	118

Tabla 24. Datos de las pruebas arveja tamiz 1.	120
Tabla 25. Datos de las pruebas arveja tamiz 2.	122
Tabla 26. Datos de las pruebas arveja tamiz 3	123
Tabla 27. Datos de las pruebas arveja tamiz 4	125
Tabla 28. Resultados de las pruebas y función representativa madera	126
Tabla 28. Resultados y obtención del coeficiente de transferencia individual de materia h_d	128
Tabla29. Resultados de las pruebas y función representativa arveja.	129
Tabla 30. Resultados y obtención del coeficiente de transferencia individual de materia h_d	130

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Clasificación de secadores	29
Figura 2. Secador directo	31
Figura 3. Secador indirecto	33
Figura 4 Prototipo 1	37
Figura 5 a) Prototipo 2	37
Figura 5 b Planos Prototipo 2	38
Figura 6. Prototipo 3	38
Figura 7. Cámara de secado.	40
Figura 8. Cámara de secado y sistema de iluminación vista externa	41
Figura 9: Ductos de ventilación	42
Figura 10 Sistema de impulsión de aire	44
Figura 11. Fotografía de sistema de control y monitoreo.	45
Figura 12. Platina de orificios	46
Figura 13 Servovalvula	46
Figura 14. Ubicación intercambiador de calor	47
Figura 15. Trampa de vapor	48
Figura 16. Sistema de racores	49
Figura 17. Sistema de humidificación	50
Figura 18. Accionamiento del humidificador	51
Figura 19 Estructura	52
Figura 20 Representación del paso del aire a través del intercambiador de calor	55
Figura 21. Representación del paso del aire a través del producto.	55
Figura 22 Potencial del secado del aire	56
Figura 23. Condiciones iniciales y finales del producto a secar.	58
Figura 24 Balance termodinámico del secador.	61

Figura 25. Configuración de flujo en el intercambiador.	69
Figura 26 Geometría del arreglo.	70
Figura 27. Condiciones de secado.	74
Figura 28.curva típica de secado	76
Figura 29 Trayectoria del vapor de agua durante la deshidratación.	80
Figura 30. Etapas de secamiento	84
Figura 31. Balance	86
Figura 32. Difusión substitucional	89
Figura 33. Difusión en estado estacionario	90
Figura 35 Histogramas de difusividades.	96
Figura 36 Isotermas de sorpción	101
Figura 37. Representación de la obtención de los valores de ω_s y ω .	103
Figura 38 Disposición de las probetas para el secado de madera.	106
Figura 40, cinética de secado madera (caracoli) probeta 2.	109
Figura 41. Cinética de secado madera (caracoli) probeta 3.	111
Figura 42. Cinética de secado madera (caracoli) probeta 4.	113
Figura 43, cinética de secado madera (caracoli) probeta 5.	115
Figura 45, cinética de secado madera (caracoli) probeta 7.	118
Figura 46. Cinética de secado madera (caracoli) probeta 8.	119
Figura 47. Disposición de los tamices para el secado de arveja.	119
Figura 48. Cinética de secado arveja tamiz 1.	121
Figura 49. Cinética de secado arveja tamiz 2.	122
Figura 50. Cinética de secado arveja tamiz 3.	124
Figura 51, cinética de secado arveja tamiz 4.	125

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. MANUAL DE OPERACION DE SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS	133
ANEXO B. LISTA DE TABLAS Y GRAFICAS EXPERIMETALES	147
ANEXO C. COSTOS	148
ANEXO D. CIRCUITO DE CONTROL	149
ANEXO D. PLANOS "SECADOR DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS"	150

GLOSARIO

ABSORCION: Es la operación unitaria en la que la transferencia de masa tiene lugar de la fase vapor a la fase líquida. Generalmente, aunque no siempre, designa una operación en la cual el líquido se suministra como corriente separada e independiente del vapor a tratar.

ADSORCION: Es la operación unitaria que se realiza al poner en contacto un sólido con una *mezcla* fluida. Las condiciones en que se produce el contacto son tales que una parte del fluido resulta adsorbida por la superficie del sólido, con lo que la composición del fluido no adsorbido resulta alterada.

AGUA: Es el compuesto químico más abundante de la superficie terrestre. El agua contiene 11.2% de hidrógeno y 88.8% de oxígeno, en peso. Se le considera como un electrolito débil y se ioniza como H_3O^+ (ion hidronio) y OH^- (ion hidroxilo).

AIRE: Es una mezcla de gases, cuya composición como aire seco a nivel del mar, es de 78.00% de nitrógeno, 20.95% de oxígeno, por volumen; el 1.05% restante está constituido por los gases nobles, el dióxido de carbono y el vapor de agua. Un litro de aire a 0°C y 760 mm Hg, pesa 1,2928 gramos.

AIREACIÓN: La aireación del grano se refiere al proceso de forzar aire a poca velocidad por la masa estática de grano para refrescarlo.

BIODEGRADABILIDAD: Es la capacidad de una sustancia de descomponerse por medio de microorganismos. Específicamente es la tasa a la cual los detergentes, los pesticidas y otras sustancias pueden ser químicamente decompuestos por bacterias y/o factores ambientales naturales.

BOUQUET: Aroma

CALOR ESPECÍFICO: Relación de la cantidad de calor requerido, para aumentar o disminuir la temperatura de una sustancia en 1oC, comparado con la que se requiere para aumentar o disminuir la temperatura de una masa igual de agua en 1oC. Se expresa como una fracción decimal.

CALOR LATENTE: Cantidad de energía calorífica requerida para efectuar un cambio de estado (fusión, evaporación, solidificación) de una sustancia, sin cambio en la temperatura o presión.

CALOR LATENTE DE VAPORIZACION: Es la energía térmica requerida para vaporizar un volumen de líquido dado.

CAUDAL (FLUJO): El caudal es el paso de una cantidad de masa (kg), por una unidad de tiempo (s). El caudal se mide de 3 maneras distintas, y las unidades en el sistema internacional SI, son diferentes para cada una:

Caudal en base a la masa - kg/s, Caudal en base al volumen - m³/s Caudal en base a la masa por área - kg/m²s

COLOIDAL: La palabra proviene de un término griego que significa cola o pegamento. En la actualidad, "coloidal" se refiere al tamaño de las partículas suspendidas, que es del orden de las diezmilésimas de milímetro.

CONDENSACION: Es la reacción química en la cual dos o más moléculas se combinan, con la separación de agua u otra sustancia simple. Sí se forma un polímero, el proceso se denomina poli- condensación. La resina fenol-formaldehído es un ejemplo de un polímero de condensación.

CONDUCCION: Es la transmisión del calor de una parte a otra del mismo cuerpo o de dos cuerpos que se encuentran en contacto físico, sin que tenga lugar un desplazamiento significativo de las partículas.

CONVECCIÓN: Transferencia de calor por medio del movimiento o flujo de un fluido.

CONVECCIÓN FORZADA: Transferencia de calor que resulta del movimiento forzado de un líquido o un gas, por medio de una bomba o un ventilador.

DESHIDRATACION (I): Consiste en la remoción del 95% o más del agua de un material, normalmente de un producto alimenticio, por exposición a alta temperatura. El propósito principal es el de reducir el volumen del producto, el incrementar su vida útil en la estantería y el reducir los costos de su transporte.

DESORCION: Es la *operación unitaria* en la que la transferencia de masa se realiza de la fase líquida a la fase vapor.

ENTALPIA: Es el calor absorbido o producido por un proceso, bajo condiciones de presión constante. La expresión matemática de la entalpía **H** es la siguiente:

$$H = E + pV$$

Donde **E** es la *energía interna* del sistema; **p** la presión absoluta del sistema y **V** el volumen del sistema.

ENTROPIA: Medida del desorden de un sistema físico: número de redistribuciones de las partes del sistema que no implican un cambio de su aspecto global.

GAS NATURAL: Es una mezcla de hidrocarburos, de bajo peso molecular, la cual se obtiene por lo general, de manera conjunta con el *petróleo*. Su composición es de un 85% de metano y 10% de etano, el porcentaje restante esta constituido por propano, butano y nitrógeno.

HUMIDIFICACION: Se denomina a la *operación unitaria* por medio de la cual se evapora el agua en el seno de una masa de aire para aumentar la humedad de ésta. Por deshumidificación se entiende la *condensación* del vapor de agua del aire, para disminuir su humedad.

ISOTERMA: Nombre con el que se conoce a la línea o líneas que en una gráfica, representan un cambio a temperatura constante.

MASA: Cantidad de materia en un cuerpo, su inercia o resistencia a la aceleración en el estado libre.

POROSIDAD: a la capacidad de un objeto de absorber líquidos o gases. La capacidad de absorción se puede medir con una fórmula matemática:

SECADO: Es la *operación unitaria* por medio de la cual se extrae más del 90% del agua de un material, por exposición al calor. El secado industrial puede ser continuo o por cochadas.

SUBLIMACIÓN: Condición donde una sustancia cambia de sólido a gas, sin volverse líquido.

TERMODINAMICA: Es la parte de la *física* que estudia el aspecto macroscópico de aquellos fenómenos caracterizados esencialmente por la transformación del *calor* en trabajo y viceversa.

TRANSFERENCIA DE CALOR: La transmisión de la energía térmica de un cuerpo a otro se realiza gracias a la diferencia de temperatura que existe entre ellos. Dicha transmisión se puede realizar mediante tres mecanismos: la conducción, la convección o la radiación.

La transferencia de calor involucra muchas operaciones unitarias tales como la cristalización, la destilación, la evaporación y el secado.

TRANSFERENCIA DE MASA: Se entiende por transferencia de masa el movimiento de uno o más componentes, bien dentro de una misma fase o su paso de una a otra fase.

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS*

AUTORES:

JAIRO ALEXANDER CASTILLO PARADA

LUIS FELIPE PARRA GUTIERREZ

JORGE FERNANDEZ BELTRAN[^]

PALABRAS CLAVES:

Diseño, Construcción, Secador, Productos Agrícolas, Laboratorio, Transferencia de Calor.

DESCRIPCION:

Con la realización de este proyecto de grado se buscó diseñar y construir un secador de productos agrícolas con capacidad de 5 a 10 kilogramos máximo de producto por cochada para el laboratorio de maquinas térmicas en la escuela de ingeniería mecánica que permita al estudiante interactuar directamente con ejercicios prácticos de secado.

Inicialmente se estableció la capacidad del secador de 5 a 10 kilogramos, luego se escogió el tipo de deshumidificación, que finalmente se implementaría entonces utilizamos aire caliente al paso por un intercambiador de calor siendo un tipo de secador indirecto, después se selecciono el sistema de impulsión de aire el cual permite obtener dos rangos de velocidades encendiendo un motor, o los dos a la vez, también la dirección del flujo se puede invertir cambiando la posición de las aspas en el motor, además el equipo debía contar con un sistema de control ON/OFF que operara sobre la alimentación de vapor, el control de humedad debería ser de tipo manual debido a que mediante la lectura de un higrómetro digital el operador abrirá en forma manual las compuertas de ventilación, finalmente realizamos un manual sobre las experiencias a realizar en el laboratorio diseñando dos pruebas básicas en la primer grafica visualizamos la variación de humedad contra el tiempo y en la segunda observamos la variación de la velocidad de secado contra la humedad del producto, para que mediante modelos matemáticos verificar los resultados de las pruebas. Este diseño permite un fácil mantenimiento de todos sus elementos por su misma flexibilidad y independencia de cada uno de los sistemas que lo comprenden; este equipo tiene una facilidad de traslado.

* Trabajo de grado

[^] Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de ingeniería mecánica, Ing. Omar Armando Gelvez Arocha

SUMMARY

TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A OF AGRICULTURAL PRODUCTS DRYER.*

AUTHORS:

JAIRO ALEXANDER CASTILLO PARADA

LUIS FELIPE PARRA GUTIERREZ

JORGE FERNANDEZ BELTRAN[^]

KEY WORDS:

Design, Construction, Dryer, Agricultural Products, Laboratory, Heat transfer.

DESCRIPTION:

With the accomplishment of project we looked for to design and to construct a dryer agricultural products with maximum capacity from 5 to 10 kilograms of product for cochada for the laboratory machines thermal in the mechanical engineering school that enable the student to interact directly with practical dry exercises.

Initially the capacity of the dryer established from 5 to 10 kilograms, then the type of dehumidification that finally would be implemented was chosen, then we use hot air through a heat exchanger being a type of indirect dryer. Then select the drive system of air which allows to obtain two speed ranges igniting an engine, or both simultaneously, also the direction of the flow can be inverted changing the position of the blades in the engine, the equipment should also have a system of ON / OFF control operating on the supply of steam, the control of moisture should be of manual type due to the fact that by reading a digital hygrometer the operator will open in manual form the hatches of ventilation. Finally we made a manual on the experiences to realizing in the laboratory designing two basic tests: At first, we visualize the variation of moisture against the time, and at second, we observe the variation of the speed of dried against the moisture, through mathematical models to verify the test results. This design allows an easy maintenance of their elements by the same flexibility and independence of each system; this equipment has a facility of displacement.

* Degree Project.

[^] Physical-mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering, Eng. Omar Armando Gélvez Arocha.

INTRODUCCIÓN

De las necesidades del hombre, la alimentación, ha sido una de las más importantes para su sustento. La industria alimentaría ha tenido sus orígenes desde la prehistoria, cuando el hombre comenzó a conservar los alimentos mediante equipos e instrumentos que inicialmente eran de tipo doméstico aprovechando los medios que tenía a su alrededor; agua, viento, sol, pero a medida que las sociedades crecieron y otros factores como sequías, inundaciones etc. influían, hubo entonces la necesidad de aumentar la producción y la eficiencia en la conservación de alimentos es así como a finales de este siglo ocurre una transformación de la industria artesanal alimentaría en una industria basada en el conocimiento científico.

La humedad es un factor crítico en el deterioro de la calidad de un grano o producto, por ello la importancia de eliminar el exceso mediante un método artificial, ya sea con un equipo de deshidratación que además permita manipular las diferentes variables involucradas en el secado. De ahí la importancia de este proyecto que busca implementar en el laboratorio un equipo experimental que permita apreciar el comportamiento de los diferentes productos en el proceso de secado.

1. SECADO

1.1 PRINCIPIO DE SECADO

El secado describe el proceso térmico para remover sustancias volátiles (humedad) con el fin de obtener un producto sólido.¹ La humedad se presenta en forma de solución líquida dentro del sólido o atrapada en su micro estructura la cual, ejerce una presión de vapor menor que el líquido puro, esta es llamada humedad intrínseca. La humedad en exceso es llamada humedad extrínseca.

Cuando la superficie sólida que se encuentra húmeda es sometida a un tratamiento de secado, ocurren dos procesos simultáneamente:

1. Transferencia de energía (sobre todo como calor sensible) desde el ambiente circundante para evaporar la humedad superficial.
2. Transferencia de humedad interna hacia la superficie para la evaporación subsiguiente debido al proceso 1.

La transferencia de energía calorica desde el ambiente circundante hacia el sólido mojado puede ocurrir como resultado de la convección, conducción o radiación y en algunos casos puede darse como la combinación de estos mecanismos. Los secadores industriales difieren en el tipo y diseño, dependiendo sobre todo del principal método de transferencia de calor empleado.

La velocidad (rata de secado) depende de las características particulares de los siguientes dos procesos:

¹ Hanbook Drying 1 Principles, Classification, and Selection of Dryers

Proceso1. La remoción de vapor de agua desde la superficie húmeda esta determinada sobre todo por las condiciones externas, como temperatura, humedad, flujo del aire, el área de exposición superficial y la presión².

Proceso 2. El movimiento interno de la humedad dentro del sólido el cual es función de la naturaleza física del mismo, la temperatura, y su contenido de humedad.

La deshidratación es una operación compleja donde participan la transferencia transitoria de calor y masa, junto con varios tipos de procesos, transformaciones químicas y físicas, que a su vez pueden producir un cambio en la calidad del producto. Entre los cambios físicos que pueden ocurrir incluyen el encogimiento, soplamiento, cristalización, etc. En algunos casos pueden ocurrir reacciones bioquímicas, como cambios en el color, textura, olor u otras propiedades del producto sólido.

El transporte de humedad dentro de un sólido puede ocurrir por cualquiera de los siguientes mecanismos de transferencia de masa:

- Difusión líquida que en los sólidos húmedos, ocurre a una temperatura por debajo del punto de ebullición.
- Difusión de vapor si el líquido se vaporiza dentro del material.
- Difusión superficial, (posible pero no probado)
- Diferencias de presión hidrostática, cuando las tasas de vaporización internas exceden la tasa de movimiento de vapor por el sólido al entorno.

El cálculo de procesos de secado requiere un conocimiento de un buen número de parámetros como las características del material, los coeficientes de transferencia de calor como convección, conductividad, etc. En la mayoría de los

² Handbook Drying Principles, Classification, and Selection of Dryers pagina 4

casos, estas mismos no se pueden calcular por medio de modelos matemáticos si no que son basados en procesos físicos y experimentales que son determinados bajo condiciones de laboratorio bien definidas.

El secado de granos se puede definir como el método universal de adecuar los granos mediante la eliminación del agua hasta un nivel que prevenga el crecimiento de hongos y bacterias, de manera que se conserve el aspecto y la calidad nutritiva del grano como alimento, o su viabilidad como semilla. El nivel seguro de humedad para el almacenamiento de granos se encuentra entre el 10 y el 13%, base húmeda, para las principales especies, dadas las condiciones medias de temperatura y humedad relativa en el trópico.

Los parámetros que influyen en la tasa de secado, cuando se secan granos con aire forzado, son: la temperatura y la humedad relativa ambiente, la temperatura y el flujo de aire de secado, el contenido de humedad inicial y de equilibrio de los granos, la temperatura y, dado el caso, la velocidad de dichos granos dentro del secador si son secadores de tipo continuo. El tipo de grano y las condiciones en la fase de campo también pueden influir en su tasa de secado

1.2 MECANISMO DEL SECADO

Cuando el aire caliente entra en contacto con un alimento húmedo, su superficie se calienta y el calor transmitido se utiliza como calor latente de evaporación con lo que el agua que contiene pasa a estado de vapor.

El vapor de agua, que atraviesa por difusión la capa de aire en contacto con el alimento, es arrastrado por el aire en movimiento, generándose sobre aquel una zona de baja presión y creándose entre el aire y el alimento un gradiente de presión de vapor, este gradiente proporciona la fuerza impulsora que permite

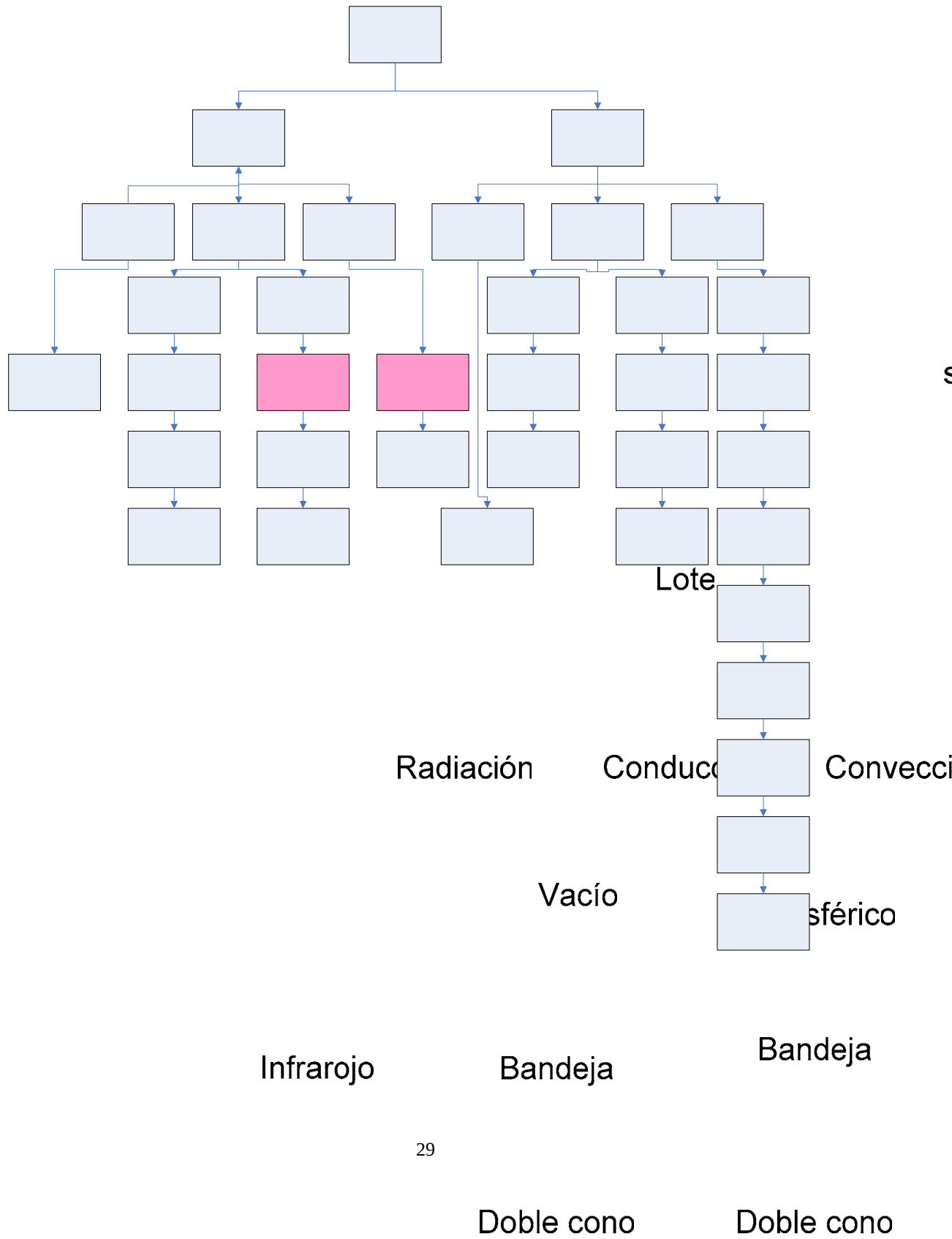
eliminar el agua. El agua escapa de la superficie del alimento por los siguientes mecanismos:

1. Por capilaridad
2. Por difusión, provocada por las diferencias en las concentraciones de solutos entre las distintas partes del alimento
3. Por difusión del agua absorbida en diversas capas sobre la superficie de los componentes sólidos del alimento.
4. Por difusión gaseosa provocada por el gradiente de presión de vapor existente en el interior del alimento.

1.3. CLASIFICACIÓN Y MÉTODOS DE SECADO

Los secadores de granos se pueden clasificar de acuerdo con diversos criterios, tales como el flujo del producto en el secador, según el método de transferencia de calor y la temperatura de secado. La elección de uno de estos criterios depende del enfoque que se quiera dar al asunto. Alguna clasificación puede ser:

Figura 1. Clasificación de secadores Fuente Capitulo 5 Pdf secado



1.3.1 Según el flujo del producto.

a. Lotes:

1. secador de lecho fijo o de capa estacionaria
2. Secador con aire movido por convección natural.

b. Continuos:

1. En cascada o de canaletas
2. De flujos cruzados
3. De flujos concurrentes
4. De flujos contrarios

c. Intermitentes.

1.3.2. Según el método de transmisión de calor a los sólidos húmedos.

SECADORES DIRECTOS.

Secadores indirectos.

Secadores diversos.

Secadores discontinuos o por lote.

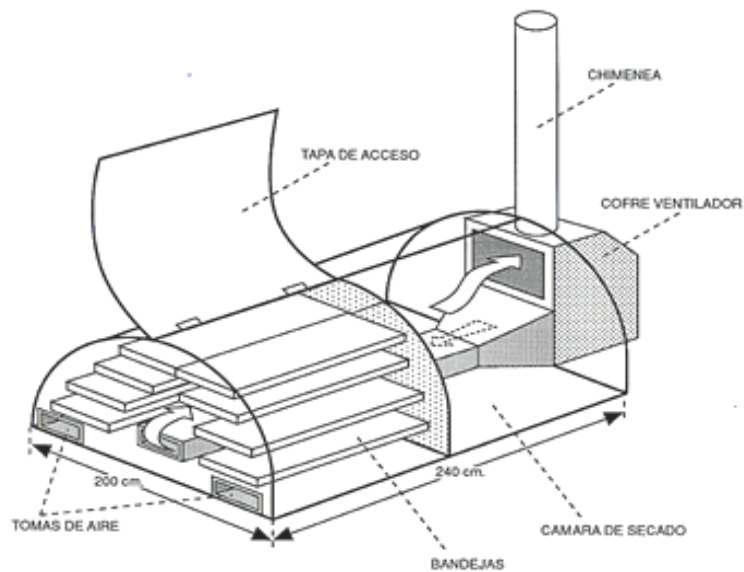
Secadores continuos.

Secadores para sólidos granulares o rígidos y pastas semisólidas.

Secadores que pueden aceptar alimentaciones líquidas o suspensiones

1.3.2.1 Secadores directos. La transferencia de calor para la desecación se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. El líquido vaporizado se arrastra con el medio de desecación; es decir, con los gases calientes. Los secadores directos se llaman también secadores por convección.

Figura 2. Secador directo Fuente: www.gem.es/MATERIALES



Los Secadores directos son aquellos en los que el grano se introduce y descarga en forma continua o intermitente, permaneciendo constantemente llenas las secciones de secado y enfriamiento. Las operaciones de secado y enfriamiento se efectúan en forma simultánea e ininterrumpida.

- Secadores D-Continuos: la operación es continua sin interrupciones, en tanto se suministre la alimentación húmeda. Es evidente que cualquier secador continuo puede funcionar en forma intermitente o por lotes, si así se desea.
- Secadores D-Por lotes: se diseñan para operar con un tamaño específico de lote de alimentación húmeda, para ciclos de tiempo dado. En los secadores por

lote las condiciones de contenido de humedad y temperatura varían continuamente en cualquier punto del equipo.

1.3.2.2 Secadores indirectos

Son secadores en los cuales el medio de calefacción (fluidos de vapor, gases calientes) no entra en contacto con el producto que se seca. El material húmedo es secado por contacto.

Un secador indirecto que use alta temperatura como fuente de calor debe operar de modo tal que el tiempo que dure el material dentro de él sea el mínimo.

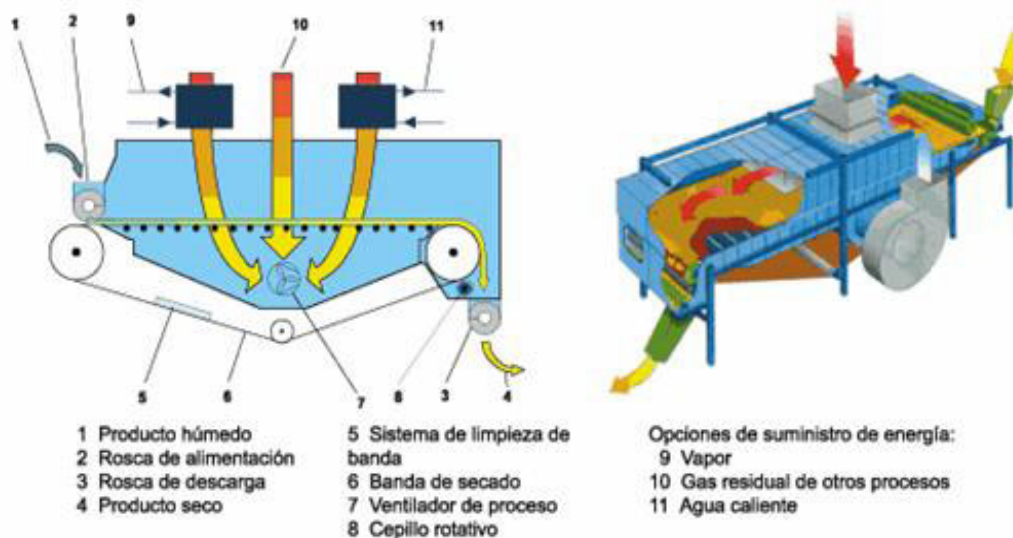
La temperatura de secado afecta directamente la tasa de secado. Cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la tasa de evaporación y la irregularidad del contenido final de humedad, si el producto no se revuelve. Con el aumento de la temperatura, la cantidad de granos supersecos no varía mucho, pero la cantidad de granos con alto contenido de humedad es superior (BROOKER et al., 1974).

El calor de desecación se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de desecación depende del contacto que se establezca entre el material mojado y las superficies calientes. Los secadores indirectos se llaman también secadores por conducción o de contacto.

En general, los secadores indirectos tienen una mayor eficiencia energética que los secadores directos, porque reducen la pérdida de energía. Entre algunas ventajas adicionales están la baja emisión de partículas; esto es beneficioso cuando se secan productos tóxicos o polvorientos ya que cualquier vapor liberado puede ser condensado fácilmente, así se solucionan problemas ambientales, La

elección de un secador indirecto generalmente es determinada por el material para ser secado.

Figura 3. Secador indirecto Fuente: www.otersu.es/pages/at_pro.asp



- Secadores I-Continuos: la desecación se efectúa haciendo pasar el material de manera continua por el secador, y poniéndolo en contacto con las superficies calientes.
- Secadores I-Por lotes: en general los secadores indirectos por lotes se adaptan muy bien a operaciones al vacío. Se subdividen en tipos agitados y no agitados.

Con muy pocas excepciones la mayor parte de los productos agrícolas sufren algún proceso de secado en la industria alimentaría, cada producto debe contener un cierto contenido de humedad, para su procesamiento además un secado excesivo es un derroche de costos y calor, deben entonces mirar los métodos que involucren un mayor ahorro de energía y aquellos procesos que además manejen una calidad aceptable, esta depende del uso final del producto.

2. DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROTOTIPO DE UN SECADOR

El diseño es la organización de materiales y procesos de la forma más productiva, en un sentido económico, con un equilibrado balance de todos los elementos necesarios para cumplir una función. Moholy-Nagy (1895 – 1946),

El proceso de diseñar, suele implicar las siguientes fases:

1. Observar y analizar
2. Planear y proyectar
3. Construir y ejecutar
4. Evaluar, ya que es necesario saber cuando el diseño está finalizado.

En el laboratorio de transferencia de calor surgen una serie de alternativas en proyectos de grado gracias a algunos ejercicios anteriores entre los que ya sea por falla en algunos equipos a causa de sus elementos o por tratar de mejorar su rendimiento permiten plantear nuevas ideas.

Todos estos ejercicios a nivel de laboratorio dan respuesta a inquietudes de diversos procesos industriales, es así como analizamos sobre el equipo de secado de madera, la posibilidad para readecuarlo o replantearlo de manera tal que trabajara con diferentes productos que anteriormente no realizaba granos (café, arveja, etc.), aumentar su capacidad de cinco a diez kilogramos en su cámara de secado, un suministro externo de vapor pero con la variante de que sea indirecto el secado; estos y algunos requerimientos mas que mencionamos mas adelante nos permitió plantear los objetivos de grado.

Para construir el equipo dividimos en varios sistemas que están enumerados a continuación, las pruebas de laboratorio guiadas por los auxiliares comprobaron la operación del equipo.

2.1 NECESIDADES DEL DISEÑO

Inicialmente los elementos que constituían el secador de madera aportaban las bases de los sistemas que requeríamos para nuestro prototipo por ejemplo cámara de secado, sistema de humidificación, sistema de control, sistema de impulsión de aire, alimentación de vapor y su estructura cada uno de estos elementos a diseñar debería entonces partir de unas nuevas necesidades:

2.1.1 Cámara de secado

- Fácil alimentación, fácil apertura y cierre sin fugas.
- Mayor capacidad de 5 a 10 kilos por cochada, además de un sistema de secado por bandejas.
- Una distribución simétrica dentro de la cámara para un par de bandejas.
- Un sistema de visualización del proceso externo.
- Buen aislamiento en las paredes para evitar las pérdidas de calor y a su vez como protección.

2.1.2 Sistema de control y monitoreo

- Un tablero de fácil manipulación, para activar los elementos de trabajo del secador: motores, válvula solenoide, termostato.
- Seguro y de fácil lectura para los equipos de control (higrómetro).
- Fácil visualización de los interruptores de encendido.
- Sistema de protección para los equipos: fusible e indicadores de encendido.

2.1.3 Sistema de impulsión del aire

- Permite un cambio de velocidad.
- Permite la inversión de flujo de aire.

2.1.4 Ductos de ventilación:

- Que permitan la renovación de aire fresco.

- Activación manual.
- Fácil operación en cualquier sentido de trabajo.

2.1.5 Sistema de humidificación

- Su suministro debería ser interno, a partir de la línea de vapor.
- Fácil manejo, a partir de válvulas de activación manual.
- Control seguro, y indicadores de operación.
- Independiente de otros sistemas

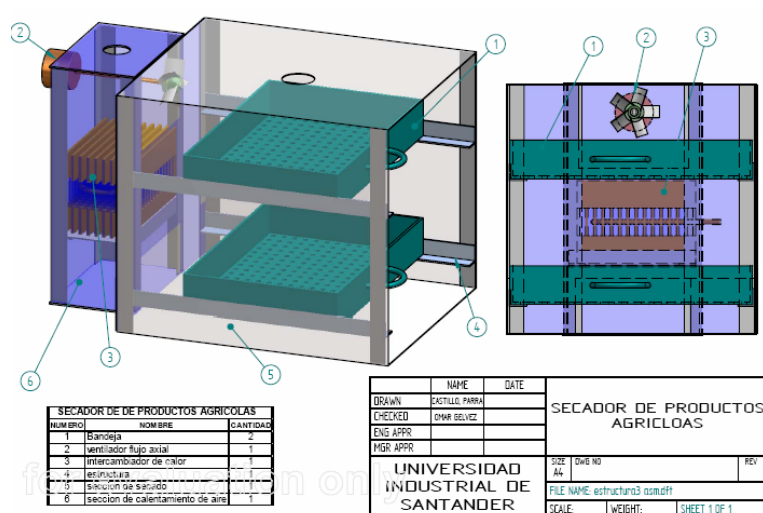
2.1.6 Energía utilizada

- El suministro debe ser por vapor a través de un intercambiador que permita el calentamiento de aire al paso Ver fotografía.
- Sistema de acoples que permita una fácil adaptación a equipos de suministro de vapor externos.

2.2 EJECUCIÓN DEL DISEÑO

Un planteamiento inicial cumplía con ciertos planteamientos, un secado por bandejas, un sistema de impulsión de aire que podía invertirse, fácil manejo aportaba unas condiciones óptimas, funcionales comparadas con modelos previos de secador existentes en el laboratorio pero continuamente surgían algunos interrogantes, en especial sobre la implementación de un sistema que pudiera variar la velocidad, los sistemas de ventilación serían suficientes, algún sistema que permitiera visualizar el proceso, etc.

Figura 4 Prototipo 1 Fuente autor



Cuando se planteo un prototipo final el cual cumplía con los requerimientos mínimos, fue llevado a planos para su respectiva cotización en los talleres de manufactura. (ver figura).

Figura 5 a) Prototipo 2

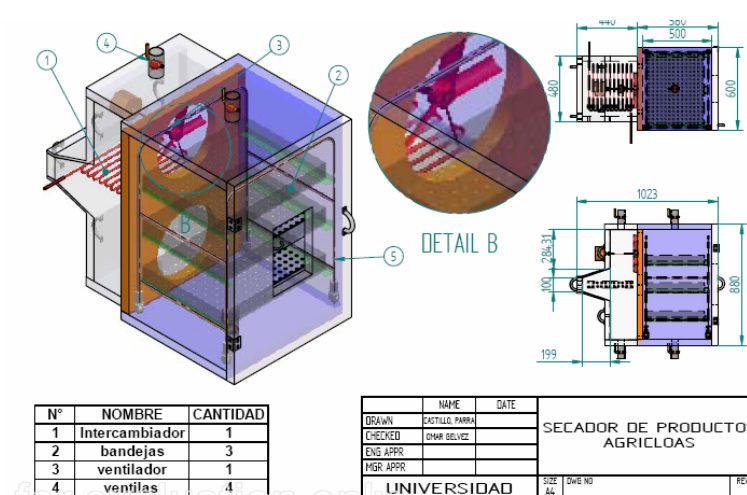
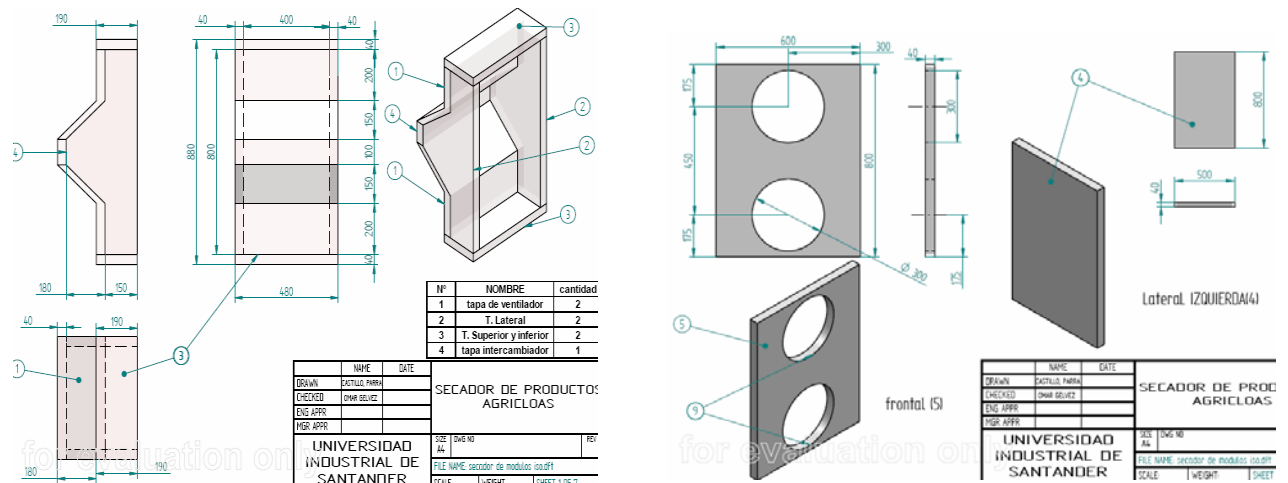
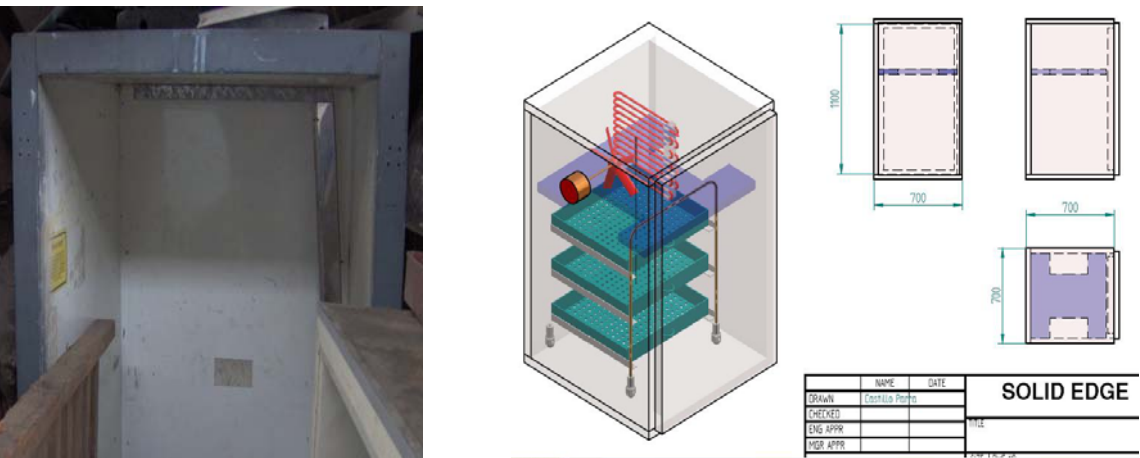


Figura 5 b Planos Prototipo 2



Pero surge la primera confrontación del diseñador, solamente la primera semana de cotizaciones en las industrias que podrían manufacturar la estructura perfectamente aislada, el costo en el lugar mas económico sobrepasaba el presupuesto del proyecto sin que en ese momento incluyera los instrumentos de control, surgía entonces la interrogante de cómo resolver un problema de diseñar un prototipo que se ajustara a todas nuestras necesidades, es así como se toma la decisión de adecuar un diseño sobre una estructura ver figura.

Figura 6. Prototipo 3 Fuente autores



Finalmente se toma la decisión de adecuar el diseño a partir que cumplía con las necesidades del proyecto, una cámara de secado amplia con un buen aislamiento y es esta parte del proyecto la que sirve como punto de partida, seguido fueron la distribución de las bandejas, el numero apropiado, sus dimensiones para tener la capacidad mínima , el sistema de impulsión de aire que debería ser simétrico, a la ubicación del intercambiador, la importancia de su ubicación, cada pauta del diseño esta resumida a continuación en la descripción del prototipo final.

En cuanto al sistema de impulsión de aire al comienzo se planteaba un solo motor, pero en el desarrollo de diseño se vio la necesidad de un segundo motor para evitar incomodidades de traslado, y así obtener una variación significativa en la velocidad. El diseño del ducto principal ya que trabajamos con alimentos fue cromado junto con las paredes laterales. Los ductos de ventilación auxiliares fueron diseñados simétricamente al intercambiador estos últimos permiten una renovación de aire fresco dentro de la cámara, además la simetría tiene como fin un flujo en ambos sentidos Ve rsección 2.3.2.

2.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO PROTOTIPO FINAL.

Este equipo cuenta con una facilidad de traslado, por su bajo peso además de su tamaño y la adaptabilidad de sus sistemas a diferentes equipos.

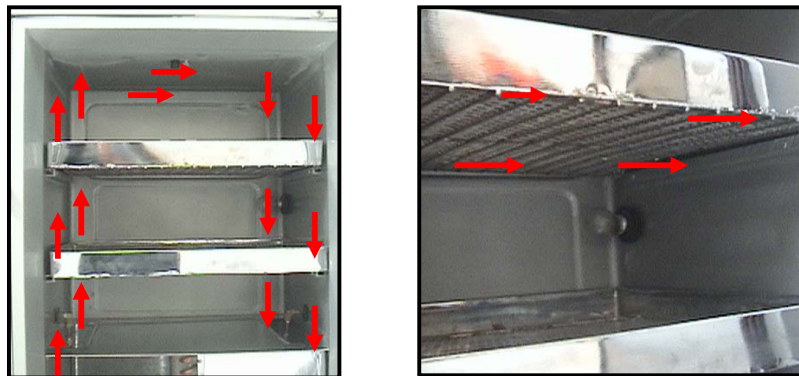
Su diseño desde un inicio fue planteado para que en cualquier falla de algunos de los sistemas que lo componen permita una inspección local, sin que involucre otras partes, es decir cada elemento es independiente en situaciones de mantenimiento.

Podemos entonces ver varios elementos:

- Cámara de Secado.
- Ductos de ventilación.
- Sistema de impulsión de aire.
- Sistema de control.
- Alimentación de vapor.
- Sistema de humidificación.
- Estructura.

2.3.1 Cámara de secado

Figura 7. Cámara de secado. Fuente Autores



Es el espacio donde se ubican las bandejas metálicas de piso perforado, estas fueron cromadas pensando en la manipulación de alimentos, y evitar el deterioro producto de la humedad de estos mismos, la distribución de estas busca aprovechar, al máximo el espacio total de la cámara de secado, por esta razón es simétrica la ubicación de las bandejas la una respecto a la otra. Beneficiando aún más, la circulación de aire y el secado en cada una de las bandejas.

Para permitir una visualización del proceso, incorporamos un sistema de iluminación que permite observar desde el exterior todo a través de la ventanilla también adaptada.

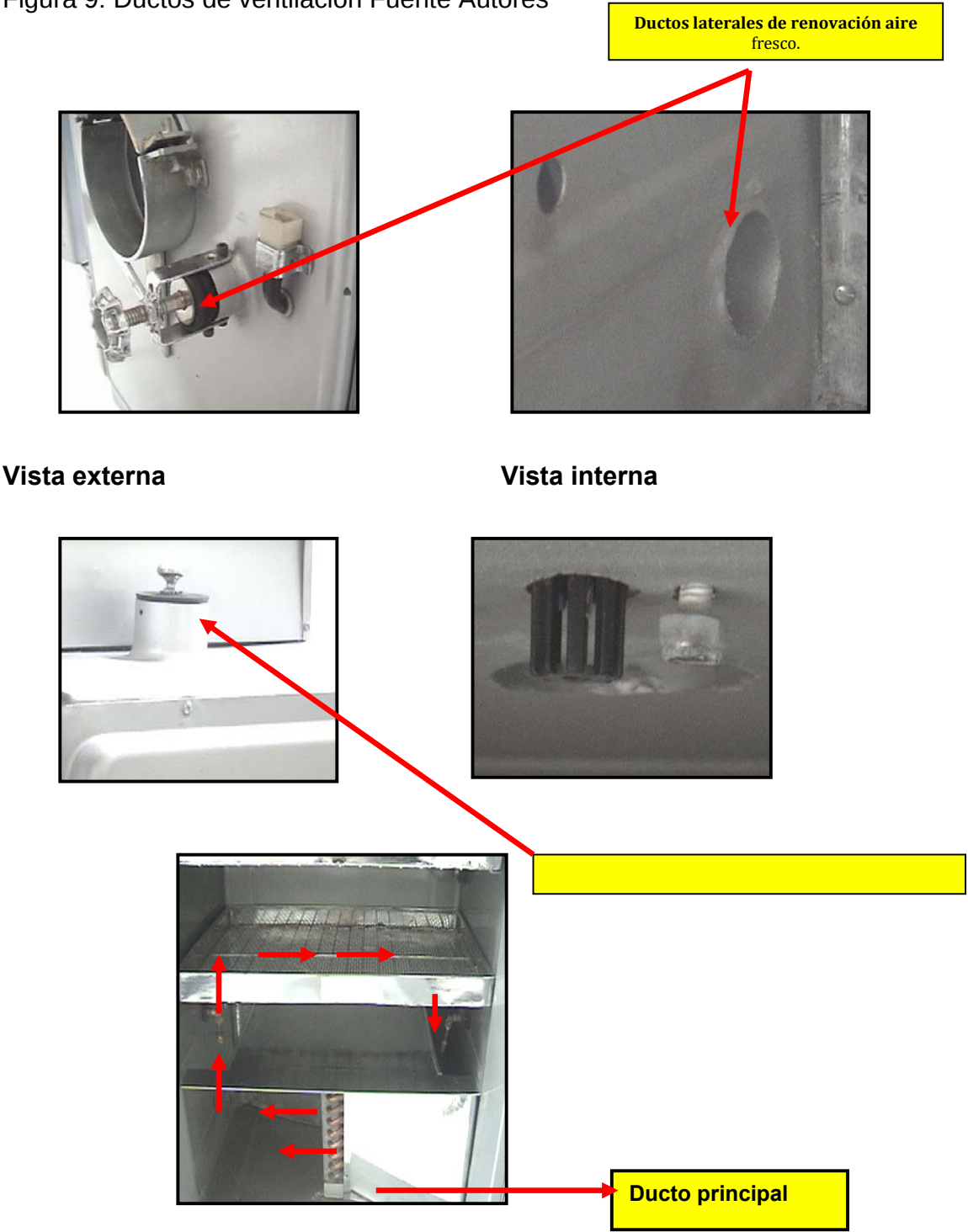
Figura 8. Cámara de secado y sistema de iluminación vista externa



Una ventaja del proyecto es un excelente aislamiento en la cámara manteniendo una temperatura mas uniforme, evitando pérdidas y así aprovechar la energía, producida por el aire caliente, conservando unas condiciones mas estables de secado a lo largo de períodos largos.

2.3.2 Ductos de Ventilación

Figura 9: Ductos de ventilación Fuente Autores



Existen tres:

- a) Ducto principal.
- b) Ducto de renovación del aire fresco.
- c) Ductos laterales de renovación.

El ducto principal fue diseñado simétricamente para cuando se invierta el flujo mantenga similares condiciones de operación.

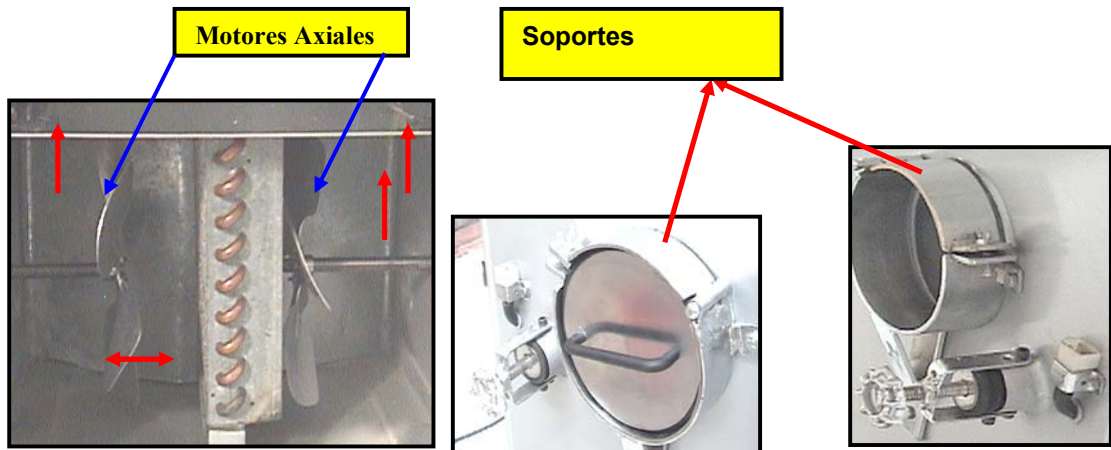
A su vez las tapas laterales son desmontables, ayudando a su vez para un aseo tanto al inicio como al final de cada prueba.

Los ductos de renovación de aire tienen lógicamente igual diámetro e igual altura cada uno de estos tiene un mecanismo de apertura o cierre manual, el ducto de renovación principal de aire ubicado en la parte superior tiene un mayor diámetro que los laterales para aprovechar por su posición, la apertura o cierre es a su vez controlada manualmente por el operario.

2.3.3 Sistema de impulsión de aire. Esencialmente son los motores impulsan aire fresco a través del condensador para calentarlo y llevarlo a través del ducto principal hacia la cámara de secado, la variación de la velocidad de este es una de las principales pautas de estudio del proyecto, podemos obtener dos rangos de velocidades encendiendo un motor, o los dos a la vez, además la dirección del flujo se puede invertir cambiando la posición de las aspas. Algunas medidas tomadas a la salida del ducto con instrumentos registraron una velocidad promedio de 3.5 a 3.7m/seg a la entrada de las bandejas inferiores y 1.3 y 0.3 m/seg en las superiores.

Ubicamos el intercambiador en la parte inferior, y además centrado para que el flujo de aire no sufra alguna alteración en caso de invertir el sentido de giro.

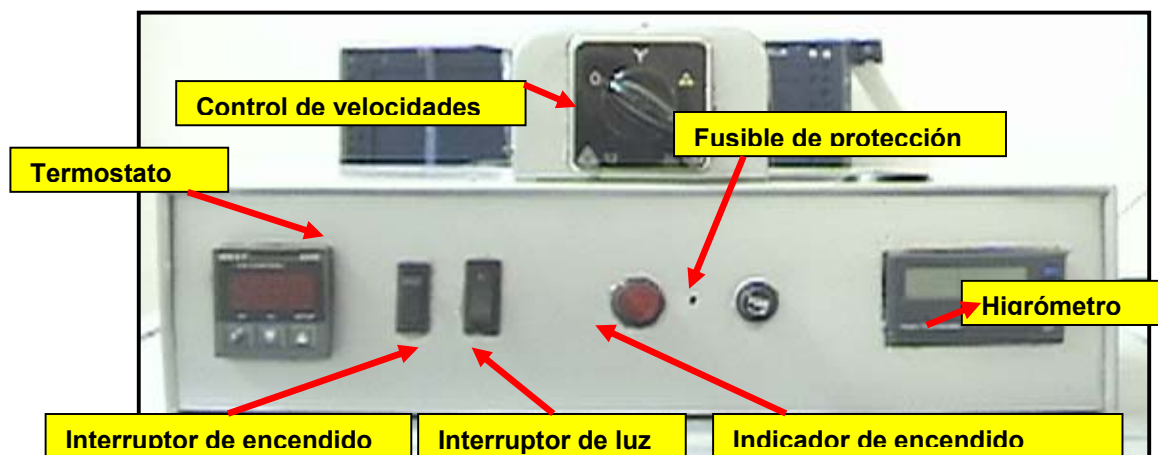
Figura 10 Sistema de impulsión de aire Fuente Autores



2.3.4 Sistema de control. Este equipo cuenta con un sistema de control, que permite operarlo, y manipularlo a lo largo de la prueba, además la mayor diferencia respecto a equipos similares, la marcan los instrumentos como el termostato que controla la válvula solenoide, y automatiza el proceso, las ventajas son varias: ahorro, calidad de secado, control de temperatura en la cámara. Todos estos aspectos mejoran la calidad.

La ubicación es ergonómica, y de fácil manejo. En el panel principal, encontramos: dos interruptores, uno que energiza todo el equipo, y otro de encendido del bombillo un higrómetro que es el lector de humedad y temperatura, el termostato que a su vez controla la apertura o cierre de la servoválvula, el controlador de velocidades enciende uno o los dos motores a la vez. Un sistema de protección mediante un fusible de protección. El circuito de potencia puede verse en el anexo.

Figura 11. Fotografía de sistema de control y monitoreo.



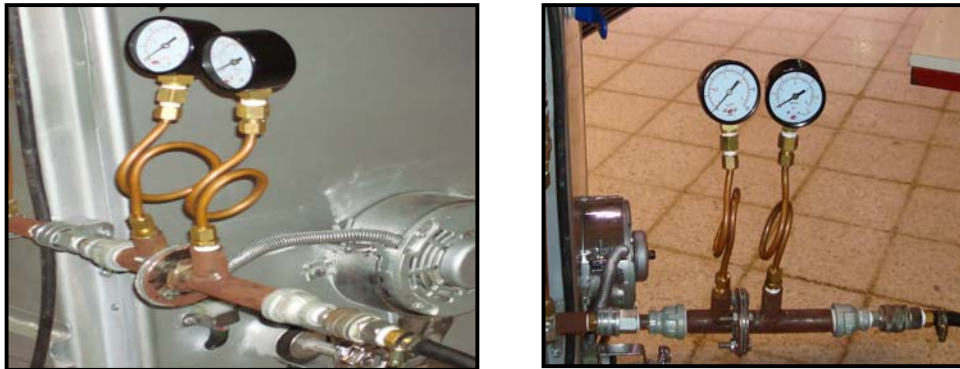
2.3.5 Alimentación de vapor. Toda maquina necesita para su operación, un flujo eléctrico para energizar los equipos de control como los de impulsión de aire y control, el combustible con el cual vamos a calentar el aire es vapor, que atravesará un intercambiador de calor proveniente de una fuente generadora, este equipo cuenta con la ventaja de adaptarse fácilmente mientras se genere unas presión mínima de operación aproximadamente 20 psi.

Como experiencia y además como herramienta de trabajo que servirá para el cálculo de curvas, el laboratorio tiene diferentes herramientas y un sin número de instrumentos de medición que el estudiante debe familiarizarse y utilizar a lo largo de la experiencia para desarrollar un total de competencias en lo referente al secado y a la transferencia de calor.

El manejo de instrumentos que involucra esta prueba desde su comienzo involucra la toma de datos previos. La temperatura, humedad ambiente, peso de muestras, y el flujo de vapor. Cada propiedad tiene su propio instrumento de

medida algunos de estos desarrollados por estudiantes como la platina de orificios instrumento que ayudado con un programa de MATLAB calculamos el un flujo de vapor, que se le aporta al secador (ver figura).

Figura 12. Platina de orificios Fuente autores

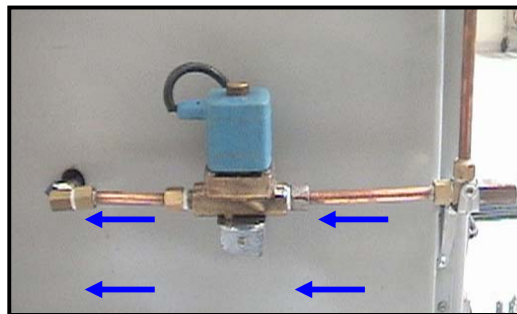


El sistema de alimentación lo comprenden:

- a) Servovalvula
- b) Intercambiador de calor.
- c) Trampa de vapor
- d) Racores y tubería.

2.3.5.1 Servo válvula

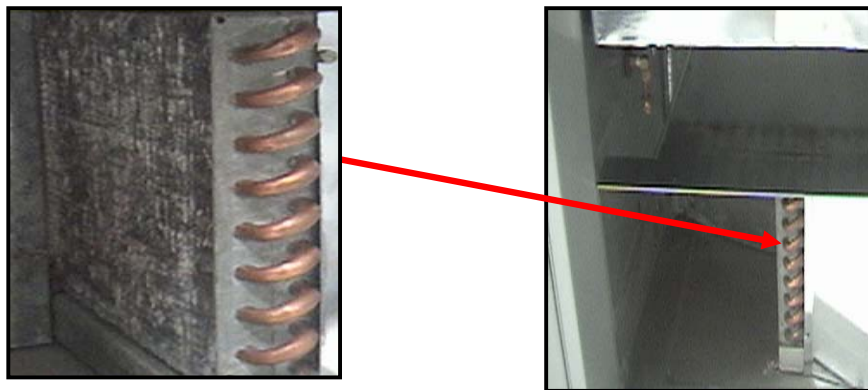
Figura 13 Servovalvula Fuente autores



Su ubicación esta posterior al acople de alimentación, el control de su apertura es a través del termostato, según la temperatura que se requiera en la cámara de secado. Su mantenimiento es sencillo y a su vez necesario para evitar alteraciones que influyan con el flujo.

2.3.5.2 Intercambiador de Calor

Figura 14. Ubicación intercambiador de calor Fuente Autores.



Es el corazón del equipo, su funcionamiento es el que genera la batería de todo el proceso, su ubicación esta en el centro del ducto principal, y es a partir de esta ubicación donde se desarrollo la distribución de cada uno de los elementos que involucran el secador.

El intercambiador será el que mantendrá un flujo de vapor generando el calor necesario para que al impulsar el aire a diferentes velocidades a través de este cree un flujo de calor recomendado para el secado de productos agrícolas.

La alimentación de vapor es a través de una línea proveniente de la servovalvula. Y la línea de salida va directamente a una línea conectada a una trampa de vapor.

2.3.5.3 Trampa de vapor

Figura 15. Trampa de vapor Fuente Autores



Su ubicación esta en la línea de salida del intercambiador manteniendo una presión mínima, ayudando de esta manera a un aprovechamiento optimo de la energía generada.

A través del condensador se pueden plantear pruebas que permitan estudiar la cantidad de energía requerida en una prueba acumulando la cantidad de condensado generada.

2.3.5.4 Racores y tubería. Como fue mencionado en el diseño las diferentes distribuciones que se plantearon inicialmente fueron las que generaron la ubicación final de la tubería, aprovechando los espacios.

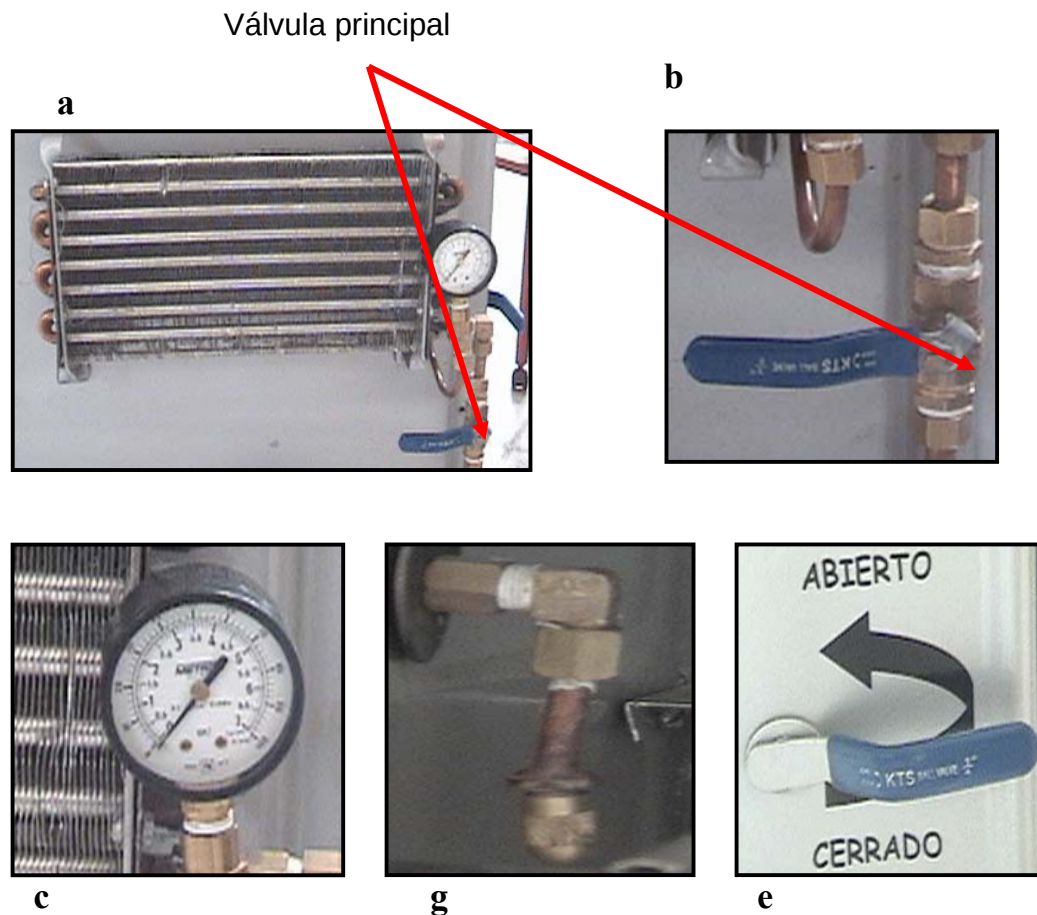
Figura 16. Sistema de racores Fuente autores



2.3.6 Sistema de humidificación

- a) Condensador
- b) Válvula Principal.
- c) Manómetro.
- d) Tubería
- e) Válvulas Secundarias.
- f) Codos.
- g) Atomizadores.
- h) Racores.

Figura 17. Sistema de humidificación Fuente autores.

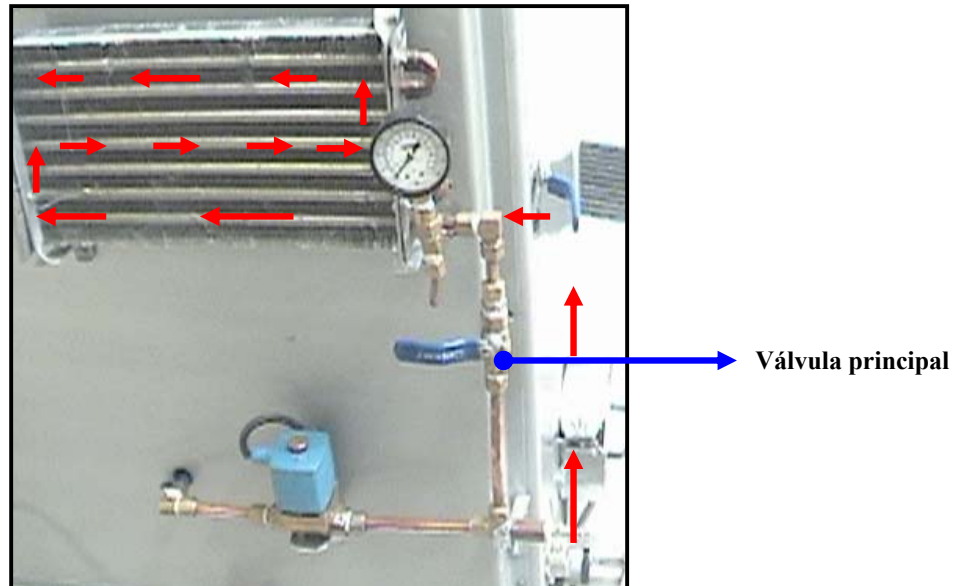


Es totalmente independiente a todo el sistema, su operación depende del paso que el operador le de al permitir el flujo de vapor, al abrir la válvula principal (a) que lo alimenta, se produce condensado y a partir de este momento se tiene disponibilidad. En el momento requerido el operador acciona cualquiera de las dos válvulas (e) para permitir el flujo a través de los atomizadores (g) e introducir cierto contenido de flujo que será impulsado en la cámara estas fueron diseñadas de manera tal que operan dependiendo de la posición que se efectúe la prueba, ya sea con una velocidad baja, (accionando un motor) o a una velocidad más alta

(accionando los dos motores). La simetría permite de tal manera que la posición de cada válvula secundaria, tubería, distancia geométrica de atomizadores no refleje ninguna alteración a la hora de operar una prueba, evitando de esta manera que si existe alguna variación en alguna prueba de secado no sea esta la causa el control de presión esta a cargo de la visualización de presión por medio del manómetro (c).

Cuenta además con un número igual de racores y accesorios de igual dimensión al lado y lado que a su vez permite un desmonte versátil, cabe anotar la previa verificación con una presión superior que no existan fugas en las uniones. Para un correcto aprovechamiento hay que limitar la presión de alimentación de vapor en cada prueba esta no debe exceder los 20psi.

Figura 18. Accionamiento del humidificador Fuente autores



2.3.7 Estructura. La estructura sobre la cual se basa el equipo es en si un cajón aislado con una puerta, sobre una base rodante, permitiendo una distribución simétrica gracias a su geometría, aprovechando, todo el equipo.

Figura 19 Estructura fuente autores



3. DISEÑO TERMODINÁMICO Y TÉRMICO

Comprende a la determinación de los requerimientos globales de energía para secar un producto y a la cantidad de aire ($\dot{m}_a$) que hay que mover a través del producto para garantizar el secado dentro de los parámetros de diseño.

El proceso de diseño termodinámico esta basado en los requerimientos mínimos que se desean imponer al secador.

En este capítulo también se determina el calor necesario para que el proceso de secado ocurra o diseño térmico

3.1 DISEÑO TERMODINÁMICO

3.1.1 Requerimientos básicos del secado. El diseño busca satisfacer una necesidad básica, que para el caso es la extracción de humedad en los productos agrícolas y en la madera desde un contenido de humedad conocido que puede ser verificado experimentalmente, hasta los niveles recomendados de almacenamiento o molienda mediante un equipo artificial de secado. Identificado el problema enumeramos las variables a trabajar y procedemos a calcular algunas de estas, consignándolas en una tabla los resultados.

Para el contenido de humedad final, fijamos unos porcentajes (tabla 1) que corresponden a almacenamientos superiores a treinta días y los contenidos de humedad inicial corresponden a valores de recolección. Para efecto de estudio establecemos la cantidad mínima del material y además fijamos un tiempo de secado que junto con la selección del producto son las condiciones básicas de diseño.

Basados en estos datos tomaremos como parámetro inicial de diseño el porcentaje más alto de humedad.

Tabla 1. Requerimientos básicos de secado.

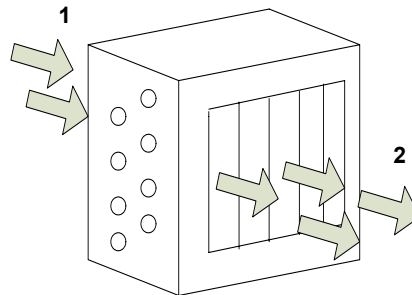
Producto	Cantidad Kg	ω inicial (Kg vapor/Kg aire seco)	ω final (Kg vapor/Kg aire seco)	tiempo secado hrs.*Ton
Yuca	5	60-70%	10-13% datos T	10-20 hrs.
Arroz	5	23-26% Humedad recolección	13% Entrada proceso trilla	10-16 hrs.
Café	5	32-55%	12%	12-18 hrs.

A partir de los requerimientos básicos, el diseño sigue una secuencia lógica iniciando por el cálculo del potencial de secado, para conocer los valores del aire durante el proceso en cada una de las fases, seguidamente calculamos el flujo de aire necesario para realizar el proceso de deshidratación.

3.1.2 Potencial del Secado de aire. El movimiento del aire a lo largo de la prueba de secado sufre diferentes cambios que podemos consignarlos en la figura 22. Entendiendo que el potencial de secado es el delta de humedad específica que hay entre los puntos 2 al 3 figura 22, lo precisamos como: $\Delta\omega$.

En el proceso de 1-2 el aire pasa a través del intercambiador de calor perpendicularmente donde gana energía al paso por la superficie caliente y eleva su temperatura, el continúa dependiendo del sentido y velocidad de impulsión fijado durante la prueba .

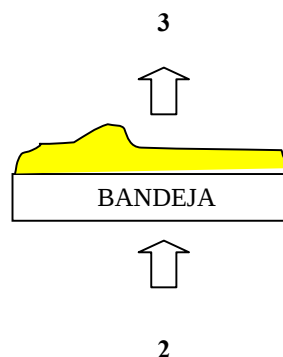
Figura 20 Representación del paso del aire a través del intercambiador de calor



Fuente autor.

A continuación el aire caliente pasa a través de la capa del producto húmedo que se encuentra en las bandejas proceso de 2-3, removiendo cierta cantidad de humedad, en este punto el aire pierde temperatura pero aumenta su humedad.

Figura 21. Representación del paso del aire a través del producto.



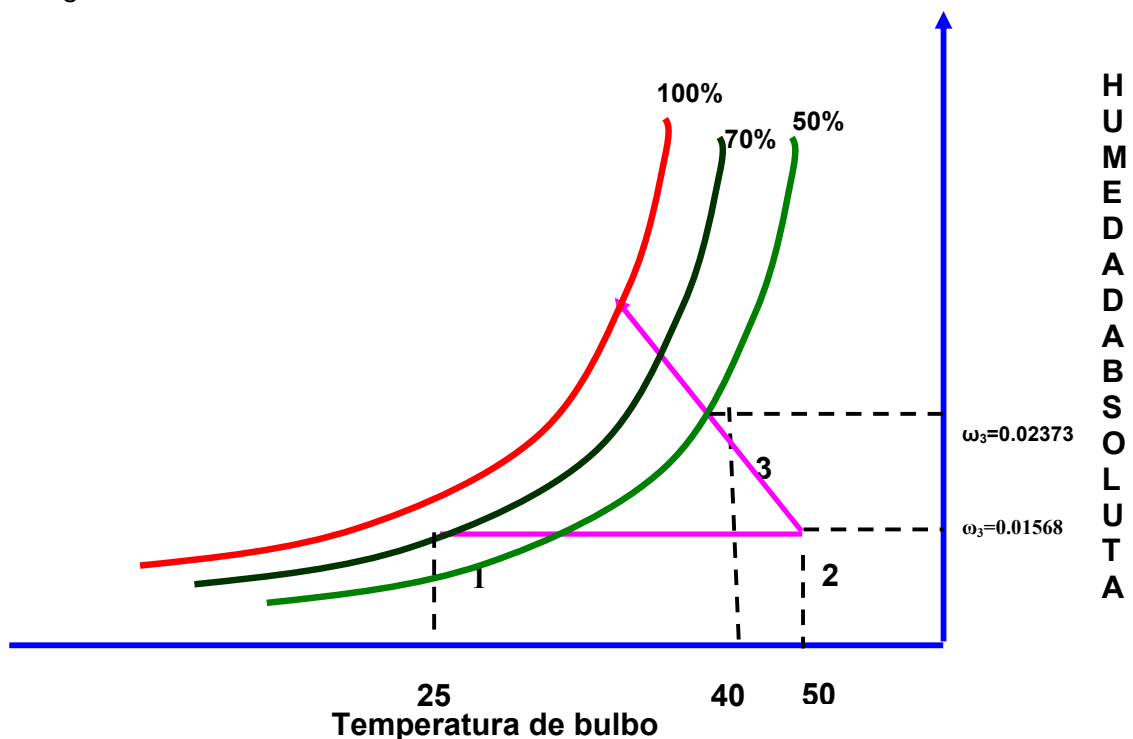
Fuente Autor

Para el diseño debemos establecer las condiciones ambientales mínimas; Normalmente la Ciudad de Bucaramanga maneja unos rangos promedios de humedad relativa del 70%, una presión barométrica aproximadamente de 676 mm de hg, 0.896 bar y una temperatura ambiente promedio de 25°C. Estas condiciones básicas se tienen en cuenta para cualquier cálculo termodinámico, y serán las pautas para el nuestro.

El proceso vuelve a repetirse, consecutivamente hasta alcanzar un nivel de humedad previamente definido para el producto requerido, el proceso queda

consignado en la figura 22. El aire a su paso por el material gana humedad en el lentamente hasta el punto de saturación, es por esto la importancia de un instrumento de medida para su control (higrómetro), cuando la lectura del instrumento marque una elevada concentración es necesario hacer una renovación de aire fresco a través de las ventilas, (ver figura 9).

Figura 22 Potencial del secado del aire Fuente autor



Para efectos de análisis posteriores consignamos en la tabla 2 los valores de humedad en los diferentes puntos que representan los estados anteriormente mencionados

Tabla 2. Resultados en los diferentes puntos de potencia del aire. Fuente autor

Estado	Temperatura °C	ϕ	Humedad	Presión Saturación Pa	Presión Pa
1	25	70	$1.568 \cdot 10^{-2}$	3166	90125.92
2	50		$1.568 \cdot 10^{-2}$		90125.92
3	38	50	$2.373 \cdot 10^{-2}$	6624	90125.92

3.1.3 Cálculo del flujo mínimo de aire requerido. Para calcular el flujo de aire requerido primero tenemos que definir que es la humedad de un producto tanto en base seca como en húmeda.

- Humedad en base seca: se define como la relación existente entre el peso del agua contenida en el producto con respecto a la materia seca.

$$\omega_{db} = \frac{W_w}{W_d} * 100 \text{ Ecuación 3.1}$$

Donde:

ω_{db} = Contenido de humedad en base seca, (%).

W_w = Peso del agua contenido en el producto, (Kg.).

W_d = Peso del producto seco, (Kg.).

- Humedad en base húmeda: Se define como la relación del peso del agua contenida en el producto, respecto al peso total de este.

$$\omega_{wb} = \frac{W_w}{(W_w + W_d)} * 100 \text{ Ecuación 3.2}$$

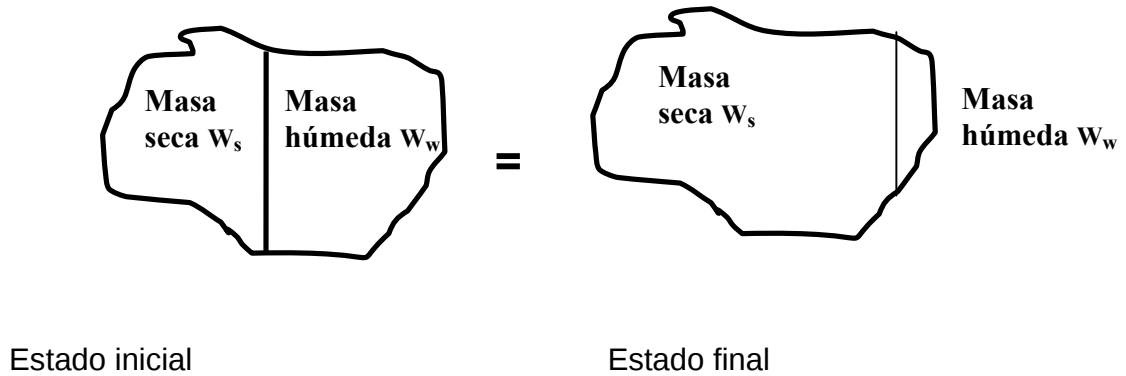
Donde:

ω_{wb} = contenido de humedad en base humedad, (%).[€]

Teniendo claro las condiciones de donde empezamos y a las que queremos llegar figura 23, calcularemos el flujo de aire requerido, el cual contribuirá para el diseño de otros elementos.

[€] Diseño y construcción y evaluación de un prototipo de secador para granos.

Figura 23. Condiciones iniciales y finales del producto a secar Fuente Autores.



Basados en las definiciones anteriores planteamos las ecuaciones que permiten cuantificar el contenido de humedad:

$$\omega = \frac{W_w}{W_w + W_s} = \frac{W_w}{W_T} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Se requiere determinar la masa seca del producto a partir del conocimiento del contenido de humedad que se despeja.

$$W_s = W_T (1 - \omega) \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Si se quiere conocer la masa de humedad en el producto, para cualquier contenido de humedad ω , despejando se obtiene:

$$W_w = \frac{W_s \cdot \omega}{(1 - \omega)} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

La velocidad de variación del contenido de humedad del grano puede definirse como:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_i - \omega_f}{t} \quad \text{Ecuación}$$

Proceso de Cálculo del flujo de masa para una muestra de 5 Kilogramos de Café desde una humedad inicial del 55% hasta una humedad final del 12%.

Tabla 3. Proceso de Cálculo del flujo de masa

Nº	Parámetro	Símbolo	cantidad
1	Peso total de la muestra	W_i (Kg)	5 kilogramos
2	Humedad inicial	ω_i	0.55
3	Humedad final	ω_f	0.12
4	Tiempo de secado	Δt	16 horas
5	Cantidad humedad retirar	ω_r %	$\omega_i - \omega_f = \omega_r$ $\omega_r = 0.88$
6	Peso total de la muestra final	W_f (Kg)	$W_s + W_{\omega f} = W_f$
7	Peso de la humedad inicial	$W_{\omega i}$ (Kgs)	$W_{\omega i} = W - W_s$ $W_{\omega i} = 5 - 2.25$ $W_{\omega i} = 2.75 \text{ Kg}$
8	Peso de la masa seca	W_s (Kg)	$W = W_i * (1 - \omega_i)$ $W_s = 2.25 \text{ Kg}$
9	Peso de la humedad final	$W_{\omega f}$ (Kg)	$W_{\omega f} = \frac{\omega_f \cdot W_s}{1 - \omega_f}$ $W_{\omega f} = 0.307$
10	Potencial del secado del aire	$(\omega_3 - \omega_2)$	$2.373 \cdot 10^{-2} - 1.568 \cdot 10^{-2}$ $0.805 \cdot 10^{-2}$
11	velocidad del variación del contenido de humedad del grano	$\Delta \omega$ Kg vapor/Kg aire seco	$\Delta \omega = \frac{W_{\omega i} - W_{\omega f}}{\Delta t} = 4.241 \cdot 10^{-2}$
12	Masa del aire requerido.	$\dot{m}$ Kg / seg	$\Delta \omega = \dot{m}(\omega_3 - \omega_2)$ $\dot{m} = 5.269 \cdot 10^{-3} \text{ Kg / seg}$
13	Densidad del aire a T(K)	Kg/m^3	$\rho_{320} = 1.106 \text{ Kg/m}^3$
14	Caudal requerido Q Cfm	$Cfm = \frac{\dot{m}}{\rho}$	$\dot{m} = \rho * Q$ $\dot{Q} = 10.09 \text{ cfm}$

3.2. DISEÑO TÉRMICO

3.2.1 Balance Termodinámico del secador. Como parte del diseño térmico debemos plantear todos los calores que están involucrados en el ejercicio mediante un balance general podemos entonces deducir el calor mínimo que debemos suministrar, este calor es el criterio mínimo de selección de otros elementos que conforman el secador como el intercambiador de calor.

Este balance esta soportado con datos obtenidos del Handbook del secado en caso de los calores específicos Tabla 4, y el resultado de los planteamientos anteriores refiriéndonos a los coeficientes de convección y los calores de Perdida.

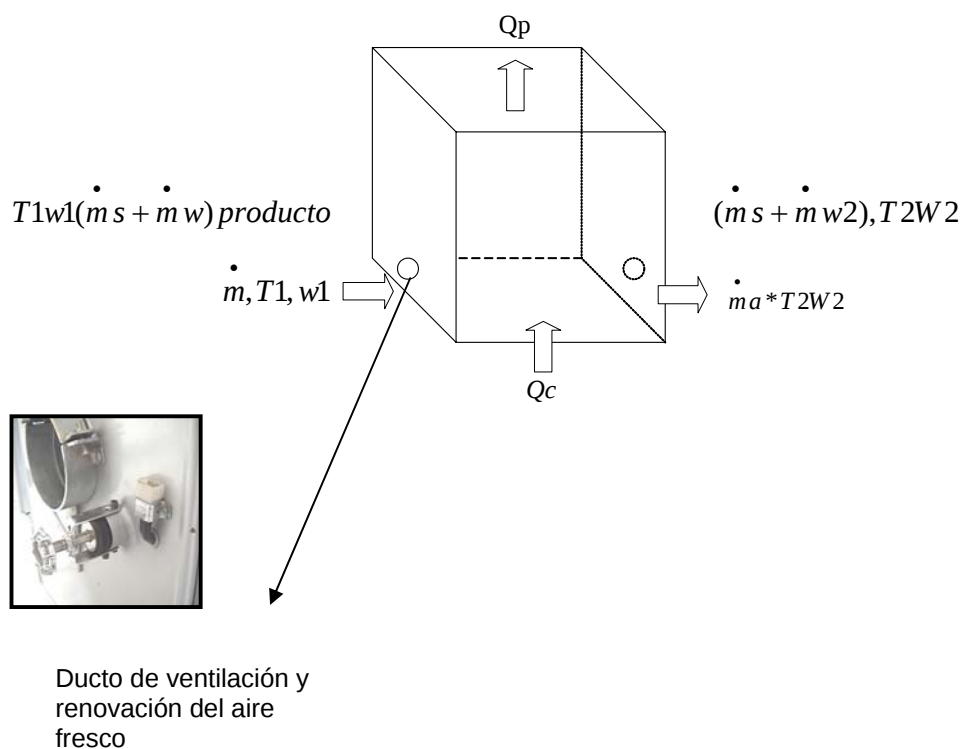
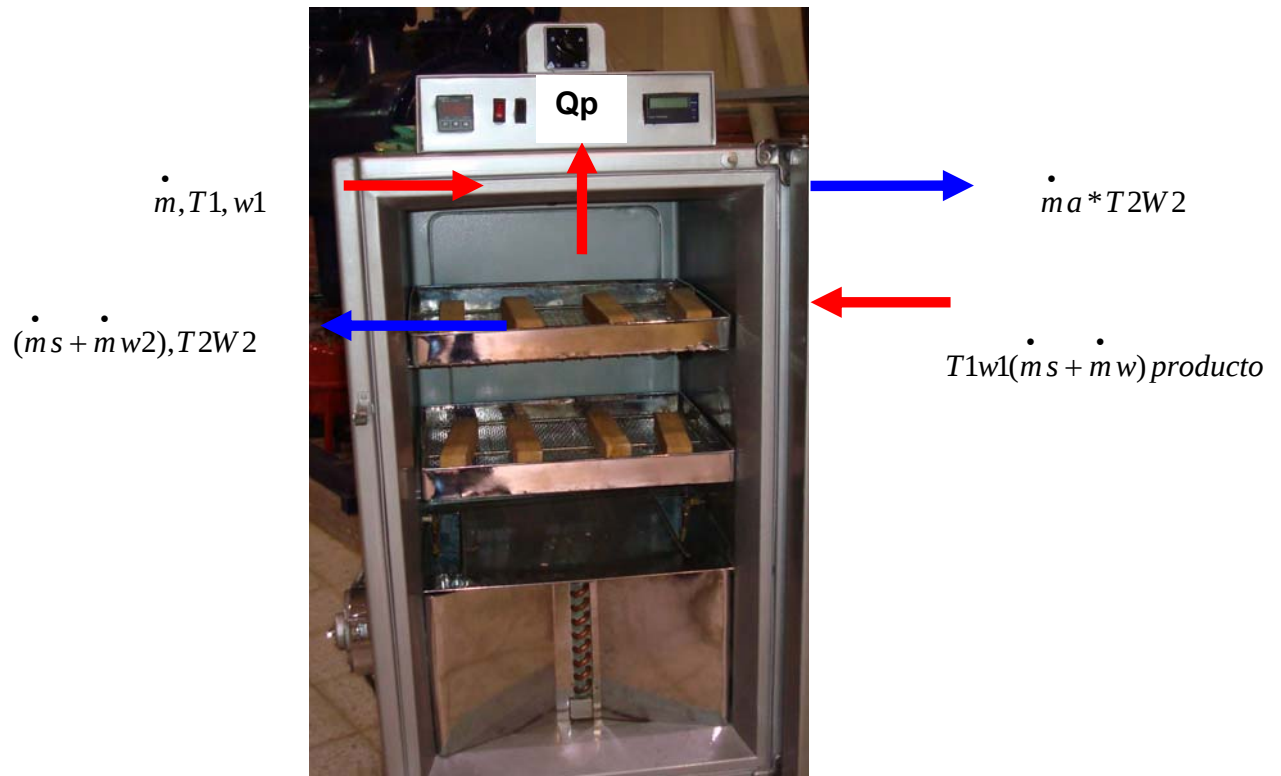


Figura 24 Balance termodinámico del secador. Fuente autores



Balance de energía:

$$Q_c = Q_{\text{calor}} + Q_w + Q_{\text{producto}} + Q_p \quad (1)$$

Donde:

$$Q_{\text{calor}} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

$$Q_w = \dot{m}_{w2} h_{w2} - \dot{m}_{w1} h_{w1}$$

$$Q_{\text{producto}} = \dot{m}_s C p_3 (T_2 - T_1)$$

Reemplazando en la ecuación principal 1, obtenemos:

$$Q_c = \dot{m}(h_2 - h_1) + \dot{m}_s C p_3 (T_2 - T_1) + \dot{m}_{w2} h_{w2} - \dot{m}_{w1} h_{w1} + Q_p$$

Donde:

$$h = T + w * h_v$$

$$C_{pe} = 1.356 + 5.7859 \cdot m \text{ (Kj/KgK) fuente cenicafe}^{\Delta}$$

$$C_{py} = 5.530 + 5.7859 \cdot m \text{ (Kj/KgK)}^{\text{N}}$$

Donde:

C_p = Calor específico del café.

C_{py} = Calor específico de la yuca

m = contenido de humedad

h_v (Kj/Kg) = entalpía de vapor

w = humedad

•
 $\dot{m}_s$ = rata de material seco

•
 $\dot{m}$ = Caudal de aire necesario

•
 $\dot{m}_{w1}$ = Rata másica de agua en el producto al a entrada.

•
 $\dot{m}_{w2}$ = Rata másica de agua al final del producto.

Q_p = Calor de perdida (Watt)

Q_c = Calor necesario para realizar el secado (Watt)

3.2.2 Fórmulas para la Determinación de Calor específico de productos agrícolas.

Tabla 4. Ecuaciones para determinar el calor específico de productos agrícolas[∞]

semilla	Ecuación y rango de trabajo
Semilla de alfalfa	$C = 1172 \ln 33M'$, $0 < M' < 28\%$
Garbanzos	$C = -4.19 \cdot 10^{-3} + 1.19 \cdot 10^{-1}\theta + 2.15 \cdot 10^{-2}\theta^2 - 3.73 \cdot 10^{-4}M - 1.65 \cdot 10^{-3}M^2 + 1.38 \cdot 10^{-2}M\theta$ $292 < T < 308 \text{ K}$, $0.12 < M < 0.32$
Grano (descascarado)	$C = 1470 + 36M'$, $1 < M' < 30\%$

^Δ Tablas 24.11, Handbook of industrial of drying

^N Fuente investigación y postgrado Vol.Nº 12 Caracas 2001

[∞] Fuente Handbook Drying

Lentejas	$C=[0.577 + 0.00710 + (0.0622 + 0.0914M) \cdot 10^2 M]1000$ $10 < T < 80^\circ\text{C}, 0.02 < M < 0.35$
Avena	$C=1277 + 32M', 10 < M' < 17\%$ $C=992 + 50M', 12 < M' < 18\%$
Semilla de colza	$C=1356 + 32M', \text{ at } 19.4^\circ\text{C}$ $C=1288 + 28.4M', \text{ at } 1.7^\circ\text{C}$ $1 < M' < 20\%$ $C=1328 + 28.0M', \text{ at } 24.4^\circ\text{C}$
Arroz (a la intemperie)	$C=1109 + 45M', 10 < M' < 17\%$
Rice (white)	$C=1197 + 38M', 10 < M' < 17\%$
Sorgo	$C=1397 + 32M', 0 < M' < 30\%$
Soya	$C=1637 + 19M', 0 < M' < 24\%$
Trigo	$C=1260 + 36M', 5 < M' < 35\%$ $C=1098 + 40 \cdot 10^2 M, 0 < M < 0.25$ $C=1184 + 30M', 0 < M' < 13.6\%$ $C=1452 + 30M', 1 < M' < 32\%$

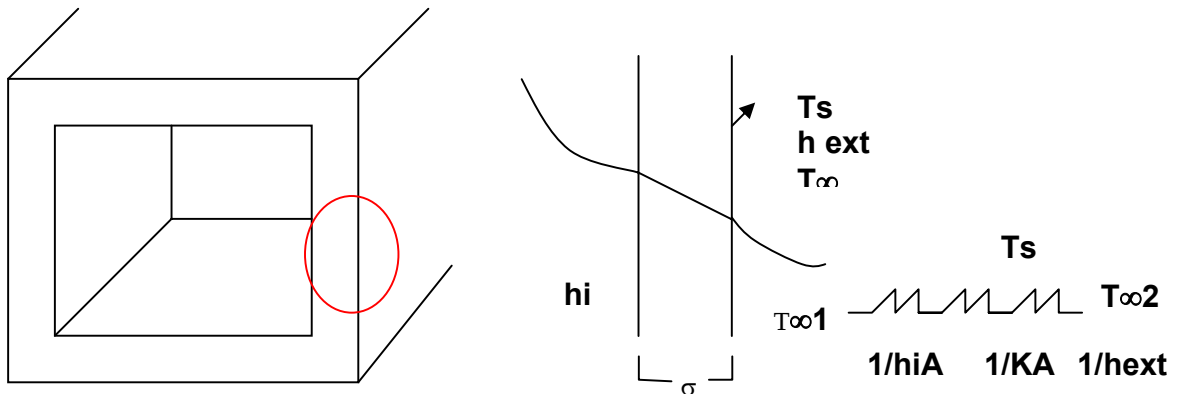
^aC Calor específico (J/(kg K)).

b₀ Medida como temperature del aire en equilibrio con las semillas l

^cM, contenido de humedad (kgH₂O/kg db) y M', contenido de humedad t%wb.

Fuente TABLE 24.11 Formulas for Specific Heat Determination of Selected Agricultural Products Handbook drying

3.2.3. Calculo de calor de pérdida y espesor de las paredes. A partir del caudal obtenido continuamos con el diseño de los diferentes elementos que constituyen el equipo. El espesor de las paredes es un factor importante por la necesidad de un buen aislamiento y la importancia que tiene este en el ahorro de energía además de su función principal que es mantener una temperatura homogénea dentro de la cámara de secado alrededor de los 50°C para nuestro diseño y una temperatura exterior superficial máximo de 35°C para seguridad del operador, planteamos gráficamente los elementos que involucran el proceso de cálculo, figura 24 y en una tabla enumeramos paso a paso el cálculo de ellos. Tabla 5



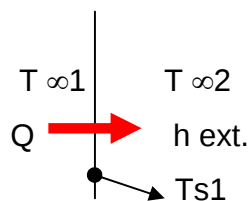
3.2.3.1 Cálculo de los coeficientes de convección. Para poder deducir el espesor de las paredes tenemos que conocer antes los coeficientes de convección externo e interno como mencionamos anteriormente enumeramos el proceso en la siguiente tabla, para el caso del coeficiente de convección interna esta basado, en la ecuaciones de convección forzada.

Tabla 5. Cálculo de los coeficientes de convección Fuente Autores

Nº	Parámetro	Símbolo	Cantidad
1	Temperatura superficial	T_s K	35°C
2	Temperatura interna en la cámara de secado.	$T_{\infty 1}$	25°C
3	Temperatura ambiente.	$T_{\infty 2}$	50°C
4	Temperatura media	T_f	$T_f = \frac{T_s + T_{\infty}}{2}$
5	Número de Raleigh	Ra	$Ra = \frac{gB(T_s - T_{\infty})}{\nu * \alpha}$ $Ra = 156596568.128$
6	Nudsel	Nu	$Nu_l = 0.68 + \frac{0.67 Ra^{1/4}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}}$
7	Propiedades del aire evaluadas a 300K	K ν Pr	$K = 26.3 \cdot 10^{-3} \text{ W/mK}$ $\nu = 15.89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$ $Pr = 0.69$

8	Coeficiente de convección externo	h_{ext}	h_{ext}=K/L*Nu_l 2.185w/m²k
9	Coeficiente de difusividad	α m ² /seg	$\alpha=22.5*10^{-6}$ m ² /seg
10	espesor	L (mtrs)	0.1mtrs
11	Reynolds	Re	$Re_{ynolds} = \frac{v * L}{\nu}$ 1969.95
12	velocidad	Vm/seg	0.049
13	Propiedades evaluadas a 320 k		K= 0.0281 W/mK $\rho=1.106$ Kg/m ³ $\nu=17.44*10^{-6}$ m ² /seg Pr= 0.69 A _T = 0.25mts.
16	H interno promedio	$\bar{h}=W/m^2K$	$\bar{h} = 0.664 * \frac{K}{L} * Pr^{(1/3)} \sqrt{Re_l}$ 1.051 W/m ² K

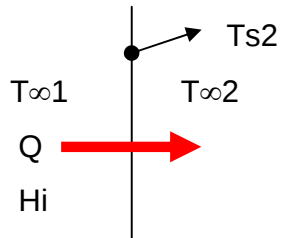
3.2.3.2. Cálculo del espesor de la pared. Antes de cualquier otro calculo, con los datos conocidos debemos obtener el Q_p= Calor de pérdidas a través de cada una de las paredes.



$T_{\infty 2}$	$T_{\infty 1}$	h ext	A	Q _p
25 °C	50°C	2.185w/m ² k	0.35mts ²	3.815 W

$$Q_p = h_{ext} * A (T_{\infty 1} - T_{\infty 2})$$

A partir de este valor podemos calcular incógnitas como la temperatura superficial Ts2 mediante:

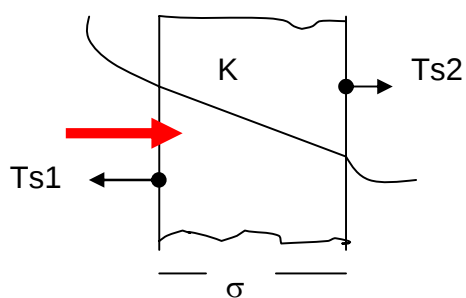


$T_{\infty 1}$	Q_p	A	h_i	T_{s2}
50°C	3.815 W	0.35 m ²	1.051 w/m ² k	39°C

$$Q = h_{int} \cdot A (T_{\infty 1} - T_{s2})$$

Conociendo las temperaturas de las paredes podemos deducir un espesor de pared para el aislamiento.

T_{s2}	T_{s1}	K	Q	σ
39°C	30°C	Cond. Fibra de vidrio.	3.815 W	4.063 cm



$$Q = K \cdot A (\Delta T) / \sigma$$

3.2.3.3. Cálculo de pérdida de calor a través de todas las paredes

Teniendo en cuenta que las pérdidas de calor incluyen todas las caras tanto de las paredes frontal, posterior.

$$Q_F = h_{ext} \cdot A_f (T_{s1} - T_{s2})$$

$$Q_{TP} = 2 \cdot Q_F + 4 \cdot Q_L$$

Donde:

Q_F = calor perdido pared frontal

Q_L = Calor perdido pared lateral

Q_{TP} = Calor total perdido en la cámara de secado

$T_{sup.1}$ °C	$T_{\infty(2)}$ °C	Q_L W	Q_F W	Q_{TP} W
35	25	3.815	2.725	20.71

Tabla de resultados del balance de energía

Producto	C_p Kj/Kg	$\dot{m}_a$ Kg/seg	$\dot{m}_{w1}$ Kg/seg	$\dot{m}_{w2}$ Kg/seg	h_1 (Kj/Kg)	h_2 (Kj/Kg)
Café	4.358		$3.91 \cdot 10^{-5}$	$5.31 \cdot 10^{-6}$	64.937	111.271
Yuca	9.58013	$5.620 \cdot 10^{-5}$	$2.62 \cdot 10^{-5}$	$3.55 \cdot 10^{-6}$	64.937	111.271

Tabla 6 Resultados de diseño

Producto	h_{w1} (Kj/Kg)	h_{w2} (Kj/Kg)	Q_p (watt)	Q_c (watt)
Café	104.81	188.4	20.71	632.827
Yuca	104.4	20.71	20.71	935.452

3.4 SELECCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

El intercambiador de calor es un dispositivo por el cual se facilita el intercambio de calor directa o indirectamente entre dos caudales de fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes.

La transferencia de calor puede darse con un intercambio de calor latente y calor sensible.

Debido a los requerimientos y condiciones de operación del secador para extracción de humedad se propuso seleccionar un condensador de tipo compacto, cuyo flujo de enfriamiento es por aire (convección forzada).

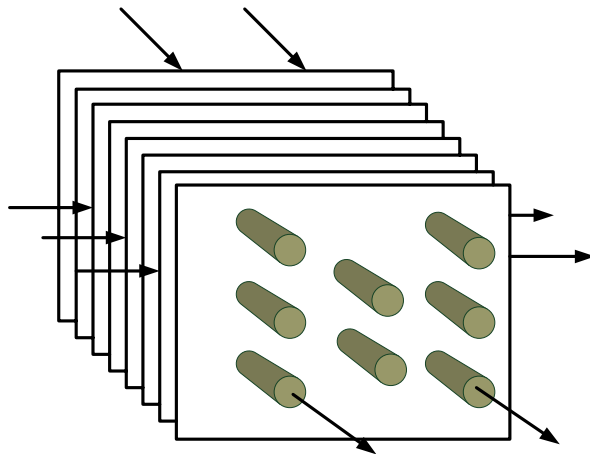
Este equipo compacto de intercambiadores de calor permite lograr gran área superficial de transferencia de calor y como consecuencia velocidades elevadas de transferencia de calor entre dos fluidos en un volumen pequeño.

En los intercambiadores compactos los dos fluidos suelen moverse de manera perpendicular entre si, a esa configuración de fluidos se le conoce como flujo cruzado. En los intercambiadores de flujo cruzado, a los cuales se les denomina serpentines de haz de tubos, se utilizan tubos con aletas exteriores.

Se dice que el flujo cruzado es no mezclado (figura 25) ya que las aletas fuerzan al fluido a moverse por un espaciamiento particular entre ellas, e impiden su movimiento en la dirección transversal.

Las aletas sirven como superficies disipadoras de calor, que aumentan el área superficial del condensador, mejorando la eficiencia.

Figura 25. Configuración de flujo en el intercambiador, Fuente: CENGEL, Yunes y BOLES, Michael. Termodinámica. 4 ed. México: Mc Graw-Hill. 2004. p. 669.



En el condensador de vapor propuesto, enfriado por aire el vapor entra a los tubos, y un ventilador induce una corriente de aire que circula a través de los tubos aleteados del dispositivo, ganando calor y logrando que el vapor sea condensado y posteriormente subenfriado.

AIRE

Para la selección del intercambiador se tuvo en cuenta las necesidades en la cámara de secado diseñadas previamente ver **sección (xx)** Los requerimientos de calor necesarios para realizar el secado fueron analizados con el producto con mayor contenido de humedad aún así los requerimientos fueron bajos de esta manera el condensador seleccionado cumple con los requerimientos de calor las características del condensador:

Número de filas: 2

Número de tubos por fila: 9

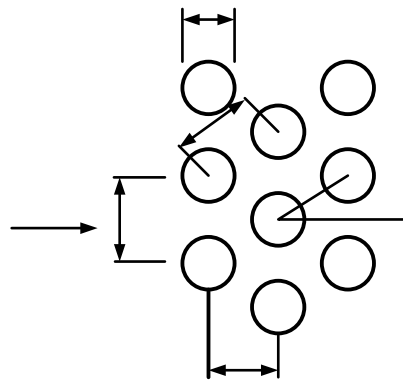
Material de los tubos: Cobre

Arreglo geométrico entre tubos: 30° Ver figura

Diámetro de los tubos: 3/8 pulg

Dimensiones: 9in*9in

Figura 26 Geometría del arreglo.



Fuente: SHAH, Ramesh K y DUSAN, P. Sekulic. Fundamentals of heat exchanger design. Haboken: John Wiley. 2003. p. 568.

SÍMBOLOS	PARÁMETROS
d_o	Diámetro externo de los tubos.
P_t	Paso del arreglo.
ϕ	Ángulo del arreglo.
X_t	Paso transversal de los tubos.
X_l	Paso longitudinal de los tubos.

**DIRECCIÓN
DEL FLUJO
DE AIRE**

Aletas: Corrugadas fijadas por expansión mecánica a la tubería lo que hace que el equipo ofrezca alto rendimiento.

Número de aletas por pulgada: 11

Material de las aletas: Aluminio.

Espesor de las aletas 0,13 mm

3.5 SELECCION DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

El condensador de vapor cuenta con dos motores eléctricos instalados al lado y lado del secador que junto con una hélice de impulsión y otra de succión

Generan la corriente de aire que atraviesa el conjunto de tubos y aletas para conseguir la condensación y subenfriamiento del fluido de trabajo, que genera la energía necesaria para el secado. Las principales características de estos motores y sus accesorios se muestran en la tabla:

Motor 1

Tabla 7. Características motor 1 fuente autores

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Tipo de motor.	Fasco.
Ambiente.	Totalmente cerrado.
Protector del motor.	Térmico automático.
Nº de velocidades.	3.
Potencia.	1/3 HP.
Velocidad.	16255 rpm.
Voltaje.	208 V.
Plena carga.	2,1 A.
Capacitores.	2 x 370V a 7,5 mfd.
Arrancador.	Siemens 2,5 a 4 A.

Motor 2

Tabla 8. Características motor 2 Fuente autores

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Tipo de motor.	Fasco
Ambiente.	Totalmente cerrado.
Protector del motor.	Térmico automático.
N° de velocidades.	2.
Potencia.	1/2 HP.
Velocidad.	1100 rpm.
Voltaje.	208 V.
Plena carga.	4,1 A.
Capacitores.	2 x 370V a 7,5 mfd.

Hélices. Para la generación de la corriente de aire en el condensador se cuenta con dos hélices que son soportadas en los ejes de los motores eléctricos y sus características principales la podemos observar en la tabla

Tabla 9. Características principales de las hélices.

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Tipo.	Hélice.
Número aspas	5
Diámetro nominal.	10".
Material.	Aluminio.
Diámetro del cubo.	1/2".

4. ESTUDIO DE LAS CONDICIONES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE SECADO

El secado de un producto colocado en una bandeja, por lo general se hace pasar una corriente de aire a presión atmosférica, es la técnica más comúnmente usada debido a no requiere el uso de equipo altamente especializado como ocurre con otra clase de secadores. Es así como el secado en bandejas lo podemos definir como una operación unitaria en la que el agua que contiene un sólido o una disolución se transfiere a una masa de aire gracias a los gradientes de humedad producidos en ambas fases gaseosas y sólida. En Este proceso se puede diferenciar distintas etapas de secado.

Las bandejas son generalmente metálicas para asegurar una buena transferencia de calor además para permitir una operación más flexible son individuales para que puedan ser cargadas o descargadas separadamente.

4.1 CONDICIONES DE SECADO

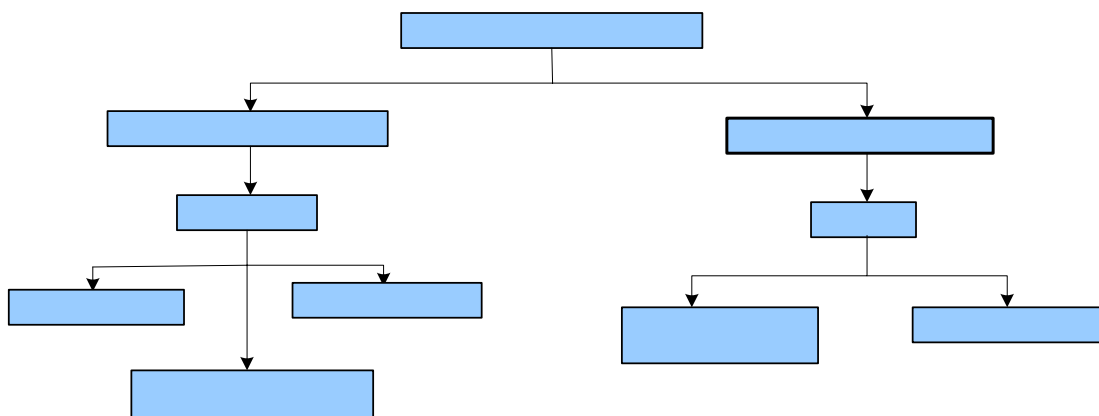
Claramente ningún procedimiento de diseño puede aplicarse directamente, sin antes estudiar los fundamentos de transferencia de calor, de masa, las propiedades de materiales y los cambios físicos que ocurren a lo largo del proceso todos estos factores intervienen en el diseño aún en el secador más simple.

Entre las condiciones externas que se estudian en el secado están la temperatura, humedad, el flujo de aire, y es importante su control y estudio sobre todo en las primeras etapas cuando la humedad superficial es removida, ya que puede generar ciertas alteraciones; por ejemplo la madera sufre un encogimiento considerable si existe una extracción excesiva de humedad en la superficie

generando altos gradientes de humedad en el interior causando una sobresequedad y una alta tensión dentro del material.

Después de mencionar las condiciones externas pondremos nuestra atención en las condiciones internas, de cómo la transferencia de calor desarrolla un gradiente de temperatura dentro del cuerpo mientras la evaporación de la humedad ocurre en la superficie generando una migración de humedad desde el centro de sólido a la superficie que ocurre gracias a uno o varios mecanismos, difusión, flujo capilar, y a su genera presiones internas cuando se reduce el contenido de humedad es por esto la importancia en esta parte del estudio de determinar la influencia de cada uno de los factores que determinan la velocidad de secado.

Figura 27. Condiciones de secado. Fuente autor



4.1.1 Condiciones externas. Aquí las variables externas son la temperatura, la humedad, la dirección de flujo de aire, la forma física del sólido, la ubicación del sólido durante la operación de secado. Las condiciones externas de secado son importantes durante las etapas iniciales, cuando la humedad superficial es removida. La evaporación superficial es aquí controlada por la difusión de vapor

desde la superficie del sólido a la atmósfera circundante por medio de una película delgada (fina) de aire que esta en contacto con la superficie.

El secado implica la transferencia de masa cuando un gas es colocado en contacto con un líquido en el cual es insoluble es necesario entonces estar familiarizado con las características del sólido húmedo ya que la transferencia de masa por lo general esta acompañada por la transferencia de calor debido a consideraciones que son dadas por la entalpía

Hay dos métodos de quitar la humedad: evaporación y vaporización.

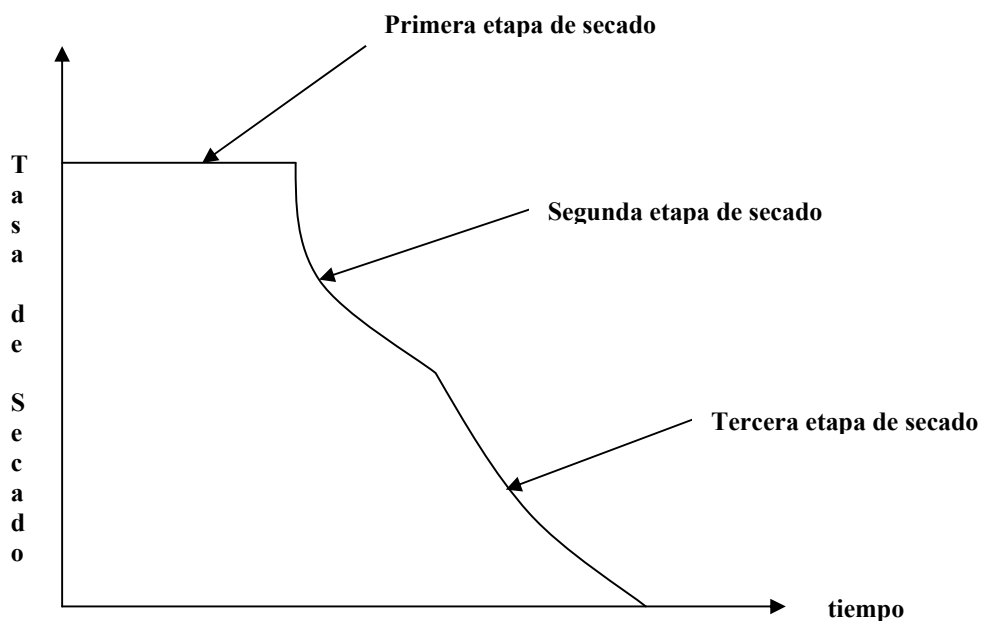
La primera es la evaporación, ocurre cuando la presión de vapor de la humedad sobre la superficie sólida es igual a la presión atmosférica generando un aumento en la temperatura hasta el punto de ebullición, Segundo, en la vaporización, el secado es realizado por convección, es decir pasando aire caliente sobre el producto, transmitiendo la humedad al aire por el producto, en este caso la presión de vapor de saturación de la humedad sobre el sólido es menor que la presión atmosférica.

El comportamiento de secado de alimentos puede ser caracterizado midiendo la pérdida de contenido de humedad como una función de tiempo, (Ver figura).

Los productos que contienen un mayor contenido de agua se comportan de manera diferente. Durante la primera etapa de secado la tasa se mantiene constante. La vaporización ocurre desde la superficie húmeda, un encogimiento podría ocurrir debido a que la superficie es retrocedida hacia la superficie sólida. Esta etapa de secado es controlada mediante la difusión de vapor, hacia el final de este período la humedad es entonces transportada del interior del sólido a la superficie por fuerzas capilares y la tasa de secado todavía puede ser constante. Cuando el contenido de humedad medio ha alcanzado el contenido de humedad

crítico, se reduce la capa fílmica superficial y es aquí donde la tasa de secado cae, es la etapa de secado decreciente, esta continua hasta que la superficie líquida es evaporada totalmente. La transmisión de calor ahora consiste en la transferencia de calor a la superficie y la conducción de calor dentro del producto. Debido a que la conductividad de calor en las zonas secas externas es muy pequeña, la tasa de secado es cada vez más baja y es a su vez más influenciada por la conducción de calor; sin embargo, el producto seco tiene una relativamente alta densidad y un pequeño volumen. El secado es determinado no tanto por la conducción de calor, sino más bien por una alta resistencia a la difusión dentro del producto.

Figura 28. curva típica de secado Fuente Handbook Drying generalidades



Aire. En el secado y almacenamiento, uno de los conceptos más importantes es el contenido de humedad de equilibrio. El intercambio recíproco de humedad entre materiales higroscópicos, tales como los granos, y el aire que los rodea; la condición de intercambio recíproco de humedad indica el equilibrio que hay entre

el aire y el material. Se establece dicho equilibrio cuando la presión de vapor que corresponde a la humedad del producto es igual a la presión de vapor de la humedad presente en el aire, en condiciones fijas de temperatura. Por tanto, en los estudios de higroscopia, las propiedades termodinámicas del aire húmedo son de fundamental importancia.

Cuando se entrega energía al aire, la temperatura aumenta, pero la razón de humedad permanece constante, pues no hay aumento ni disminución en la cantidad de masa de la mezcla (aire seco y vapor de agua).

Por sus dimensiones y por los procesos físico-químicos que se produjeron, el planeta Tierra posee hoy una capa gaseosa que lo envuelve (aire atmosférico), la que constituye la atmósfera de la Tierra y es esencial para las formas de vida que se encuentran en ella.

El aire atmosférico se compone de una mezcla de gases, vapor de agua y una mezcla de contaminantes, tales como humo, polvo, y otros elementos gaseosos que no están presentes normalmente, en lugares distantes de las fuentes de contaminación.

Por definición, existe aire seco cuando se ha extraído todo el vapor de agua y los contaminantes del aire atmosférico. Mediante extensas mediciones se ha demostrado que la composición del aire seco es relativamente constante, si bien el tiempo, la ubicación geográfica y la altura determinan pequeñas variaciones en la cantidad de componentes.*

* Fuente www.fao.org

Tabla 10. Composición del aire seco a 1 atmósfera. FUENTE TERMODINAMICA APLICADA Juan Francisco Maradey Charris pag 128

Sustancia	Análisis molar, %	Análisis másico, %
Nitrógeno	78.084	75.496
Oxígeno	20.948	23.139
Argón	0.934	1.279
Gas Carbónico	0.031	0.047
Hidrógeno, Neón, Helio, Metano, Bióxido de Azufre y trazas de otros gases	0.003	0.039

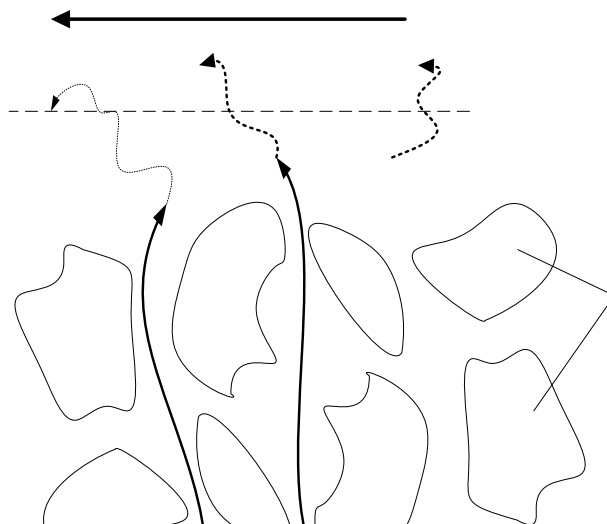
4.1.1.2 Velocidad del aire. Las velocidades de aire son importantes sólo en la medida en que aumenten las tasas de transferencia de calor. Otros factores representativos en lo concerniente a los cambios en las etapas de secado son la temperatura del aire, la humedad, el espesor del material, y la profundidad o espesor de la capa sobre las bandejas.

El aire caliente o seco recoge más humedad que el aire frío, pero el aire en movimiento, es decir, el aire a alta velocidad, además de recoger humedad, la barre de la superficie del grano, previniendo la creación de una atmósfera saturada que disminuiría la velocidad de la eliminación subsiguiente de humedad. Además caudales mayores que los recomendados, forzarán al aire a salir antes que tenga tiempo de recoger suficiente humedad, lo que significa un desperdicio de energía

Entre las influencias del aire exterior podríamos mencionar que el rendimiento mejora cuanto mayor sea la diferencia entre la temperatura del grano y la del aire.

4.1.1.3 Temperatura. A medida que el agua es expulsada del grano en forma de vapor de agua, ver figura, tiene que ser removida, ya que, de otra manera, la humedad crearía en la superficie del grano una atmósfera saturada, que disminuiría la velocidad de eliminación del agua. Cuanto más caliente y seco esté el aire más humedad podrá absorber antes de saturarse; de esta manera el aire caliente y seco que se encuentre en la proximidad con el grano en proceso de secado, recogerá la humedad expulsada de éste con más facilidad que el aire más frío.

Figura 29 Trayectoria del vapor de agua durante la deshidratación.



Es evidente también que un mayor volumen de aire puede recoger más humedad que un menor volumen de aire.

La temperatura del aire está además asociada con la humedad relativa, flujo del aire, humedad del grano y el tiempo de secamiento. A una temperatura constante el contenido en agua del alimento cambia continuamente hasta que alcanza un equilibrio con la presión de vapor con en el aire circundante. En estas condiciones durante su almacenamiento, el alimento no gana ni pierde peso.

El uso que se va a dar al producto puede determinar la temperatura de secamiento. Para el secado de la mayoría de granos que se emplean como semillas la temperatura debe ser inferior a 43°C. Para granos de utilización industrial no debe ser superior de 66°C y para granos que van a ser utilizados en la alimentación animal, la temperatura debe ser inferior a 86°C.

La siguiente tabla nos muestra algunas temperaturas máximas empleadas para secado:

Tabla 11 Temperaturas máximas utilizadas en el secado de granos FUENTE
DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR DE GRANOS POR
CONDENSACION

GRANO	TEMPERATURA DEL AIRE°C
Maiz, sorgo	Molienda seca y semilla 38-43 Molienda húmeda 55-60 Consumo animal 71-82
Cebada	40
Frijol	49
Café	60
Legumbres comestibles	38
soya	Semilla 38 Aceite 48
Cebada cervecera	53
Trigo	Semilla (> 24%) 44 Semilla (< 24%) 49 Molienda de harina 49-66
Girasol	Confitería 60-75°C Aceite 75-80°C
ARROZ	Molienda (>20%) 40°C Molienda (<20%) 44°C

4.1.2 Condiciones internas. Como se ha mencionado antes, en el período de velocidad constante la variación de secado es determinada por la tasa de evaporación. Cuando la superficie externa del sólido pierde su humedad, el movimiento de vapor de agua desde el centro el sólido a la superficie esta controlado por la difusión y la capilaridad.

Para explicar la disminución de tamaño (encogimiento), como ocurre en el secado de madera, es debido a gradientes de presión que se crean dentro de los sólidos y pueden asumir gran importancia, en el caso de materiales que forman una capa impermeable ya que retardan la evaporación y el proceso es influenciado por la tasa de movimiento de humedad desde el interior. También para materiales donde inicialmente el contenido de humedad inicial es relativamente bajo y el contenido de humedad final requerida es extremadamente bajo, por esto la caída de la tasa de período es importante.

En particular debido a que la difusión es el factor de control para periodos de secado largos, donde se requiere alcanzar bajos contenidos de humedad, es importante el grosor del material, de ahí la conveniencia de granular la materia prima, mediante la agitación o el uso de capas finas en el caso de secado por bandejas, por esto las características de los sólidos son extremadamente importantes en el diseño de un secador.

La resistencia de transferencia de masa a través del material es mayor que la resistencia de difusión de la capa límite de gas. El gradiente de temperaturas en el sólido también creará un gradiente de presión de vapor, que a su turno causará la difusión de vapor de humedad a la superficie; esto ocurrirá simultáneamente con el movimiento de humedad.[¶]

Además el contenido de humedad en una solución dentro de un sólido ejerce una presión de vapor significativa que depende de la naturaleza de él y la temperatura, un cuerpo húmedo sometido a un suministro continuo de gas fresco sigue perdiendo humedad hasta que la presión de vapor de esta en el sólido sea igual a la presión parcial del vapor del gas.

[¶] Hanbook Drying Sección 1.3 internal conditions (process 2)

4.1.2.1 Grano. Se dice que los granos están compuestos por una masa seca (esencialmente fécula y agua). En las cosechas los granos normalmente contienen mucha humedad, la cual suele ser peligrosa para el almacenamiento o inadecuado para el trillado o el molido final. La cantidad de humedad en el producto es normalmente expresada como porcentaje de contenido de humedad, referida en base seca o en base húmeda mencionadas en el capítulo anterior.

4.1.2.2 Flujo de transferencia de calor y masa en el secado por bandejas.

Durante el proceso de secado todos los granos ceden la mayor parte de la humedad al aire caliente que es forzado a pasar entre ellos. En el secado, clásicamente se distinguen dos periodos de secado citados anteriormente: el inicial, donde la resistencia a la pérdida de humedad se da en la superficie y el final, cuando la resistencia se ofrece dentro del grano, esto se logra cuando la humedad interna del grano alcanza la superficie, llamando a este fenómeno de difusión. En la primera fase el coeficiente de transferencia de masa por convección determina las tasas de secado; en la segunda fase, que es la más prolongada, el coeficiente de difusión de humedad del grano, o la resistencia al paso del agua en el interior del grano es la determinante.

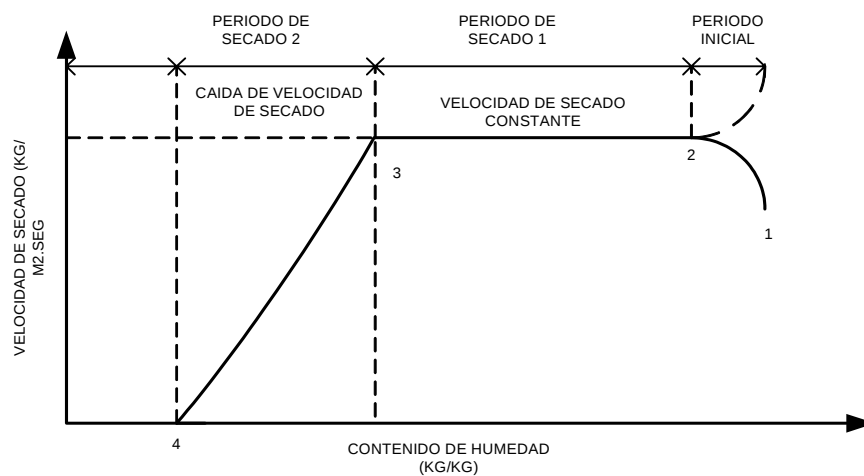
La ley de conservación de masa establece que la masa que entra en un proceso es igual a la masa que sale del mismo.*

$$\text{Masa de la materia prima a la entrada} = \text{Masa de los productos y desechos} + \text{Masa de los poroductos almacenados} + \text{Pérdidas}$$

De forma semejante, el balance de energía establece que la cantidad de calor y energía mecánica que ingresa en el proceso es igual a ala energía que sale del mismo con los productos y los desperdicios + la energía almacenada +las pérdidas al entorno.

4.1.2.3 Etapas de secado. Pueden distinguirse tres etapas principales durante el proceso de secado de granos.

Figura 30. Etapas de secamiento FUENTE TECNOLOGIA DEL PROCESADO DE ALIMENTOS PRINCIPIOS Y PRACTICAS, METODOS EXPERIMENTALES EN LA INGENIERIA ALIMENTARIA



4.1.2.3.1 Periodo inicial. De calentamiento, se cumple entre los puntos 1 y 2, en ella la velocidad de evaporación aumenta según que se va calentando.

4.1.2.3.2 Periodo de secado 1. De velocidad constante, se lleva a cabo entre los puntos 2 y 3; el secamiento tiene lugar en la superficie del producto, la cual se mantiene húmeda en su totalidad; la velocidad de secado en esta etapa es independiente de las características internas del grano y es controlada fundamentalmente por las características del aire desecante. La velocidad está determinada por la rata de difusión del calor de agua a través de la película de aire estancado que envuelve los granos hasta la corriente de aire principal.

* Referencia: Tecnología y procesamiento de los alimentos.

4.1.2.3.3 Periodo de secado 2. Se lleva a cabo entre los puntos 3 y 4; donde la superficie deja de permanecer completamente húmeda, se denomina en ocasiones punto crítico e indica el inicio de la tercera etapa, de velocidad de secado decreciente, etapa que a su vez puede dividirse en partes húmedas y otra en la cual se encuentra completamente seca.

Durante la etapa de velocidad decreciente, la temperatura del grano es superior a la temperatura de bulbo húmedo, por la disminución de la conversión de calor sensible en latente; el aumento de la temperatura contribuye al daño de los granos, acelerando la formación de fisuras y produciendo daños químicos y físicos de importancia.

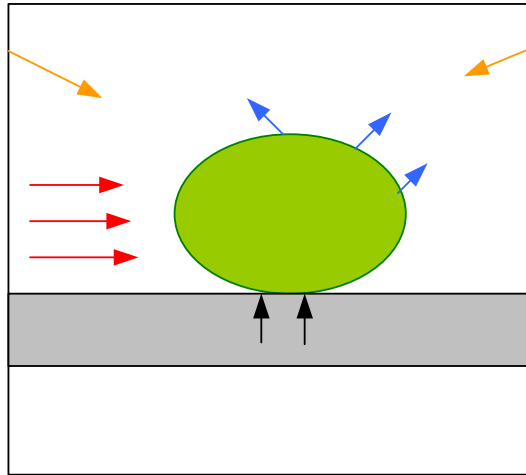
Para el análisis del proceso de secado partimos de conocer que existen condiciones internas y externas involucradas a lo largo de la deshidratación y su comportamiento ingiere de una manera mas critica en una etapa de secado que en otra.

Tabla 12 condiciones de deshidratación según las diferentes etapas de secado, Fuente autores

PERIODO	NOMBRE	CONDICIÓN	PARÁMETRO
1-2	inicial	externa	Velocidad del aire
			Temperatura de la cámara
2-3	Velocidad constante	externa	Velocidad del aire
			Temperatura de la cámara
3-4	Velocidad decreciente	internas	difusividad
			Coeficiente de transferencia de masa

4.1.2.4 Ecuaciones de transferencia de calor y masa para la primera etapa de secado de granos.

Figura 31. Balance Fuente Autores



Generalmente el proceso de secado de granos se involucran cuatro distintos flujos de calor entre el grano y sus alrededores: latente asociado a la evaporación de humedad (Q_l), calor sensible debido a la transferencia de calor por convección (Q_c), calor sensible debido a la transferencia de calor por radiación (Q_r), y calor sensible debido a la transferencia de calor por conducción (Q_{cond}), estos cuatro flujos de calor están relacionados así:

$$q_l = q_c + q_r + q_{cond} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

T_c

Expresando cada uno de los calores se tiene:

$$q_l = h_d (\omega_s - \omega) * h_{fg} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Q_c

$$q_c = h_c (t_c - t_s) \quad \text{Ecuación 4.3}$$

$$q_r = hr (t_r - t_s) \quad \text{Ecuación 4.4}$$

$$q_{cond} = U (t_0 - t_s) \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Reemplazando en la ecuación 4.8 tenemos:

$$h_d(\omega_s - \omega) * h_{fg} = h_c(t_c - t_s) + hr(t_r - t_s) + U(t_0 - t_s)$$

Si los efectos de secado por radiación y conducción son despreciables como en un secado por bandejas entonces:

$$h_d(\omega_s - \omega) * h_{fg} = h_c(t_c - t_s)$$

$$q_l = h_c(t_c - t_s) \text{ Ecuación 4.6}$$

Durante el período de velocidad constante se produce un equilibrio entre la velocidad de transferencia de calor al alimento y la transferencia de masa (representada por el flujo de vapor escapa de éste). Relacionando las dos ecuaciones obtenemos:

$$-\frac{d\omega}{dt} = \frac{h_c A}{h_{fg}}(t_c - t_s) \text{ Ecuación.4.7}$$

Por lo tanto

$$\frac{d\omega}{dt} = h_d(\omega_s - \omega) \text{ Ecuación.4.8}$$

ω_s : (Kg de vapor/ Kg de aire seco): Razón de humedad del aire saturado en la superficie del grano

ω : (Kg de vapor por Kg de aire seco): Razón de humedad del aire de secado

T_c (K): temperatura del aire en la cámara

T_s (K): temperatura de la superficie del grano

T_o (K): temperatura del medio que soporta el grano

T_r :(K) Temperatura del medio circundante

h_c (W/m²K): coeficiente de transferencia de calor por convección

h_r (W/m²K): coeficiente de transferencia de calor por radiación

U (J/Kg)=: coeficiente global de transferencia de calor por conducción

h_{fg} (J/Kg)=: calor latente de vaporización del agua a T_s

h_d : coeficiente individual de transferencia de materia

$\frac{d\omega}{dt}$ = velocidad de deshidratación en la que el agua se evapora tan solo en la superficie

La velocidad de deshidratación depende de las características del deshidratador temperatura de bulbo seco, Humedad relativa, velocidad del aire coeficiente de transferencia de calor superficial y de las características del alimento contenido de agua en relación volumen/superficie, temperatura superficial y velocidad a la que el alimento pierde agua). El tamaño del alimento influye de forma importante sobre la velocidad de deshidratación tanto en el período de velocidad de deshidratación creciente como la de la velocidad decreciente. En el período de velocidad constante, las partículas de menor tamaño se evaporan antes (porque su superficie es relativamente mayor) y en de velocidad decreciente, porque la distancia que el vapor de agua tiene que atravesar, es menor. Aunque estos fenómenos en la práctica no se visualizan, ver sección análisis de resultados.

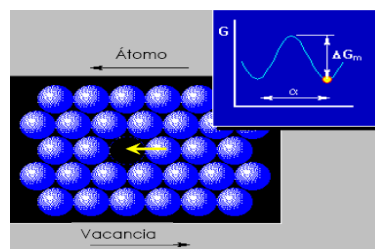
4.1.2.5 Ecuaciones de transferencia de calor y masa para la segunda etapa de secado de granos. Determinar un modelo matemático en la segunda etapa es complicado, es así que planteamos cierta teoría que describa el comportamiento del fenómeno en especial de la difusividad.

4.1.2.5.1 COMPORTAMIENTO DE LA DIFUSIVIDAD EN EL SECADO DE GRANOS. El secado es un proceso complicado que implica simultáneamente, la masa, el calor y fenómenos de transferencia, se necesita de modelos eficaces para el diseño del proceso, el desarrollo de modelos matemáticos para describir el proceso de secado ha sido un asunto de varias décadas de estudio Indudablemente, el progreso observado ha sido limitado gracias al empirismo Sin embargo, el diseño de secadores es todavía una mezcla de ciencia y la experiencia práctica.

La difusividad: la difusión es el transporte de masa por movimiento atómico para que ocurra el movimiento de los átomos son necesarias dos condiciones:

- 1) Debe existir un espacio libre adyacente.
- 2) El átomo debe poseer energía suficiente para romper los enlaces químicos

Figura 32. Difusión substitucional Fuente: www.fi.uba.ar



La difusión en estado estacionario debe cumplir con una condición el flujo de difusión no cambie con el tiempo (Macroscópicamente la cantidad de un elemento transportado dentro de otro es una función del tiempo), este fenómeno lo analizó **Adolf Eugen Fick**[∞] y lo planteó en sus dos leyes:

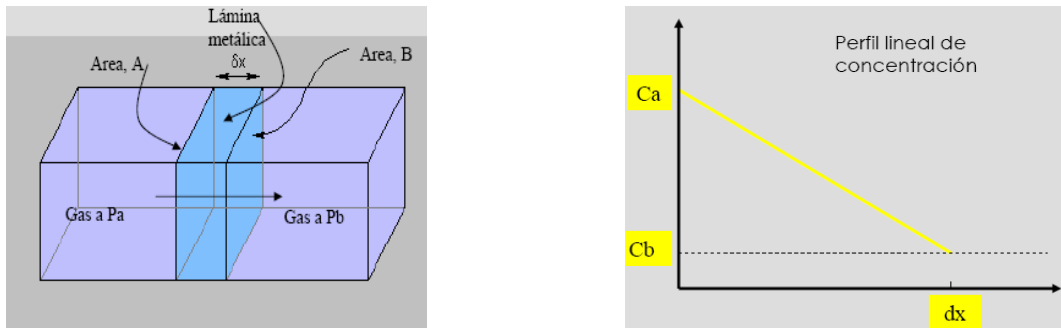
Primera Ley de Fick: El flujo es proporcional al gradiente de concentración

Segunda ley de Fick: Cuando el coeficiente de difusión no depende de la concentración por tanto, de la posición.

Para entender un poco más cada una de las leyes observemos en la figura 12 que enseña la difusión de átomos de un gas a través de una lámina metálica (fig. a), cuyas concentraciones de las sustancias que difunden se mantienen constantes a ambos lados de la lámina. En este caso analizamos la difusión en estado estacionario

[∞] nacido el 3 de septiembre de 1829 en Kassel, Alemania; fallecido el 21 de agosto de 1901 en Blankenberge, Bélgica) fue un médico alemán, al que se le ha atribuido usualmente la invención de los lentes de contacto. Fuente www.answers.com.

Figura 33. Difusión en estado estacionario Fuente www.fi.uba.ar



La pendiente de la gráfica (figura b) en un punto determinado es el gradiente de concentración.³

Gradiente de Concentración = dC/dx

$$\text{gradiente} = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B}$$

Además la difusión es un proceso dependiente del tiempo por lo tanto en un determinado proceso, es importante conocer la rapidez con la que ocurre el transporte de masa que puede ser expresada por medio del *flujo de difusión* (j):

$$j = \frac{M}{At}$$

Donde:

J : kg/m² s ó átomos/m² s

A : área

t : tiempo

M : Nro. de átomos

³ Fuente www.fi.uba.ar

Entonces la expresión de la primera Ley de Fick:

$$J = -D(dC / dx)$$

Donde el signo negativo expresa la dirección de difusión que es contraria al gradiente de concentración.

Para entender la segunda ley de Fick primero debemos entender que la mayoría de las situaciones prácticas de difusión son en estado *no estacionario*.

La difusión en los sólidos durante el secado es un proceso completo que puede involucrar difusión molecular, flujo capilar, flujo hidrodinámico o difusión superficial si combinamos todos estos fenómenos en uno, el efecto de difusividad puede ser definido por la segunda ley de Fick's.

En este caso, tanto el flujo como la concentración varían con el tiempo

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Cuando el coeficiente de difusión no depende de la concentración si no de la posición:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2}{\partial x^2} (C)$$

(Si el D es independiente de la composición):

Las soluciones a esta expresión (concentración en función de posic. y tiempo) se consiguen especificando condiciones límites físicamente significativas, una

solución importante es la de un sólido semiinfinito cuya concentración superficial se mantiene cte.

La transferencia de humedad en medios heterogéneos puede ser considerada por la ley de Fick's para materiales homogéneos.

La ecuación nos muestra el cambio en el tiempo de la distribución de la humedad en los materiales, es decir describe también el movimiento de la humedad dentro del sólido. La ecuación fue usada para objetivos de diseño en casos donde el mecanismo de control de secado es la difusión de humedad.

4.1.2.5.2 Métodos de medida experimentales. No hay ningún método estándar para la determinación experimental de difusividad. La difusividad en sólidos puede ser determinada usando los métodos enumerados en la tabla:

Tabla 13 Métodos experimentales para la medida de la difusividad

Métodos para la Medida Experimental de Humedad y difusividad
--

Método

Cinética de la sorpción

Métodos de infiltración

Curvas de distancia- concentración

Otros métodos

Métodos por radio

Resonancia magnética nuclear (NMR)

Resonancia de vuelta de electrones (ESR)

Técnicas de secado

Métodos simplificados

Método de régimen regular

Análisis de regresión de solución Numérico

^o Fuente Handbook Drying

Fuente: Tabla 4.1 Handbook drying.

- **Cinética de la Sorpción.** La sorpción (absorción o desorción) es la tasa de medida de un balance en equilibrio donde una muestra de un sólido es guardada en un ambiente controlado. Asumiendo la superficie resistente ala a transferencia de masa, el método es basado en la ecuación de difusión de Fick's
- **Método de Infiltración.** El método de permeabilidad es un método a una membrana de un material. Según esto la rata de permeabilidad de la difusión de un material de un espesor conocido que conocemos es medida bajo una constante bien definida concentración en las superficies. El análisis también es basado en la ecuación de difusión de Ficks.
- **Técnicas de secado.** Los métodos de análisis de regresión son en particular relevantes para procesos de secado. En ellos, las muestras son colocadas en un secador y la humedad difusiva es estimada a partir de datos en el secado.

Todos los métodos de secado están basados en la ecuación de Fick y se diferencian en la metodología de solución.

- **Métodos simplificados.** La ecuación de Fick's resuelve para ciertos cuerpos geométricos bajo las siguientes condiciones:

El coeficiente de transferencia de masa en la superficie es bastante alto para materiales que en su superficie este en equilibrio con el aire de secado.

Las condiciones del aire de secado son constantes.

La difusividad de humedad es constante, independientemente del contenido de humedad en la materia y la temperatura.

- **Método de régimen regular.** Este método está basado en la medida experimental de la curva de régimen regular, que es la curva de secado, cuando se hace independiente del perfil de concentración inicial. Usando este método, la difusividad depende de la concentración puede ser calculado de un experimento.
- **Compilación de datos** La difusividad efectiva, ha sido estimada de ratas de sorpción y secado. Los datos experimentales son escasos debido al efecto del método experimental, las variaciones en composición y estructura de los materiales examinados, etcétera. Los datos del los coeficientes de difusión efectiva están disponibles para materiales inorgánicos, polímeros y alimentos.

La tabla 15 muestra valores efectivos de difusividad de la humedad en varios materiales. Los alimentos son los más investigados La difusividad en los alimentos está entre unos valores de 10^{-13} a 10^{-6} m²/seg. y más del 82% están acumulados en la región de 10^{-11} a 10^{-8} . Las difusividades para otros materiales están en un rango de valores de 10^{-11} a 10^{-8} donde más del 58% son acumulados en la región de 10^{-12} a 10^{-5} . Estos resultados pueden verse en los histogramas de la figura 10. La difusividad en los alimentos es menor que la de otros materiales esto es porque la complicitad de estructura biopolimerica de los alimentos y probablemente la fuerte ligadura de agua en ellos.

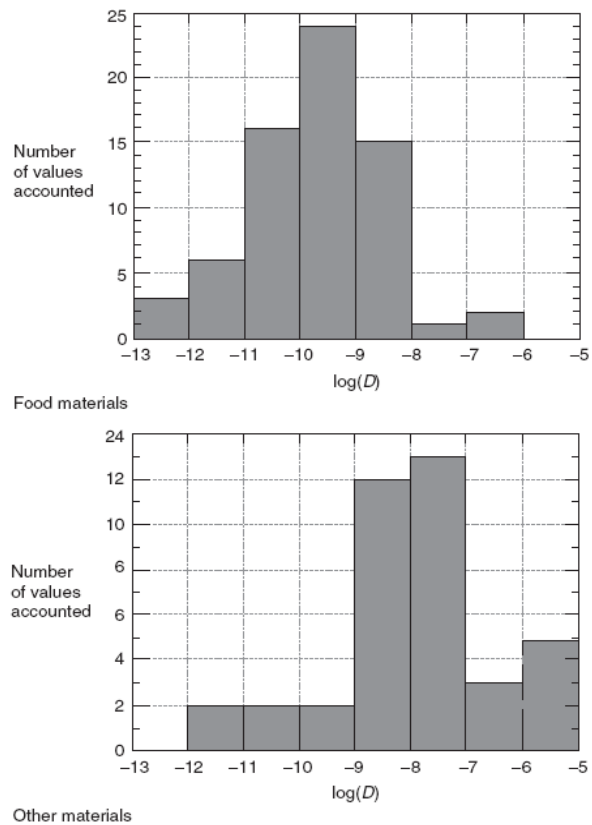
Tabla 14 Difusividad efectiva en algunos materiales. Fuente TABLE 4.2 Effective Moisture Diffusivity in Some Materials Handbook Drying

clasificación	Material	Contenido de agua (kg/kg db)	Temperatura (°C)	Difusividad (m ² /s) 1*10E-10
	Alimento			
1	Tallos de alfalfa	<3.70	26	0.026–26
2	Manzana	0.12 0.15–7.00	60 30–76	0.065–1.2 1.2–2.6

3	Ahucate		31–56	1.1–3.3
4	Remolacha		65	15
5	Biscocho	0.10–0.65	20–100	9.4–970
6	Pan	0.10–0.70	20–100	25–0.005.5
7	Zanahoria	0.03–11.6	42–80	9.0–33
8	Grano	0.05–0.23 0.19–0.27	40 36–62	0.01–1 0.72–3.3
9	Músculo de pescado	0.05–0.30	30	0.81–3.4
10	Ajo	0.20–1.60	22–58	0.11–2
11	Espuma de leche	0.20	40	11
12	Leche	0.25–0.80	30–70	0.15–2.5
13	Mollete	0.10–0.65	20–100	8.4–1500
14	Cebolla	0.05–18.7	47–8	7–49
15	Pastas, sémola	0.01–0.25	40–125	0.003–1.5
16	Pastas basada en grano	0.10–0.40	40–80	0.5–1.3
17	Pasta, trigo duro	0.16–0.35	50–90	0.025–0.56
18	Pimienta Verde	0.04–16.2	47–81	5–92
19	Pepperoni	0.19	12	0.47–0.57
20	Papa	0.60 <4.00 0.15–3.50 0.01–7.20	54 65 65 39–82	2.6 4.0 17 0.5–27
21	Arroz	0.18–0.36 0.28–0.64	60 40–56	0.13–0.23 0.1–0.69
22	Frijoles desengrasado	0.05	30	0.02.–0.054
23	Gel de almidón	0.10–0.30 0.20–3.00 0.75	25 30–50 25–140	0.01–0.23 1.–12 1–15
24	Almidon granular	0.10–0.50	25–140	5–30
25	remolacha	2.50–3.60	40–80	4–13
26	Raíz de tapioca	0.16–1.95	97	9
27	Turquía	0.04	22	0.00008.
28	Trigo	0.12–0.30 0.13–0.20	21–80 20	0.069–2.8 3.3–37
	Otros materiales			
29	Cemento de asbesto	0.10–0.60	20	20–50
30	Avicel		37	50–500
31	Polvo de ladrillo	0.08–0.16	60	2500–250000
32	Carbon, activado		25	160000

33	Acetato de celulosa	0.05–0.12	25	0.02–0.032
34	Ladrillo de arcilla	0.20	25	1300–1400
35	Hormigón	0.10–0.40	20	5–1200
36	Hormigón, piedra pómez	0.20	25	1800
37	Diatomite	0.05–0.50	20	30–50
38	Lana de vidrio	0.10–1.80	20	20–150
39	Esferas de cristal, 10mm	0.01–0.22	60	184_94
40	arcilla	0.10–0.40		50–100
41	Arcilla de caolín	<0.50	45	150–1500
42	Sistema modelo		68	31
43	Turba	0.30–2.50	45	400–500
44	Arena	<0.15	45	800–1500
45	Arena, mar	0.07–0.13	60	250–25000
46	Silicona alumina	0.59–1.18	60	2500–250000
47	Gel de silicona		25	30000–56000
48	hoja de tabaco		30-50	0.32–0.81
49	Madera, suave		40-60	5E-10–25
50	Álamo de madera, amarillo	1.00	100–150	100E–250

Figura 35 Histogramas de difusividades Fuente: FIGURE 4.2 Histograms of diffusivities in various materials (data from Table 4.2) Handbook Drying.



En general las difusividades mostradas en los libros son difíciles de agrupar por los diferentes métodos de estimación que hay, especialmente en los alimentos. Además se concluyó que las diferencias entre materiales son menores que las que hay entre la temperatura y el contenido de humedad de algún material.

- **Factores que afectan la difusividad.**

La difusividad de la humedad depende fuertemente de la temperatura y a menudo sobre el contenido de humedad, pero hay pocos datos confiables. En materiales porosos la fracción de vacío afecta la difusividad considerablemente, y la estructura de poro lo hacen aún más.

La dependencia de temperaturas en la difusividad generalmente puede ser descrita por la ecuación Arrhenius, que toma la forma:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

Donde: D_0 , Es una constante (m^2/s); Q , energía de activación para difusión (J/mol); R , constante universal de los gases ($8,31 \text{ J/mol K}$); y Temperatura absoluta K . Q : Se puede interpretar como la energía requerida para producir el movimiento difusivo de un mol de átomos.

La dependencia del contenido de humedad puede ser presentada en la ecuación Arrhenius para considerar la energía de activación este factor es empírico en función de la humedad ambas modificaciones pueden estar consideradas simultáneamente. La humedad difusa es una función creciente de la temperatura y la humedad del material. La tabla 6 muestra las relaciones que describen la simultánea dependencia de la difusividad sobre la temperatura.

Entre la ecuación T3.1 a la ecuación 3.4 sugieren el contenido de humedad en un material puede ser tenido en cuenta pero considerando el factor preexponencial de la ecuación de Arthenius como función del contenido de humedad en el material. Las funciones polinómicas de primer orden pueden ser consideradas (ecuación 3.1), bien así o de un orden mas alto (Ecuació T3.2 op Ecuación T3.3). La función exponencial puede también usarse la ecuación T3.4).La ecuación T3.5, T3.6 en la tabla 7 son obtenidas para considerar la energía de activación para la difusión es una función del contenido de humedad del material. La ecuación T3.7 a la T3.10 no son basadas en la ecuación de la forma de Arthenius. Estas son empíricas y su uso son complicadas. La ecuación 3.11 es más sofisticada como considera diferentes difusividades atadas al agua libre e introduce la función dependiente del contenido humedad en el material sobre la energía de desorcpción. La ecuación T3.12 introduce el efecto de porosidad en la difusividad en la humedad.Considerando el número de parámetros envueltos (una significativa medida de análisis de regresión), esto concluye con que al menos tres parámetros son necesarios (ec. T3.1, T3.5 y T3.7)

Tabla 15. Influencia de la temperatura en la difusividad. Fuente TABLE 4.3 Effect of Material Moisture Content and Temperature on Diffusivity Handbook Drying.

Ec. N°	Materiales de aplicación	Ecuación	N° de parámetros
T3.1	Manzana, zanahoria, almidón	$D(X,T) = a_0 \exp(a_1 X) \exp(-a_2/T)$	3
T3.2	Pan, bizcocho, mollete	$D(X,T) = a_0 \exp \left(\sum_{i=1}^3 a_i X^i \right) \exp \left(- \frac{a_2}{T} \right)$	5
T3.3	Polyvinylalcohol	$D(X,T) = a_0 \exp \left(\sum_{i=1}^{10} a_i X^i \right) \exp \left(- \frac{a_2}{T} \right)$	12

T3.4	Verduras	$D(X, T) = a_0 \exp(-a_1 / x) \exp(-a_2 / T)$	3
T3.5	Glucosa, extracto de café, leche desnatada, manzana, patata, pienso	$D(X, T) = a_0 \exp[-a_1(1/T - 1/a_2)]$ $a_1 = a_{10} + a_{11} \exp(-a_{12} X)$	5
T3.6	Silica gel	$D(X, T) = a_0 \exp(-a_1 / T) a_1 = a_{10} + a_{11} X$	3
T3.7	Arcilla de ladrillo, arcilla quemada, hormigón de piedra pómez	$D(X, T) = a_0 X^{a_1} T^{a_2}$	3
T3.8	Grano	$D(X, T) = a_0 \exp(a_1 X) \exp(-a_2 / T) = a_{11} T + a_{10}$	4
T3.9	Arroz áspero	$D(X, T) = a_1 \exp(a_2 X) a_1 = a_{10} \exp(a_{11} T),$ $a_2 = a_{20} \exp(a_{21} T + a_{22} T^2)$	5
T3.10	Trigo	$D(X, T) = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 a_0 = a_{01} \exp(a_{02} T),$ $a_1 = a_{11} \exp(a_{12} T), a_2 = a_{21} \exp(a_{22} T)$	6
T3.11	Semolina (sacada)	$D(X, T) = a_0 \exp(-a_2 T) \frac{a_2 \exp(-a_3 / T)}{1 + a_2 \exp(-a_3 / T)},$	4
T3.12	Almidón poroso	$D(X, T) = (a_0 + a_1 X^{a_2}) \exp(-a_3 / T) a_0 = F_{(\varepsilon)}$	>5
D, humedad difusa; X, contenido de humedad material; T, temperatura; ai, constants; ε, porosidad.			

• CONTENIDO DE HUMEDAD EN EQUILIBRIO

La migración del agua en forma de vapor desde el alimento al medio circundante depende de su contenido de agua y de la composición del alimento, así como de la temperatura y humedad relativa del ambiente. A una temperatura constante el contenido en agua del alimento cambia continuamente hasta que alcanza un equilibrio con la presión de vapor en el aire circundante. En estas condiciones durante su almacenamiento, el alimento no gana ni pierde peso.

A este contenido de agua se le denomina contenido de agua de equilibrio y a la humedad relativa de la atmósfera de almacenamiento humedad relativa en equilibrio.

Cuando un grano se encuentra durante un tiempo suficientemente prolongado en un ambiente con determinada humedad relativa y temperatura, adquiere un contenido de humedad en equilibrio con dicho ambiente, es decir, no absorbe ni pierde agua, mientras el ambiente, por supuesto, no varíe su humedad y temperatura.

Cuando se representan diversos valores de humedad relativa frente al correspondiente contenido en agua en equilibrio, se obtiene una curva que se denomina la isoterma de sorpción de agua.

Cada alimento posee su característica isoterma de sorpción para cada temperatura. La diferente forma de las isotermas de sorpción se debe a las diferencias en la estructura física, composición química y capacidad de retención de agua del alimento

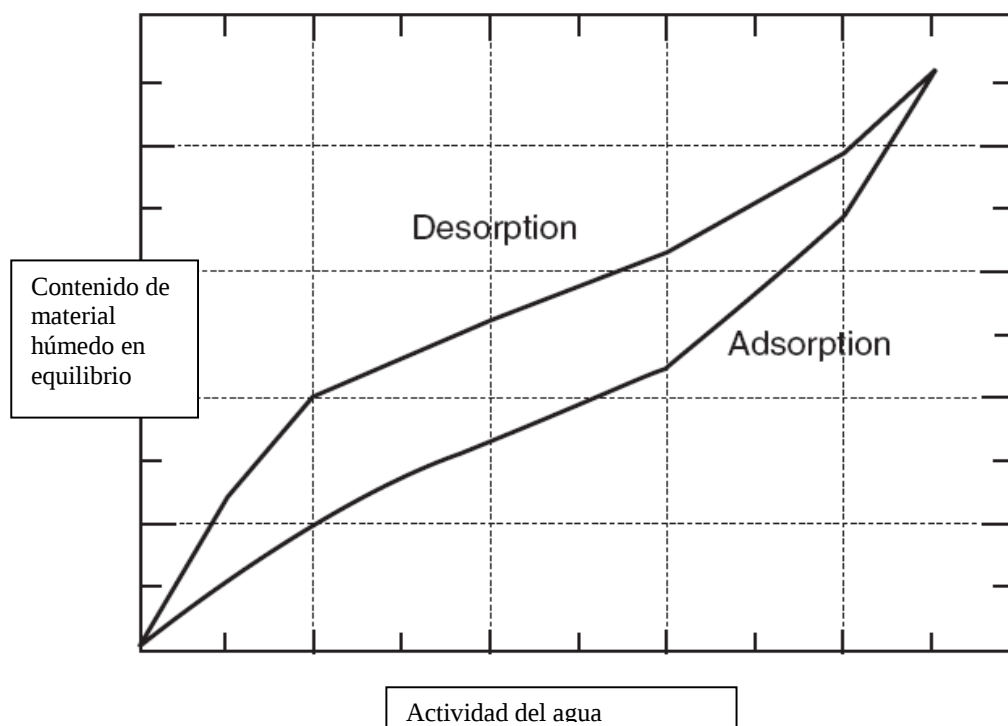
Los granos que tienen un alto contenido de aceite, como soya y girasol, absorben menos agua que granos en los que predomina un contenido mas harinoso, como maíz y trigo, para un mismo ambiente. Por este motivo, esos granos oleaginosos deben ser conservados en los almacenamientos a menores contenidos de humedad.

La isoterma de sorpción indica la actividad del agua a la que un alimento es estable, permite predecir su velocidad de deshidratación, la temperatura óptima de almacenamiento.

El cambio en una determinada isoterma se observa en la actividad de agua a medida que varía el contenido de agua en el alimento, es diferente si se retira de éste (desorción) o se añade al mismo (adsorción). Este fenómeno se denomina histéresis, es muy intenso en algunos alimentos por ejemplo el arroz.

Pos esta razón es importante cuando se pretende determinar el grado de protección del alimento contra el grado de captación de humedad ambiental (ver figura 11).

Figura 36 Isotermas de sorpción Fuente FIGURE 4.11 Hysteresis between adsorption and desorption isotherms. Handbook drying



5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS

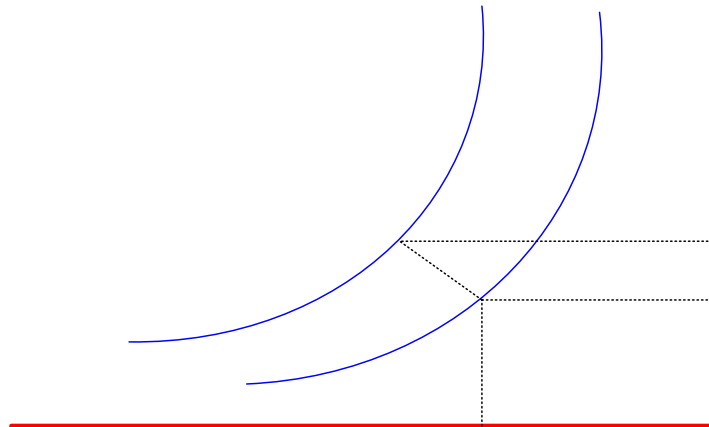
En el siguiente capítulo se analizaron los diferentes materiales que se utilizaron para las pruebas del prototipo de secado en los cuales se destaca la madera variedad caracoli y la arveja.

El análisis de la variación de humedad del producto lo que se pretendió conseguir fue una función matemática simplificada que muestre el fenómeno de transferencia de masa. Por ello para el estudio del secado se basó en un modelo matemático simple de deshidratación en bandejas presentado en el libro de métodos experimentales en la ingeniería alimentaria (2000). Y se basa en que la variación temporal del contenido de humedad de la materia es función lineal del potencial de secado amplificado por un coeficiente global de transferencia de masa y un gradiente de humedad, con lo cual se podemos afirmar

$$\frac{d\omega}{dt} = h_d (\omega_s - \omega) \quad \text{Ecuación 5.1}$$

En donde los valores ω_s y ω se obtienen en la práctica a partir de la lectura de la temperatura que rige en la cámara de secado en cualquier intervalo de tiempo ver figura (x),

Figura 37. Representación de la obtención de los valores de ω_s y ω . Fuente autores



$$-\frac{d\omega}{dt} = f(W) \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Según el mecanismo tendremos una función

$$-\frac{d\omega}{dt} = n + m \cdot W \quad \text{Ecuación 5.3}$$

ω_s : (Kg de vapor/ Kg de aire seco): Razón de humedad del aire saturado en la superficie del grano

ω : (Kg de vapor por Kg de aire seco): Razón de humedad del aire de secado

$\frac{d\omega}{dt}$ = velocidad de secado

m = pendiente de la curva en la grafica de velocidad de secado vs. Humedad

n = ordenada en el origen de la curva grafica de velocidad de secado vs. Humedad.

Con herramientas de programación se logro obtener el comportamiento grafico de los materiales utilizados las pruebas de secado. MATLAB (matrix laboratory), es un ambiente de cómputo, de alta ejecución numérica y de visualización. MATLAB integra el análisis numérico, calculo de matrices, procesamiento de señales, y graficación, en un ambiente sencillo de utilizar, donde los problemas y sus soluciones son expresadas justamente como están escritas; a diferencia de la programación tradicional, el elemento básico de dato es una matriz, la cual no requiere de dimensionamiento, lo que permite resolver problemas en una fracción de tiempo, del que nos tomaría al escribir un programa en cualquier lenguaje como, Pascal, Fortran, C, etc.

Utilizamos el programa para que nos brindara unas curvas que se acercaran con una mayor exactitud a lo que deseábamos y de esa manera nos permitiera visualizar un efecto más real en el comportamiento que ocurre en cada experiencia.

El código lo anexamos para que el estudiante sobre este desarrolle la experiencia con una herramienta mas que le brinde facilidades para el análisis de la experiencia.

Los valores resaltados son los coeficientes de la ecuación que nos brinda cualquier programa tipo Hoja calculo en este caso trabajamos con EES (**Engineering Equation Solver.**) que brinda una solución numérica de un juego de ecuaciones algebraicas.

El orden seguido, en el análisis de una prueba fue:

Primero después de una correcta tabulación de los datos obtenidos en una experiencia proseguimos a pedir la ecuación Ver Anexo B (Lista de tablas y graficas experimentales). y en el código que ingresamos a MATLAB, como resaltamos anotamos los coeficientes proporcionados por la ecuación (ver código).

5.1 Código Programa de Matlab:

```
a=[-3.68749312*1E-12 -1.57151003*1E-9 2.29366167*1E-6 -9.28783803*1E-4  
2.88731872*1E-1];
```

```
der=polyder(a);  
x=[0:0.1:270];  
y=polyval(a,x);  
yprima=polyval(der,x);
```

```
axes(handles.axes1)  
%plot(x,y,'r',x,yprima,'b');  
plot(x,y,'b');  
hold on  
xlabel('Tiempo min')  
ylabel('Humedad gr H2O/gr prod.seco')  
%legend('Humedad','Velocidad','Location','East')  
grid on
```

```
axes(handles.axes4)  
%plot(x,y,'r',x,yprima,'b');  
plot(x,-yprima,'b');  
hold on  
xlabel('Tiempo min')  
ylabel('Vel de secado')  
%legend('Humedad','Velocidad','Location','East')  
grid on
```

```
axes(handles.axes6);  
plot(y,-yprima);  
hold on
```

```

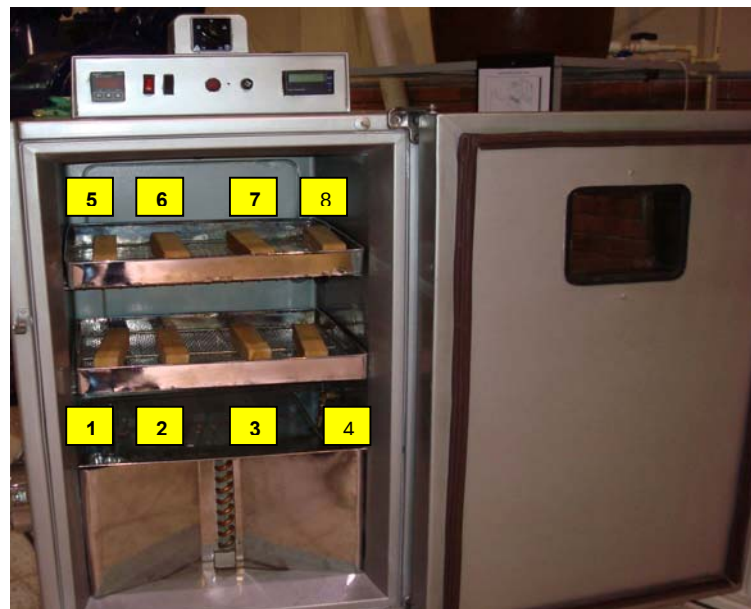
xlabel('Humedad gr H2O/gr producto seco (madera caracoli)')
ylabel('Vel de secado')
grid on

```

5.2 RESULTADOS.

5 .2.1 Madera ‘caracoli’

Figura 38 Disposición de las probetas para el secado de madera. Fuente Autores



Probeta 1

Condiciones de secado

Temperatura de la cámara de secado:	55 c
Velocidad del aire en la probeta:	0,7 m/seg.
Humedad de la cámara:	44%
Humedad inicial del material según laboratorio	22.3871%

Nota: Para el análisis los resultados son considerados constantes.

Datos obtenidos en las pruebas

Tabla 16. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 1. Fuente autores

tiempo (min)	peso probeta (g)	Masa seca Ms (g)	humedad producto(H) Kg vapor/ Kg de aire seco (H)	Velocidad (W)
0	144,66	112,2748211	0,288445606	
2	144,37	112,2748211	0,285862659	0,00129147
4	144,19	112,2748211	0,28425945	0,0008016
7	143,95	112,2748211	0,282121838	0,00071254
10	143,58	112,2748211	0,278826353	0,0010985
13	143,23	112,2748211	0,275709002	0,00103912
17	142,86	112,2748211	0,272413517	0,00082387
170	133,23	112,2748211	0,186641837	0,00046315
175	133,09	112,2748211	0,185394897	0,00024939
180	132,85	112,2748211	0,183257285	0,00042752
185	132,67	112,2748211	0,181654076	0,00032064
190	132,48	112,2748211	0,1799618	0,00033846
280	129,24	112,2748211	0,151104038	0,00030283
290	128,9	112,2748211	0,148075755	0,00030283
300	128,6	112,2748211	0,14540374	0,0002672

Resultados gráficos obtenidos

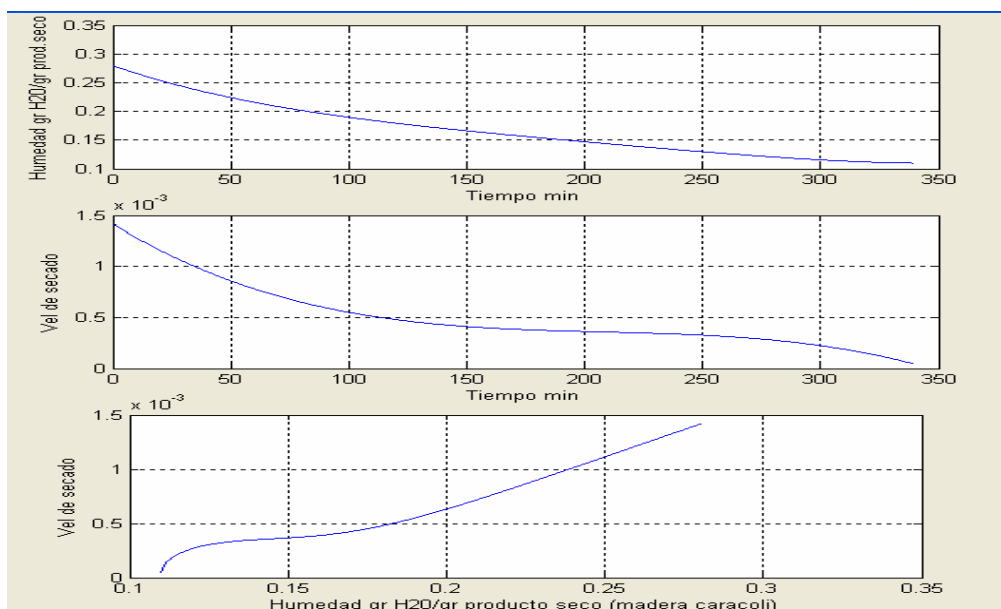


Figura 39, cinética de secado madera (caracoli) probeta 1. Fuente autores

Probeta 2

Condiciones de secado

Temperatura de la cámara de secado:	54.5 c
Velocidad del aire en la probeta:	1.2 m/seg.
Humedad de la cámara:	44%
Humedad inicial del material según laboratorio:	22.3871%

Nota: para análisis de los resultados estos datos son considerados constantes durante toda la prueba

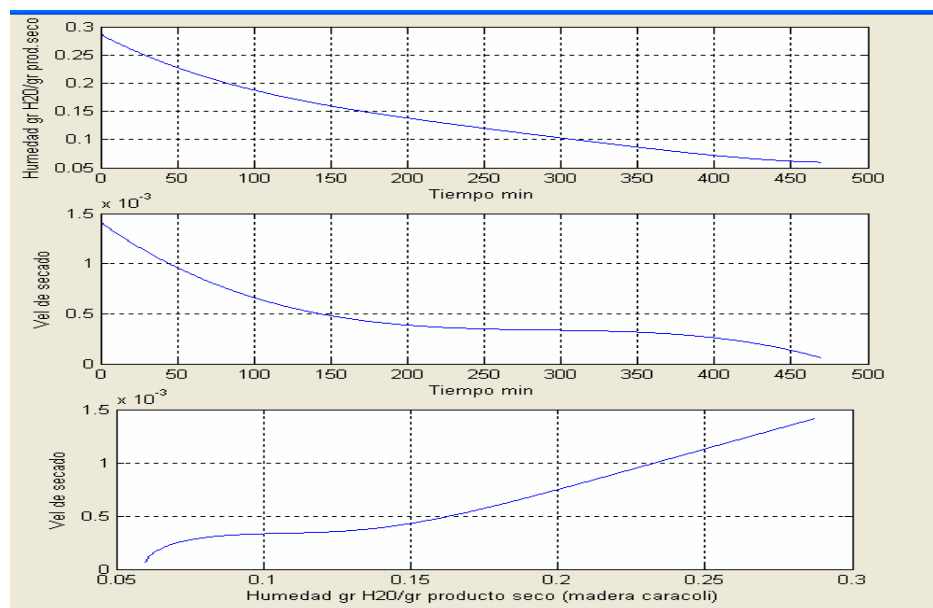
Datos obtenidos en la prueba

Tabla 17. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 2. Fuente autores

Tiempo (min.)	pesos de la probeta	Masa seca (Ms) (g)	humedad del producto (h) Kg vapor/ Kg de aire seco (H)	Velocidad de secado (w)
0	123,65	95,9683509	0,288445606	
2	123,29	95,9683509	0,28469437	0,00187562
4	123,01	95,9683509	0,281776741	0,00145881
7	122,61	95,9683509	0,2776087	0,00138935
10	122,15	95,9683509	0,272815453	0,00159775
13	121,8	95,9683509	0,269168418	0,00121568
17	121,26	95,9683509	0,263541563	0,00140671
20	120,8	95,9683509	0,258748316	0,00159775
270	106,84	95,9683509	0,113283693	0,00029176
280	106,5	95,9683509	0,109740858	0,00035428
290	106,18	95,9683509	0,106406425	0,00033344
300	105,89	95,9683509	0,103384596	0,00030218

Resultados gráficos obtenidos

Figura 40, cinética de secado madera (caracoli) probeta 2. Fuente autores



Probeta 3

Condiciones de secado

Temperatura de la cámara de secado:	55c
Velocidad del aire en la probeta:	0.9 m/seg.
Humedad de la cámara:	44%
Humedad inicial del material según laboratorio:	22.3871%

Nota: para análisis de los resultados estos datos son considerados constantes durante toda la prueba

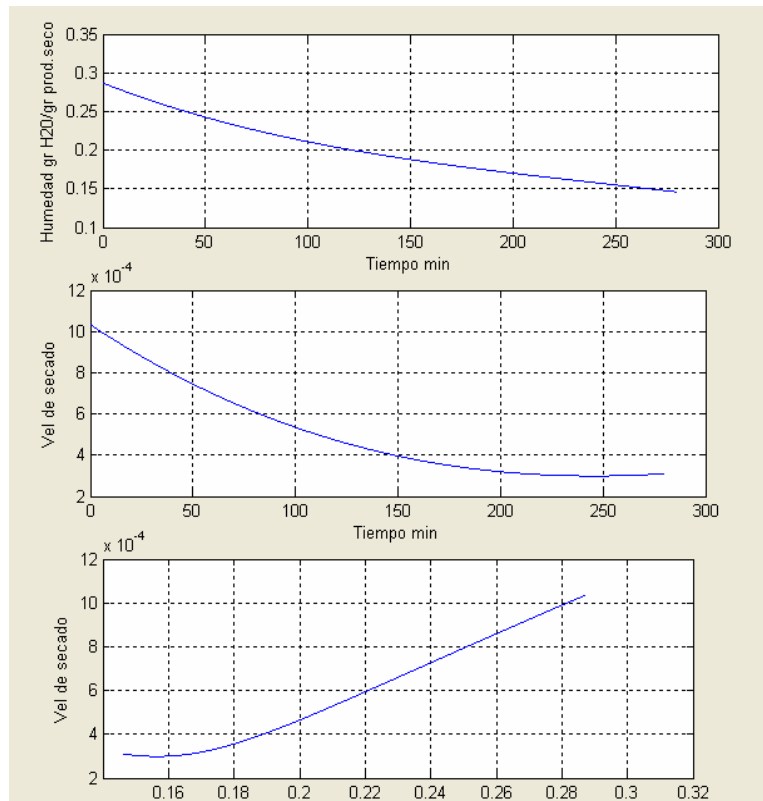
Datos obtenidos en la prueba

Tabla 18. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 3. Fuente autores

Tiempo (min.)	peso de la probeta (g)	Masa seca (Ms) (g)	humedad producto (H)	Velocidad de secado (W)
0	129,05	100,159447	0,288445606	
2	128,77	100,159447	0,285650064	0,00139777
4	128,58	100,159447	0,283753088	0,00094849
7	128,32	100,159447	0,281157227	0,00086529
10	127,92	100,159447	0,277163595	0,00133121
13	127,06	100,159447	0,268577286	0,0028621
17	127,01	100,159447	0,268078082	0,0001248
32	125,83	100,159447	0,256296867	0,00102337
36	125,52	100,159447	0,253201802	0,00077377
270	115,01	100,159447	0,148269114	0,00032947
280	114,77	100,159447	0,145872935	0,00023962
290	114,47	100,159447	0,142877711	0,00029952
300	114,21	100,159447	0,14028185	0,00025959

Resultados gráficos obtenidos

Figura 41. Cinética de secado madera (caracoli) probeta 3. Fuente autores



Probeta 4

Condiciones de secado

Temperatura de la cámara de secado:	55c
Velocidad del aire en la probeta:	1.4 m/seg.
Humedad de la cámara:	44%
Humedad inicial del material según laboratorio:	22.3871%

Nota: para análisis de los resultados estos datos son considerados constantes durante toda la prueba

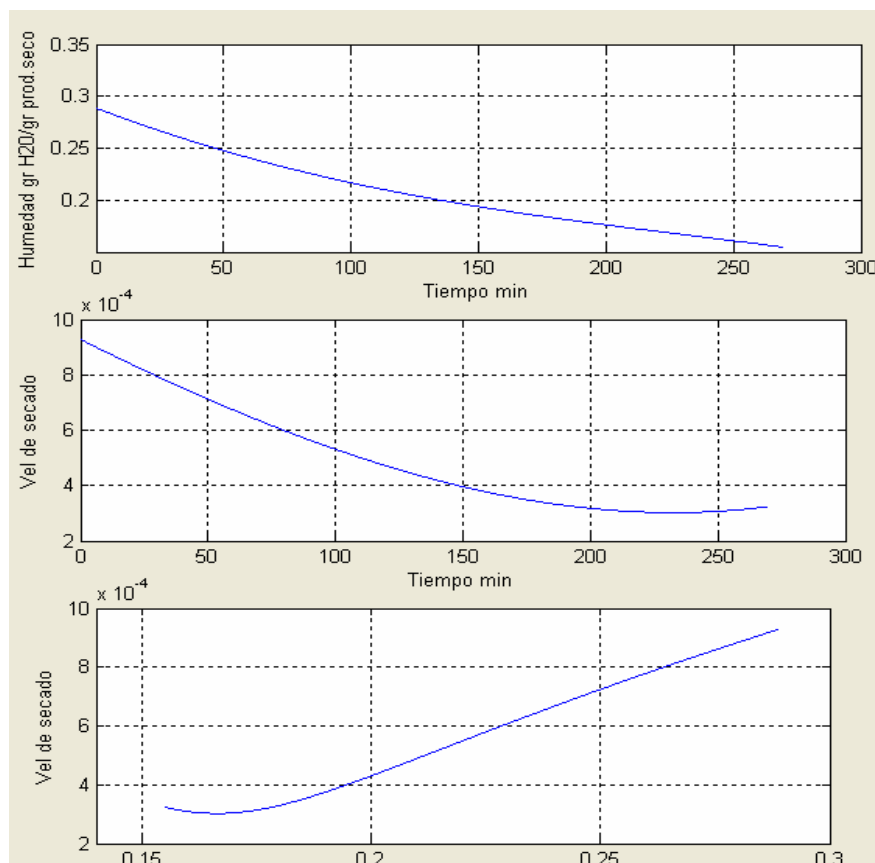
Datos obtenidos en la pruebas

Tabla 19. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 4. Fuente autores

Tiempo (min.)	peso de la probeta (g)	Masa seca (ms) (g)	humedad producto(H) Kg vapor/ Kg de aire seco (H)	Velocidad de secado (W)
0	137,5	106,717738	0,288445606	
2	137,3	106,717738	0,286571504	0,00093705
4	137,15	106,717738	0,285165927	0,00070279
7	136,91	106,717738	0,282917003	0,00074964
10	136,55	106,717738	0,279543619	0,00112446
13	136,28	106,717738	0,27701358	0,00084335
17	135,97	106,717738	0,274108721	0,00072621
20	135,61	106,717738	0,270735336	0,00112446
24	135,26	106,717738	0,267455656	0,00081992
28	134,87	106,717738	0,263801156	0,00091363
32	134,56	106,717738	0,260896297	0,00072621
36	134,21	106,717738	0,257616617	0,00081992
40	133,91	106,717738	0,254805463	0,00070279
45	133,56	106,717738	0,251525783	0,00065594
270	123,16	106,717738	0,154072443	0,00029049
280	122,84	106,717738	0,151073878	0,00029986
290	122,49	106,717738	0,147794199	0,00032797
300	122,23	106,717738	0,145357865	0,00024363

Resultados gráficos obtenidos

Figura 42. Cinética de secado madera (caracoli) probeta 4. Fuente autores



Probeta 5

Condiciones de secado

Temperatura de la cámara de secado:	45c
Velocidad del aire en la probeta:	0.5 m/seg.
Humedad de la cámara:	44%
Humedad inicial del material según laboratorio:	22.3871%

Nota: para análisis de los resultados estos datos son considerados constantes durante toda la prueba

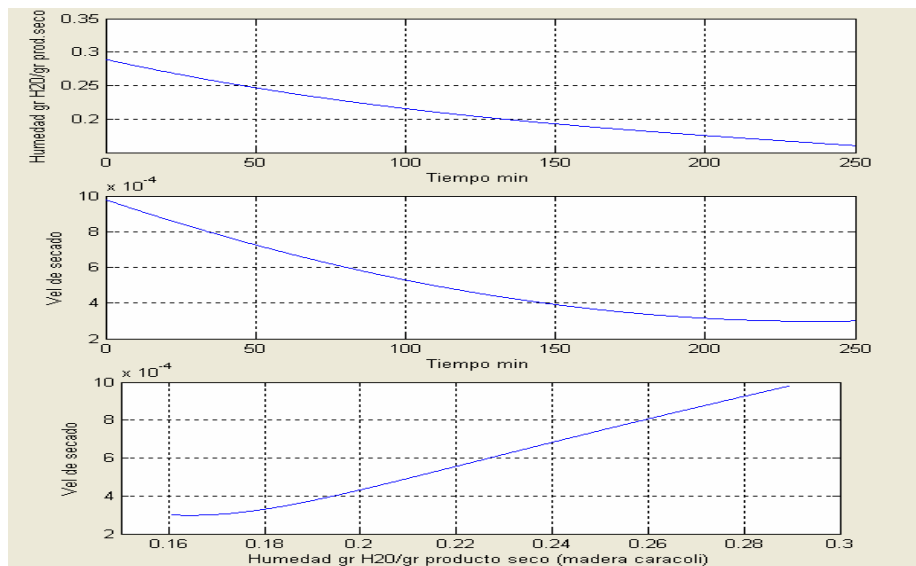
Datos obtenidos en la prueba

Tabla 20. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 5. Fuente autores

tiempo (min)	peso de la probeta (g)	Masa seca ms (g)	humedad producto (H) Kg vapor/ Kg de aire seco (H)	Velocidad de secado (W)
0	133,57	103,667551	0,288445606	
2	133,41	103,667551	0,286902211	0,0007717
4	133,26	103,667551	0,285455278	0,00072347
7	133,05	103,667551	0,283429572	0,00067524
10	132,72	103,667551	0,280246319	0,00106108
13	132,35	103,667551	0,276677218	0,0011897
17	132,1	103,667551	0,274265663	0,00060289
20	131,64	103,667551	0,269828402	0,00147909
24	131,38	103,667551	0,267320385	0,000627
190	122,26	103,667551	0,179346858	0,00032797
260	119,91	103,667551	0,156678241	0,00027009
270	119,6	103,667551	0,153687913	0,00029903
280	119,31	103,667551	0,150890509	0,00027974
290	119,01	103,667551	0,147996643	0,00028939
300	118,73	103,667551	0,145295701	0,00027009

Resultados gráficos obtenidos

Figura 43, cinética de secado madera (caracoli) probeta 5. Fuente autores



Probeta 6

Condiciones de secado

Temperatura de la cámara de secado:	45c
Velocidad del aire en la probeta:	0.5 m/seg.
Humedad de la cámara:	44%
Humedad inicial del material según laboratorio:	22.3871%

Nota: para análisis de los resultados estos datos son considerados constantes durante toda la prueba

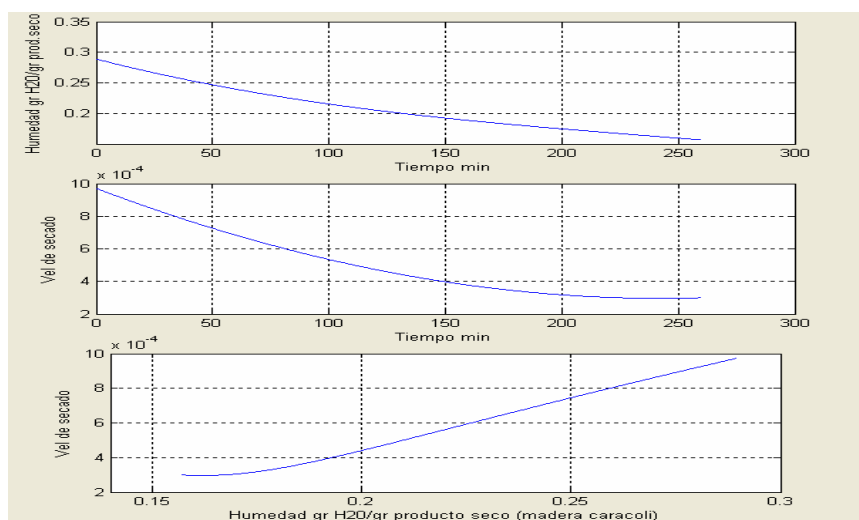
Datos obtenidos en la prueba

Tabla 21. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 6. Fuente autores

tiempo (min)	peso probeta (g)	Masa seca ms (g)	humedad producto (H) Kg vapor/ Kg de aire seco (H)	Velocidad de secado (W)
0	139,07	107,93626	0,288445606	
2	138,88	107,93626	0,286685308	0,00088015
4	138,74	107,93626	0,285388246	0,00064853
7	138,52	107,93626	0,283350006	0,00067941
10	138,17	107,93626	0,280107352	0,00108088
13	137,83	107,93626	0,276957345	0,00105
17	137,5	107,93626	0,273899985	0,00076434
20	137,12	107,93626	0,270379388	0,00117353
24	136,77	107,93626	0,267136734	0,00081066
160	128,35	107,93626	0,189127731	0,00027794
250	125,07	107,93626	0,158739426	0,00032427
260	124,78	107,93626	0,156052655	0,00026868
270	124,47	107,93626	0,15318059	0,00028721
280	124,18	107,93626	0,150493819	0,00026868
290	123,85	107,93626	0,147436459	0,00030574
300	123,57	107,93626	0,144842335	0,00025941

Resultados gráficos

Figura 44. Cinética de secado madera (caracoli) probeta 6. Fuente autores



Obtenidos

Probeta 7

Condiciones de secado

Temperatura de la cámara de secado:	45c
Velocidad del aire en la probeta:	0.5 m/seg.
Humedad de la cámara:	44%
Humedad inicial del material según laboratorio:	22.3871%

Nota: para análisis de los resultados estos datos son considerados constantes durante toda la prueba

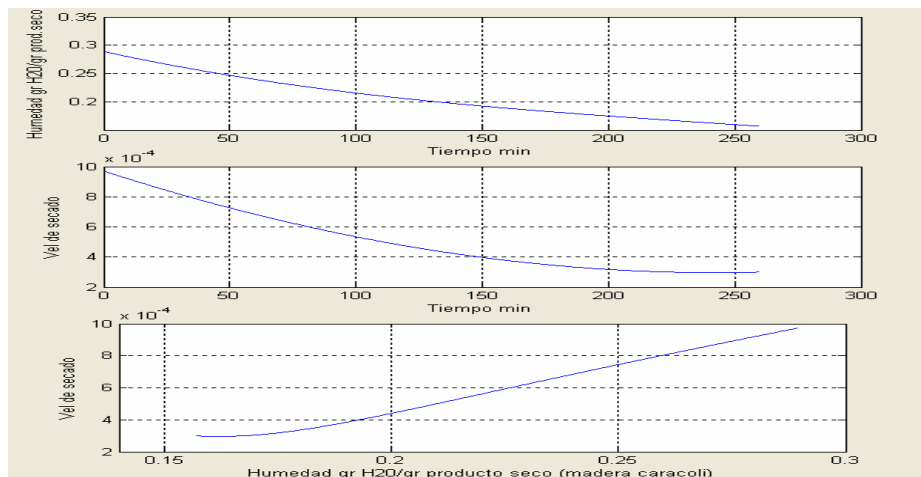
Datos obtenidos en la prueba

Tabla 22. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 7. Fuente autores

tiempo (min.)	peso probeta (g)	Masa seca ms (g)	humedad producto (Kg de vapor por Kg de aire seco (H))	Velocidad de secado (W)
0	173,9	134,968833	0,288445606	
2	173,7	134,968833	0,286963783	0,00074091
4	173,5	134,968833	0,285481959	0,00074091
7	173,27	134,968833	0,283777862	0,00056803
10	173,09	134,968833	0,282444221	0,00044455
13	172,56	134,968833	0,278517388	0,00130894
17	172,2	134,968833	0,275850106	0,00066682
20	171,8	134,968833	0,272886459	0,00098788
165	161,92	134,968833	0,199684374	0,00037046
240	158,74	134,968833	0,176123379	0,00033341
250	158,32	134,968833	0,173011549	0,00031118
260	157,95	134,968833	0,170270176	0,00027414
270	157,6	134,968833	0,167676984	0,00025932
280	157,23	134,968833	0,164935611	0,00027414
290	156,85	134,968833	0,162120146	0,00028155
300	156,5	134,968833	0,159526955	0,00025932

Resultados gráficos obtenidos

Figura 45, cinética de secado madera (caracoli) probeta 7. Fuente autores



Probeta 8

Condiciones de secado

Temperatura de la cámara de secado: 45c
 Velocidad del aire en la probeta: 0.7 m/seg.
 Humedad de la cámara: 44%
 Humedad inicial del material según laboratorio: 22.3871%

Nota: para análisis de los resultados estos datos son considerados constantes durante toda la prueba

Datos obtenidos en la prueba

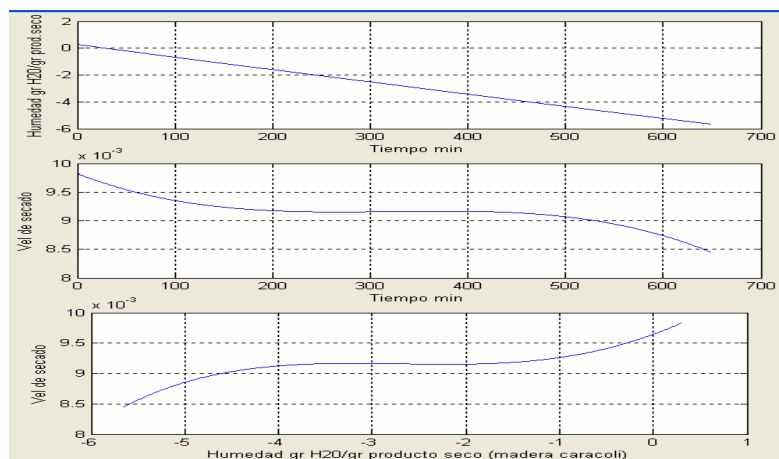
Tabla 23. Datos de las pruebas madera (caracoli) probeta 8. Fuente autores

Tiempo (min.)	peso probeta (g)	Masa seca (ms)	humedad producto Kg de vapor/ Kg de aire seco (H)	Velocidad secado (W)
0	144,66	112,274821	0,288445606	
2	144,37	112,274821	0,285862659	0,00129147
4	144,19	112,274821	0,28425945	0,0008016
7	143,95	112,274821	0,282121838	0,00071254
10	143,58	112,274821	0,278826353	0,0010985
13	143,23	112,274821	0,275709002	0,00103912
17	142,86	112,274821	0,272413517	0,00082387

20	142,5	112,274821	0,269207099	0,00106881
230	130,99	112,274821	0,166690792	0,00033846
240	130,58	112,274821	0,163039038	0,00036518
250	130,23	112,274821	0,159921687	0,00031174
260	129,89	112,274821	0,156893404	0,00030283
270	129,58	112,274821	0,154132322	0,00027611
280	129,24	112,274821	0,151104038	0,00030283
290	128,9	112,274821	0,148075755	0,00030283
300	128,6	112,274821	0,14540374	0,0002672

Resultados gráficos obtenidos

Figura 46. Cinética de secado madera (caracoli) probeta 8.



Fuente autores

5.2.2. Arveja

Figura 47. Disposición de los tamices para el secado de arveja.



Fuente Autores

Tamiz 1

Condiciones de secado

Temperatura de la cámara de secado:	40c
Velocidad del aire en la probeta:	0.7 m/seg.
Humedad de la cámara:	48%
Humedad inicial del material según laboratorio:	69.97%

Nota: para análisis de los resultados estos datos son considerados constantes durante toda la prueba

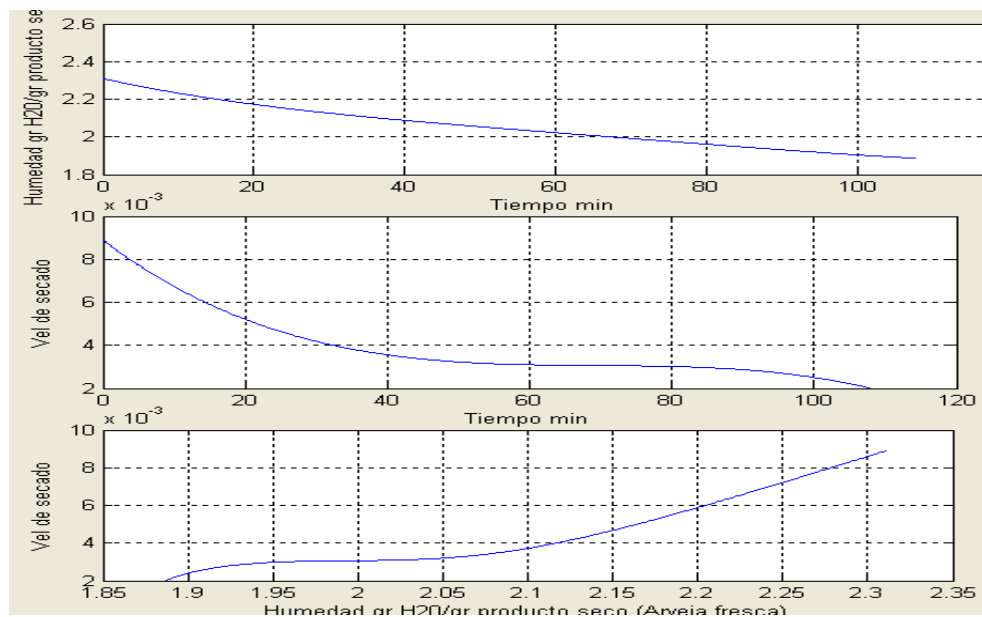
Datos obtenidos en la prueba

Tabla 24. Datos de las pruebas arveja tamiz 1. Fuente autores

Tiempo (min)	peso tamiz (g)	Masa seca (ms)	humedad en base seca(Kg de vapor/ Kg de aire seco (H)	velocidad de secado(W)
0	45,5	13,66365	2,33000333	
2	45,02	13,66365	2,294873625	0,017564853
4	44,6	13,66365	2,264135132	0,015369246
6	44,37	13,66365	2,247302148	0,008416492
8	44,21	13,66365	2,235592247	0,005854951
10	44,09	13,66365	2,22680982	0,004391213
12	43,96	13,66365	2,217295525	0,004757148
14	43,8	13,66365	2,205585623	0,005854951
16	43,76	13,66365	2,202658148	0,001463738
43	42,04	13,66365	2,076776703	0,002927475
48	41,84	13,66365	2,062139326	0,002927475
53	41,73	13,66365	2,054088768	0,001610112
88	40,18	13,66365	1,940649094	0,003220223
93	39,97	13,66365	1,925279848	0,003073849
98	39,78	13,66365	1,91137434	0,002781102
103	39,6	13,66365	1,8982007	0,002634728
108	39,4	13,66365	1,883563323	0,002927475

Resultados gráficos obtenidos

Figura 48. Cinética de secado arveja tamiz 1. Fuente autores



Tamiz 2

Condiciones de secado

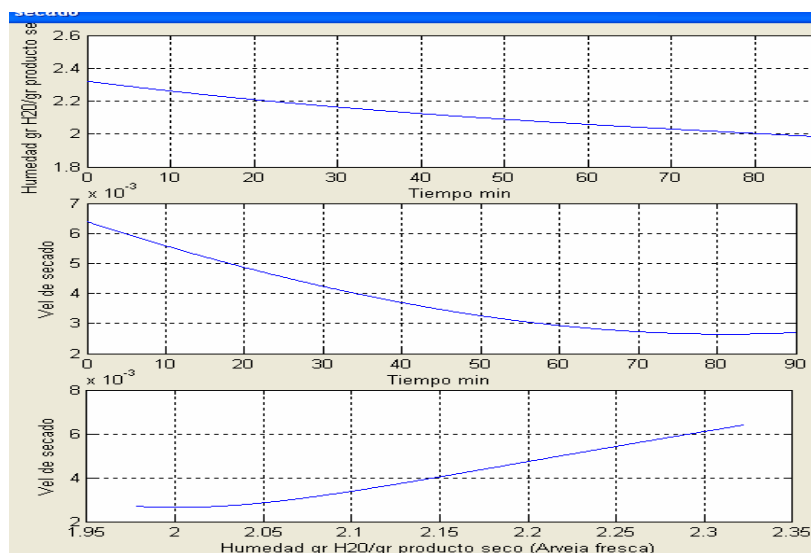
Temperatura de la cámara de secado:	40c
Velocidad del aire en la probeta:	1.1 m/seg.
Humedad de la cámara:	48%
Humedad inicial del material según laboratorio:	69.97%
Nota: Para el análisis los resultados son considerados constantes.	

Tabla 25. Datos de las pruebas arveja tamiz 2. Fuente autores

Tiempo (min.)	peso tamiz (g)	Masa seca ms (g)	humedad del producto (H) Kg vapor/ Kg de aire seco (H)	Velocidad de secado (W)
0	44,07	13,234221	2,33000333	
2	43,8	13,234221	2,309601676	0,01020083
4	43,55	13,234221	2,290711255	0,00944521
6	43,37	13,234221	2,277110153	0,00680055
8	43,23	13,234221	2,266531517	0,00528932
10	43,13	13,234221	2,258975349	0,00377808
12	43,01	13,234221	2,249907947	0,0045337
22	42,43	13,234221	2,206082171	0,00415589
24	42,33	13,234221	2,198526003	0,00377808
26	42,2	13,234221	2,188702984	0,00491151
28	41,82	13,234221	2,159989545	0,01435672
33	41,54	13,234221	2,138832274	0,00423145
88	39,48	13,234221	1,983175209	0,00181348
93	39,29	13,234221	1,96881849	0,00287134
98	39,09	13,234221	1,953706153	0,00302247
103	38,95	13,234221	1,943127518	0,00211573
108	38,7	13,234221	1,924237097	0,00377808

Resultados gráficos obtenidos

Figura 49. Cinética de secado arveja tamiz 2. Fuente autores



Tamiz 3

Condiciones de secado

Temperatura de la cámara de secado: 35c
Velocidad del aire en la probeta: 0.7 m/seg.
Humedad de la cámara: 48%
Humedad inicial del material según laboratorio: 69.97%

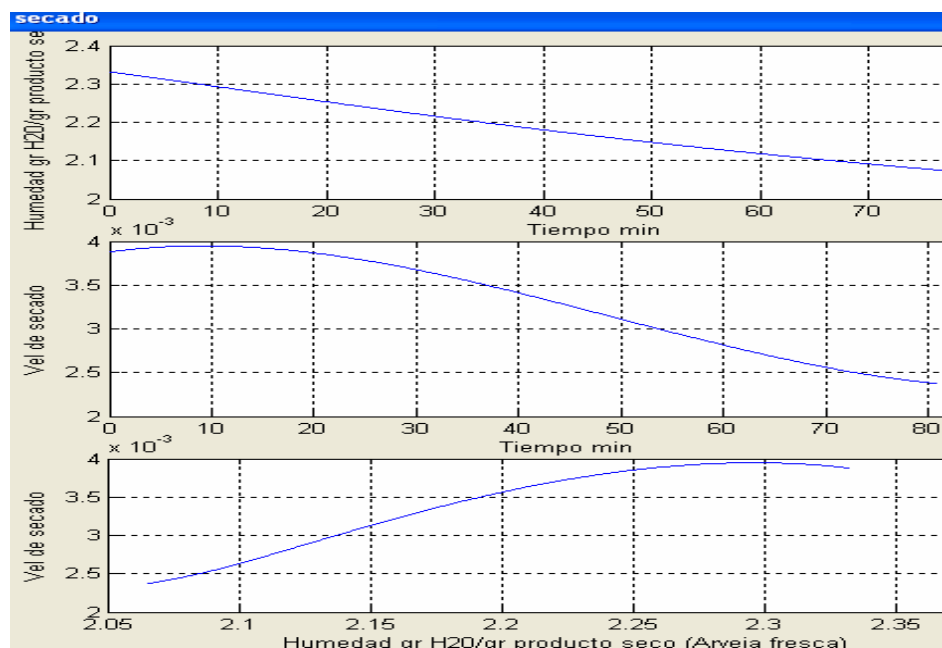
Nota: Para el análisis los resultados I son considerados constantes

Tabla 26. Datos de las pruebas arveja tamiz 3

Tiempo (min.)	peso tamiz (g)	Masa seca (ms)	Humedad del producto (H) Kg vapor/ Kg de aire seco (H)	Velocidad de secado (W)
0	52,51	15,768753	2,33000333	
2	52,41	15,768753	2,32366167	0,00317083
4	52,29	15,768753	2,31605169	0,00380499
6	52,17	15,768753	2,3084417	0,00380499
8	52,05	15,768753	2,30083171	0,00380499
10	51,94	15,768753	2,29385589	0,00348791
12	51,81	15,768753	2,28561174	0,00412208
14	51,69	15,768753	2,27800175	0,00380499
73	48,6	15,768753	2,0820446	0,00291716
78	48,4	15,768753	2,06936129	0,00253666
83	48,2	15,768753	2,05667798	0,00253666
88	48,11	15,768753	2,05097049	0,0011415
93	47,84	15,768753	2,03384802	0,00342449
98	47,69	15,768753	2,02433553	0,0019025
103	47,49	15,768753	2,01165222	0,00253666
108	47,32	15,768753	2,00087141	0,00215616

Resultados gráficos obtenidos

Figura 50. Cinética de secado arveja tamiz 3. Fuente autores



Tamiz 4

Condiciones de secado

Temperatura de la cámara de secado:	35c
Velocidad del aire en la probeta:	0.7 m/seg.
Humedad de la cámara:	48%
Humedad inicial del material según laboratorio:	69.97%

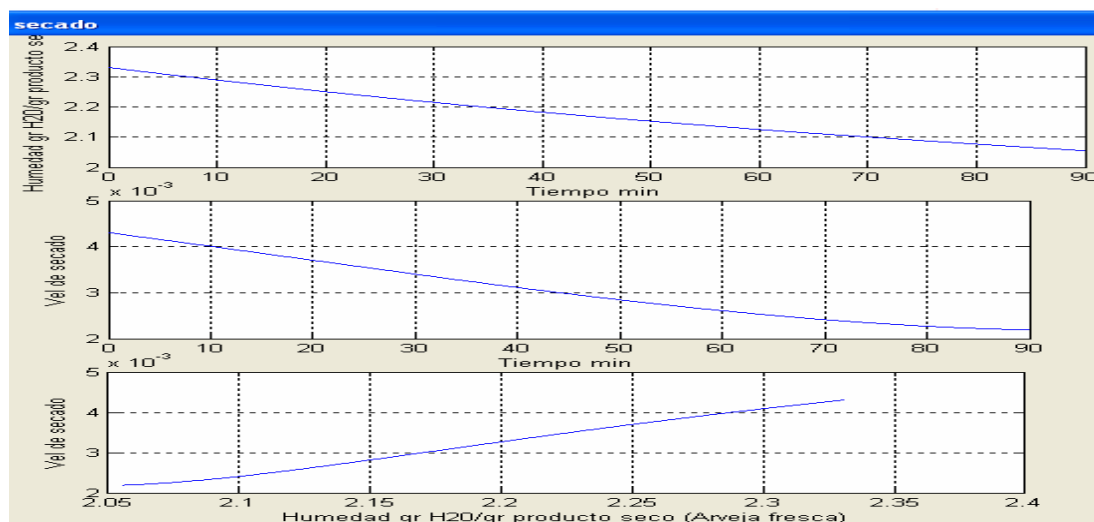
Nota: Para el análisis los resultados son considerados constantes.

Tabla 27. Datos de las pruebas arveja tamiz 4

Tiempo (min.)	peso tamiz (g)	Masa seca (ms)	Humedad del producto (Kg vapor/ Kg de aire seco (H)	Velocidad de secado (W)
0	50	15,015	2,33000333	
2	49,87	15,015	2,32134532	0,004329
4	49,73	15,015	2,31202131	0,004662
6	49,62	15,015	2,3046953	0,003663
8	49,51	15,015	2,2973693	0,003663
10	49,39	15,015	2,28937729	0,003996
12	49,28	15,015	2,28205128	0,003663
14	49,19	15,015	2,27605728	0,002997
73	46,4	15,015	2,09024309	0,0030636
78	46,3	15,015	2,08358308	0,001332
83	46,14	15,015	2,07292707	0,0021312
88	45,9	15,015	2,05694306	0,0031968
93	45,7	15,015	2,04362304	0,002664
98	45,6	15,015	2,03696304	0,001332
103	45,46	15,015	2,02763903	0,0018648
108	45,3	15,015	2,01698302	0,0021312

Resultados gráficos obtenidos

Figura 51. cinética de secado arveja tamiz 4. Fuente autores



5.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.3.1 Madera

5.3.1.1 Ecuación representativa del secado. partir de los diferentes resultados obtenidos a lo largo de las pruebas experimentales y basados en las diferentes ecuaciones que plantean el comportamiento de la humedad en función del tiempo (ecuación 5.3) deducimos una función representativa que plantea el estudio del secado en los diferentes intervalos de tiempo a lo largo de los ensayos.

Madera caracoli

Tabla 28. Resultados de las pruebas y función representativa madera, Fuente autor

Probeta	humedad relativa de sec, Kg vapor / Kg de aire seco	Temp. de sec.(°C)	Velocidad de sec. (m/seg)	función representativa	coeficiente n	pendiente m
1	44%	55	0,7	$\frac{d\omega}{dt} = -1,31E-03 + 1,08E-02 * \omega$	-1,31E-03	1,08E-02
2	44%	55	1,2	$\frac{d\omega}{dt} = -5,80E-04 + 7,03E-03 * \omega$	-5,80E-04	7,03E-03
3	44%	55	0,9	$\frac{d\omega}{dt} = -1,31E-03 + 1,08E-02 * \omega$	-1,31E-03	1,08E-02
4	44%	55	1,4	$\frac{d\omega}{dt} = -5,21E-04 + 4,95E-03 * \omega$	-5,21E-04	4,95E-03
5	44%	45	0,5	$\frac{d\omega}{dt} = -1,31E-03 + 1,08E-02 * \omega$	-1,31E-03	1,08E-02
6	44%	45	0,5	$\frac{d\omega}{dt} = -5,39E-04 + 5,08E-03 * \omega$	-5,39E-04	5,08E-03
7	44%	45	0,5	$\frac{d\omega}{dt} = -4,98E-04 + 4,4E-03 * \omega$	-4,98E-04	4,40E-03

Probeta	humedad relativa de sec, Kg vapor / Kg de aire seco	Temp. de sec.(°C)	Velocidad de sec. (m/seg)	función representativa	coeficiente n	pendiente m
				$03^* \omega$		
8	44%	45	0,7	$\frac{d\omega}{dt} = -6,14E-04 + 5,43E-03^* \omega$	-6,14E-04	5,43E-03

En las Figuras (39 a la 46) se muestran las cinéticas de secado para la madera (Caracoli) obtenidas a diferentes temperaturas y diferentes velocidades de secado analizadas, en cada una de las graficas se observa que las cinéticas se ajustaron a un modelo exponencial, lo cual esta de acuerdo a lo reportado algunos investigadores anteriormente para diferentes productos (Saravacos, 1995; Chrastil, 1989) Así mismo, se observó que las curvas obtenidas es muy difícil observar dos zonas lineales de diferente pendiente, lo cual esta directamente relacionado con las dos etapas de secado generalmente observadas (Geankoplis, 1998), es decir que no diferencian perfectamente los dos periodos principales de secado: de velocidad constante y velocidad decreciente por ello se asume periodo de secado decreciente.

En este periodo de secado se obtuvieron valores de la pendiente (tabla 28) (la cual está relacionada directamente con la transferencia de masa) que fueron variando a medida que aumentó la temperatura del secador y flujo de aire en el secador, obteniéndose la mayor velocidad de secado a una temperatura 55 °C y una velocidad de flujo de (1.4 m/seg.) (Figura 41) y la menor a 45 °C (Figura 46), lo cual esta de acuerdo con los datos reportados de las propiedades termodinámicas, es decir que a mayor temperatura mayor energía cinética de las moléculas del agua. Asi mismo se observó que fue menor el tiempo necesario para llegar al humedad requería cuando se aplicó la temperatura más alta (Figura 25

5.3.1.2 Análisis del coeficiente individual de materia h_d

La parte experimental tiene como objetivo proporcionar para el análisis las herramientas que permiten deducir un comportamiento bien definido, es así como establecemos el cálculo de un coeficiente individual de transferencia de materia h_d respaldado primero por los resultados a partir de las diferentes pruebas y aún mas por las ecuación deducida (ecuación 5.1) como se había referenciado anteriormente junto a la obtención de la grafica.

Tabla 28. Resultados y obtención del coeficiente de transferencia individual de materia h_d

probeta	Temp C	humedad relativa Φ	presión vapor (bar)	presión de aire bar	humedad seno del grano ω_s	humedad del aire ω	velocidad de secado promedio $\frac{d\omega}{dt}$	coeficiente h_d
1	55	0,44	0,1574	0,9012592	0,108628905	0,047796718	0,000726112	0,006684335
2	55	0,44	0,1574	0,9012592	0,108628905	0,047796718	0,00072558	0,006679438
3	55	0,44	0,1574	0,9012592	0,108628905	0,047796718	0,00057427	0,005286526
4	55	0,44	0,1574	0,9012592	0,108628905	0,047796718	0,000536115	0,004935287
5	45	0,44	0,9584	0,9012592	0,661435467	0,291031606	0,000540129	0,000816601
6	45	0,44	0,9584	0,9012592	0,661435467	0,291031606	0,000540442	0,000817075
7	45	0,44	0,9584	0,9012592	0,661435467	0,291031606	0,000480518	0,000726477
8	45	0,44	0,9584	0,9012592	0,661435467	0,291031606	0,000542485	0,000820163
							h_d	0,003345738

5.3.2 Arveja

5.3.2.1 Ecuación representativa de secado

El análisis es similar al estudiado con la madera.

Tabla29. Resultados de las pruebas y función representativa arveja. Fuente autor

tamiz	humedad relativa de sec Kgaire/Kg,	Temperatura de sec.(c°)	Velocidad de sec. (m/seg.)	Función representativa	Coeficiente n	Pendiente m
1	48%	40	0,7	$W=-3,42E-02+1,871E-02 \cdot H$	-3,42E-02	1,87E-02
2	48%	40	1,1	$W=-2,13E-02+1,21E-02 \cdot H$	-2,13E-02	1,21E-02
3	48%	35	0,7	$W=-9,36E-03+5,84E-03 \cdot H$	-9,36E-03	5,84E-03
4	48%	35	0,7	$W=-1,35E-02+7,660E-03 \cdot H$	1,35E-02	7,66E-03

En las Figuras (48 a la 51) se muestran las cinéticas de secado para la arveja obtenidas a diferentes temperaturas y diferentes analizadas, en cada una de las graficas se observa que las cinéticas se ajustaron a un modelo exponencial, lo cual esta de acuerdo a lo reportado por algunos investigadores anteriormente para diferentes productos (Saravacos, 1995; Chrastil, 1989) Así mismo, se observó que las curvas obtenidas es muy difícil observar dos zonas lineales de diferente pendiente, lo cual esta directamente relacionado con las dos etapas de secado generalmente observadas (Geankoplis, 1998), es decir que no diferencian perfectamente los dos periodos principales de secado: de velocidad constante y velocidad decreciente por ello se asume periodo de secado decreciente.

En este periodo de secado se obtuvieron valores de la pendiente (tabla 29) (la cual está relacionada directamente con la transferencia de masa) que fueron variando a medida que aumentó la temperatura del secador y flujo de aire en secador, obteniéndose la mayor velocidad de secado a una temperatura 40 °C y una velocidad de flujo de (1.1 m/seg.) (Figura 49) y la menor a 35 °C (Figura 50), lo

cual esta de acuerdo con los datos reportados de las propiedades termodinámicas, es decir que a mayor temperatura mayor energía cinética de las moléculas del agua. Así mismo se observó que fue menor el tiempo necesario para llegar al humedad requería cuando se aplicó la temperatura más alta (Figura 49).

5.3.2.2 Análisis del coeficiente individual de materia h_d

El análisis es similar al estudiado con la madera.

Tabla 30. Resultados y obtención del coeficiente de transferencia individual de materia h_d

TAMIZ	Temp C	humedad relativa Φ	presión vapor (bar)	presión de aire bar	humedad seno del grano ω_s	humedad del aire ω	velocidad de secado promedio $\frac{d\omega}{dt}$	coeficiente h_d
1	40	0,48	0,07375	0,9012592	0,050898232	0,02443115	0,005010862	0,18932432
2	40	0,48	0,07375	0,9012592	0,050898232	0,02443115	0,00440525	0,16644261
3	35	0,48	0,05622	0,9012592	0,038799981	0,01862399	0,00335474	0,16627387
4	35	0,48	0,05622	0,9012592	0,038799981	0,01862399	0,00323232	0,16020626
								0,17056177

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la realización de este proyecto se logro diseñar y construir un secador de productos agrícolas para el laboratorio de transferencia de calor en la escuela de ingeniería mecánica, cumpliendo con los objetivos planteados inicialmente.

El secador tiene una capacidad mínima de 5 a 10 kilogramos por cochada, que se pueden distribuir en las dos bandejas.

El flujo de aire necesario para extraer el agua a los diferentes materiales dentro del equipo, es suministrado a partir de dos ventiladores axiales que impulsan el aire a través de un intercambiador de calor para calentarlo, generando un flujo de aire caliente, que tiene dos velocidades diferentes y con la capacidad de invertir el sentido.

Un sistema de humidificación, que funciona a partir de la línea de alimentación de vapor, que condensa la suficiente cantidad para suministrar en cualquier momento la cantidad suficiente.

El suministro de vapor es controlado mediante la apertura o cierre de una válvula solenoide ON/OFF que opera dependiendo de la temperatura programada en un termostato.

La maquina por su diseño comparada con otros equipos similares brinda ventajas en aspectos relacionados a la seguridad y ahorro.

Este diseño permite un fácil mantenimiento de todos sus elementos por la flexibilidad de su diseño.

La visualización del proceso, su fácil manejo constituyen el equipo como una herramienta de investigación para el secado y además como un buen instrumento pedagógico para el laboratorio.

En la práctica el comportamiento de los materiales puede ser distinto del que se esperaría, de acuerdo con las curvas de deshidratación teórica debido a los cambios en la temperatura, humedad relativa del aire y otros fenómenos como velocidad de difusión que alteran el valor de las propiedades en las probetas

Entre los diferentes períodos de secado, en especial en la fase decreciente, el factor que controla el proceso es la velocidad a la cual el agua se desplaza desde el interior del alimento hacia la superficie su variación es alterada por los cambios en la superficie ya que esta ya se ha secado.

Como ejercicio para evaluar los conocimientos a lo largo de la carrera, el diseñar y construir un equipo, es una experiencia enriquecedora, que ayuda a confrontar la teoría con la práctica, favorece al estudiante con la vivencia de enfrentar situaciones reales por ejemplo en la adquisición de materiales, sus costos la adaptabilidad en las situaciones de no encontrarlos, todo esto aporta un valor agregado un trabajo de grado de este tipo.

ANEXO A. MANUAL DE OPERACION DE SECADOR DE PRODUCTOS

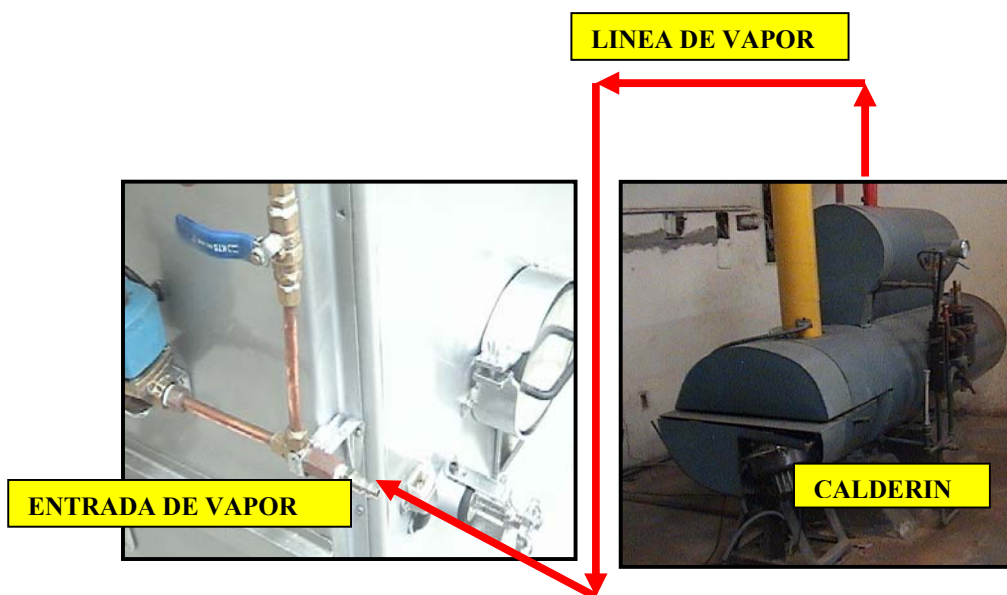
AGRICOLAS

1 MONTAJE Y OPERACION

1.4 PREPARACION DE LA PRUEBA

1.4.1 Verificación del equipo.

Esta maquina cuenta con la ventaja de poder ser adaptada en cualquier sitio que permita un suministro de vapor.

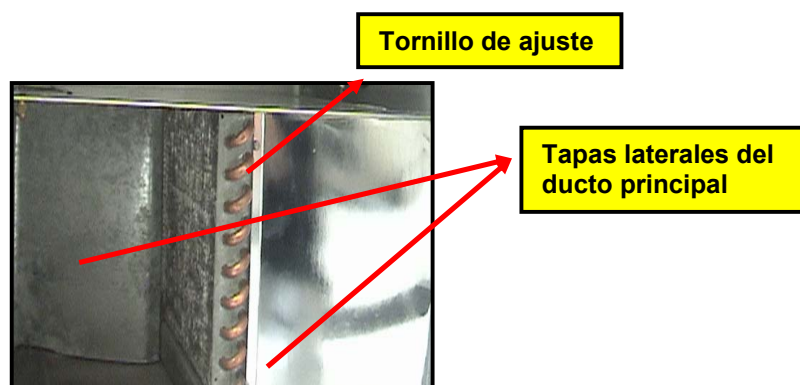


Como sus elementos han sido adaptados para un montaje que pueda ser desarmable hay que verificar previamente el ajuste de estos:

- Ajuste del motor: Debido a que el motor tiene que evitar una mala colocación para evitar vibraciones su posición debe ser verificada Además la hélice que esta situada en el eje del motor, se debe verificar su ajuste y

la correcta posición para evitar accidentes y daños al equipo en el caso que este suelta.

- Las tapas que constituyen el ducto principal deben estar ajustadas para concentrar de esta manera el flujo tanto de alimentación de aire por parte del ventilador al intercambiador como el de suministro de aire caliente hacia la cámara de secado y para evitar en lo mínimo fugas.



- Las válvulas de suministro laterales deben estar cerradas al inicio de cada prueba de igual forma la de alimentación al humidificador.
- Los nebulizadores deben tener una graduación exacta, porque de otra manera su función sería alterada por esta la importancia de no manipularla, cuando previamente se prepara una prueba.

1.4.2 Preparación de la muestra

Cada grano debe haber pasado por un estudio previo que nos aporte su peso de masa seca, estudio que consiste en colocar una muestra del producto a una temperatura en un horno de (100 ° C a 120 ° C). Esta temperatura se recomienda gracias a que se encuentra por encima del punto de evaporación, y es en este rango de temperatura donde el producto debe permanecer por lo menos una hora, para garantizar al final conocer la masa seca del producto. Todas estos

procedimientos pueden realizarse en el laboratorio, pero cabe anotar que la toma de datos para las pruebas consignadas en esta tesis fueron realizadas en el laboratorio de carbones, donde se aconseja a los estudiantes preparar las muestras cuando se realicen la experiencias en el laboratorio debido a la precisión de los equipos de medición que se encuentran en el.



Fig. a) balanza de 5 cifras significativas, b)Horno

Conociendo el valor de masa seca podemos calcular la cantidad y contenido de humedad del grano inicial y así conocemos la cantidad de agua a retirar.

La muestra se pesa inicialmente y se distribuye lo mas uniformemente en las bandejas, al encender el equipo verificar el ajuste en el termostato, el limite de temperatura va de la mano con el tipo de grano como se menciona en la teoría explicada anteriormente. Verificar el ajuste de la puerta para evitar fugas.

Durante el transcurso de la prueba o previamente podemos medir el flujo de aire dentro de la cámara de secado, ya que este factor es importante, esta operación debe verificarse ya sea con el encendido de un motor o lo dos, el laboratorio cuenta con un anemómetro digital como instrumento de medida. El estudiante debe situar el instrumento en diferentes puntos dentro de la cámara de secado para que estas medidas aporten una visión más clara del secado.



Figura.a) Anemómetro digital, figura b) Peso de las muestras c) Tacómetro Digital

2.5 Experimento

CURVAS DE SECADO

2.5.1. Objetivos

- a) Secar un material sólido y obtener los diferentes periodos de secado en condiciones de operación constantes.
- b) Determinar experimentalmente humedad, velocidad y tiempo crítico.
- c) Analizar curvas características de secado en función del tiempo.

2.5.2 Teoría básica

La operación de secado consiste en la eliminación de un líquido contenido en un sólido, por medios térmicos. Los contenidos de humedad son generalmente bajos en comparación con la cantidad de sólido. El secado generalmente es la etapa final de una serie de operaciones y el producto obtenido de un secador, queda frecuentemente listo para el envasado final.

El contenido de humedad de una sustancia seca varía de un producto a otro. En algunos casos el producto no contiene agua y se denomina "totalmente seco". Sin embargo, lo más frecuente es que el producto contenga algo de agua, por ejemplo, la sal de mesa seca contiene alrededor de 0.5% en peso de agua; el carbón seco: 4%; la caseína seca del orden de 0.8% etc. El término secado es relativo y significa solamente que hay una reducción en el contenido de humedad desde un valor inicial hasta un final.

Velocidad de Secado

La capacidad de un secador térmico depende de la velocidad de transmisión de calor y de la velocidad de transferencia de masa. Puesto que la humedad tiene que evaporarse, hay que suministrar calor de secado a la zona de evaporación, que puede estar en ó cerca de, la superficie del sólido o bien dentro del mismo, dependiendo del tipo de material y de las condiciones del proceso.

La humedad debe fluir a través del sólido como líquido o como vapor, y como vapor, desde la superficie del sólido hasta el seno de la cámara de secado.

Mecanismo del secado de sólidos

En la práctica del secado se encuentran dos clases de sólidos. Aunque muchos sólidos se encuentran comprendidas entre estos dos extremos, es conveniente suponer que el sólido es POROSO o NO POROSO y en cualquier caso puede ser también HIGROSCÓPICO o NO HIGROSCÓPICO.

Las características del secado de un sólido determinado pueden examinarse teniendo en cuenta la forma en que varía la velocidad de secado con las condiciones de operación y lo que sucede en el interior del sólido durante el secado.

Curva de velocidad de secado

Para estudiar el mecanismo de secado en condiciones constantes, es conveniente representar la velocidad instantánea de secado en función de la humedad libre instantánea, como lo indica la figura 1.

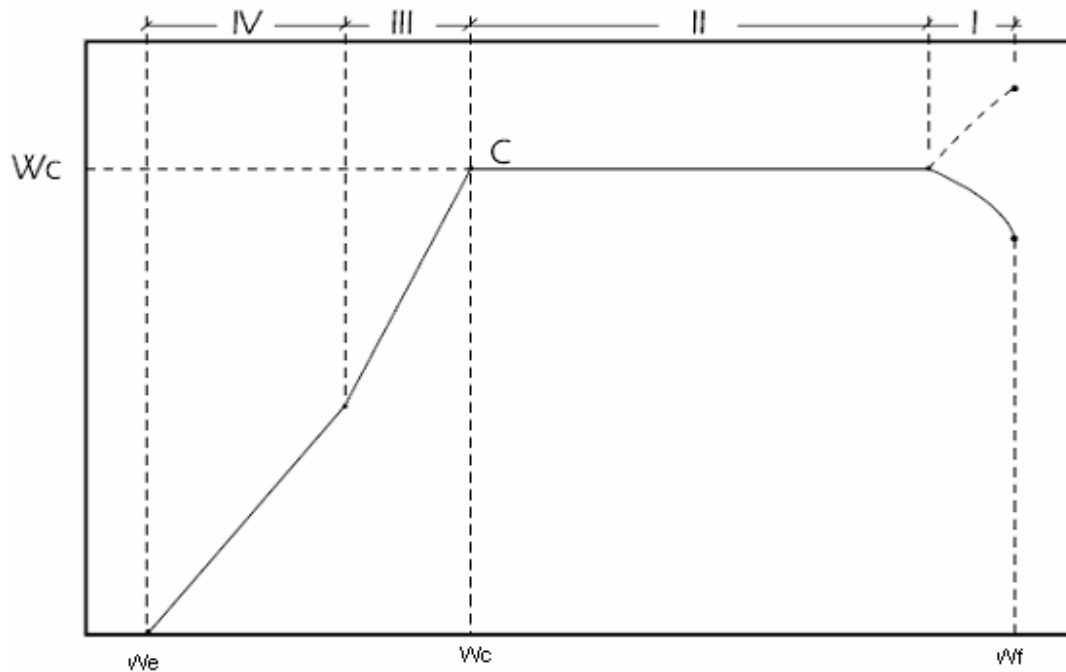


Figura 1.

Esta es una curva característica de secado que refleja el paso del sólido por distintos períodos a medida que la humedad del sólido se reduce desde un valor inicial elevado W_i hasta el pequeño valor final, que puede incluso ser la humedad de equilibrio W_e .

Periodos de Secado. Análisis

De la figura 1, en el periodo I la velocidad de secado aumenta o disminuye rápidamente, desde un valor inicial. Su duración es relativamente corta y en algunos experimentos no llega a observarse. En este periodo, se ajusta la temperatura del material a las condiciones de secado.

La línea II representa el período de velocidad constante. Se caracteriza porque la velocidad de secado es independiente de la humedad del sólido. Durante este período del sólido está tan húmedo que existe una película de agua continúa sobre toda la superficie de secado y el líquido se comporta como si el sólido no existiera.

Si el sólido no es poroso, el líquido evaporado en este período es esencialmente el que recubre la superficie del sólido. En un sólido poroso, la mayor parte del líquido evaporado en el período de velocidad constante proviene del interior del mismo.

La línea III representa el período de velocidad decreciente y humedad crítica. Al disminuir la humedad del sólido se alcanza un cierto valor para el cual termina la velocidad constante y comienza a disminuir la velocidad de secado.

El punto en que termina el periodo de velocidad constante, representado por C, en la misma figura, se llama Punto Crítico. Este punto marca el instante en que el líquido que está sobre la superficie es insuficiente para mantener una película continúa que cubra toda el área de secado.

Para sólidos no porosos, el punto crítico aparece aproximadamente, cuando se evapora la humedad superficial; en cambio para sólidos porosos el punto crítico se alcanza cuando la velocidad de flujo de la humedad hacia la superficie no es capaz de igualar la velocidad de evaporación. Al valor de la humedad y de la velocidad que determina el punto C se les llama "Críticos", W_c , w_c .

Si la humedad inicial del sólido es inferior a la humedad crítica, no aparece el periodo de velocidad constante.

La humedad crítica varía con el espesor del material y con la velocidad de secado y por consiguiente, no es una propiedad del material.

El periodo que sigue al punto crítico se llama velocidad decreciente. Es evidente que la forma de la curva de velocidad de secado varía con el tipo de material, el espesor y las variables presión y temperatura.

Cálculo del tiempo de secado

El peso del material a secar puede medirse en función del tiempo, en condiciones de presión y temperatura constantes. A partir de esos datos se obtiene la gráfica siguiente: figura 2.

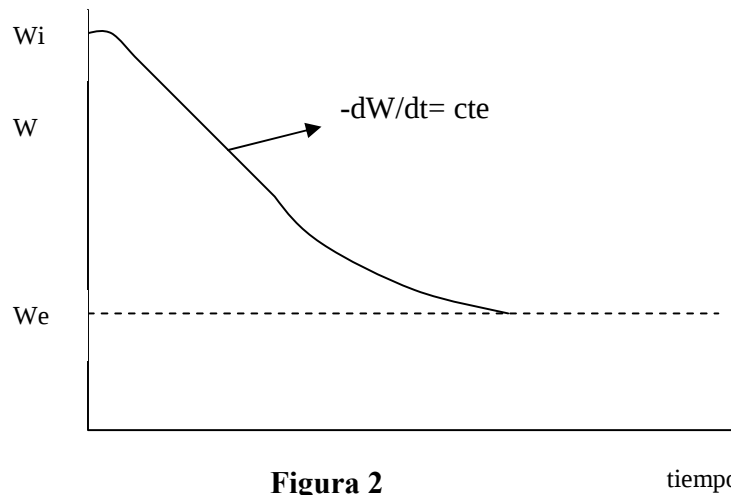


Figura 2

En los cálculos de secado debe tomarse en consideración las secciones mayores de la curva anterior, ya que los factores de control difieren junto con las diferentes porciones de la curva. La velocidad de secado se define como:

$$\beta = \frac{m}{A} \left[- \frac{dW}{dt} \right]$$

Donde: β = velocidad de secado, kg/hr m²

m = masa de sólido seco, kg

A = área de la superficie expuesta, m²

$$\omega = \text{humedad, } \frac{\text{Kg } h_2O}{\text{Kg sólido seco}}$$

t = tiempo, hr

La ecuación puede arreglarse para obtener el tiempo de secado y queda:

$$dt = \frac{m}{A} - \frac{dW}{\omega}$$

$$\text{Integrando: } \int_0^t dt = \frac{m}{A} \int_{w_i}^{w_f} \left[- \frac{dW}{\omega} \right]$$

Donde:

ω_i = humedad inicial.

ω_f = humedad final.

Como se puede observar. en la figura 1 hay un periodo en que la velocidad de secado β es constante, siendo el mismo periodo que el de la figura 2, en que dW/dt es constante.

Si el sólido se seca durante este periodo, ω_i y ω_f son mayores que ω_c , entonces W = constante y el valor que le corresponde es el de la velocidad crítica β_c , por lo que al integrar la ecuación 3 se tiene:

$$t = \frac{m(W_i - W_f)}{A\omega}$$

Tiempo de secado en periodo de velocidad decreciente

Si W_f es menor que W_c el secado se efectúa a velocidad variable, por lo que la ecuación 3 se puede resolver de la siguiente forma:

a) Caso general. La ecuación 3 se integra gráficamente a fin de determinar el área bajo la curva con $1/W$ como ordenada y W como abscisa, datos que se pueden obtener a partir de la figura 1.

b) Para el caso en que ω varía linealmente con W , se toma la ecuación de una recta.

$$\beta = m\omega + n \quad (5)$$

Donde: m = pendiente de la porción lineal de la curva.

$n = \text{constante.}$

Pero: $\beta_i = m\omega_i + n$ (6)

y $\beta_f = m\omega_f + n$ (7)

Teniendo que:

$$t = \frac{m(W_i - W_f)}{A(\omega_i - \omega_f)} \ln \frac{\omega_i}{\omega_f} = \frac{m(W_i - W_f)}{A\omega_{lm}} \quad (9)$$

$$\omega_{lm} = \frac{(\omega_i - \omega_f)}{\ln \frac{\omega_i}{\omega_f}}$$

Si tomamos toda la zona decreciente como una recta, se tiene:

$$t = \frac{m}{A} \frac{(W_c - W_e)}{\omega_c} \ln \frac{(W_i - W_e)}{W_f - W_e}$$

Ya que:

$$\omega = m(W_i - W_e) = \frac{\omega_c}{W_c - W_e} (W_i - W_e)$$

$$\omega_i = \frac{\omega_c}{W_c - W_e} (W_i - W_e)$$

$$\omega_f = \frac{\omega_c}{W_c - W_e} (W_f - W_e)$$

Para dibujar las figuras 1 y 2, es necesario determinar y tabular:

Tiempo hr.	Peso gr total	Humedad W (Kg de vapor/ Kg de aire seco)	Velocidad de secado β

$$\beta = \frac{m \Delta \bar{W}}{A \Delta t}$$

2.5.3 Formato de la información experimental

MATERIAL:	
masa grano seca = kg	
masa H2O adic = kg	
Bandejas largo = m ancho = m	
área de secado = m ²	

GRUPO: _____

FECHA: _____

PROFESOR: _____

OBSERVACIONES: _____

2.5.4. Contenido del informe de la práctica

- a) Título
- b) Objetivo
- c) Descripción del proceso
- d) Representación del proceso en un diagrama de flujo
- e) Formato con los datos experimentales
- f) Desarrollo de cálculos con:
 - Una gráfica de humedad vs tiempo.
 - Una gráfica de velocidad de secado vs tiempo
 - Una gráfica de velocidad de secado vs humedad
- g) Análisis y tendencias de resultados.
- h) Conclusiones y recomendaciones
- i) bibliografía

2.5.5. CUESTIONARIO

1. Defina la operación unitaria de secado.
2. ¿En el secado, hay transferencia de calor y de masa simultáneo?
Si lo hay ¿cómo ocurre?
3. Mencione algunas razones para aplicar la operación de secado.
4. Enuncie las formas de expresar el contenido de humedad de un sólido.
5. ¿Qué es la humedad de equilibrio, la humedad libre y la humedad crítica?
6. ¿De qué depende la humedad crítica en una operación de secado?
7. ¿Qué tipos de curvas se obtienen de una operación de secado?
8. ¿Qué periodos de secado se observan en una curva de secado?
9. Describa algunos tipos de secadores y cómo se clasifican.
10. ¿Cómo opera el secador que se usará en la práctica?
11. Describa la forma como utilizará el equipo de secado en la práctica.

2.5.7. NOMENCLATURA

β =Velocidad de secado

M= masa del sólido seco

ω = humedad del sólido

t= tiempo

A= área de secado

ANEXO B. LISTA DE TABLAS Y GRAFICAS EXPERIMENTALES

Listado de ecuaciones (madera tipo caracoli)

Probeta 1

$$H=2,80086983E-01-1,41877410E-03*T+7,07781051E-06*T^2-2,17609627E-08*T^3+2,61385732E-11*T^4$$

Probeta 2:

$$h=2,86790088E-01-1,41345895E-03*t+5,35145200E-06*t^2-1,20469945E-08*t^3+1,03687257E-11*t^4$$

Probeta 3:

$$h=2,86890992E-01-1,03459968E-03*t+3,30296468E-06*t^2-5,73471198E-09*t^3+2,54932567E-12*t^4$$

Probeta 4:

$$h=2,88731872E-01-9,28783803E-04*t+2,29366167E-06*t^2-1,57151003E-09*t^3-3,68749312E-12*t^4$$

Probeta 5:

$$h=2,89298323E-01-9,79957612E-04*t+2,81228695E-06*t^2-3,67359641E-09*t^3-5,96235138E-13*t^4$$

Probeta 6:

$$h=2,89143626E-01-9,72187464E-04*t+2,70388287E-06*t^2-3,36863312E-09*t^3-7,19717155E-13*t^4$$

Probeta 7:

$$h=2,88891149E-01-8,39091551E-04*t+2,85793238E-06*t^2-7,60622044E-09*t^3+8,74361368E-12*t^4$$

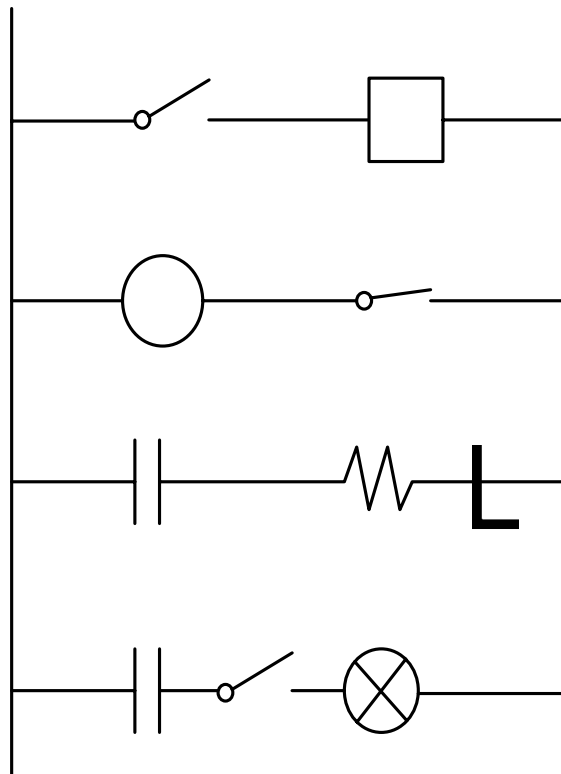
Probeta 8:

$$h=2,88180570E-01-9,82708275E-04*t+3,31087472E-06*t^2-7,07119152E-09*t^3+5,49772548E-12*t^4$$

ANEXO C. COSTOS

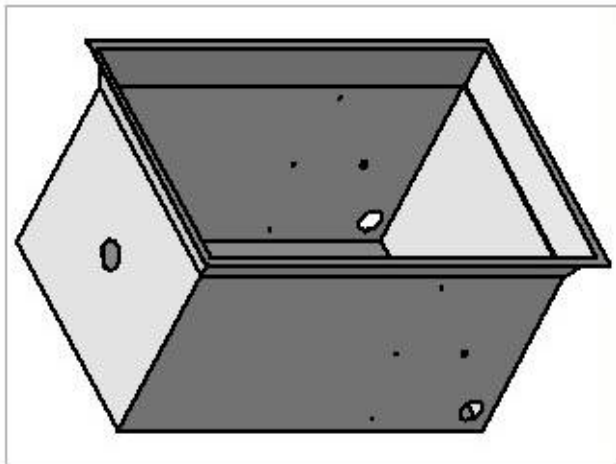
MATERIAL	CANTIDAD	VALOR \$
motor 1 (1625 rpm)	1	250000
motor 2 (1125rpm)	1	180000
caja secador	2	300000
condensador principal	1	120000
condensador de humificacion	1	110000
válvula solenoide	1	160000
Válvulas de globo 304 (3/8) pulg.	3	135000
trampa de vapor (3/8)	1	350000
Tubería de cobre 3/8 pulg.	7 mts	77000
Tubería de cobre 1/2 pulg.	3 mts	18000
pintura aluminio grueso	1 galón	85000
lamina acero galvanizada calibre 20	1	50000
tornillos y tuercas		20000
ruedas	4	32000
vidrio refractario (20X30)cm.	2	30000
sensor de humedad	1	110000
sensor de temperatura	1	150000
control de velocidades del motor	1	100000
mano de obra		1500000
	total	\$3777000

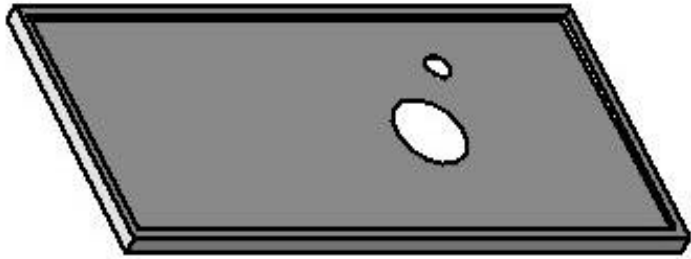
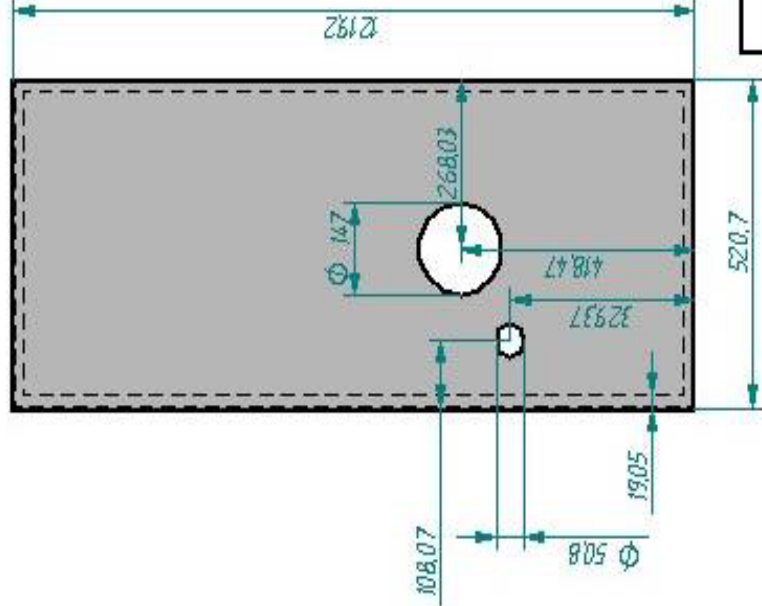
ANEXO D. CIRCUITO DE CONTROL



2' R 10'

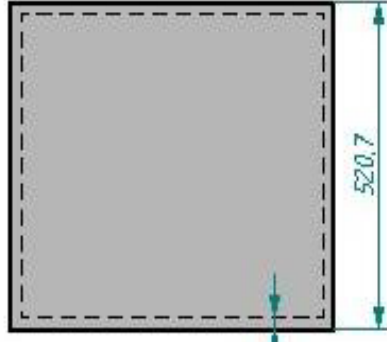
AGRÍCOLAS”



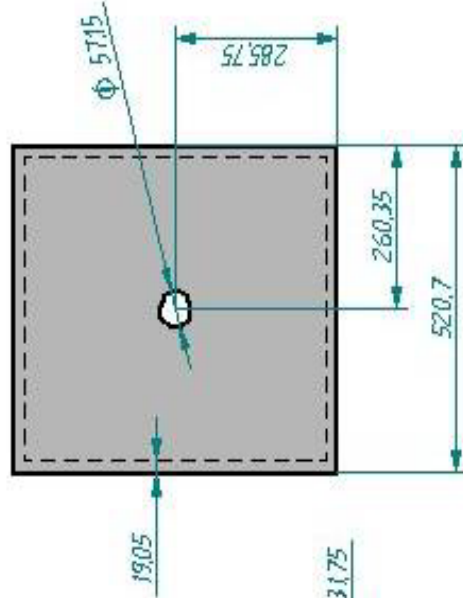
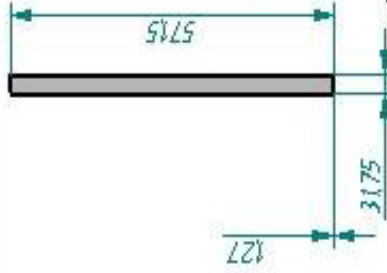


TAPA LATERAL
1:10

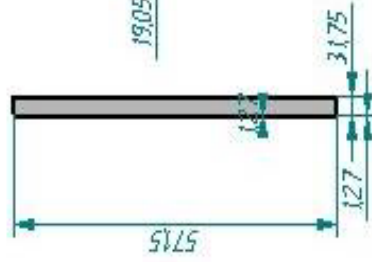
Dibujado	Nombre	Fecha
Comprobado	Jairo Felipe	
Aprobado 1		
Aprobado 2		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^{\circ}$		
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Rev
SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS		A4 Plano
Archivo: cajon interior.dft		
Escala	Peso	Hoja 2 de 14



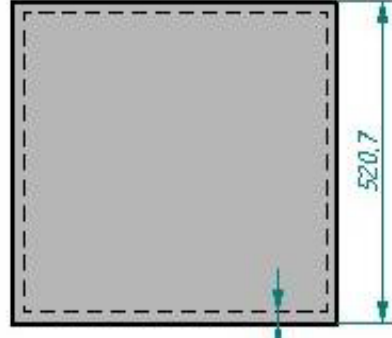
TAPA INFERIOR
1:10



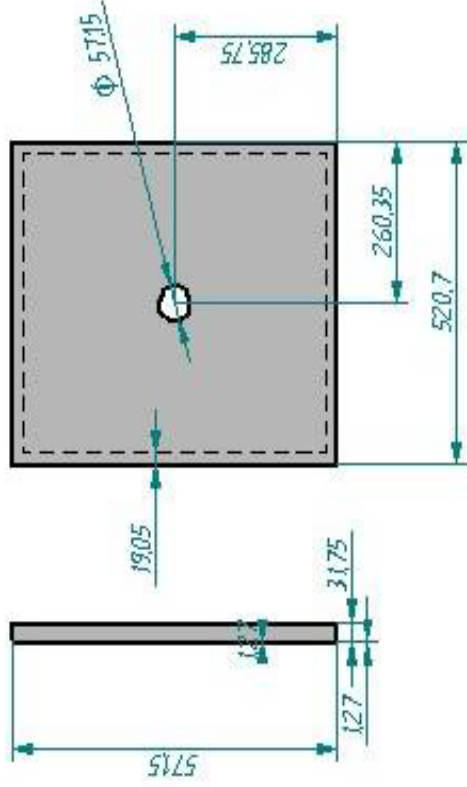
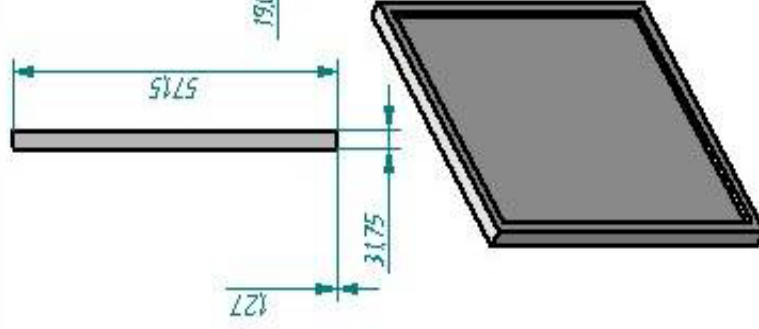
TAPA SUPERIOR
1:10



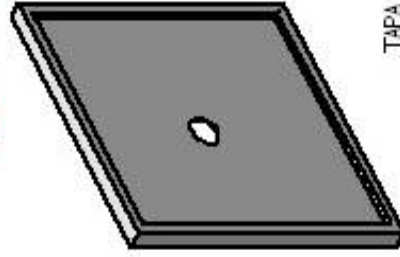
Nombre	Fecha
Unidad	Unidad
Comprobado	Comprobado
Aprobado 1	Aprobado 1
Aprobado 2	Aprobado 2
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y ± 1	
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS	
Plano	
Rev	
Archivo: cajon interior.dft	
Escala	
Hoja 3 de 14	



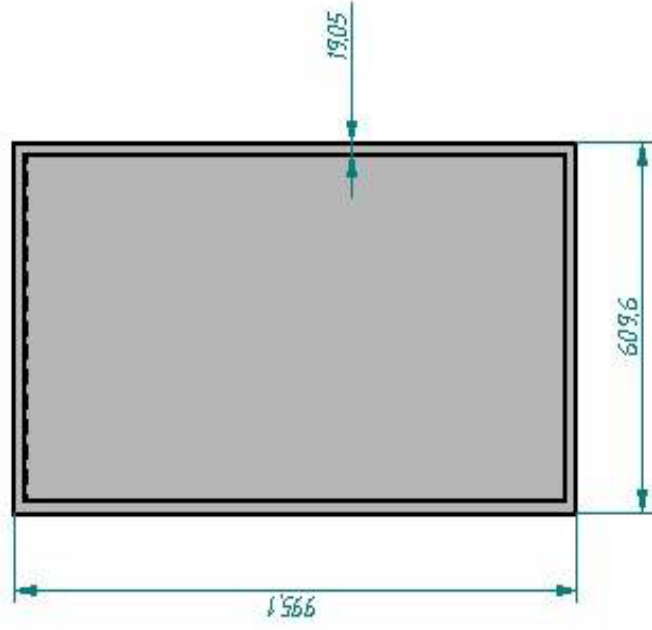
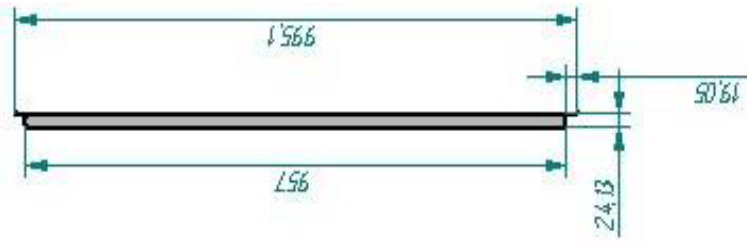
TAPA INFERIOR
1:10



TAPA SUPERIOR
1:10



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Nombre	Fecha
SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS		Apellido	
		Comprobado	
		Aprobado 1	
		Aprobado 2	
		Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y ± 1	
		Plano	Rev
		Archivo: cajon interior.dft	
		Escala	Peso
		Hoja 3 de 14	



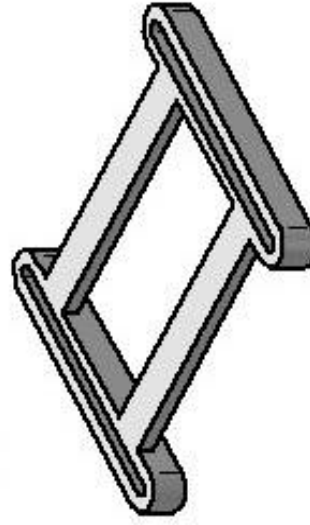
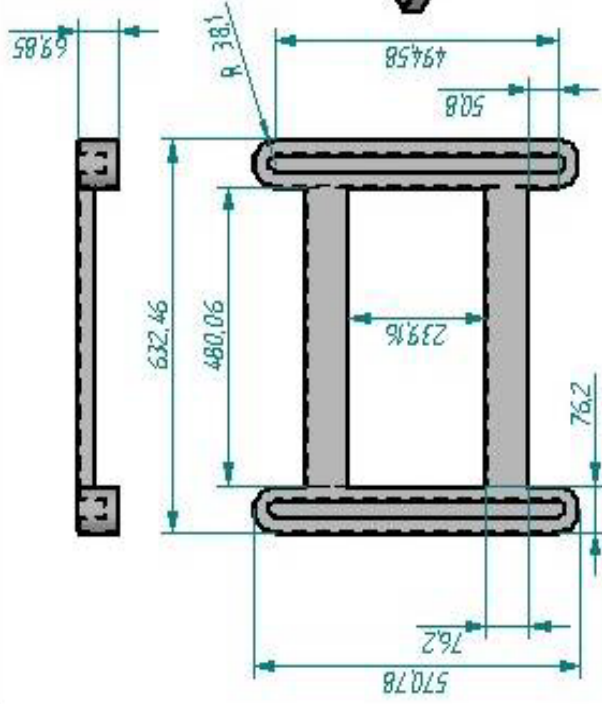
TAPA POSTERIOR

1:10

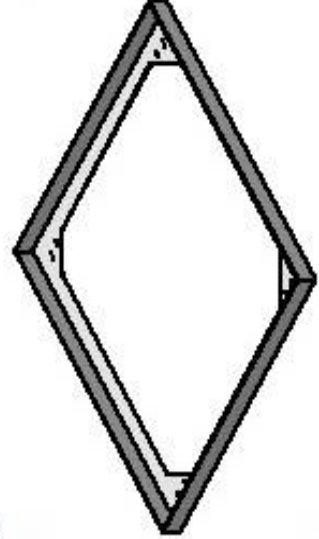
1:10

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS		SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS	
A4		Plano	
Rey		Rey	
Archivo: cajon interior.dft		Archivo: cajon interior.dft	
Escala		Peso	
Hoja 4 de 14		Hoja 4 de 14	

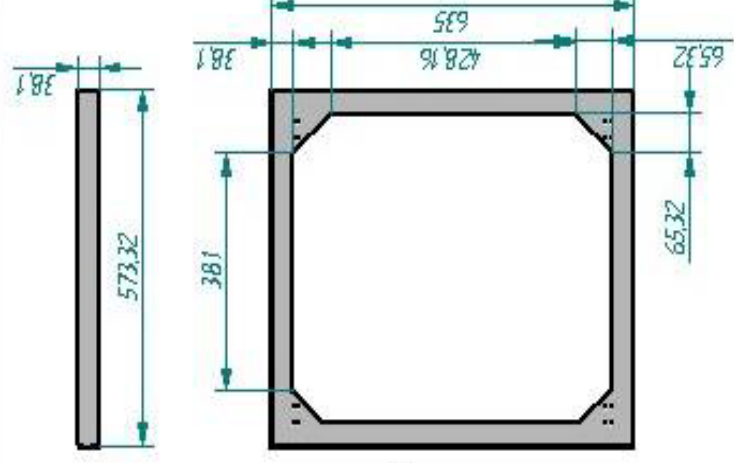
Nombre	Fecha
Jairo Felipe	
Comprobado	
Aprobado 1	
Aprobado 2	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^\circ$	



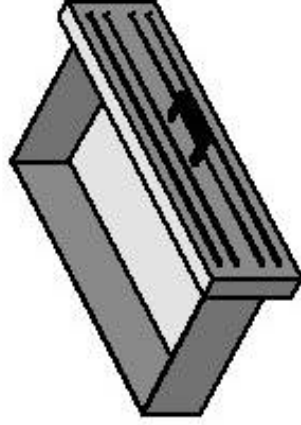
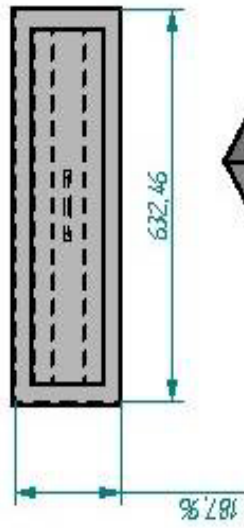
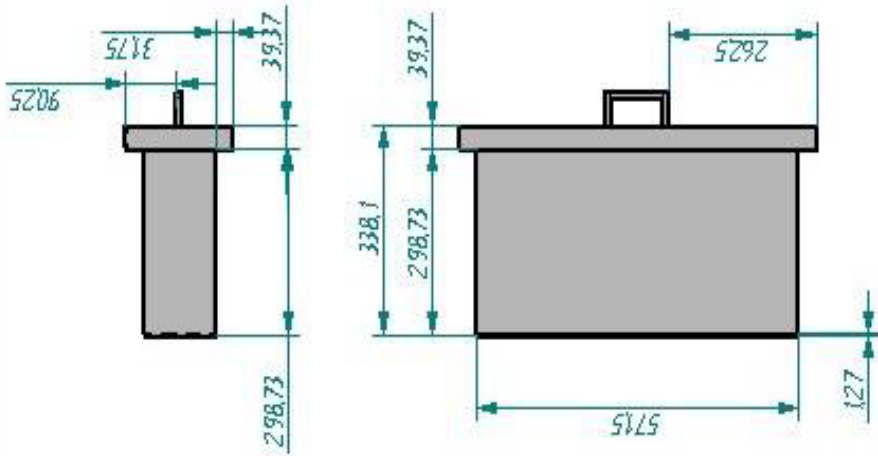
SOPORTE INICIAL
1:10



SOPORTE TOTAL
1:10



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Rev	
SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS		A4	
Plano		Rev	
Archivo: cajon interior.dwg		Escala	
Peso		Hoja 5 de 14	
Nombre		Fecha	
Dibujado		Jairo Rafael	
Comprobado			
Aprobado 1			
Aprobado 2			
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^\circ$			



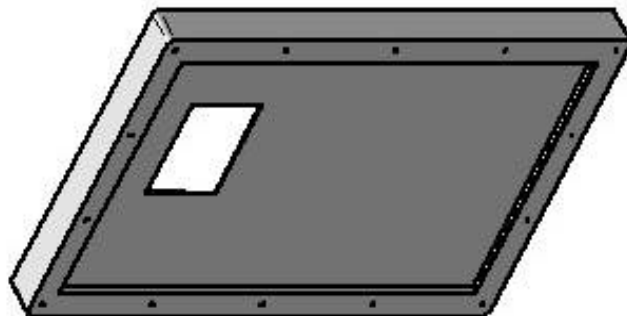
CAJON DE HERRAMIENTAS

1:10

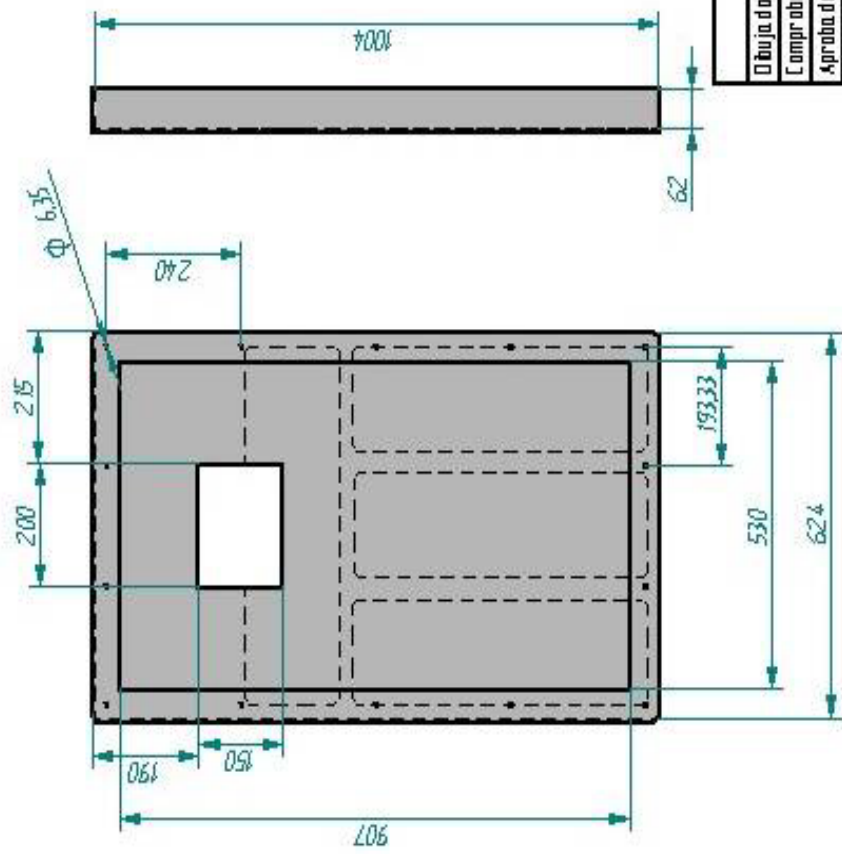
Dibujado	Nombre	Fecha
Comprobado	Jairo Felipe	
Aprobado 1		
Aprobado 2		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y ± 1		
A4		Plano
Rev		
Archivo: cajon interior.dwg		
Escala	Peso	Hoja 6 de 14

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

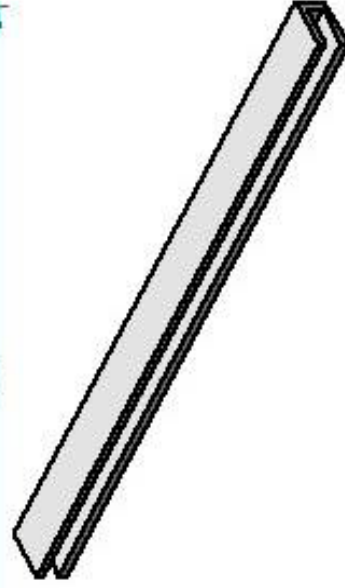
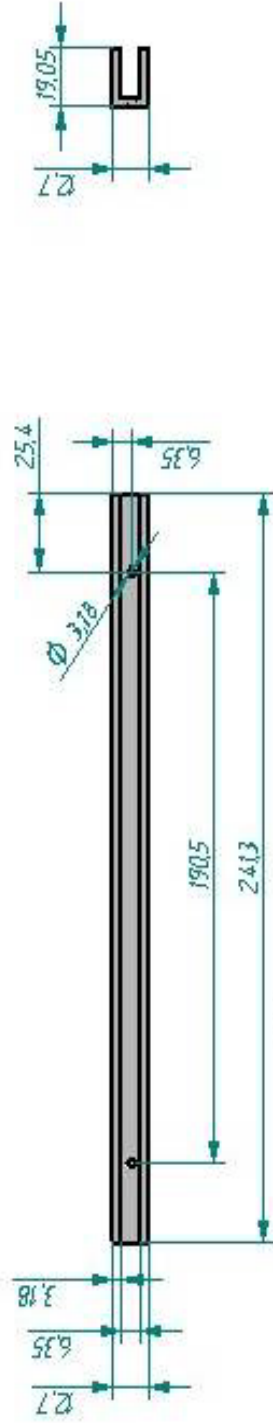
SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS



PUERTA PRINCIPAL
1:10



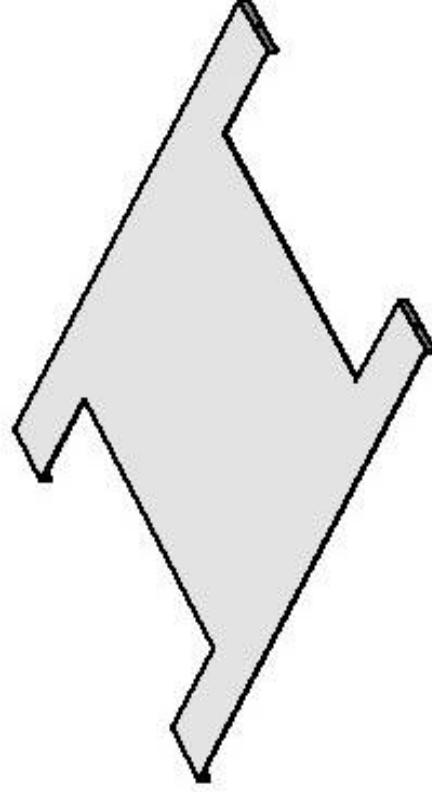
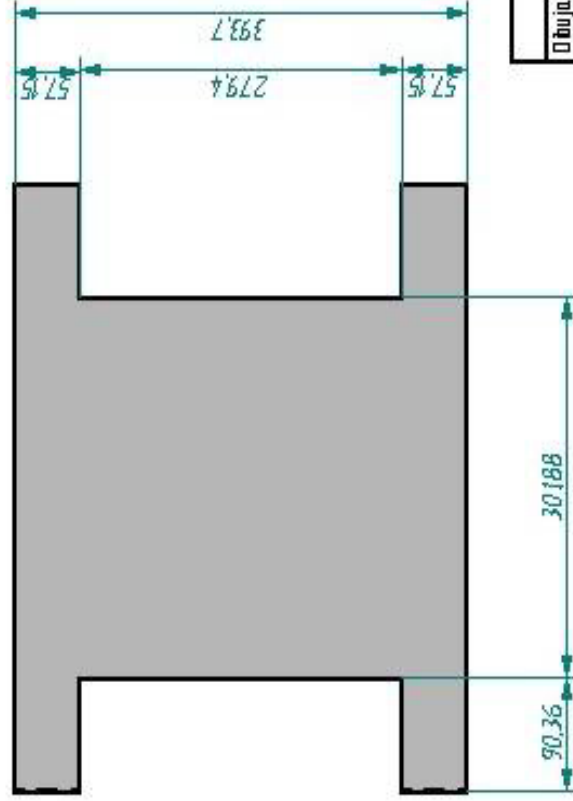
Dibujado	Nombre	Fecha
Comprobado	Jairo Felipe	
Aprobado 1		
Aprobado 2		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^\circ$		
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Rev
SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS		A4 Plano
Archivo: cajon interior.dft		
Escala	Peso	Hoja 7 de 14



SOPORTE DE BANDEJA

12

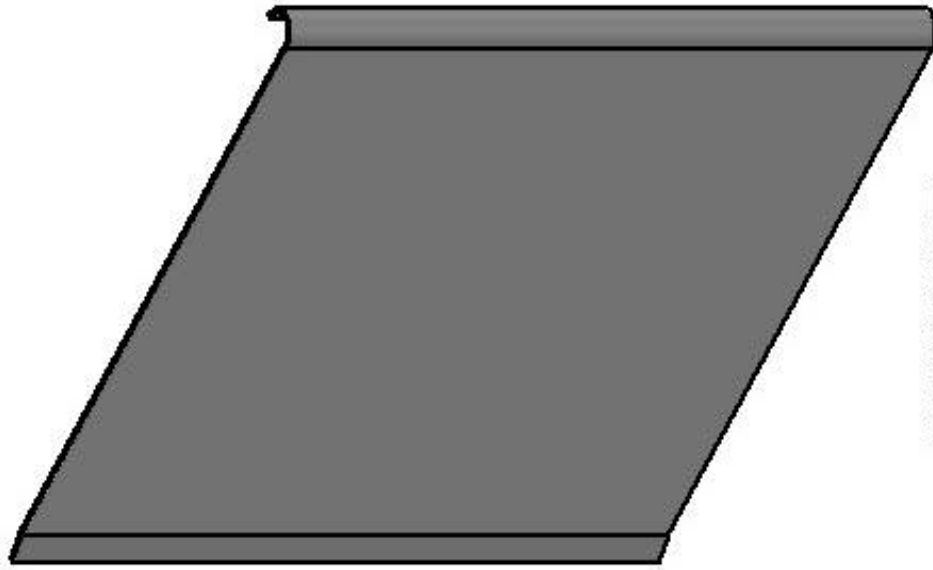
	Nombre	Fecha
Dibujado	Jair & Felipe	
Comprado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y ± 1		
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Rev
SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS		A4 Plano
Archivo: cajon interior.ddt		
Escala	Peso	Hoja 10 de 14



PARED SUPERIOR DEL DUCTO

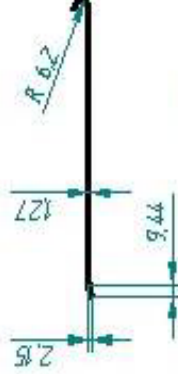
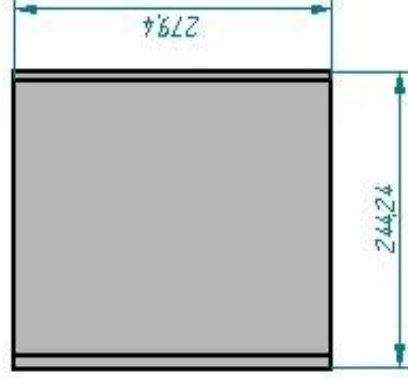
15

Nombre	Fecha	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
Dibujado	Jairo Felipe		
Comprado			
Aprobado 1		SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS	
Aprobado 2			
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^\circ$		A4	Plano
		Rev	
		Archivo: cajon interior.dwg	
		Escala	Peso
		Hoja 11 de 14	



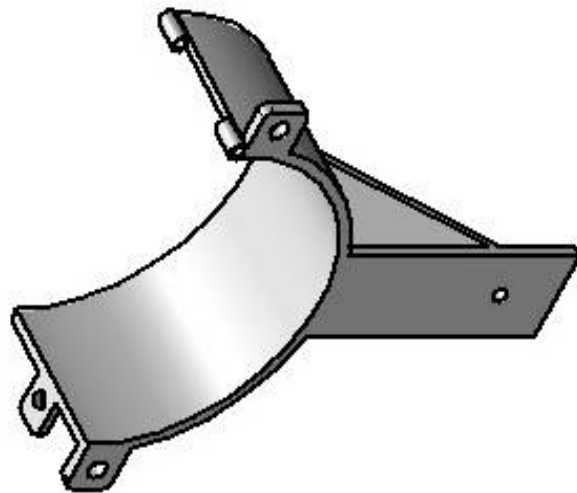
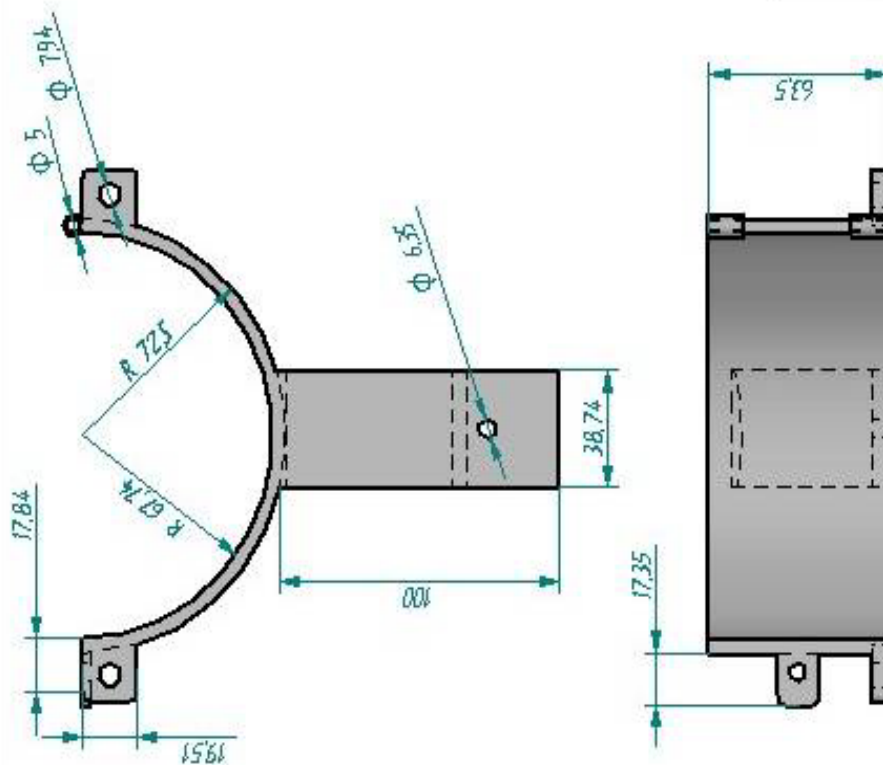
PARED LATERAL DEL DUCTO

12



15

	Nombre	Fecha	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
	Dibujado	Jairo Felipe	SECADOR DE PRODUCTOS AGRICOLAS	
	Comprobado		A4	Plano
	Aprobado 1		Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\neq 0$			Archivo: cajon interior.dft Escala Peso	
			Hoja 12 de 14	



SOPORTE DEL MOTOR

12

	Nombre	Fecha
Elaborado	Juan Carlos Felipe	
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

Salvo indicación contraria
 cotas en milímetros
 ángulos en grados
 tolerancias ± 0.5 y ± 1