

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA
DE UN DISPOSITIVO DE SECADO DE MATERIAL VEGETAL
PARA LAS PLANTAS DE EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES**

**SERGIO ANDRÉS VÁSQUEZ RIOS
OSCAR MAURICIO VEGA CÁRDENAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2013

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA
DE UN DISPOSITIVO DE SECADO DE MATERIAL VEGETAL
PARA LAS PLANTAS DE EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES**

**SERGIO ANDRÉS VÁSQUEZ RIOS
OSCAR MAURICIO VEGA CÁRDENAS**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero mecánico.**

**Director
OMAR ARMANDO GÉLVEZ AROCHA
Ingeniero mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

A mis padres, José de Jesús Vásquez Méndez y Nubia Cecilia Rios Dueñas,
a mis hermanos, a mi familia y mis compañeros que me acompañaron
durante toda la carrera, apoyándome y motivándome a seguir siempre
adelante.

A los profesores de la escuela de ingeniería mecánica en especial al
profesor Omar A. Gélvez Arocha por toda la ayuda brindada para la
realización del proyecto.

Sergio Andrés Vásquez Rios.

DEDICATORIA

A toda mi familia.

Oscar Mauricio Vega Cárdenas

AGRADECIMIENTOS

Expresamos los más sinceros agradecimientos al grupo de investigación CENIVAM y a todas aquellas personas que hicieron posible que se realizara este trabajo de grado en especial:

Al profesor e ingeniero Omar Armando Gélvez Arocha, Ingeniero Mecánico, director de proyecto, por su colaboración y apoyo incondicional en la realización del proyecto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	22
1. GENERALIDADES DE LA OBTENCIÓN DE ACEITES ESENCIALES	25
2. SECADO.....	28
2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE SECADO	28
2.1.2 Según la forma de alimentar el material.	29
2.1.2 Según el mecanismo de remoción de humedad.....	29
2.1.3 Según las características físicas del material manejado.....	30
2.1.4 Según la fuente de energía usada para potenciar el secado	31
2.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL SECADO.....	32
2.3 ESTADO ACTUAL DEL PROCESO DE SECADO EN LAS PLANTAS DE EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES.....	33
3. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	34
3.1 CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES DEL SECADOR.	35
3.2 MATERIAL VEGETAL.	36
3.2.1 Contenido de humedad.....	37
3.3 CONCEPTO DE DISEÑO DEL SECADOR	38
3.3.1 Sistema de carga	39
3.3.2 Recinto.....	39
3.3.3 Fuentes energéticas	40
3.3.3.1. Calor por radiación solar.....	40
3.3.3.2 Calor convectivo	41
3.4 ANÁLISIS DEL DISEÑO DEL SECADOR.....	42
3.4.1 Diseño térmico.....	42
3.4.1 Diseño mecánico.	42
4. DISEÑO TÉRMICO.....	43
4.1 BALANCE DE ENERGÍA DEL AIRE	45
4.2 BALANCE DE ENERGÍA DEL MATERIAL A SECAR.....	47

4.3 BALANCE DE MASA DEL MATERIAL A SECAR.....	48
4.4 CALOR DE RADIACIÓN SOBRE EL INVERNADERO (Q_{rad})	49
4.5 CALOR DE PÉRDIDAS A TRAVÉS DE LAS PAREDES (Q_p)	50
4.6 CALOR ENTREGADO POR EL INTERCAMBIADOR (Q_c)	45
4.7 CALOR SENSIBLE (Q_s)	52
4.8 CALOR LATENTE (Q_L).....	53
5. SIMULACION DEL PROCESO DE SECADO.....	55
5.1 MÓDULO DE CONSTANTES.....	56
5.2 MÓDULO DE BALANCE DE ENERGÍA.....	58
5.3 MÓDULO DE BALANCE DE MASA DE MATERIAL A SECAR	60
5.4 MÓDULO DE SUBCONJUNTOS DE FUNCIONES BÁSICAS	62
5.5 MÓDULO DE FUNCIONES	67
5.6 OTROS	69
5.7 GRÁFICAS RESULTADO.....	71
5.7.1 Gráfica general.	71
5.7.1.1 Temperatura del recinto	73
5.7.1.2 Temperatura del material.....	73
5.7.1.3 Humedad retirada	73
5.7.1.4 Humedad relativa del aire.	74
5.7.2 Secado con exceso de aire.....	74
5.7.3 Secado únicamente con energía solar.....	75
5.7.4 Secado con recirculación de aire.	77
5.7.5 Conclusiones de la simulación del proceso de secado.....	78
6. EXPERIMENTACIÓN	80
6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO	80
6.1.1 Cubierta	81
6.1.2 Suministro de energía.....	81
6.1.3 Módulos de secado.....	81
6.1.4 Probetas.....	81
6.2 PROPIEDADES INVOLUCRADAS EN EL SECADO DE BIOMASA	82

6.2.1	Peso del sólido húmedo y del sólido seco.	83
6.2.1	Humedad de base húmeda.....	83
6.2.2	Humedad retirada	84
6.2.3	Coeficiente de transferencia de masa.....	84
6.3	CONDICIONES OPERACIONALES DEL SECADOR	85
6.4	EXPERIMENTO 1: PESO DE SÓLIDO SECO.	86
6.4.1	Procedimiento	86
6.5	EXPERIMENTO 2: CURVAS DE SECADO PARA EL MATERIAL FRESCO.....	87
6.5.1	Procedimiento	87
6.5.2	Curvas de secado para el material fresco sin aportes de energía solar.	88
6.5.2.1	Resultados del secado sin aportes de energía solar para el material fresco.....	90
6.5.3	Datos del secado con aportes de energía solar para el material fresco	91
6.5.3.1	Resultados del secado con aportes de energía solar para el material fresco.....	93
6.5.4	Conclusiones sobre las curvas de secado para el material fresco.....	94
6.6	EXPERIMENTO 3: CURVAS DE SECADO PARA EL MATERIAL PROCESADO	95
6.6.1	Procedimiento.....	95
6.6.2	Curvas de secado para el material procesado a 50°C.....	96
6.6.3	Curvas de secado para el material procesado a 60°C.....	97
6.6.4	Curvas de secado para el material procesado a 80°C.....	97
6.6.5	Curvas de secado para el material procesado a 100°C.....	98
6.6.6	Curvas de secado para el material procesado a 110°C.....	98
6.6.7	Resultados de las pruebas para el material procesado.	99
6.6.8	Conclusiones de las pruebas para el material vegetal procesado	99
6.7	EXPERIMENTO 4: CONSUMO DE ENERGÍA DEL PROTOTIPO	100
6.7.1	Procedimiento	100

6.7.2 Energía consumida por el prototipo para una temperatura de recinto de 50°C sin aportes de energía solar.....	101
6.7.2.1 Resultados del experimento de consumo de energía	101
6.7.3 Energía consumida por el prototipo para una temperatura de recinto de 50°C con aportes de energía solar	102
6.7.3.1 Resultados del experimento de consumo de energía	102
6.7.4 Energía consumida por el prototipo para una temperatura de recinto de 60°C sin aportes de energía solar.....	103
6.7.4.1 Resultados del experimento de consumo de energía	103
6.7.5 Energía consumida por el prototipo para una temperatura de recinto de 60°C con aportes de energía solar	104
6.7.5.1 Resultados del experimento de consumo de energía	104
6.7.6 Conclusiones del experimento del consumo de energía del prototipo	105
6.8 EXPERIMENTO 5: VELOCIDAD DE SECADO VS. VELOCIDAD DE ROTACIÓN.....	106
6.8.1 Procedimiento	106
6.8.2 Velocidad de secado para 10 y 20 RPM.....	106
6.8.2.1 Conclusión del experimento de velocidad de secado vs velocidad de rotación	108
7. DISEÑO MECÁNICO.....	109
7.1 SISTEMA DE CARGA.....	109
7.1.1 Cilindros rotativos	110
7.1.1.1 Dimensiones preliminares.....	111
7.1.1.2 Cubierta	111
7.1.1.3 Aletas.....	111
7.1.1.4 Estructura.....	112
7.1.1.5 Soporte	113
7.1.1.6 Compuertas	113
7.1.1.7 Carga del material.....	115
7.1.1.8 Descarga del material	115
7.1.2 Recolectores de material.....	115

7.1.3 Sistema de transmisión.....	116
7.1.3.1 Poleas.....	117
7.1.3.2 Motor.....	117
7.2 RECINTO.....	119
7.2.1 Recubrimiento.....	120
7.2.2 Estructura.....	121
7.2.3 Acceso.	122
7.7 Ventilación.	122
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	124
BIBLIOGRAFIA.....	125
ANEXOS.....	127
Anexo A. Curvas de secado para material fresco sin aporte solar.....	127
Anexo B. Curvas de secado para material fresco con aporte solar.	131

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades de los materiales y plantas estudiadas.	37
Tabla 2. Humedad de base húmeda para el material fresco	86
Tabla 3. Tabla del experimento 2.....	88
Tabla 4. Resultados del experimento 2 para la Lippia Alba a 50°C	88
Tabla 5. Resultados del experimento 2 para la Lippia Alba a 60°C	89
Tabla 6. Tiempo de secado para el material vegetal fresco a 50°C sin aportes de energía solar	90
Tabla 7. Tiempo de secado para el material vegetal fresco a 60°C sin aportes de energía solar	91
Tabla 8. Tabla del experimento 2 para la Lippia Alba a 50°C con energía solar	91
Tabla 9. Tabla del experimento 2 para la Lippia Alba a 60°C con energía solar	92
Tabla 10. Tiempo de secado para el material vegetal fresco a 50°C con aportes de energía solar.....	93
Tabla 11. Tiempo de secado para el material vegetal fresco a 50°C con aportes de energía solar.....	94
Tabla 12. Tabla del experimento 3.....	96
Tabla 13. Tabla del experimento 3 para el material procesado a 50°C	96
Tabla 14. Tabla del experimento 3 para el material procesado a 60°C	97
Tabla 15. Tabla del experimento 3 para el material procesado 80°C	97
Tabla 16. Tabla del experimento 3 para el material procesado 100°C	98
Tabla 17. Tabla del experimento 3 para el material procesado 110°C	98
Tabla 18. Resultados de las pruebas para el material procesado	99
Tabla 19. Consumo de energía a 50°C y sin aportes de energía solar.....	101
Tabla 20. Consumo de energía a 50°C con aportes de energía solar	102
Tabla 21. Consumo de energía a 60°C sin aportes de energía solar	103
Tabla 22. Consumo de energía a 60°C con aportes de energía solar	104
Tabla 23. Prueba a 50°C con 10rpm y 20 rpm en los cilindros rotativos para el cymbopoggon	106
Tabla 24. Prueba a 50°C con 10rpm y 20 rpm en los cilindros rotativos para la Lippia Alba.....	107
Tabla 25. Prueba a 50°C con 10rpm y 20 rpm en los cilindros rotativos para la Swienglia	107

Tabla 26. Prueba a 50°C con 10rpm y 20 rpm en los cilindros rotativos para el material procesado	107
Tabla 27. Propiedades Físicas del recubrimiento.	120
Tabla 28. Identificación de la prueba y resultados de la prueba	127
Tabla 29. Identificación de la prueba y resultados de la prueba	128
Tabla 30. Identificación de la prueba y resultados de la prueba	129
Tabla 31. Identificación de la prueba y resultados de la prueba	130
Tabla 32. Identificación de la prueba y resultados de la prueba	131
Tabla 33. Identificación de la prueba y resultados de la prueba	132
Tabla 34. Identificación de la prueba y resultados de la prueba	133
Tabla 35. Identificación de la prueba y resultados de la prueba	134

Lista de figuras

Figura 1. Etapas del material en la producción de aceites esenciales.....	25
Figura 2. Esquema general de un proceso de destilación.	26
Figura 3. Invernaderos en la actualidad.....	33
Figura 4. Esquema general del secador.....	35
Figura 5. Flujo de material vegetal fresco y material procesado.....	36
Figura 6. Componentes del equipo de secado.....	39
Figura 7. Cilindros rotativos.....	40
Figura 8. Radiación sobre una superficie.....	41
Figura 9. Aportes y pérdidas energéticas.....	44
Figura 10. Balance de energía del aire.....	46
Figura 11. Balance de energía del material a secar.....	47
Figura 12. Balance de masa del material a secar.....	48
Figura 13. Pérdidas de calor del recinto.....	50
Figura 14. Balance energético de una gota de agua en el material vegetal .	54
Figura 15. Interfaz gráfica en Simulink.....	56
Figura 16. Bloque 21.....	58
Figura 17. Bloque 22.....	59
Figura 18. Bloque 23.....	60
Figura 19. Bloque 24.....	61
Figura 20. Balance de masa de material a secar.....	61
Figura 21. Bloque 25 y bloque 26.....	62
Figura 22. Bloque 27.....	63
Figura 23. Bloque 28.....	63
Figura 24. Bloque 29 y bloque 30.....	64
Figura 25. Bloque 31.....	64
Figura 26. Bloque 32.....	65
Figura 27. Bloque 33.....	65
Figura 28. Bloque 34.....	66
Figura 29. Bloque 35.....	66
Figura 30. Bloque 36.....	67
Figura 31. Bloque 38.....	68
Figura 32. Bloque 42 y bloque 43.....	70
Figura 33. Bloque 44.....	70
Figura 34. Leyenda de la grafica.....	72
Figura 35. Comportamiento en el tiempo de un secador en invernadero	72

Figura 36. Leyenda de la grafica.....	75
Figura 37. Secado con exceso de aire.....	75
Figura 38. Leyenda de la grafica.....	76
Figura 39. Secado únicamente con energía solar.....	76
Figura 40. Leyenda de la grafica.....	77
Figura 41. Secado con recirculación de aire.....	78
Figura 42. Prototipo a escala del secador y probetas.....	82
Figura 43. Curvas de secado para la lippia alba a 50°C sin aportes de energía solar.....	89
Figura 44. Curvas de secado para la lippia alba a 60°C sin aportes de energía solar.....	90
Figura 45. Curvas de secado para la lippia alba a 50°C con aportes de energía solar.....	92
Figura 46. Curvas de secado para la lippia alba a 60°C sin aportes de energía solar.....	93
Figura 47. Energía consumida del prototipo para una temperatura de recinto de 50°C sin aportes de radiación solar.....	101
Figura 48. Energía consumida del prototipo para una temperatura de recinto de 50°C con aportes de radiación solar.....	102
Figura 49. Energía consumida del prototipo para una temperatura de recinto de 60°C sin aportes de radiación solar.....	103
Figura 50. Energía consumida del prototipo para una temperatura de recinto de 60°C con aportes de radiación.....	104
Figura 51. Sistema de carga.....	109
Figura 52. Cilindros rotativos.....	110
Figura 53. Dimensiones preliminares del cilindro rotativo.....	111
Figura 54. Ubicación de las aletas en el cilindro.....	112
Figura 55. Estructura del cilindro rotativo.....	112
Figura 56. Soporte del cilindro giratorio.....	113
Figura 57. Lugar de las compuertas en el cilindro.....	113
Figura 58. Vistas de la compuerta y mariposa roscada.....	114
Figura 59. Compuerta en estado normalmente cerrado.....	114
Figura 60. Compuerta en estado normalmente abierto.....	114
Figura 61. Recolectores de material.....	116
Figura 62. Distancia entre ejes de poleas.....	116
Figura 63. Componentes del recinto invernadero.....	119
Figura 64. Dimensiones preliminares del invernadero.....	121
Figura 65. Zonas de acceso del invernadero.....	122
Figura 66. Dimensiones del ventilador centrífugo.....	123

Figura 67. Curvas de secado para el cymbopoggon 50°C sin aportes de energía solar	127
Figura 68. Curvas de secado para el cymbopoggon 60°C sin aportes de energía radiación solar.....	128
Figura 69. Curvas de secado para la swienglia a 50°C sin aportes de energía solar	129
Figura 70. Curvas de secado para la swienglia a 60°C sin aportes de energía solar	130
Figura 71. Curvas de secado para cymbopoggon 50°C con aportes de energía solar	131
Figura 72. Curvas de secado para cymbopoggon 60°C con aportes de energía solar	132
Figura 73. Curvas de secado para la swienglia a 50°C con aportes de energía solar	133
Figura 74. Curvas de secado para la swienglia a 60°C con aportes de energía solar	134

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UN DISPOSITIVO DE SECADO DE MATERIAL VEGETAL PARA LAS PLANTAS DE EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES.*

AUTORES: OSCAR MAURICIO VEGA CÁRDENAS**
SERGIO ANDRÉS VÁSQUEZ RIOS**

PALABRAS CLAVE: cilindros, rotativos, secado, biomasa, aprovechamiento.

CONTENIDO:

El secado es un proceso que se puede aplicar en las plantas de extracción de aceites esenciales para obtener los siguientes beneficios: proteger la materia prima de enfermedades y prepararlas para el proceso de destilado; utilizar el bagazo residuo de la planta de extracción, como combustible para la caldera. El equipo busca el aprovechamiento de la energía solar en forma de radiación y la energía contenida en los gases de escape de la caldera, como fuente de energía para el secado.

Se ha diseñado un secador del material vegetal utilizado en las plantas de destilación de aceites esenciales desarrolladas por el CENIVAM. Cuenta con dos cilindros rotativos contenidos dentro de un invernadero, que retira la humedad por medio de una corriente de aire caliente. Para su realización se analizó el proceso de secado como un fenómeno termodinámico de orden transitorio con algunas simplificaciones que responden a nuestras condiciones específicas. El modelo matemático fue desarrollado en la plataforma Simulink de la herramienta computacional Matlab. Las propiedades del secado que dependían de la naturaleza del material a secar se aproximaron gracias a la construcción del prototipo. Finalmente la selección de los componentes mecánicos se realizó siguiendo los resultados de la experimentación y los diferentes cálculos.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías Físico mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica.

Director Ing. Omar Armando Gélvez Arocha

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A DRYING DEVICE SCALE MODEL
FOR PLANT MATERIAL TO EXTRACTION PLANTS OF ESSENTIAL OILS.

*

AUTHORS: OSCAR MAURICIO VEGA CÁRDENAS**
SERGIO ANDRÉS VÁSQUEZ RIOS**

KEY WORDS: rotary cylinder, biomass drying, exploitation

CONTENT :

Drying is a process that can be used in extraction plants of essential oils to obtain the next benefits: protecting the raw materials of diseases and preparing them for distillation process, using bagasse residue of the extraction plant as fuel for the boiler. The equipment seeks to harness the solar energy in radiation form and the energy contained in the exhaust gas of the boiler, as an energy source for drying.

It has been designed a plant material dryer used in the distillation plants of essential oils developed by CENIVAM. It has two rotary cylinders content inside a greenhouse that separates the moisture through a hot air flow. To carry it out, the drying process was analyzed as a thermodynamic phenomena of transitional order with some simplifications that respond to our specific conditions. The mathematical model was developed in the platform Simulink from the computational tool Matlab. The drying properties that depended on the nature of the material to be dried were approached through the construction of the prototype. Finally the selection of mechanical components was performed following the experimental results and the different calculations.

* Graduation project

** Department of Physical mechanical engineerings. Mechanical Ingeneering School.

Director Ing. Omar Armando Gélvez Arocha

INTRODUCCIÓN

El secado es una operación que retira la humedad de los materiales. En la agroindustria es una práctica que se realiza para prevenir la aparición de enfermedades y hongos, aumentar el tiempo de post-cosecha, mejorar las condiciones de procesamiento, almacenamiento y transporte de los productos, brindando un valor agregado sobre la cadena de producción. En el caso de la destilación de plantas aromáticas y medicinales, el secado ayuda además a aumentar el potencial de extracción de aceites en las especies vegetales. Aunque es una operación importante en la agroindustria, en la región es un proceso poco tecnificado, no estandarizado y con baja investigación tecnológica.

Los secadores desarrollados en la industria son de diversos tipos, dependiendo de la naturaleza del material a secar, la forma de alimentarlo al dispositivo, o el mecanismo de transferencia de energía. Convencionalmente se clasifican de la siguiente manera: continuos o por lotes; directos o indirectos; de túnel, de bandejas, rotativos, turbo secadores, atmosféricos, al vacío, por pulverización, entre otros. Sin embargo la mayoría de los agricultores dejan secar sus productos a la intemperie, muchas veces por el desconocimiento de estas técnicas, con el producto sujeto a ataques de todo tipo de insectos y enfermedades, lo que acarrea pérdidas antes y durante el almacenamiento, baja rentabilidad, demoras en la producción, maltrato del producto y desorden en los procedimientos, perjudicando la economía de la región, la salud de los trabajadores y la del medio ambiente.

La entrada en vigencia de los tratados de libre comercio, deja en evidencia la desigualdad tecnológica, de recursos y de infraestructura en todos los sectores de producción. Es momento de tecnificar la agroindustria y de investigar en el diseño de los equipos que se utilizan en las zonas rurales del país, con miras a un desarrollo tecnológico que disminuya el impacto ambiental del agro, mejore los estándares de calidad de sus productos, vuelva sus prácticas económicamente viables y sobre todo, que garantice unos niveles de productividad para competir a nivel mundial.

Entre las complejidades y la diversidad de equipos presentes en las plantas de extracción de aceites esenciales, cabe resaltar las posibilidades de mejora en el diseño de un dispositivo de secado del material vegetal, por ser un punto crítico en cuanto al desperdicio de materia prima y un cuello de botella en el abastecimiento de combustible a otros componentes de la planta.

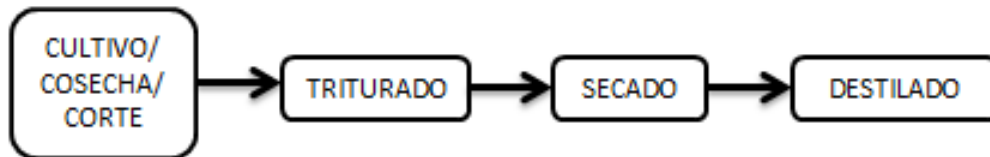
Los equipos de secado deben estar de acuerdo con el nivel de la producción, el manejo de los materiales y las prácticas tradicionales de los agricultores. En nuestro medio, se debe considerar su construcción y funcionamiento en zonas rurales y de difícil acceso, operado por personal con bajo nivel. Por lo que se requiere que el dispositivo sea seguro, de fácil uso, económico y permitir un sencillo mantenimiento.

En este trabajo de grado se ha diseñado un secador para las plantas de destilación de aceites esenciales. Como criterio se han seguido dos condicionamientos: la necesidad de extraer humedad para el material residuo del proceso de destilación, que servirá como combustible en los quemadores de las unidades de generación de potencia, y la remoción de humedad para especies aromáticas y medicinales frescas, que las protegerá contra enfermedades y potencializará el proceso de extracción de aceites. El equipo busca el aprovechamiento de la energía solar en forma de radiación y la energía contenida en los gases de escape de la caldera, hecho que suministrará la totalidad energética requerida en el secadero, y reducirá el impacto ambiental de las plantas de destilación. Para esto se ha optado por un secador de tipo invernadero, con un ambiente interno controlado en unas condiciones climáticas que fomenten la desecación por medio de una corriente de aire que asegure un arrastre convectivo de humedad.

A continuación se verán los conceptos que rigen la investigación, el diseño termodinámico y mecánico del secador para diferentes condiciones ambientales y de carga. Finalmente se mostrarán las condiciones constructivas del secadero para las plantas de destilación de aceites esenciales.

1. GENERALIDADES DE LA OBTENCIÓN DE ACEITES ESENCIALES

Figura 1. Etapas del material en la producción de aceites esenciales



CULTIVO / COSECHA / CORTE: es la materia prima del proceso de destilación. Se recolectan las plantas en el momento oportuno y se llevan a la planta de extracción de aceites esenciales.

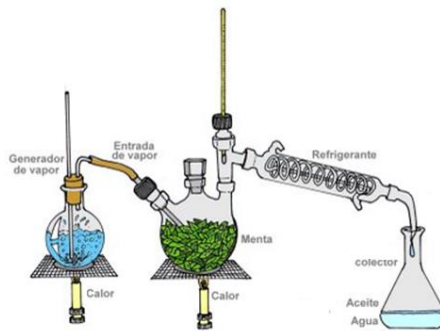
TRITURADO: el material vegetal pasa por la trituradora quedando en trozos pequeños. Se hace para poder almacenarlo en sacos y preparar el material con miras a la destilación

SECADO: se hace para proteger al material de enfermedades. Un secador de tipo invernadero es el lugar comúnmente usado en la región para este fin.

DESTILADO: es la operación con la cual se separan los componentes más volátiles de las especies vegetales, en forma de aceite, para la manipulación de sus propiedades médicas y aromáticas. Se pueden distinguir en esta etapa varios dispositivos:

- Unidad de potencia: una caldera que produce vapor a alta temperatura para la destilación por arrastre de vapor, o un quemador si es el caso de hidrodestilación.
- Alambique: es el recipiente en el que se produce la separación de los componentes volátiles de la mezcla.
- Condensador: devuelve al estado líquido los vapores provenientes del alambique preparándolos para la recolección
- Vaso separador: en él “cae” la mezcla de agua-aceite proveniente del condensador y en él se separan por diferencia de densidades.

Figura 2. Esquema general de un proceso de destilación.



Fuente: <http://esperanza96.wordpress.com/2012/04/29/destilacion/>

2. SECADO

El secado es una operación industrial que disminuye el contenido de humedad y aumenta el valor agregado de los productos agrícolas, por las siguientes razones: le confiere propiedades de maduración, reduce el peso del producto, baja los costos de transporte y almacenamiento, protege de enfermedades y asegura la calidad. En el caso de la producción de aceites esenciales, aumenta el rendimiento del proceso de destilación en las especies vegetales.

2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE SECADO

Todos los cuerpos tienen un contenido de agua. Los secadores se han desarrollado a lo largo de la historia y actualmente se encuentra una gran variedad de equipos destinados para este fin. Existen diferentes categorías en las que se pueden clasificar, dependiendo de las condiciones en la línea de producción a la que estén asociados, el mecanismo para remover la humedad, las características del material manejado y la fuente de energía que se provea para acelerar el proceso de secado. Un secador se puede clasificar de la siguiente manera¹:

¹ **BADGER, W. BANCHERO, J.** Introducción a la ingeniería química. McGraw-Hill. 1964.

2.1.2 Según la forma de alimentar el material.

- Secadores continuos: estos equipos operan en estado estacionario, generalmente el equipo es pequeño en comparación con la cantidad de producto. La operación continua es versátil pues permite integrar procesos en la cadena de producción, evitando el almacenamiento intermedio del material.
- Secadores por lotes: tienen una operación cíclica, se carga inicialmente el material a secar, se lleva a las condiciones de secado y finalmente se retira el material seco para repetir el proceso con un nuevo lote.

2.1.2 Según el mecanismo de remoción de humedad.

- Secadores directos: la transferencia de calor se realiza por convección, exponiendo el material a secar con un gas caliente, por lo general aire, que retira el contenido de humedad.
- Secadores indirectos: el fluido caliente que se proporciona para retirar la humedad se suministra sin entrar en contacto con el material a secar. Los mecanismos de transferencia de calor involucrados en este tipo de secadores son la radiación y la conducción. Son característicos de secadores donde el calor se proporciona a través de paredes metálicas en contacto con la sustancia a secar. Se usan cuando el material no puede tener una exposición directa con el gas que retira la humedad.
-

2.1.3 Según las características físicas del material manejado.

- Materiales en hojas, transportados por bandejas o transportadores:
 - Secadores discontinuos: De compartimentos a presión atmosférica; de bandejas al vacío.
 - Secadores continuos: de túnel.

- Materiales sueltos o granulares:
 - Secadores rotativos: rotativos normales; roto-louvre
 - Turbo secadores
 - Secadores de transportador
 - Combinación de secador-filtro

- Materiales en hojas continuas:
 - Cilindros secadores
 - Secadores de festón

- Pastas, lodos o torres cristalinas:
 - Secador agitador: atmosférico; al vacío.

- Materiales en solución:
 - Tambores secadores: atmosféricos; al vacío
 - Secadores por pulverización

2.1.4 Según la fuente de energía usada para potenciar el secado

- Secadores mecánicos:
 - Centrifugado; filtrado; prensado

- Secadores térmicos:
 - Secado convectivo.
 - Secado radiante: secadores solares
 - Secado por conducción.

2.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL SECADO

- Velocidad del aire: afecta los coeficientes de transferencia de calor y de masa entre el medio y el material a secar.
- Humedad del aire: la intensidad de la desecación disminuirá a medida que el aire utilizado posea mayor humedad.
- Efecto de contracción: este fenómeno puede producir el agrietamiento del material, endurecer la superficie del material impidiendo el flujo de humedad y/o modificar el área superficial del sólido en contacto con el ambiente.
- Área de transferencia: el secado se efectúa mejor sobre partículas pequeñas, ya que existe una mayor exposición de superficie húmeda con el medio.
- Migración de la humedad en el sólido: este efecto depende del tamaño de las partículas y la estructura del material.
- Agitación: provee de uniformidad al proceso de secado y el movimiento aumenta la intensidad de desecación.
- Volumen de material: de este factor depende el tamaño del equipo de secado.
- La temperatura del aire dentro del recinto.

2.3 ESTADO ACTUAL DEL PROCESO DE SECADO EN LAS PLANTAS DE EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES.

En el caso de las plantas desarrolladas por el CENIVAM, el secado se realiza en interior de invernaderos. El proceso se encuentra en el siguiente estado:

- No tienen análisis funcional y tecnológico.
- Los tiempos de secado son irregulares.
- Son equipos grandes que generan altos costos asociados a la construcción.
- La distribución del material vegetal se hace de una forma inadecuada apilándola en grandes montones, lo que fomenta la aparición de enfermedades en las plantas.

Figura 3. Invernaderos en la actualidad



Fuente. CENIVAM

3. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

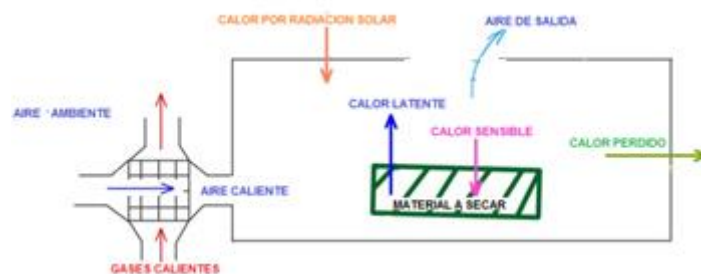
El objetivo del proyecto es diseñar un secador en invernadero, para el material vegetal utilizado en las plantas de extracción de aceites esenciales. Utilizando como fuente de energía los gases de combustión residuales de la operación de la caldera y la energía solar.

Por las características de la producción en la destilación de aceites esenciales, las cualidades y el tratamiento del material vegetal, las prácticas tradicionales de la operación de remoción de humedad por parte de los agricultores, el equipo debe cumplir con niveles de *producción por lotes de gran volumen*. El proceso se realiza cuando haya disponibilidad de la materia prima, en el momento de la cosecha y cuando se disponga de bagazo al final de cada destilación. El secado se realiza de forma *directa*, ya que no existe riesgo de poner en contacto las plantas con una corriente de aire caliente. La materia prima se encuentra *triturada*, lo que facilita enormemente el proceso de secado por hacer del mecanismo de migración de humedad en el interior del material un fenómeno despreciable en el diseño y aumentar el área efectiva de secado.

3.1 CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES DEL SECADOR.

1. Secar dos tipos de materiales: *material fresco* y *material procesado*
2. Obtener una humedad de base húmeda de salida del 18% para el *material procesado*.
3. Cumplir con una rata de salida de 30 Kg/h de *material procesado seco*.
4. Obtener una humedad de base húmeda de salida del 50% para el *material fresco*.
5. Utilizar energía solar en forma de radiación y la energía contenida en los gases de escape de la caldera, para satisfacer las necesidades energéticas.
6. Desarrollar un sistema de secado de biomasa para funcionar en zonas rurales.

Figura 4. Esquema general del secador



3.2 MATERIAL VEGETAL.

Depende del agricultor las especies vegetales que se trabajen en las plantas de destilación de aceites. El material que llega al proceso de secado es de dos naturalezas: *material fresco*, que es la materia prima de la destilación y *material procesado*, que es el bagazo residuo de la misma. No presenta un tamaño uniforme, ni una forma regular en su materia. En algunos se pueden encontrar tallos, hojas, espinas y ramas. Otras especies solo presentan hojas y tallos.

El volumen de material vegetal es un factor crítico en el caso de especies vegetales de esta naturaleza. El tamaño del equipo dependerá de este factor y de la manera de cargar el material en el dispositivo.

Figura 5. Flujo de material vegetal fresco y material procesado.



3.2.1 Contenido de humedad. El contenido de humedad de un cuerpo se puede expresar de dos maneras:

- Humedad de base seca: Este contenido de humedad está asociado al peso de agua de un kilogramo del cuerpo seco.
- Humedad de base húmeda: Es el contenido de humedad en porcentaje del peso del sólido húmedo.

$$\%Bs = \frac{Wh + Ws}{Ws} * 100$$

$$\%Bh = \frac{Wh + Ws}{Wh} * 100$$

Tabla 1. Propiedades de los materiales y plantas estudiadas.

PLANTA / PROPIEDAD	HUMEDAD [%Bh]
PROCESADO	76,5
<i>Swinglea</i>	67,67
<i>Cymbopogon</i>	76,14
<i>Lippia Alba</i>	70,75

3.3 CONCEPTO DE DISEÑO DEL SECADOR

La elección del equipo de secado estuvo de acuerdo con la manera tradicional de hacer esta operación: secado solar en invernadero. Un factor crítico en el diseño fue el volumen de biomasa que se maneja en las plantas de destilación de aceites, lo que condiciona el sistema de carga de material. Para lograr una uniformidad y mejorar la rapidez del secado se dispuso el material vegetal en el interior de cilindros rotativos, expuesto a una corriente de aire caliente.

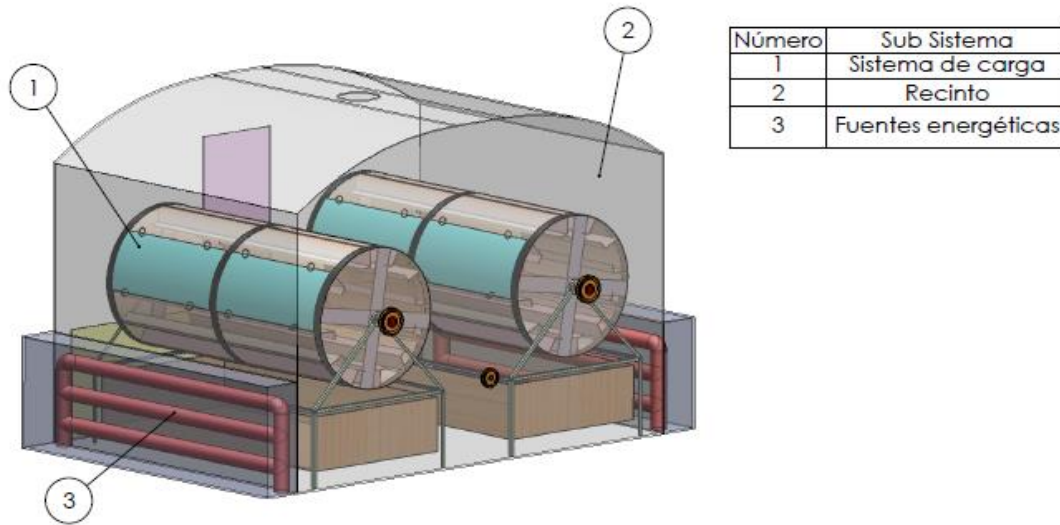
El equipo de secado se compone de:

1. Sistema de carga
 - Cilindros rotativos
 - Recolectores de material
 - Transmisión de movimiento

2. Recinto
 - Recubrimiento
 - Estructura
 - Ventilación

3. Fuentes energéticas
 - Calor por radiación solar
 - Calor por convección

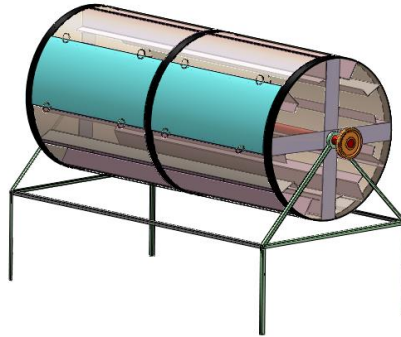
Figura 6. Componentes del equipo de secado



3.3.1 Sistema de carga. Su objetivo es contener el material vegetal y darle uniformidad al secado, minimizando el efecto de escudo de una partícula por otra. Debe permitir una rápida, sencilla y segura operación. Los cilindros rotativos son la mejor opción para contener el material en un proceso de secado, son simples y económicos.

3.3.2 Recinto. Un invernadero es el equipo que comúnmente se utiliza en las plantas de extracción de aceites esenciales. Debe ser del menor tamaño posible, seguro, permitir una fácil construcción y mantenimiento. Estará ubicado en una zona rural, en el lugar de producción de las plantas de destilación, cerca del ducto de salida de los gases de escape de la caldera.

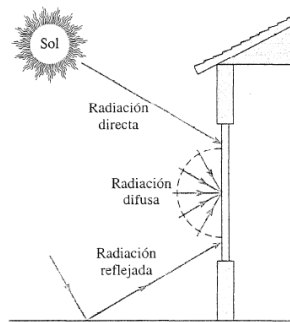
Figura 7. Cilindros rotativos.



3.3.3 Fuentes energéticas. El calor necesario para la desecación del material vegetal en el dispositivo se suministrará por medio de dos fuentes: *calor radiante* y *calor convectivo*. Esta combinación nos brindan ventajas que se complementan: la primera fuente representa una ventaja económica que se obtiene de aprovechar la radiación solar; la segunda, asegurará la operación continua del dispositivo y lo independizará de factores tan variables como las condiciones ambientales.

3.3.3.1. Calor por radiación solar. La cubierta translúcida de los invernaderos permite aprovechar la energía solar en su interior. El aire circundante y el material vegetal en la cámara de secado son calentados de esta manera, aumentando su temperatura para mejorar la capacidad de extracción de humedad.

Figura 8. Radiación sobre una superficie



Fuente. CENGEL, Yunus. Fundamentos de transferencia de calor y masa

3.3.3.2 Calor convectivo. Como resulta difícil controlar las condiciones climáticas debido a la incertidumbre en el comportamiento del medio ambiente, se hace necesario utilizar una fuente energética complementaria, en este caso de carácter convectivo. Un intercambiador ubicado en la ventana de ingreso de aire cederá calor a este, proveniente de los gases de escape del proceso de combustión de los quemadores de la caldera. Los gases, en vez de ser enviados al medio ambiente a una alta temperatura, transferirán una porción de energía al sistema y a su vez, disminuirán su impacto sobre el medio ambiente de la planta de extracción de aceites esenciales. La transferencia de calor por convección, lo compone un sistema de tubos radiantes, dentro de los cuales circulan los gases residuos de la combustión.

3.4 ANÁLISIS DEL DISEÑO DEL SECADOR

El diseño del secador propuesto exige dos tipos de análisis a considerar: el diseño térmico y el diseño mecánico.

3.4.1 Diseño térmico. Comprende el estudio del proceso de secado desde la termodinámica. Para este propósito se efectuaron los siguientes pasos:

1. Elaboración del modelo matemático unidimensional de orden transitorio de los aportes y pérdidas energéticas del secador
2. Simulación computacional de las ecuaciones diferenciales simplificadas que describen el proceso de secado
3. Construcción de un modelo a escala del secador propuesto
4. Experimentación con el prototipo para conocer las variables que dependen de la naturaleza del material a secar y las condiciones climáticas del modelo.

3.4.1 Diseño mecánico. Comprende el estudio de los componentes móviles y estacionarios del equipo de secado, la elección de los materiales y las dimensiones de sus partes, como también el manejo del material a secar. Para este propósito se efectuaron los siguientes pasos:

1. Diseño de los elementos del sistema de carga
2. Diseño de los elementos del recinto invernadero
3. Elaboración de planos

4. DISEÑO TÉRMICO

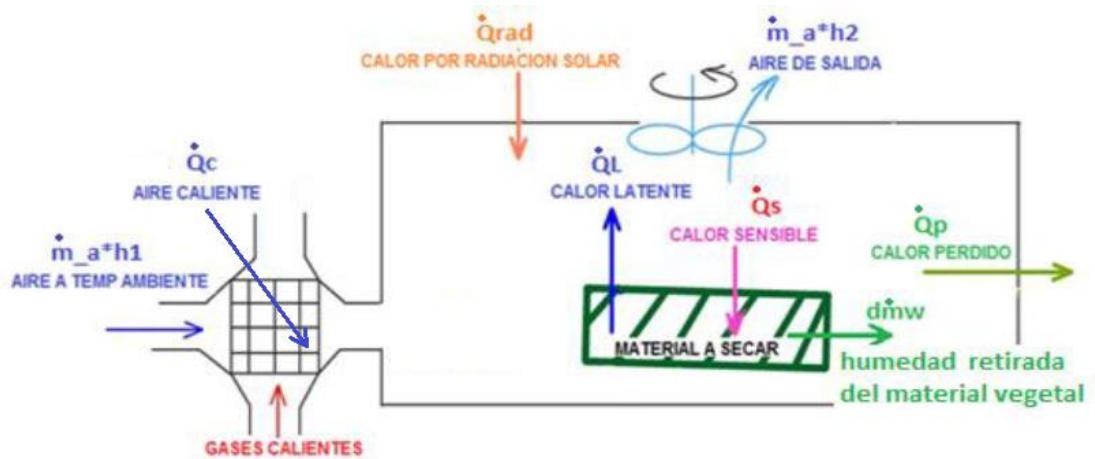
Se establece un modelo matemático considerando dos regiones para el análisis: el producto y el medio circundante. La transferencia de calor, la transferencia de masa, la deformación, el encogimiento del producto y el mecanismo de migración de humedad en el mismo, son los factores más importantes en el momento de analizar la remoción de humedad. No obstante, es necesario efectuar una serie de simplificaciones al problema, que nos ayude a plantear un sistema de ecuaciones acordes al nivel de la solución propuesta. En este sentido, se describen algunos de los fenómenos de transferencia de masa en el interior de un secadero, en el que se desprecia la migración interna de humedad al tratarse de un material particulado y en hojuelas, en el que lo consideramos constante, además de despreciarse cualquier efecto por la contracción sufrida por el mismo.

El secado convectivo, es un proceso de transferencia de masa de un medio líquido a un medio gaseoso en movimiento, ocurriendo simultáneamente una transferencia de calor y masa.

El diseño térmico busca generar un modelo matemático que se ajuste a las condiciones del secado en un recinto con las características del invernadero, simulando el comportamiento del mismo para conocer con un buen grado de precisión el contenido de humedad en el producto final y el aire circundante, los efectos de la ventilación, las distribuciones de la velocidad de la corriente de aire, la distribución de las temperaturas, las condiciones meteorológicas en el proceso, entre otras variables. A continuación se refiere un esquema donde se relacionan,

con respecto al volumen de control del invernadero, los aportes y pérdidas energéticas:

Figura 9. Aportes y pérdidas energéticas.



Q_{rad} = calor de radiación sobre el invernadero

Q_p = calor de pérdida a través de las paredes

Q_c = calor entregado por el intercambiador

Q_s = calor sensible recibido por el material

Q_L = calor latente cedido por la masa de humedad

m_a = masa de aire

Para analizar el secado en el interior del invernadero se establece un balance termodinámico de orden transitorio, porque las variables como la temperatura, la

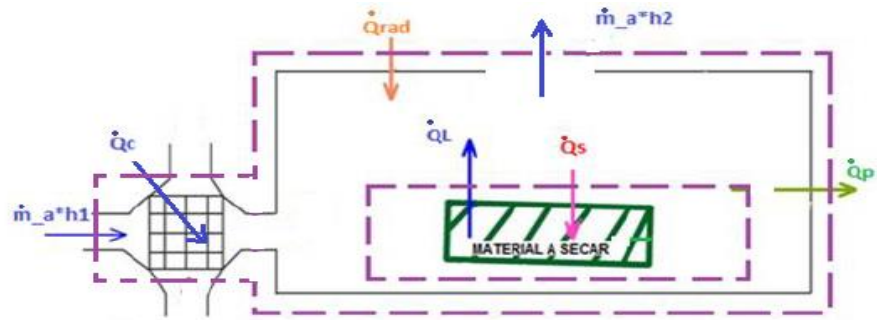
humedad relativa y absoluta del aire, la cantidad de agua en el material, son cambiantes en el tiempo. Este balance arrojó las siguientes ecuaciones:

- Balance de energía del aire
- Balance de energía del material a secar
- Balance de masa del material a secar
- Calor de radiación sobre el invernadero
- Calor de pérdidas a través de las paredes
- Calor entregado por el intercambiador
- Calor sensible
- Calor latente

4.1 BALANCE DE ENERGÍA DEL AIRE

Con este balance se obtiene la temperatura dentro del invernadero en función del tiempo. A medida que el tiempo va transcurriendo en el secado, el aire dentro del invernadero se va cargando de energía debido al calor sensible producido por los tubos radiantes, el aporte energético de la radiación solar y el flujo de calor latente proveniente del material a secar. El sistema pierde energía hacia el ambiente por medio de las paredes y el flujo de aire que sale del invernadero. Otro porcentaje de calor sensible se pierde con el material vegetal debido a la diferencia de temperatura que existe entre ellos, siendo el aire el que tiene mayor temperatura con respecto a la temperatura del material a secar.

Figura 10. Balance de energía del aire.



$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{dE}{dt}$$

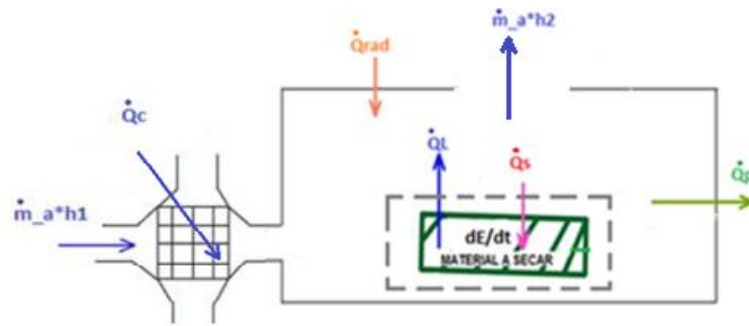
$$\dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_c + \dot{m}_a h_1 - \dot{m}_a h_2 + \dot{Q}_L - \dot{Q}_S - \dot{Q}_p = \dot{m}_a C v_a \frac{dT_s}{dt}$$

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_c + \dot{m}_a h_1 - \dot{m}_a h_2 + \dot{Q}_L - \dot{Q}_S - \dot{Q}_p}{\dot{m}_a C v_a}$$

4.2 BALANCE DE ENERGÍA DEL MATERIAL A SECAR

Con este balance podemos obtener una aproximación del valor de la temperatura en la superficie del material vegetal en el tiempo. Se puede observar que como la temperatura del aire es mayor que la del material vegetal, se producirá una transferencia de calor sensible hacia el material, y que como la humedad que está siendo removida del material vegetal hacia al ambiente, se transformará en un flujo de calor llamado calor latente.

Figura 11. Balance de energía del material a secar



$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{dE}{dt}$$

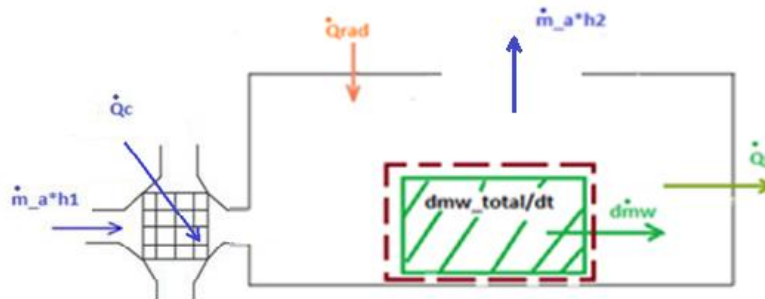
$$\dot{Q}_S - \dot{Q}_L = m_s C p_m \frac{dT_w}{dt} + \dot{m}_w(t) C p_w \frac{dT_w}{dt} + \frac{dm_w}{dt} h_{fg}$$

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{\dot{Q}_S - \dot{Q}_L - \frac{dm_w}{dt} h_{fg}}{\dot{m}_s C p_m + \dot{m}_w(t) C p_w}$$

4.3 BALANCE DE MASA DEL MATERIAL A SECAR

Con el balance de masa que se muestra a continuación, podemos obtener las gráficas que del comportamiento de la humedad del material. El material vegetal dentro del invernadero está afectado por la temperatura del aire y la humedad absoluta que presenta en el proceso de secado. La biomasa se irá secando hasta llegar al contenido de humedad de base húmeda en equilibrio con el sistema.

Figura 12. Balance de masa del material a secar



$$m_w(t) = m_{Total} - \sum k_x A_{H_2O} (W_{Tw}^* - W_{Ts})$$

4.4 CALOR DE RADIACIÓN SOBRE EL INVERNADERO (Q_{rad})

Es el calor que procede de la energía solar. Una región como el departamento de Santander con seis horas de sol diarias en promedio anual², registra, para este mismo periodo 5 KW-h/m². El material absorbe una parte de la misma, refleja una pequeña proporción y por ser una cubierta translúcida deja pasar la mayor cantidad de la radiación para ser aprovechable. La velocidad de transferencia de calor por radiación está dada por CENGEL, Yunus en el libro de transferencia de calor:

$$\dot{Q}_{rad} = \dot{q}_r * A (\tau_s + f_1 * \alpha_s - E(T_p - T_{amb}))$$

τ_s = Transmisividad del material

f_1 = Fracción de energía absorbida transmitida por convección al recinto

α_s = Absortividad del material

A = Área del invernadero

\dot{q}_r = Radiación solar que llega a la superficie

E = Emisividad en la superficie de las paredes del recinto

T_p = Temperatura de la superficie en las paredes del recinto

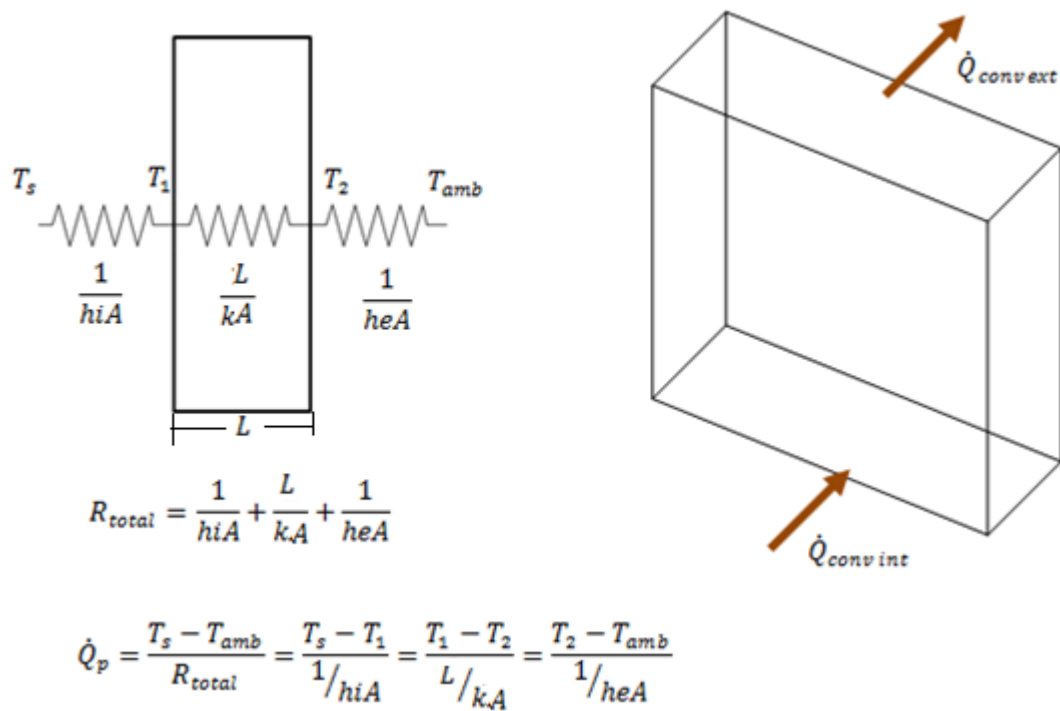
T_{amb} = Temperatura ambiente

²Departamento de Planeación Nacional

4.5 CALOR DE PÉRDIDAS A TRAVÉS DE LAS PAREDES (Q_p)

La pérdida de calor se efectúa hacia el exterior de la cámara de secado. El fenómeno que tiene lugar al interior del recinto es por convección natural, seguida de conducción de calor en la cubierta, para finalmente ceder calor al ambiente por convección forzada según las condiciones de viento.

Figura 13. Pérdidas de calor del recinto



CONDUCCIÓN DE CALOR: el material de la cubierta es un excelente aislante, lo que limita la cantidad de calor que se pierde a través de las paredes.

CONVECCIÓN INTERNA (NATURAL): las corrientes de aire en el interior del recinto son bajas.

CONVECCIÓN EXTERNA (FORZADA): se debe al movimiento del viento al exterior del invernadero.

SIMPLIFICACIÓN: temperatura de pared constante (T_1, T_2). Esta es una variable que depende de muchos factores cambiantes en el tiempo. Se puede asumir un valor en el caso extremo de pérdidas de calor, que sería la etapa estable del proceso, donde el recinto se encuentra al set point de temperatura.

4.6 CALOR ENTREGADO POR EL INTERCAMBIADOR (Q_c)

Las condiciones ambientales como la cantidad de sombra a lo largo del día es un factor negativo en los dispositivos que funcionan con energía solar. Por lo general se requiere la cooperación de una fuente energética secundaria para casos extremos. El secador se ha diseñado con un sistema auxiliar de suministro energético. Se trata de un sistema de intercambiador de calor por medio de tubos radiantes que funcionan con los gases de escape de la caldera, a un flujo másico de 237,6 Kg/h y una temperatura de entrada de 290°C^3 , y que podemos además analizar como un banco de tubos ubicados a la entrada de aire del invernadero.

³ ESCORCIA, Karol. GONZÁLEZ, Juan. Diseño de una calera pirotubular que use biomasa como combustible, para la generación de vapor de arrastre de un destilador de aceites esenciales. Tesis de grado ingeniería mecánica. Universidad Industrial de Santander. 2012.

$$\dot{Q}_c = U * A * LMDT$$

U = Coeficiente global de convección del aire

A = Área superficial de transferencia de calor

LMTD = Diferencia media logarítmica de temperatura

4.7 CALOR SENSIBLE (Q_s)

El material vegetal gana calor sensible del sistema debido a la diferencia de temperatura de este con respecto al aire circundante. De la misma forma el aire pierde esta misma cantidad de calor por cederlo al material vegetal. La transferencia ocurre por convección en esa dirección porque el aire del recinto se encuentra en cada instante a una temperatura superior a la del material.

$$\dot{Q}_s = h_s A_{H_2O} (T_{s(t)} - T_{w(t)})$$

h_s = Coeficiente de convección

A_{H_2O} = Área superficial del material a secar en contacto con el aire caliente

$T_{s(t)}$ = Temperatura del aire

$T_{w(t)}$ = Temperatura de la gota

4.8 CALOR LATENTE (Q_L)

Es la energía que representa la cantidad de masa de agua que gana el aire, al aumentar su contenido de humedad mientras se seca el material. Cuando el agua se evapora, pasando de su estado líquido en el material, al gaseoso en el aire, ocurre un fenómeno de enfriamiento por evaporación. Este calor nos da una medida de este fenómeno proporcional a una constante k_x .

$$\dot{Q}_L = k_x A_{H_2O} (W_{T_w}^* - W_{T_s}) h_{fg}$$

k_x = Coeficiente de transferencia de masa

A_{H_2O} = Área superficial del material a secar en contacto con el aire caliente

$W_{T_w}^*$ = Humedad de saturación a la temperatura de la gota

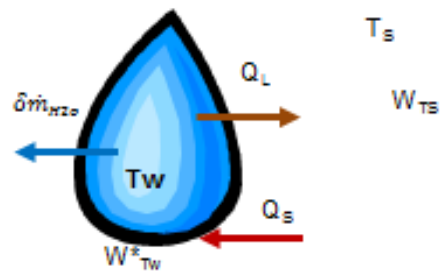
W_{T_s} = Humedad del aire del sistema

h_{fg} = Diferencia de entalpías a la temperatura del aire

SIMPLIFICACIÓN: tamaño de partículas. Por tratarse de un material triturado, de diferentes variedades, formas y tejidos (tallos, hojas, cáscaras), el mecanismo de migración de humedad no se analizó. Se tuvo en cuenta su influencia en el coeficiente de transferencia de masa k_x , que se halló experimentalmente.

Podemos resumir los dos últimos flujos de calor mencionados, en el siguiente esquema donde se muestran las direcciones que adoptan sobre una gota de agua en el material vegetal. El aire en contacto con la gota alcanza la temperatura de saturación de la gota y se llena de humedad, llegando al 100% de humedad relativa. El material gana calor sensible del sistema y pierde calor latente. En el tiempo, el aire del invernadero va aumentando su humedad estableciéndose un flujo de masa de agua desde el material vegetal (la gota) hacia el recinto.

Figura 14. Balance energético de una gota de agua en el material vegetal

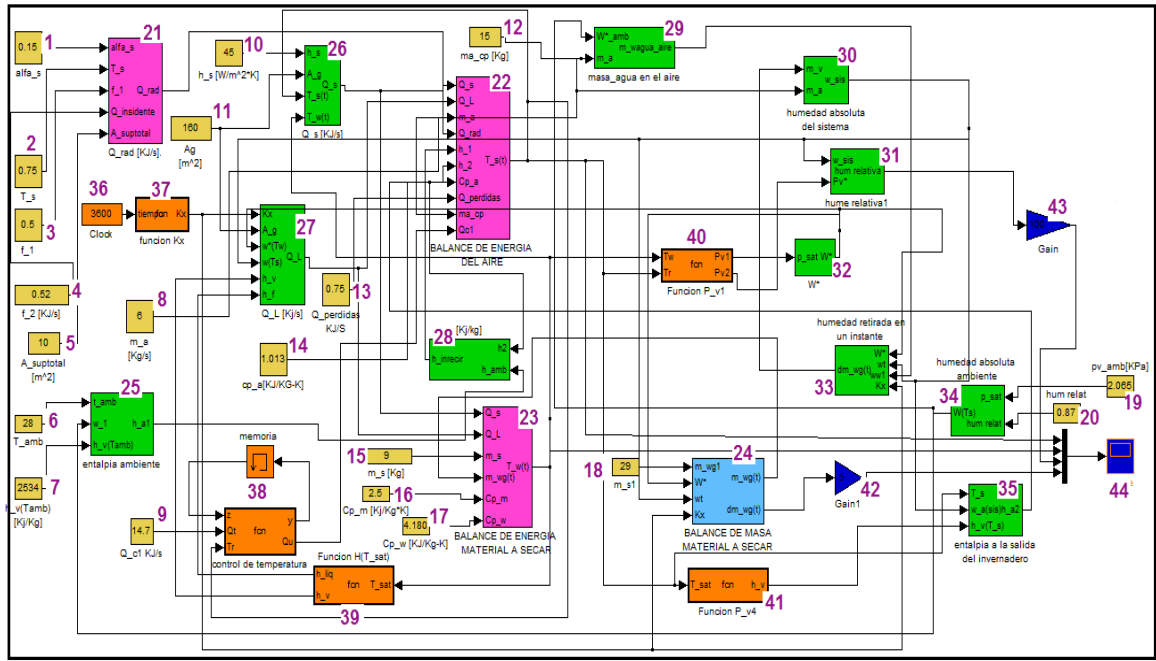


5. SIMULACION DEL PROCESO DE SECADO

Con los balances de energía para el invernadero y los datos obtenidos con las pruebas en el laboratorio, se procedió a realizar un programa en Simulink, que mostrara el comportamiento de la temperatura del recinto, la temperatura del material a secar y la humedad retirada en función del tiempo. Simulink es un entorno de programación de la herramienta computacional MatLab. Es una herramienta matemática para la resolución de sistemas de ecuaciones de orden transitorio y por la cantidad de variables en juego, resulta inapropiado abordarlo “a mano”. Con este programa podemos encontrar la respuesta que describe el comportamiento en el tiempo de nuestro sistema y predecir lo que sucedería si llegara a existir cambios en algunas variables que influyen en el proceso de secado. A continuación se muestra el esquema general de programación utilizado para el desarrollo del secador, en el cual se han clasificado los módulos del programa con diferentes colores.

- Amarillo: módulo de constantes
- Morado: módulo de balance de energías
- Celeste: módulo de balance de masa
- Verde: módulo de subconjuntos u operaciones básicas.
- Naranja: módulo de funciones halladas con la experimentación y tablas.
- Azul: otros.

Figura 15. Interfaz gráfica en Simulink.



5.1 MÓDULO DE CONSTANTES

Son los valores de entrada del sistema de ecuaciones. A continuación se muestra el número del bloque, el nombre y su correspondiente significado:

1. Alfa_s = absortividad del material
2. T_s = transmisividad del material
3. F_1= fracción de energía absorbida transmitida por convección al recinto.
4. F_2 = calor incidente de la radiación solar que llega a la superficie
5. A_subtotal = área de la superficie soleada.

6. T_{amb} = temperatura ambiente.
7. h_v = entalpia de vapor a la temperatura ambiente
8. M_a = masa de aire que entra y sale del sistema.
9. Q_c = calor suministrado por los tubos radiantes.
10. h_s = Coeficiente de convección en el invernadero
11. A_g = área del material en contacto con el aire.
12. $M_{a_{cp}}$ = masa de aire dentro del invernadero.
13. $Q_{pérdidas}$ = calor promedio perdido por las paredes del invernadero.
14. C_{p_a} = calor específico del aire.
15. M_s = masa del material seco.
16. C_{p_m} = calor específico del material seco.
17. C_{p_w} = calor específico del agua.
18. m_{s1} = masa total de humedad del material a secar
19. P_{v-amb} = presión de vapor a la temperatura ambiente
20. $hum\ relat$ = humedad relativa del ambiente a la temperatura ambiente

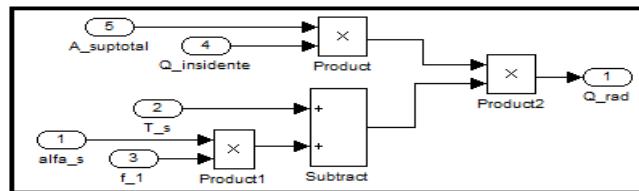
5.2 MÓDULO DE BALANCE DE ENERGÍA

En este módulo aparece el balance de energía del aire, del material a secar y el calor entregado por la radiación solar. La descripción de estos balances aparece en el capítulo anterior, por lo que solo se mostrará la ecuación diferencial para cada uno y el diagrama de bloques hecho en simulink.

21. Calor suministrado por la radiación solar: se anexó en este módulo porque el aporte que le hace al balance de energía en el aire es considerable.

$$\dot{Q}_{rad} = \dot{q}_r * A (\tau_s + f_1 * \alpha_s - E(T_p - T_{amb}))$$

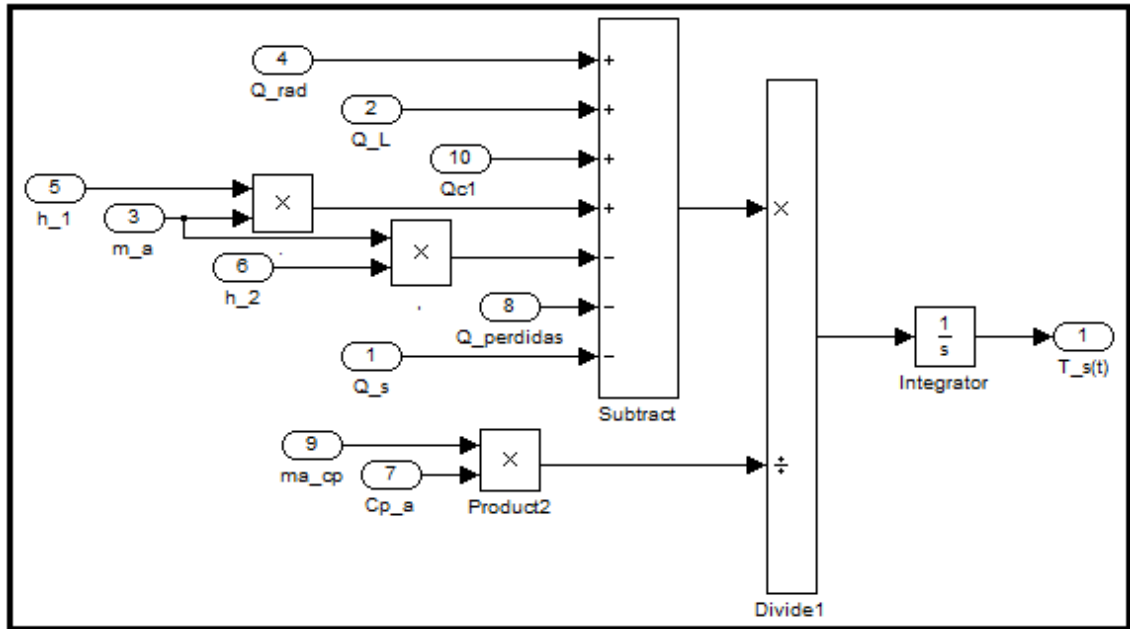
Figura 16. Bloque 21



22. Balance de energía del aire: con este balance se obtiene la temperatura en función del tiempo dentro del invernadero.

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_c + \dot{m}_a h_1 + \dot{Q}_L - \dot{Q}_S - \dot{Q}_p - \dot{m}_a h_2}{\dot{m}_a C p_a}$$

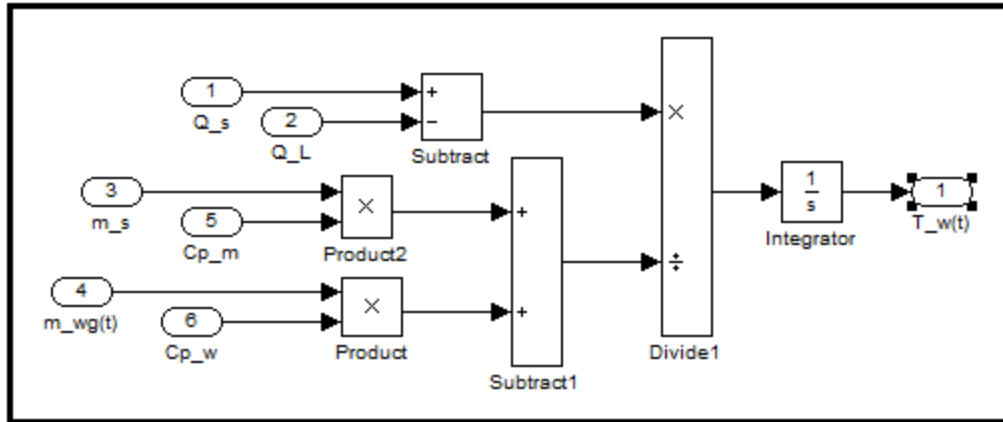
Figura 17. Bloque 22.



23. Balance de energía del material vegetal: con este balance podemos obtener una aproximación del valor de la temperatura en la superficie del material vegetal.

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{\dot{Q}_S - \dot{Q}_L - \frac{dm_w}{dt} h_{fg}}{\dot{m}_s C_{p_m} + \dot{m}_w(t) C_{p_w}}$$

Figura 18. Bloque 23



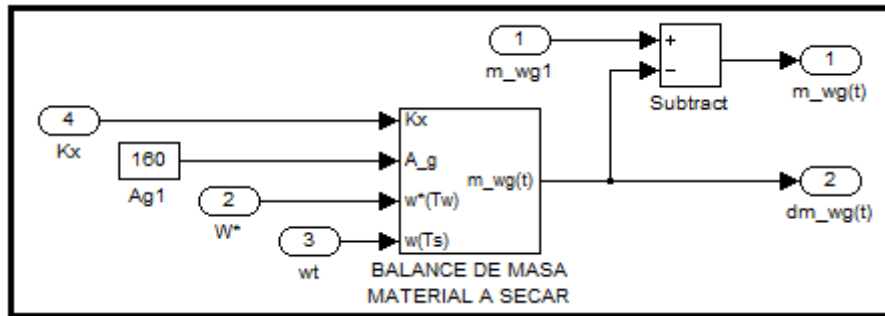
5.3 MÓDULO DE BALANCE DE MASA DE MATERIAL A SECAR

Con el balance de masa que se muestra a continuación, podemos obtener las gráficas del comportamiento de la humedad del material. Se hallará una curva que muestre el valor acumulado en el tiempo de la cantidad de humedad retirada, a la vez que podremos observar la humedad que queda en el material vegetal en cualquier momento.

24. Balance de masa del material a secar.

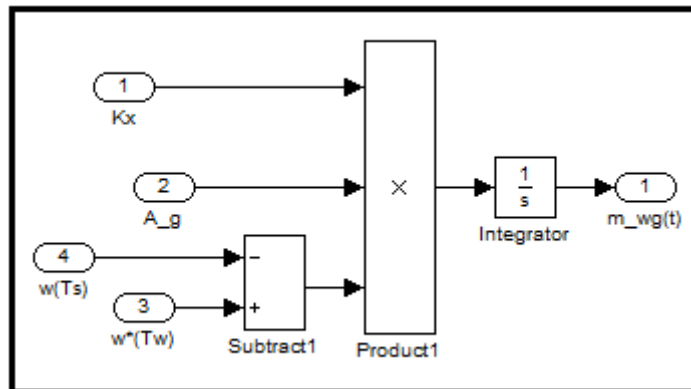
$$m_{w(t)} = m_{Total} - \sum k_x A_{H2O} (W_{Tw}^* - W_{Ts})$$

Figura 19. Bloque 24



El diagrama de bloques que se muestra a continuación, es el desarrollo del bloque "BALANCE DE MASA DE MATERIAL A SECAR". La integral es para hacer un acumulado de la humedad retirada en el tiempo.

Figura 20. Balance de masa de material a secar



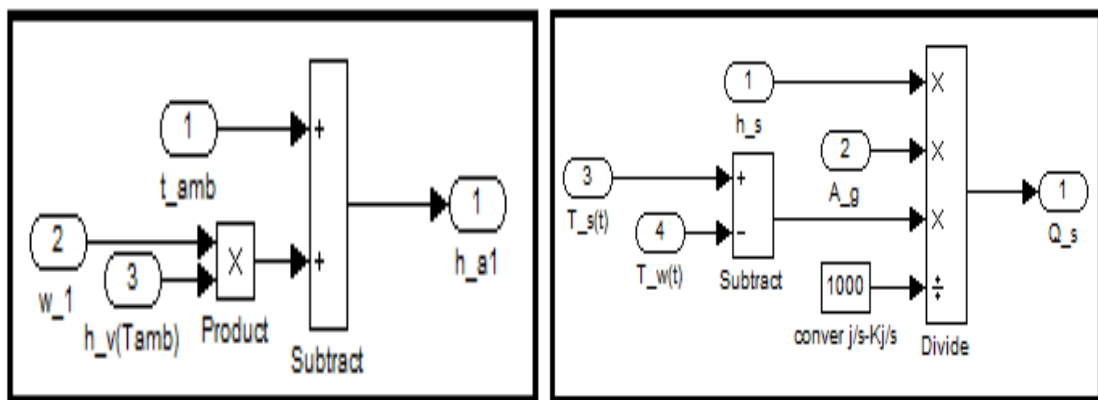
5.4 MÓDULO DE SUBCONJUNTOS DE FUNCIONES BÁSICAS

Son fórmulas de las que se obtienen valores de entrada para los balances de energía y masa. Hacen parte del estudio de las propiedades del aire húmedo y sus cargas energéticas.

25. Entalpía ambiente

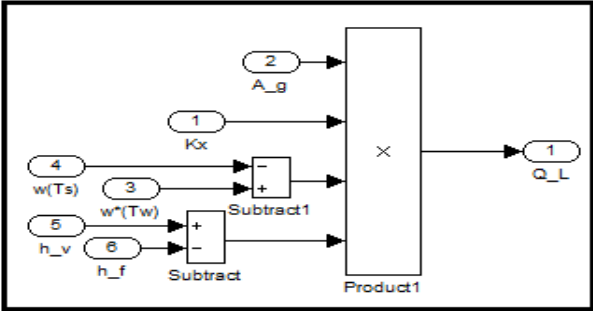
26. Calor sensible Q_s

Figura 21. Bloque 25 y bloque 26



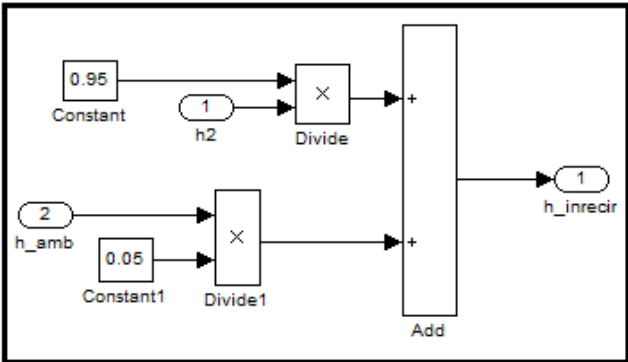
27. Calor latente QL

Figura 22. Bloque 27



28. Entalpía que entra al recinto

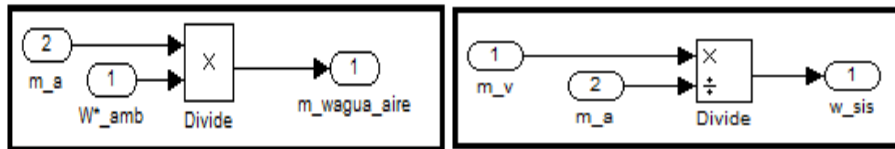
Figura 23. Bloque 28



29. Masa de agua en el aire

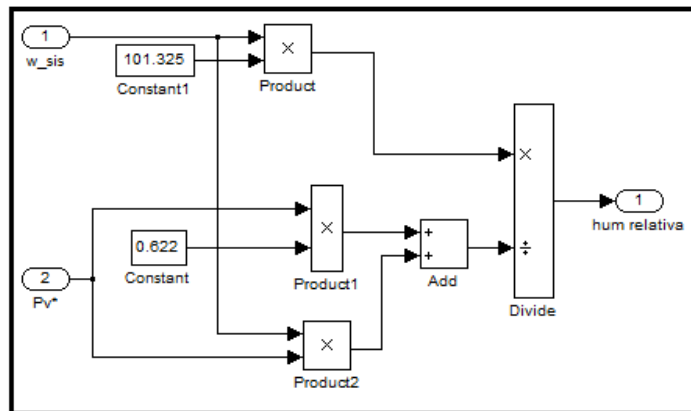
30. Humedad absoluta del sistema

Figura 24. Bloque 29 y bloque 30



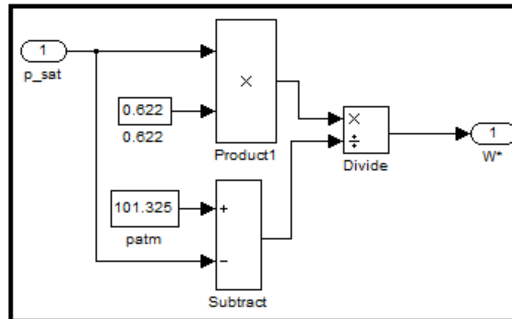
31. Humedad relativa dentro del invernadero

Figura 25. Bloque 31



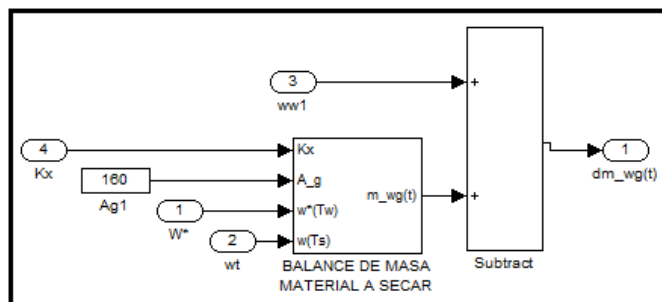
32. Humedad absoluta de saturación

Figura 26. Bloque 32



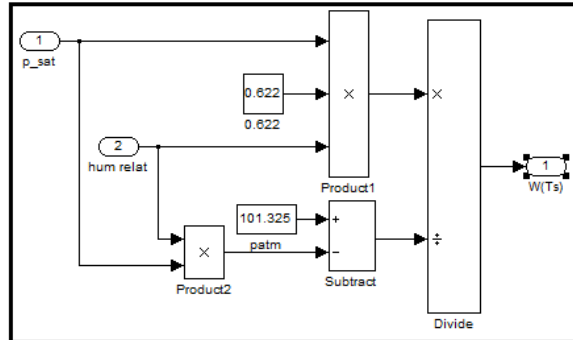
33. Humedad instantánea retirada

Figura 27. Bloque 33



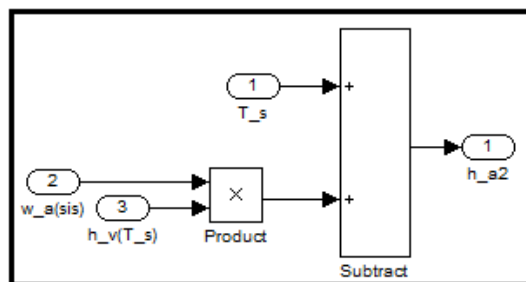
34. Humedad absoluta ambiente

Figura 28. Bloque 34



35. Entalpía a la salida del invernadero

Figura 29. Bloque 35



5.5 MÓDULO DE FUNCIONES

Son variables que dependen de la temperatura o el tiempo, halladas experimentalmente o sustentadas en los libros de termodinámica.

36. Contador de tiempo: va marcando el tiempo real que ha transcurrido desde la depuración del programa.

Figura 30. Bloque 36



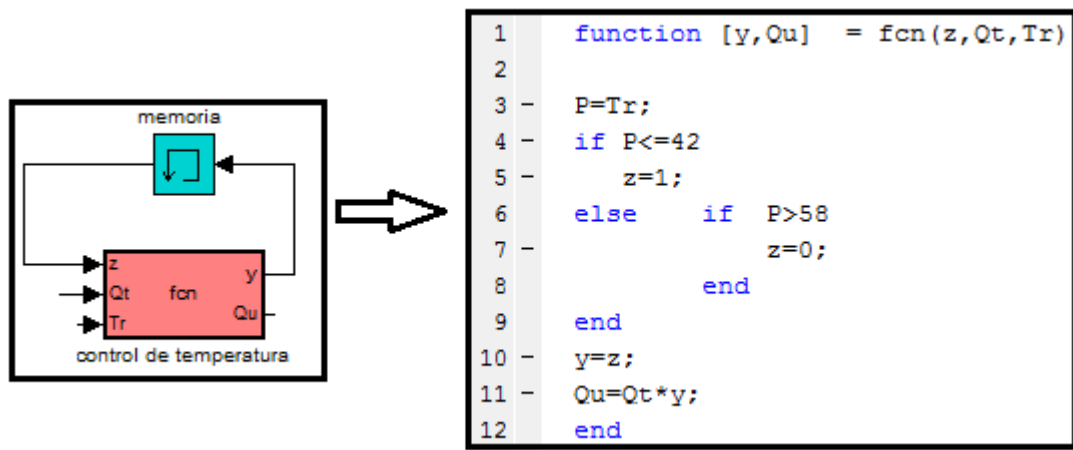
Fuente. Simulink

37. Función del coeficiente de transferencia de masa: se obtuvo una función de K_x con los datos obtenidos en el laboratorio para las diferentes tipos de material a secar. La función muestra el comportamiento de la lippia alba.

$$K_x = \frac{0,3008 + 0,0001342 \cdot t - 2,656 \times 10^{-7} \cdot t^2 + 1,818 \times 10^{-10} \cdot t^3 - 5,639 \times 10^{-14} \cdot t^4}{1000}$$

38. Control de temperatura: se censó la temperatura en el prototipo para saber los intervalos de temperatura en el termostato y así poder ajustar los valores límite de temperatura para el control on-off en el programa.

Figura 31. Bloque 38



39. Función de la entalpia de vapor y líquido en función de la temperatura superficial del material a secar, obtenidas en el programa EES:

$$h_{lq} = -0,3706 + 4,375 \cdot T_{sat} - 0,01552 \cdot T_{sat}^2 + 0,00052691008 \cdot T_{sat}^3 - 0,0000086817433 \cdot T_{sat}^4 + 6,850 \times 10^{-8} \cdot T_{sat}^5 - 2,065 \times 10^{-10} \cdot T_{sat}^6$$

$$h_v = 2498 + 2,301 \cdot T_{sat} - 0,02769 \cdot T_{sat}^2 + 0,0007542 \cdot T_{sat}^3 - 0,00001064 \cdot T_{sat}^4 + 7,281 \times 10^{-8} \cdot T_{sat}^5 - 1,940 \times 10^{-10} \cdot T_{sat}^6$$

40. Función de la presión de vapor en función de la temperatura superficial del material a secar y de la temperatura del aire circundante, obtenidas en el programa EES:

$$Pv1 = 0,6065 + 0,0456 \cdot Tw + 0,001325 \cdot Tw^2 + 0,00003104 \cdot Tw^3 + 1,9594943 \times 10^{-7} \cdot Tw^4 + 3,475 \times 10^{-9} \cdot Tw^5 - 2,392 \times 10^{-12} \cdot Tw^6$$

$$Pv2 = 0,6065 + 0,0456 \cdot Tr + 0,001325 \cdot Tr^2 + 0,00003104 \cdot Tr^3 + 1,9594943 \times 10^{-7} \cdot Tr^4 + 3,475 \times 10^{-9} \cdot Tr^5 - 2,392 \times 10^{-12} \cdot Tr^6$$

41. Función de la entalpía del vapor a la temperatura del aire del recinto, obtenida en programa EES:

$$h_v = 2498 + 2,301 \cdot T_{sat} - 0,02769 \cdot T_{sat}^2 + 0,0007542 \cdot T_{sat}^3 - 0,00001064 \cdot T_{sat}^4 + 7,281 \times 10^{-8} \cdot T_{sat}^5 - 1,940 \times 10^{-10} \cdot T_{sat}^6$$

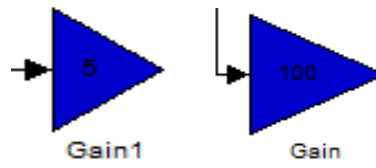
5.6 OTROS

Son bloques de programación específicos del entorno Simulink. Herramientas de trabajo para graficar o aumentar la escala. No interfieren numéricamente en el desarrollo de las ecuaciones del modelo térmico. Se usan para modificar el entorno de visualización de los resultados.

42. Gain para ampliar 5 veces la curva de humedad retirada

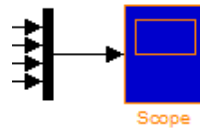
43. Gain para graficar la humedad relativa en porcentaje dentro del invernadero.

Figura 32. Bloque 42 y bloque 43



44. Scope para graficar las curvas de la Figura 44:

Figura 33. Bloque 44



5.7 GRÁFICAS RESULTADO

A continuación se muestran unas gráficas donde podremos observar los resultados de la programación descrita. También se mostrarán escenarios en donde se han alterado algunas variables del sistema de secado y son los siguientes:

- Gráfica general del comportamiento optimo del secador
- Secado con exceso de aire a la entrada de los tubos radiantes
- Secado únicamente con energía solar
- Secado con recirculación de aire

Se puede ver el comportamiento en el tiempo de la humedad retirada (color verde), la temperatura del aire (color rojo), la temperatura del material vegetal (color morado), y la humedad relativa del aire (color azul).

5.7.1 Gráfica general. Muestra el comportamiento de un secador de tipo invernadero expuesto a la radiación solar y con aportes de energía por medio de los tubos radiantes, con un flujo de aire a la entrada moderado y sin recircular el aire de salida del invernadero. Esta última condición, hace que en el aire del recinto la humedad relativa tienda a estabilizarse en un cierto valor. Las temperaturas serán controladas por el termostato. Las condiciones de la gráfica son:

- Temperatura ambiente 28°C
- Humedad relativa del ambiente 87%

- 80 Kg de material a secar
- Flujo másico de aire a razón de 6 Kg/s en la entrada de los tubos radiantes

Figura 34. Leyenda de la grafica

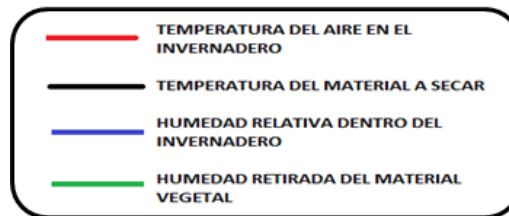
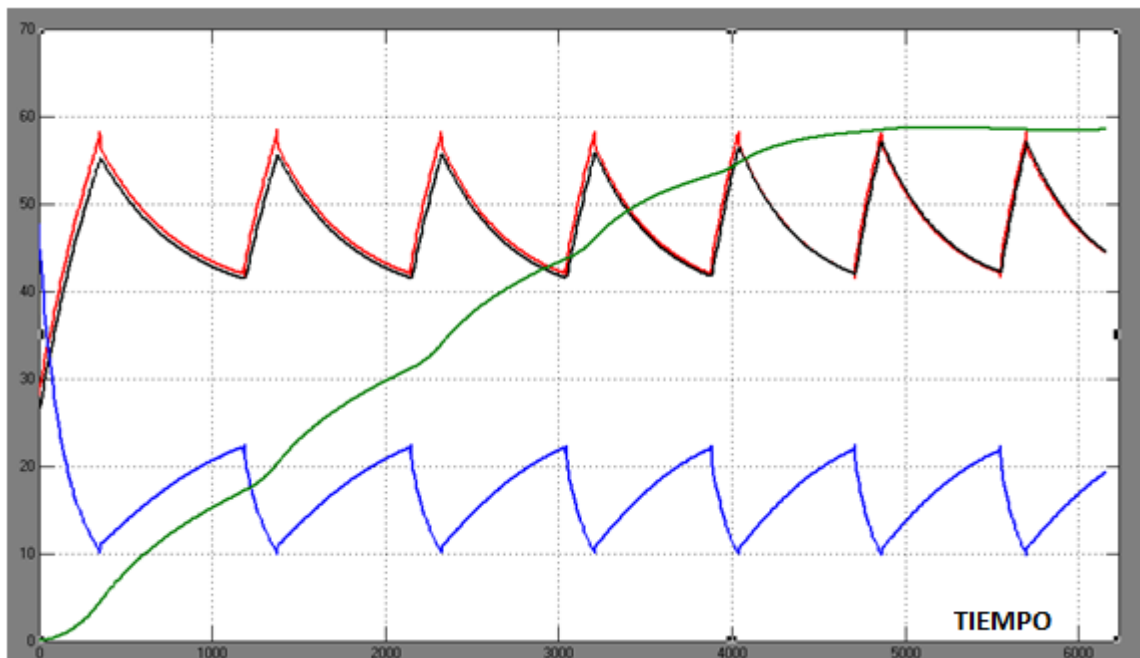


Figura 35. Comportamiento en el tiempo de un secador en invernadero



5.7.1.1 Temperatura del recinto. Tiene un comportamiento periódico que responde a las siguientes dos etapas:

- **ETAPA DE CALENTAMIENTO:** el recinto recibe los dos aportes de energía (radiante y convectiva), pasa por el Set Point de temperatura hasta alcanzar el valor pico que depende de la precisión del termostato.
- **ETAPA DE ENFRIAMIENTO:** en el pico de temperatura, se apaga el suministro de energía del intercambiador de calor. El recinto solamente recibe energía solar y se enfría hasta el valor mínimo permitido por el termostato, donde nuevamente empieza a recibir aportes de energía del intercambiador de calor.

5.7.1.2 Temperatura del material. Varía en el tiempo de la mano con la temperatura del recinto, tiene un valor siempre por debajo de esta.

5.7.1.3 Humedad retirada. La gráfica muestra un comportamiento ascendente en el tiempo, lo que indica que el material se está secando. Luego la velocidad de desecación disminuye en el tiempo, respondiendo a los mecanismos de migración de humedad en el material, hasta que finalmente el material llega al punto de humedad en equilibrio con el medio que lo rodea

5.7.1.4 Humedad relativa del aire. El comportamiento de esta curva es inversamente proporcional al de la temperatura y al flujo másico del aire en el recinto.

Con el fin de contrastar esta gráfica con el comportamiento de un secador con diferentes condiciones de funcionamiento, se encontraron los siguientes resultados:

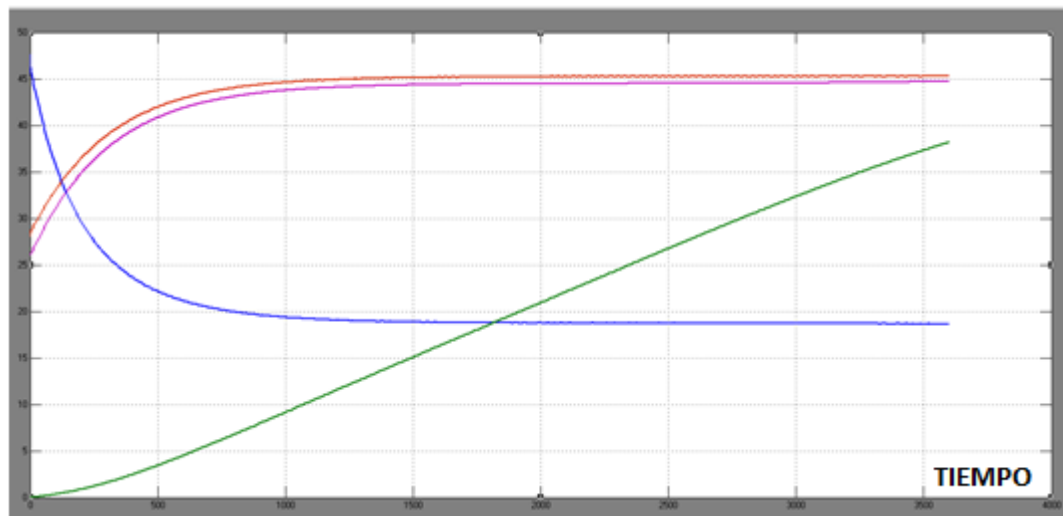
5.7.2 Secado con exceso de aire. La siguiente gráfica muestra el comportamiento de un secador de tipo invernadero con aportes energéticos del sol y de los tubos radiantes, con un exceso de aire a la entrada. Dependiendo de cuanto sea este exceso de flujo, la temperatura dentro del recinto tenderá a estabilizarse en un determinado valor. Cuanto mayor sea el exceso de flujo, la temperatura del recinto será más baja, por lo tanto la tasa de remoción de humedad del material será menor. Las condiciones iniciales de la siguiente grafica son:

- Temperatura ambiente 28°C
- Humedad relativa del ambiente 87%
- 80 Kg de material a secar
- Flujo másico de aire a razón de 12 Kg/s en la entrada de los tubos radiantes

Figura 36. Leyenda de la grafica



Figura 37. Secado con exceso de aire



5.7.3 Secado únicamente con energía solar. La siguiente gráfica muestra el comportamiento de un secador de tipo invernadero funcionando solamente con aportes energéticos por radiación solar. Las temperaturas alcanzadas con este condicionamiento energético son menores y la humedad relativa dentro del invernadero es mayor que en el caso anterior. Se puede observar que la remoción

de la humedad del material a secar es ineficiente. Las condiciones iniciales de la siguiente grafica son:

- Temperatura ambiente 28°C
- Humedad relativa del ambiente 87%
- 80 Kg de material a secar
- Flujo másico de aire a razón de 6 Kg/s en la entrada de los tubos radiantes

Figura 38. Leyenda de la grafica

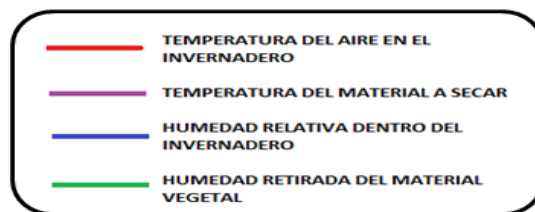
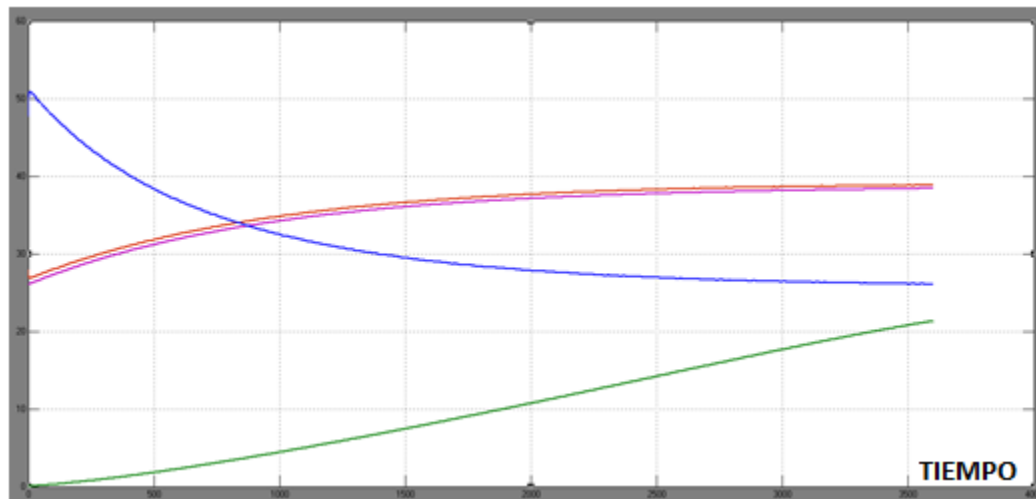


Figura 39. Secado únicamente con energía solar



5.7.4 Secado con recirculación de aire. La siguiente gráfica muestra el comportamiento de un secador de tipo invernadero con ganancia de calor por medio de los tubos radiantes y radiación del solar con recirculación de aire por el invernadero. La ventaja de recircular el aire es que los periodos de calentamiento se van a producir más rápido. La desventaja es que la humedad relativa del recinto crece a medida que pasa el tiempo, porque el aire recirculado viene cargado con humedad que ya ha sido retirada del material vegetal. Esta condición hace que la migración de humedad del material al aire dentro del invernadero sea más lenta que en el caso general. Las condiciones iniciales de la siguiente grafica son:

- Temperatura ambiente 28°C
- Humedad relativa del ambiente 87%
- 80 Kg de material a secar
- Flujo másico de aire a razón de 6 Kg/s en la entrada de los tubos radiantes
- Recirculación del 70% del aire de salida

Figura 40. Leyenda de la grafica

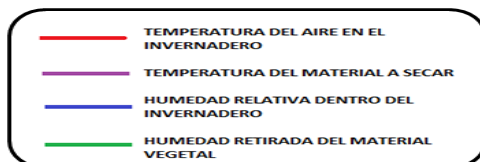
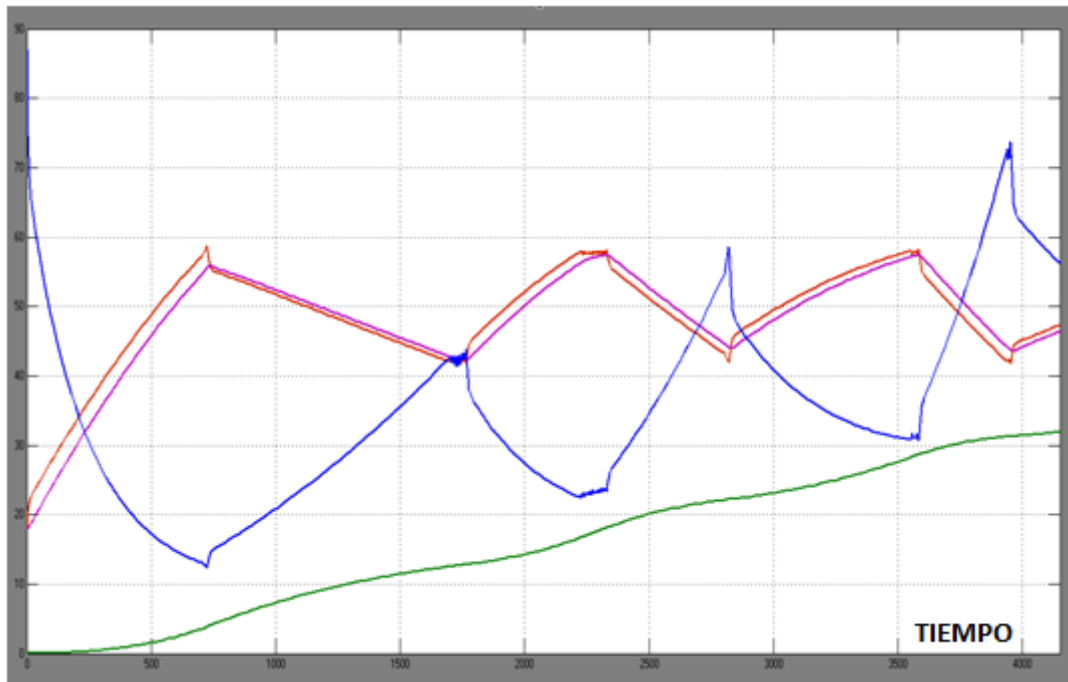


Figura 41. Secado con recirculación de aire



5.7.5 Conclusiones de la simulación del proceso de secado. De las anteriores comparaciones podemos concluir lo siguiente:

- Aumentar el flujo de aire en la entrada del invernadero perjudica el secado en cuanto que disminuye la temperatura en el recinto.
- Cuando se seca el material vegetal únicamente con energía solar, la remoción de humedad es ineficiente.
- Al recircular el aire en el recinto, la humedad relativa aumenta y dificulta la remoción de humedad en el material vegetal.
- Cuanto mayor sea el exceso de flujo, la temperatura del recinto será más baja, por lo tanto la tasa de remoción de humedad del material será menor.

- Al recircular el aire periodos de calentamiento se van a producir más rápido y la humedad relativa del recinto irá creciendo a medida que pasa el tiempo, esto ocurre porque el aire recirculado ingresa al invernadero cargado de humedad que ya había sido retirada del material vegetal. Esta condición hace que la migración de humedad del material al aire dentro del invernadero se vuelva lenta.

Para desarrollar completamente este modelo matemático, se hallaron las variables dependientes de la naturaleza del material a secar y del comportamiento real del secador, por medio de un prototipo a escala que se describe en el siguiente capítulo, donde también se muestra la metodología experimental seguida para este fin.

6. EXPERIMENTACIÓN

Con el fin de conocer el comportamiento del secador propuesto, del material a secar y los estados del proceso, se construyó un prototipo a escala. Con la ayuda de este modelo, se pudo visualizar mejor la operación, el montaje, las proporciones de los elementos y demás aspectos del diseño. Las propiedades y las características del secado de las diferentes especies de plantas aromáticas, depende de múltiples factores. En los experimentos se pretende estudiar el efecto de factores como la naturaleza del material a secar, el movimiento del mismo en el interior del equipo, la temperatura y la velocidad del medio desecante. Se siguió un marco procedimental para el material a secar. Finalmente se realizaron las experiencias tanto para el material fresco como para el material destilado, con el fin de encontrar los tiempos de secado de la biomasa.

6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

Se construyó un modelo a escala similar al secador propuesto, con el fin de simular las condiciones del proceso y analizar los factores que modifican su comportamiento. El prototipo está compuesto por:

- Cubierta
- Suministro de energía
- Módulos de carga del material
- Probetas

6.1.1 Cubierta. Por facilidades constructivas, se optó por usar una cubierta con techo plano. Las dimensiones son las siguientes: altura 45 cm; longitud 60 cm; ancho 60 cm. La ventilación se hizo por medio de un ventilador centrífugo ubicado en la entrada de aire del sistema convectivo de transferencia de calor, obteniendo una velocidad máxima de aire en la entrada del recinto de 1,5 m/s.

6.1.2 Suministro de energía. La fuente de calor convectiva se hizo por medio de dos resistencias eléctricas de 1 KW a 110 v cada una, las cuales reciben el flujo de aire del ventilador centrífugo y están ubicadas en las ventanas de ingreso del invernadero. Esto se debe a la imposibilidad de construir el sistema por tubos radiantes en un modelo a escala, porque no se dispone de una caldera de biomasa.

6.1.3 Módulos de secado. Se compone de dos cilindros rotativos. Tienen un diámetro de 22,5 cm y una longitud de 50 cm. Giran a 20 RPM y tienen una capacidad para 0,015 m³ a un 75% de su carga máxima.

6.1.4 Probetas. Para facilitar la toma de datos, se construyeron dos probetas cilíndricas de 8 cm de diámetro y 18 cm de largo.

Figura 42. Prototipo a escala del secador y probetas.



6.2 PROPIEDADES INVOLUCRADAS EN EL SECADO DE BIOMASA

Las propiedades de las plantas aromáticas dependen de la especie analizada y su composición física. La abundancia de tallos, hojas o espinas influye en el comportamiento global del secado. Estos datos también se ven modificados por las condiciones climáticas y operacionales del secador. En la experimentación se analizaron los siguientes factores:

- Peso del sólido húmedo y del sólido seco
- Humedad de base húmeda
- Humedad retirada
- Coeficiente de transferencia de masa

6.2.1 Peso del sólido húmedo y del sólido seco.

- Peso del sólido húmedo: peso de un material en su estado natural.
- Peso del sólido seco: peso de un material totalmente seco.

6.2.1 Humedad de base húmeda. Es una propiedad del material a secar y expresa el contenido de humedad en porcentaje del peso del sólido húmedo. Se puede hallar conociendo el peso de una muestra en su estado natural y su peso completamente seco. Está dada por:

$$\%Bh = \frac{Wh - Ws}{Wh} * 100$$

O en función del tiempo:

$$\%Bh(t) = \frac{Wi - Ws}{Wh} * 100$$

Wh = Peso del sólido húmedo

Ws = Peso del sólido seco

Wi = Peso en el instante

6.2.2 Humedad retirada. Es la cantidad de agua que ha salido del material en un instante de tiempo determinado. Depende de la naturaleza del material y de las condiciones operativas del secador. Se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta W = W_h - W_i$$

ΔW = Humedad retirada

6.2.3 Coeficiente de transferencia de masa: Determina la velocidad de secado del material en un medio ambiente con condiciones específicas de temperatura, humedad y el área de transferencia. Se calcula de la siguiente manera:

$$K_x = \frac{\Delta W}{t * A_s}$$

K_x = Coeficiente de transferencia de masa

t = Tiempo de secado

A_s = Área de secado

6.3 CONDICIONES OPERACIONALES DEL SECADOR

El material vegetal que llega al secado se encuentra triturado y es de dos naturalezas:

- *Material procesado*
- *Material vegetal fresco*

Para estos materiales se diseñaron cinco tipos de experimentos con el fin de encontrar las propiedades de nuestro interés en el análisis del secado:

- Experimento 1: peso de sólido seco.
- Experimento 2: curvas de secado para el material fresco.
- Experimento 3: curvas de secado para el material procesado.
- Experimento 4: potencia consumida del prototipo.
- Experimento 5: velocidad de secado.

6.4 EXPERIMENTO 1: PESO DE SÓLIDO SECO.

El objetivo del experimento es hallar el peso de sólido seco y calcular la humedad de base húmeda de cada material.

6.4.1 Procedimiento

1. Llenar una probeta con material vegetal
2. Pesar la muestra inicialmente para obtener el peso húmedo: Wh
3. Introducirla en un horno a 150° durante 1,5 horas para secar totalmente la muestra
4. Pesar la muestra final para obtener el peso seco: Ws
5. Llenar la tabla

Tabla 2. Humedad de base húmeda para el material fresco

ESPECIE	Wh [g]	Ws	%Bh
<i>Cymbopoggon</i>	73,65	15,33	76,14
<i>Lippia Alba</i>	24,62	7,2	70,75
<i>Swienglia</i>	13,92	4,5	67,67
PROCESADO	10	7,65	76,5

6.5 EXPERIMENTO 2: CURVAS DE SECADO PARA EL MATERIAL FRESCO.

Estas curvas dependen de las condiciones de operación y climáticas del secador, así como de la naturaleza del material a secar. Se pretende hallar la humedad de base húmeda contenida en el material a lo largo del tiempo, la velocidad de secado Kx y el tiempo de secado para cuando la humedad de base húmeda se hace el 50%. El objetivo de esta prueba, es comparar los tiempos de secado bajo diferentes condiciones energéticas y de temperatura. Para esto procedió de la siguiente manera:

6.5.1 Procedimiento

1. Llenar dos probetas con material vegetal, previamente triturado.
2. Pesar la probeta
3. Medir el volumen ocupado en la probeta.
4. Cargar el material en los cilindros rotativos.
5. Encender el equipo
6. Pesar las probetas cada 15 minutos durante 2 horas
7. Tabular los resultados
8. Realizar las curvas de secado y de humedad retirada
9. Conclusiones

Tabla 3. Tabla del experimento 2

ESPECIE				
Temperatura del recinto		°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx[Kg/hm ²]	%Bh(t)

6.5.2 Curvas de secado para el material fresco sin aportes de energía solar.

Tabla 4. Resultados del experimento 2 para la Lippia Alba a 50°C

ESPECIE		<i>Lippia Alba</i>		
Temperatura del recinto		50°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx[Kg/hm ²]	%Bh(t)
0	21,21	0	0	70,75
15	19,82	1,39	0,123	64,19
30	17,95	3,26	0,145	55,38
45	16,05	5,16	0,153	46,41
60	14,33	6,88	0,153	38,3
75	13,26	7,95	0,141	33,25
90	11,96	9,25	0,137	27,12
105	11,05	10,16	0,129	22,83
120	10,41	10,8	0,120	19,81

Figura 43. Curvas de secado para la lippia alba a 50°C sin aportes de energía solar

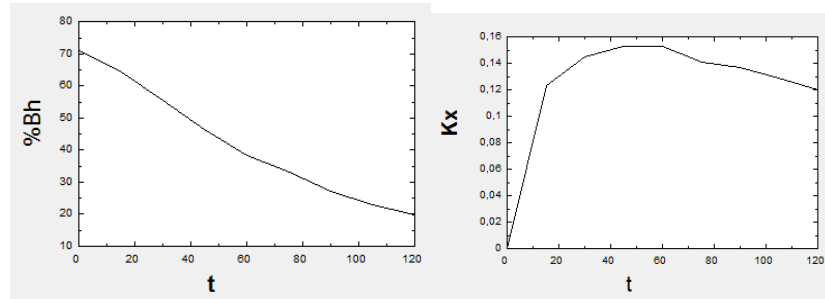
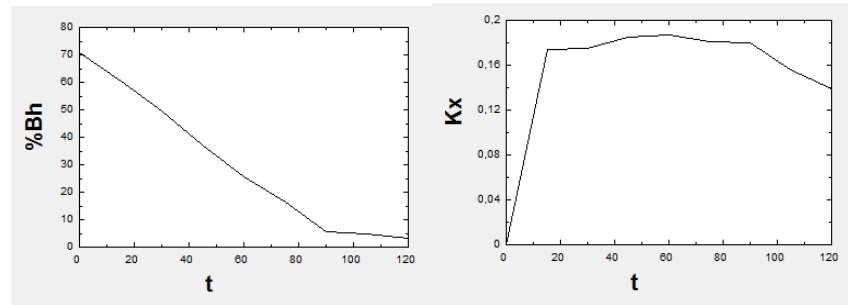


Tabla 5. Resultados del experimento 2 para la Lippia Alba a 60°C

ESPECIE		<i>Lippia Alba</i>		
Temperatura del recinto		60°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx[Kg/hm²]	%Bh(t)
0	10,37	0	0	70,75
15	9,28	1,09	0,174	60,23
30	8,18	2,19	0,175	49,61
45	6,9	3,47	0,185	37,26
60	5,69	4,68	0,187	25,58
75	4,73	5,64	0,181	16,31
90	3,6	6,77	0,180	5,4
105	3,55	6,82	0,156	4,92
120	3,39	6,98	0,139	3,38

Figura 44. Curvas de secado para la lippia alba a 60°C sin aportes de energía solar



6.5.2.1 Resultados del secado sin aportes de energía solar para el material fresco.

- Para obtener una humedad en base húmeda de salida del 50% en las diferentes especies, a una temperatura de 50°C se requiere:

Tabla 6. Tiempo de secado para el material vegetal fresco a 50°C sin aportes de energía solar

RAZA	t [min]
<i>Cymbopogon</i>	60
<i>Lippia Alba</i>	38
<i>Swienglia</i>	38

- Para obtener una reducción del 15% en la humedad de base húmeda en las diferentes especies, a una temperatura de 60°C se requiere:

Tabla 7. Tiempo de secado para el material vegetal fresco a 60°C sin aportes de energía solar

RAZA	t [min]
<i>Cymbopogon</i>	33
<i>Lippia Alba</i>	30
<i>Swienglia</i>	40

6.5.3 Datos del secado con aportes de energía solar para el material fresco

Tabla 8. Tabla del experimento 2 para la *Lippia Alba* a 50°C con energía solar

ESPECIE		<i>Lippia Alba</i>		
Temperatura del recinto		50°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx[Kg/hm ²]	%Bh(t)
0	35,67	0	0	70,75
15	31,29	4,38	0,260	58,47
30	25,59	10,08	0,299	42,49
45	23,40	12,27	0,242	36,35
60	20,21	15,46	0,229	27,41
75	18,22	17,45	0,207	21,83
90	16,54	19,13	0,189	17,12
105	15,45	20,22	0,171	14,06
120	14,81	20,86	0,155	12,27

Figura 45. Curvas de secado para la lippia alba a 50°C con aportes de energía solar

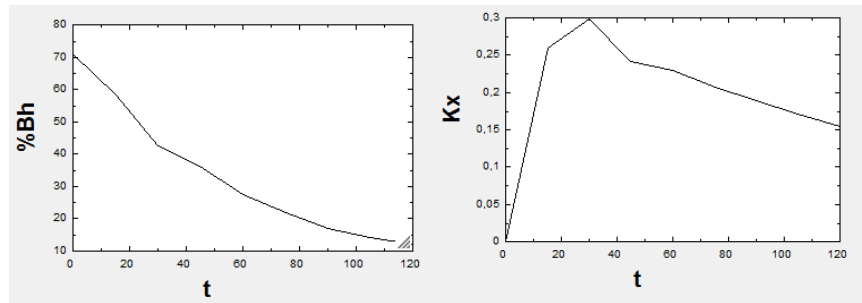
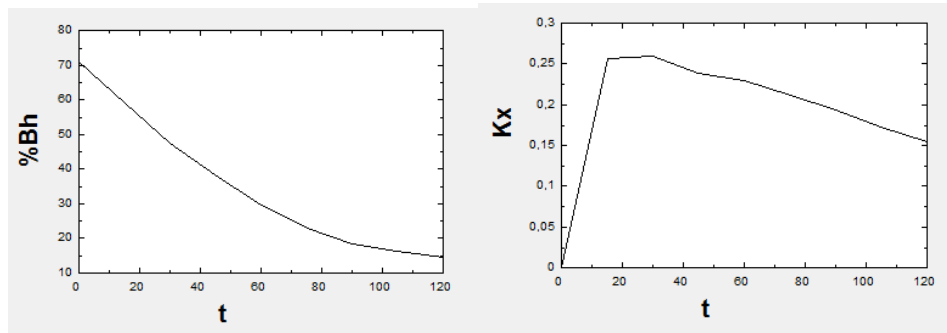


Tabla 9. Tabla del experimento 2 para la Lippia Alba a 60°C con energía solar

ESPECIE		<i>Lippia Alba</i>		
Temperatura del recinto		60°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx[Kg/hm²]	%Bh(t)
0	37,35	0	0	70,75
15	33,02	4,33	0,257	59,16
30	28,60	8,75	0,259	47,32
45	25,26	12,09	0,239	38,38
60	21,92	15,43	0,229	29,44
75	19,46	17,89	0,212	22,85
90	17,77	19,58	0,193	18,33
105	17,02	20,33	0,172	16,32
120	16,39	20,96	0,155	14,63

Figura 46. Curvas de secado para la lippia alba a 60°C sin aportes de energía solar



6.5.3.1 Resultados del secado con aportes de energía solar para el material fresco.

- Para obtener una humedad de base húmeda de salida del 50% en las diferentes especies, a una temperatura de 50°C se requiere:

Tabla 10. Tiempo de secado para el material vegetal fresco a 50°C con aportes de energía solar

ESPECIE	t [min]
<i>Cymbopoggon</i>	40
<i>Lippia Alba</i>	22
<i>Swienglia</i>	20

- Para obtener una reducción del 15% en la humedad de base húmeda en las diferentes especies, a una temperatura de 60°C se requiere:

Tabla 11. Tiempo de secado para el material vegetal fresco a 50°C con aportes de energía solar

ESPECIE	t [min]
<i>Cymbopoggon</i>	20
<i>Lippia Alba</i>	25
<i>Swienglia</i>	20

6.5.4 Conclusiones sobre las curvas de secado para el material fresco

La energía solar ayuda a disminuir el tiempo de secado para el material fresco.

Un aumento de 10°C en la temperatura del recinto no tiene efecto apreciable en el tiempo de secado de la *swienglia*. Esto se debe a que el mecanismo de migración interna de humedad gobierna el proceso de secado.

El *cymbopoggon* es la especie más sensible al aumento de temperatura.

6.6 EXPERIMENTO 3: CURVAS DE SECADO PARA EL MATERIAL PROCESADO

Estas curvas dependen de las condiciones de operación y climáticas del secador, así como de la naturaleza del material a secar. Se pretende hallar la humedad de base húmeda contenida en el material a lo largo del tiempo, la velocidad de secado Kx . Se busca encontrar la temperatura en la cual el material procesado alcanza el 18% de su humedad de base húmeda. Para esto procedió de la siguiente manera:

6.6.1 Procedimiento

1. Llenar dos probetas con material vegetal, previamente triturado.
2. Pesar la probeta
3. Medir el volumen ocupado en la probeta.
4. Cargar el material en los cilindros rotativos.
5. Encender el equipo
6. Pesar las probetas cada 15 minutos durante 1 hora
7. Tabular los resultados
8. Conclusiones

Tabla 12. Tabla del experimento 3

ESPECIE				
Temperatura del recinto		°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx[Kg/hm ²]	%Bh(t)
0				
15				
30				
45				
60				

6.6.2 Curvas de secado para el material procesado a 50°C.

Tabla 13. Tabla del experimento 3 para el material procesado a 50°C

ESPECIE		PROCESADO		
Temperatura del recinto		50°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx[Kg/hm ²]	%Bh(t)
0	106,51	0	0	76,5
15	102,51	4	0,178	72,75
30	99,89	6,62	0,147	70,29
45	96,86	9,65	0,143	67,44
60	93,52	12,99	0,144	64,31

6.6.3 Curvas de secado para el material procesado a 60°C.

Tabla 14. Tabla del experimento 3 para el material procesado a 60°C

ESPECIE		PROCESADO		
Temperatura del recinto		60°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx[Kg/hm ²]	%Bh(t)
0	93,38	0	0	76,5
15	86,82	6,56	0,233	69,48
30	82,3	11,08	0,197	64,64
45	77,61	15,77	0,187	59,61
60	73,34	20,04	0,178	55,04

6.6.4 Curvas de secado para el material procesado a 80°C.

Tabla 15. Tabla del experimento 3 para el material procesado 80°C

ESPECIE		PROCESADO		
Temperatura del recinto		80°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx[Kg/hm ²]	%Bh(t)
0	87,30	0	0	76,50
15	73,98	13,32	0,592	61,24
30	64,52	22,78	0,506	50,41
45	58,92	28,38	0,420	43,99
60	56,48	30,82	0,342	41,20

6.6.5 Curvas de secado para el material procesado a 100°C.

Tabla 16. Tabla del experimento 3 para el material procesado 100°C

ESPECIE		PROCESADO		
Temperatura del recinto		100°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx[Kg/hm ²]	%Bh(t)
0	78,67	0	0	76,50
15	60,76	17,91	0,796	53,73
30	50,34	28,33	0,630	40,49
45	44,12	34,55	0,512	32,58
60	38,50	40,17	0,446	25,44

6.6.6 Curvas de secado para el material procesado a 110°C.

Tabla 17. Tabla del experimento 3 para el material procesado 110°C

ESPECIE		PROCESADO		
Temperatura del recinto		110°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx[Kg/hm ²]	%Bh(t)
0	88,73	0	0	76,50
15	67,62	21,11	0,938	52,71
30	55,31	33,42	0,743	38,84
45	46,95	41,78	0,619	29,41
60	36,04	52,69	0,585	17,12

6.6.7 Resultados de las pruebas para el material procesado.

- El material procesado registró para las diferentes temperaturas de secado, la siguiente humedad de base húmeda de salida, para una hora.

Tabla 18. Resultados de las pruebas para el material procesado

TEMPERATURA	%Bh FINAL
50	64,31
60	55,04
80	41,2
100	25,44
110	17,12

6.6.8 Conclusiones de las pruebas para el material vegetal procesado

- Para secar eficientemente el material procesado hay que llevar la temperatura del recinto por encima de 100°C.
- A bajas temperaturas del recinto, no se puede llevar el material procesado al 18% de humedad de base húmeda en una hora.

6.7 EXPERIMENTO 4: CONSUMO DE ENERGÍA DEL PROTOTIPO

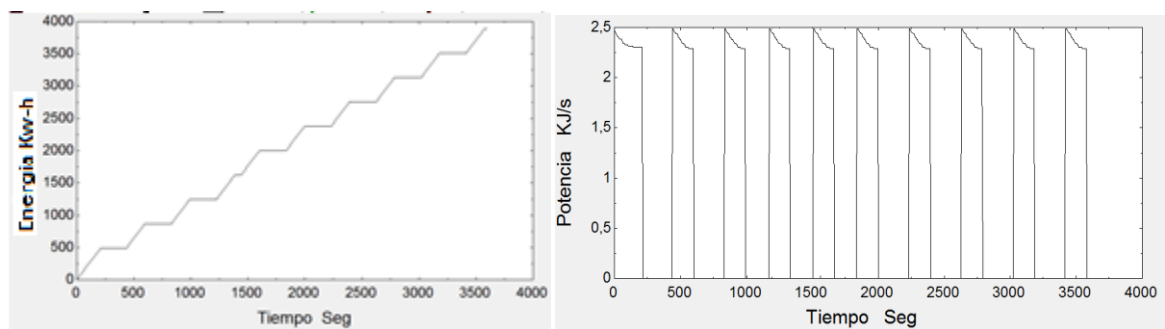
El objetivo de este experimento es calcular la cantidad de energía demanda por el prototipo, operando durante una hora y determinar el aporte energético de la radiación solar.

6.7.1 Procedimiento

1. Cargar el equipo los cilindros rotativos con material vegetal.
2. Encender el equipo
3. Medir el tiempo de encendido y apagado de la resistencia eléctrica durante una hora
4. Registrar el valor de la corriente eléctrica de la resistencia durante una hora
5. Medir el valor del voltaje que llega a la resistencia durante una hora
6. Tabular los resultados
7. Realizar las gráficas de energía y potencia consumida en función del tiempo
8. Conclusiones

6.7.2 Energía consumida por el prototipo para una temperatura de recinto de 50°C sin aportes de energía solar. Debido a la cantidad de datos registrados para una hora de tiempo, solo se presentan las gráficas de los resultados.

Figura 47. Energía consumida del prototipo para una temperatura de recinto de 50°C sin aportes de radiación solar



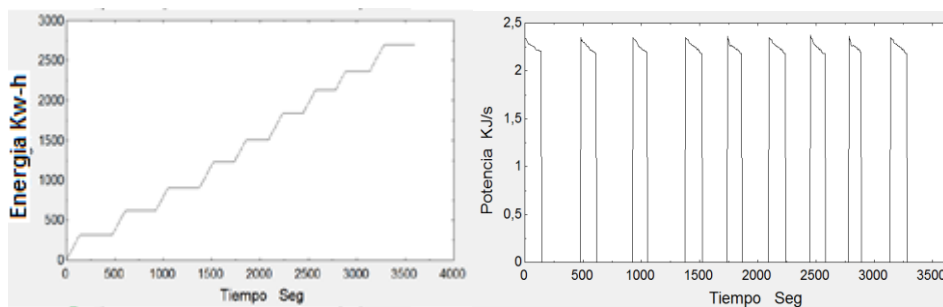
6.7.2.1 Resultados del experimento de consumo de energía. El consumo de energía se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 19. Consumo de energía a 50°C y sin aportes de energía solar

Potencia total KJ/h	Energía Kw-h
777,4479	1,07978875

6.7.3 Energía consumida por el prototipo para una temperatura de recinto de 50°C con aportes de energía solar. Debido a la cantidad de datos registrados para una hora de tiempo, solo se presentan las gráficas de los resultados.

Figura 48. Energía consumida del prototipo para una temperatura de recinto de 50°C con aportes de radiación solar



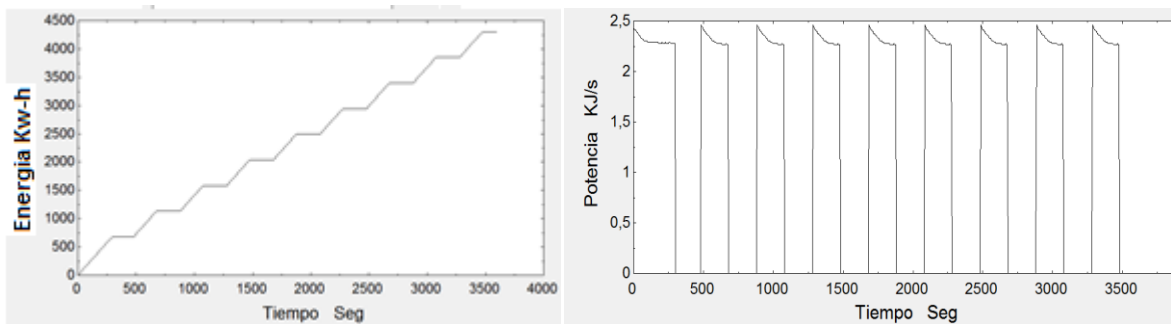
6.7.3.1 Resultados del experimento de consumo de energía. El consumo de energía para los dos experimentos se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 20. Consumo de energía a 50°C con aportes de energía solar

Potencia total KJ/h	Energía Kw-h
539,1423	0,74880875

6.7.4 Energía consumida por el prototipo para una temperatura de recinto de 60°C sin aportes de energía solar. Debido a la cantidad de datos registrados para una hora de tiempo, solo se presentan las gráficas de los resultados.

Figura 49. Energía consumida del prototipo para una temperatura de recinto de 60°C sin aportes de radiación solar



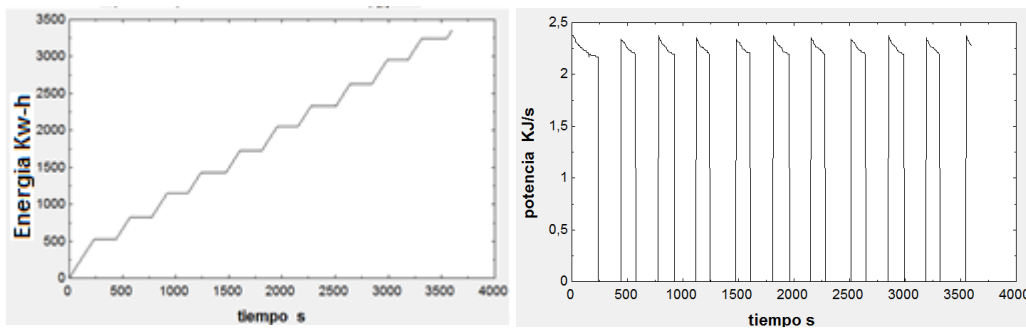
6.7.4.1 Resultados del experimento de consumo de energía. El consumo de energía se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 21. Consumo de energía a 60°C sin aportes de energía solar

Potencia total KJ/h	Energía Kw-h
860,43276	1,1950455

6.7.5 Energía consumida por el prototipo para una temperatura de recinto de 60°C con aportes de energía solar. Debido a la cantidad de datos registrados para una hora de tiempo, solo se presentan las gráficas de los resultados.

Figura 50. Energía consumida del prototipo para una temperatura de recinto de 60°C con aportes de radiación



6.7.5.1 Resultados del experimento de consumo de energía. El consumo de energía para los dos experimentos se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 22. Consumo de energía a 60°C con aportes de energía solar

Potencia total KJ/h	Energía Kw-h
673,08066	0,93483425

6.7.6 Conclusiones del experimento del consumo de energía del prototipo

La radiación solar aporta el 30% de la energía para el secado de biomasa para una temperatura de recinto del 50°C.

La radiación solar aporta el 22% de la energía para el secado de biomasa para una temperatura de recinto del 60°C.

La radiación solar aportó en promedio 0,3Kw-h para los experimentos realizados.

A mayor temperatura del recinto menor va a ser la proporción del aporte de la energía solar hacia el sistema.

6.8 EXPERIMENTO 5: VELOCIDAD DE SECADO VS. VELOCIDAD DE ROTACIÓN

En este experimento se busca comparar el efecto de la velocidad de rotación de los cilindros, sobre la velocidad de secado. Para esto se procedió de la siguiente manera:

6.8.1 Procedimiento

1. Llenar dos probetas con material vegetal, previamente triturado.
2. Pesar la probeta
3. Medir el volumen ocupado en la probeta.
4. Cargar el material en los cilindros rotativos.
5. Encender el equipo
6. Pesar las probetas a los 30 y 90 minutos
7. Tabular los resultados
8. Conclusiones

6.8.2 Velocidad de secado para 10 y 20 RPM

Tabla 23. Prueba a 50°C con 10rpm y 20 rpm en los cilindros rotativos para el cymbopoggon

ESPECIE		<i>Cymbopoggon</i>
Temperatura del recinto		50°C
TIEMPO [min]	Kx (20 RPM)	Kx(10 RPM)
30	0,131	0,144
90	0,108	0,146

Tabla 24. Prueba a 50°C con 10rpm y 20 rpm en los cilindros rotativos para la Lippia Alba

ESPECIE		<i>Lippia Alba</i>
Temperatura del recinto		50°C
TIEMPO [min]	Kx (20 RPM)	Kx(10 RPM)
30	0,105	0,137
90	0,107	0,129

Tabla 25. Prueba a 50°C con 10rpm y 20 rpm en los cilindros rotativos para la Swienglia

ESPECIE		<i>Swienglia</i>
Temperatura del recinto		50°C
TIEMPO [min]	Kx (20 RPM)	Kx (10 RPM)
30	0,145	0,115
90	0,137	0,111

Tabla 26. Prueba a 50°C con 10rpm y 20 rpm en los cilindros rotativos para el material procesado

ESPECIE		PROCESADO
Temperatura del recinto		50°C
TIEMPO [min]	Kx (20 RPM)	Kx (10 RPM)
30	0,147	0,177
90	0,142	0,165

6.8.2.1 Conclusión del experimento de velocidad de secado vs velocidad de rotación

Una velocidad de rotación de 10 RPM mejora la velocidad de secado del material vegetal en el prototipo.

7. DISEÑO MECÁNICO

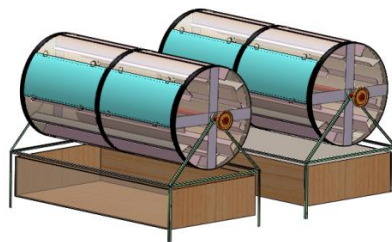
El diseño mecánico estudia los componentes móviles y estacionarios del secador, este capítulo comprende el sistema de carga del material vegetal y el sistema estructural del recinto.

7.1 SISTEMA DE CARGA

El sistema de carga es el lugar donde se encuentra el material durante el secado. Lo componen un par de cilindros rotativos que giran a bajas revoluciones, el sistema de transmisión de movimiento y los recolectores de material vegetal. Debe permitir una rápida carga y descarga de material. Se compone de:

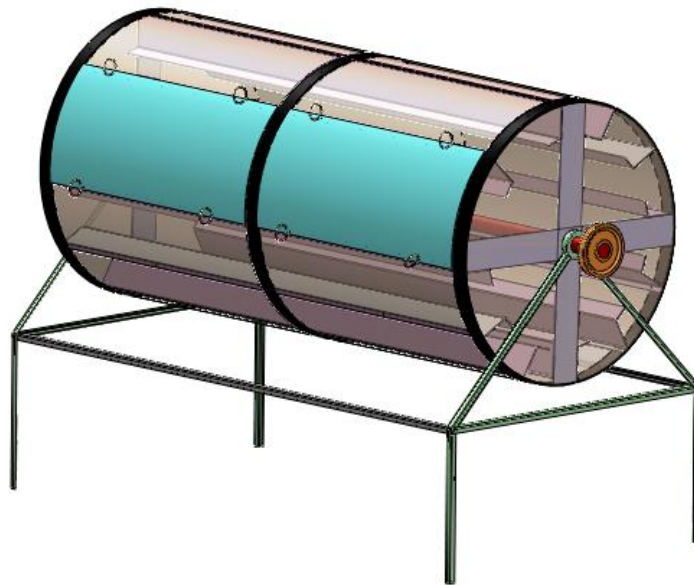
- Cilindros rotativos
- Recolectores de material
- Sistema de transmisión

Figura 51. Sistema de carga



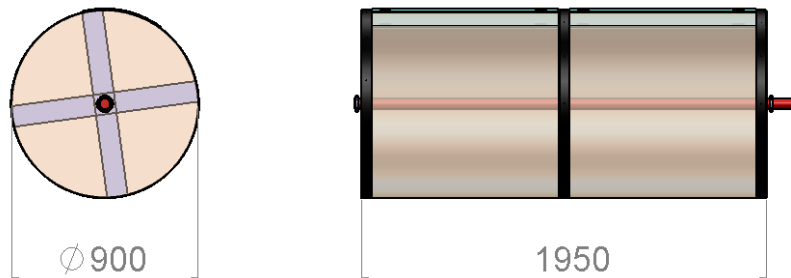
7.1.1 Cilindros rotativos. El material vegetal se ubicará dentro de dos cilindros, dotados de un par de compuertas para la carga y descarga del material. El cilindro está hecho de *malla zaranda*, lo que permite la circulación de aire caliente en su interior. Está montado sobre tres aros con radios de lámina calibre 16 de 4 cm de ancho, soldados entre si por medio de electrodo. Los radios van unidos al eje también de esta manera. Tienen unas aletas fijas para revolver y exponer las partículas de sólido a la acción secadora de la corriente de aire, distribuyéndolas uniformemente. Cada cilindro tiene una capacidad de carga de 50 Kg y giran a 10 rpm.

Figura 52. Cilindros rotativos.



7.1.1.1 Dimensiones preliminares. La siguiente figura muestra las dimensiones generales del cilindro:

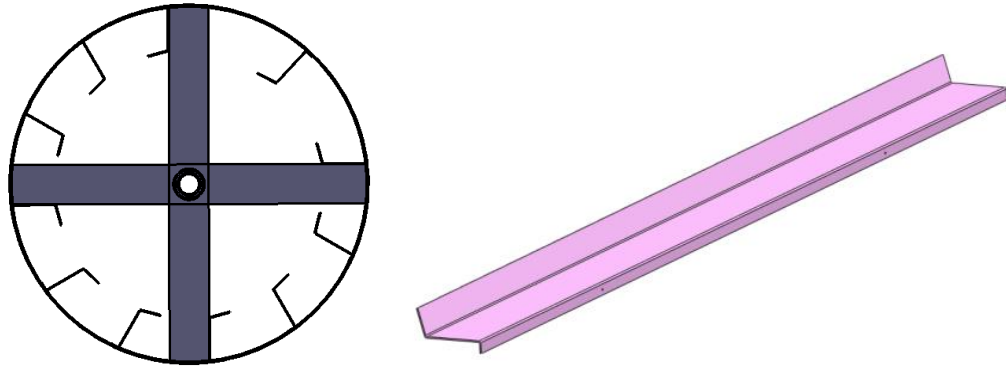
Figura 53. Dimensiones preliminares del cilindro rotativo.



7.1.1.2 Cubierta. El material de las paredes del cilindro rotativo está hecho de *malla zaranda*, para permitir la circulación de aire en su interior. Como los bordes de ese material son extremadamente filosos, se recomienda bordearlos con lámina calibre 28 para tener un buen grado de seguridad. La cubierta va fija a la estructura de los cilindros por medio de remaches de 1/8”.

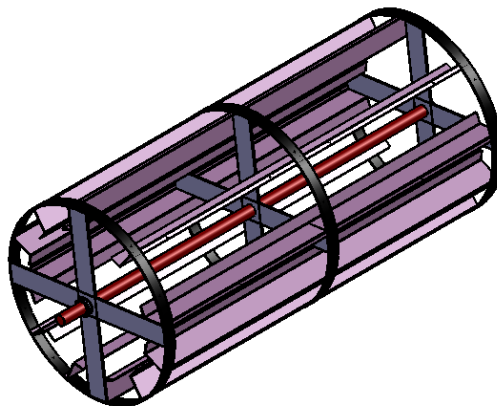
7.1.1.3 Aletas. La función de este componente es revolver la biomasa, para distribuir uniformemente todas las partículas de sólido a la acción secadora del aire. Cada uno de los cilindros cuenta con 11 aletas fijas alrededor del perímetro interno. Son de lámina calibre 20.

Figura 54. Ubicación de las aletas en el cilindro



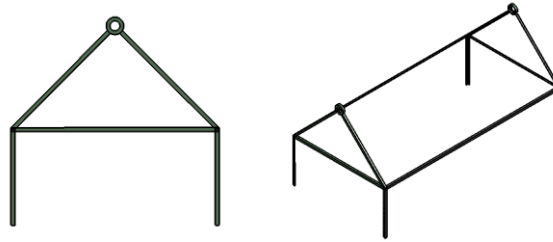
7.1.1.4 Estructura. La cubierta está montada sobre tres aros con radios de lámina calibre 16 de 4 cm de ancho, soldados entre si por medio de electrodo. Unidos también de esta manera al eje.

Figura 55. Estructura del cilindro rotativo



7.1.1.5 Soporte. La estructura está hecha con perfileraía en L de 1½" x 1½".

Figura 56. Soporte del cilindro giratorio



7.1.1.6 Compuertas. Se usan para permitir el ingreso de la carga de secado en los cilindros rotativos. Están hechas de *malla zaranda*, para permitir el flujo de aire en el interior del cilindro. Se ajusta por medio de una ranura con tuerca y una mariposa roscada, a la estructura del cilindro rotativo, confiriéndole dos estados: normalmente abierto y normalmente cerrado.

Figura 57. Lugar de las compuertas en el cilindro

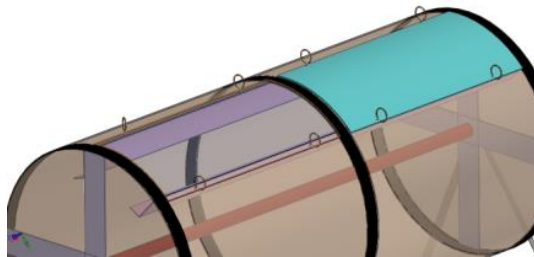


Figura 58. Vistas de la compuerta y mariposa roscada

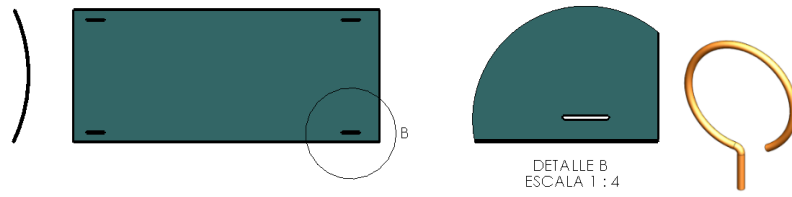


Figura 59. Compuerta en estado normalmente cerrado.

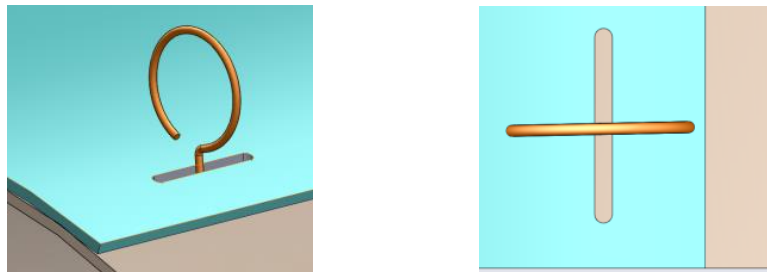


Figura 60. Compuerta en estado normalmente abierto.



7.1.1.7 Carga del material. Para cargar el material vegetal dentro del cilindro rotativo se deben cumplir los siguientes pasos:

1. Comprobar que el equipo esté apagado
2. Ubicar las compuertas en su estado normalmente abierto
3. Retirar cada una de las compuertas
4. Cargar el material en el interior del cilindro
5. Ubicar las compuertas en su estado normalmente cerrado

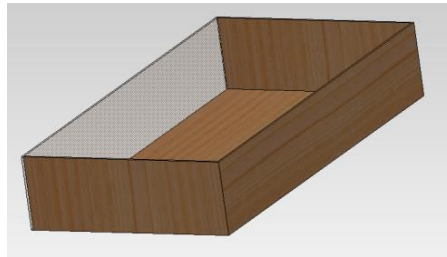
7.1.1.8 Descarga del material. Para descargar el material del cilindro rotativo se deben cumplir los siguientes pasos:

1. Comprobar que el equipo esté apagado
2. Ubicar las compuertas en su estado normalmente abierto
3. Retirar cada una de las compuertas
4. Girar los cilindros 180°
5. Esperar a que el material caiga dentro de los recolectores de material
6. Girar los cilindros 180°
7. Ubicar las compuertas en su estado normalmente cerrado.

7.1.2 Recolectores de material. Están ubicados debajo de cada cilindro. Durante la operación de secado, recolectan el material que escapa de la malla en forma de *polvo*. Al final de la operación, en ellos se descarga la totalidad del material de trabajo. Son de madera triplex de 15mm de espesor. Cuentan con cuatro ruedas y

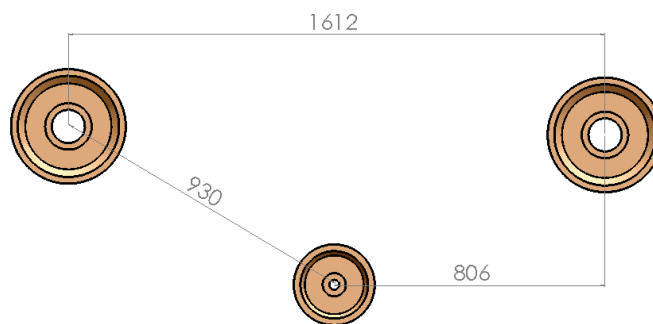
una manija para retirarlos del invernadero cuando se descarga el material, deslizándolos por unos rieles guía.

Figura 61. Recolectores de material.



7.1.3 Sistema de transmisión. Los cilindros rotativos están impulsados por un motor de bajas revoluciones (moto-reductor), que le suministra el giro al eje de cada cilindro por medio de un par de poleas.

Figura 62. Distancia entre ejes de poleas



7.1.3.1 Poleas. El sistema de transmisión lo componen dos poleas tipo B de 6" solidarias al eje de los cilindros rotativos, y una polea doble tipo B de 4" solidaria al eje del motor. La longitud de cada correa tipo B es de 2260 mm.

7.1.3.2 Motor. Para hacer una correcta elección del motor que dará movimiento al sistema de transmisión, se procedió de la siguiente manera:

$$\sum T = Ic * \alpha = \frac{1}{2} m * r^2 * \alpha$$

$$m = m_{estructura} + m_{carga}$$

$$m_{estructura} = m_{aletas} + m_{aros} + m_{malla}$$

$$m_{aletas} = \#aletas * espesor * altura * longitud * \rho$$

$$m_{aletas} = 11 * \frac{1}{16} * 0,0254 * 0,17 * 1,95 * 7850$$

$$m_{aletas} = 45,44 \text{ Kg}$$

$$m_{aros} = espesor * longitud * altura * \rho$$

$$Longitud = 0,9 * 6 + (\pi * 0,9) * 3 = 13,88$$

$$m_{aros} = \frac{1}{8} * 0,0254 * 13,88 * 0,05 * 7850$$

$$m_{aros} = 17,3 \text{ Kg}$$

$$m_{malla} = 0,37 * Volúmen * \rho$$

$$Volúmen = (2\pi * r * espesor) * (Longitud * r)$$

$$Volúmen = 2 * \pi * 0,45 * \frac{1}{16} * 0,0254 * (1,9 + 0,45) = 0,01055$$

$$m_{malla} = 30,64 [Kg]$$

$$m_{estructura} = 45,44 + 17,3 + 30,64 = 93,38$$

$$m = 93,38 + 50 = 143,38 [Kg]$$

$$\sum T = Ic * \alpha = \frac{1}{2} m * r^2 * \alpha$$

$$\alpha = 2 \frac{rad}{s^2}$$

$$\sum T = \frac{1}{2} m * r^2 * \alpha = \frac{1}{2} * 143,38 * (0,45)^2 * 2$$

$$\sum T = 29 N - m$$

$$[HP] = \frac{T[N - m] * n[RPM] * 2\pi}{60 * 746}$$

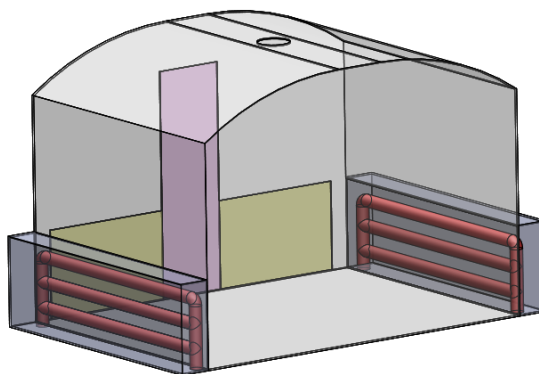
$$[HP] = \frac{29 * 10 * 2\pi}{60 * 746} = 0,05HP$$

7.2 RECINTO

Un invernadero es el equipo que tradicionalmente se utiliza en las plantas de extracción de aceites esenciales. Un invernadero es un recinto que permite el paso de la radiación solar a través de una cubierta translúcida, para su aprovechamiento. Ha de ser del menor tamaño posible. Se ubicará en una zona rural, en el lugar de producción de las plantas de destilación, cerca del ducto de salida de los gases de escape de la caldera. En este capítulo se muestra:

- Recubrimiento
- Estructura
- Acceso al invernadero
- Ventilación

Figura 63. Componentes del recinto invernadero.



7.2.1 Recubrimiento. Dependiendo de las exigencias ambientales, constructivas, y las posibilidades económicas, se usan diferentes materiales. Para secador con la configuración de invernadero la resistencia al calor es fundamental. El ambiente en el interior será más eficiente para la operación de secado a mayores temperaturas. El policarbonato es la mejor alternativa para la construcción de invernaderos de carácter rígido que soporten altas temperaturas de operación. Es un material de configuración interna de tipo alveolar, gran aislante térmico, de peso reducido y que puede curvarse para obtener geometrías especiales.

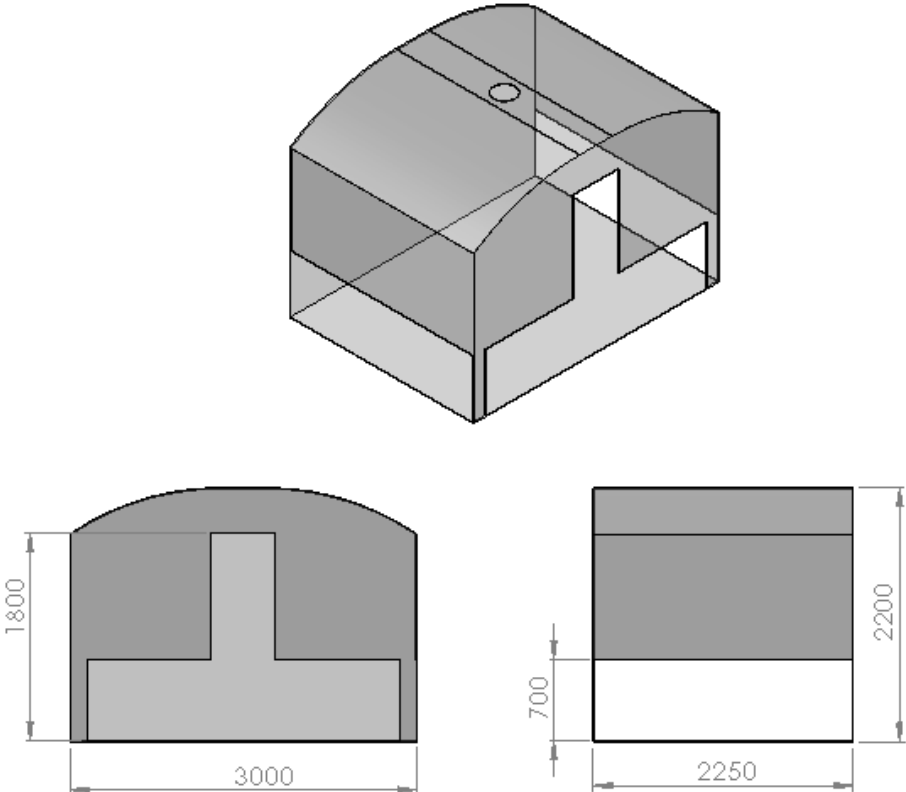
Tabla 27. Propiedades Físicas del recubrimiento.

MATERIAL	POLICARBONATO
Densidad	1,20 g/Cm ³
Transmisividad	0.75
Absortividad	0.15
Conductividad térmica	0,2 W/mK
Calibre	10

Fuente. Metalcristal Ltda.

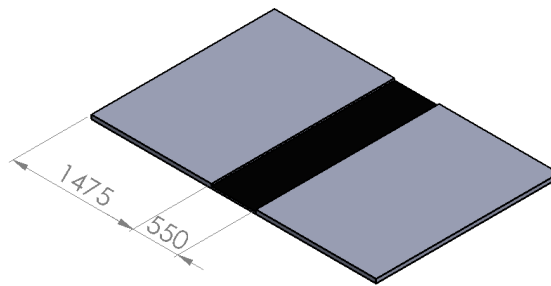
7.2.2 Estructura. La configuración de túnel es la más recomendada para la construcción de invernaderos, pues se evita la acumulación de lluvias en el techo, permite una mejor orientación con respecto a los rayos solares, es más estable desde el punto de vista mecánico y no tiene obstáculos estructurales en su interior. El perfil es de aluminio con geometría rectangular de 40 x 80 mm

Figura 64. Dimensiones preliminares del invernadero



7.2.3 Acceso. El invernadero cuenta con una puerta para el acceso del operario para la carga y descarga del material, las cuales deben hacerse cuando el equipo esté completamente apagado. Durante la operación de secado está prohibido entrar en el recinto.

Figura 65. Zonas de acceso del invernadero



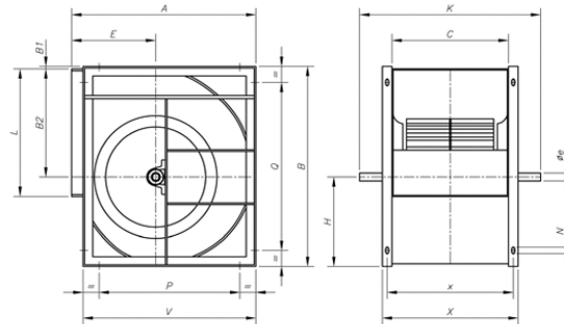
7.7 Ventilación. El aire es impulsado por medio de dos ventiladores centrífugos ubicados en la entrada, marca SODECA CBXR-20/20, con las siguientes especificaciones técnicas:

- Velocidad máxima 1000 RPM,
- Máxima potencia instalada de 11 KW
- Caudal máximo 28000 m³/h
- Temperatura del aire entre -20°C y 110°C
- Peso aproximado 84 Kg

Figura 66. Dimensiones del ventilador centrífugo

Dimensiones mm

CBXR



Modelo	A	B	B1	B2	C	E	ee	H	K	L	N	P	Q	V	X	x
CBXR-15/15	583	632	-	348	473	265	25	284	730	404	9x17	406	406	553	533	505
CBXR-18/18	694	756	-	415	540	323	25	341	800	482	9x17	520	608	664	600	572
CBXR-20/20	843	963	35	523	603	375	35	405	923	603	13x25	646	811	798	683	643
CBXR-22/22	913	1046	35	569	656	400	35	442	976	693	13x25	716	894	868	736	696
CBXR-25/25	998	1161	35	642	765	423	35	484	1085	793	13x25	801	1009	953	845	805
CBXR-30/28	1206	1400	35	776	888	515	40	589	1208	933	13x25	1009	1248	1161	968	928

Fuente. SODECA

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al revolcar el material vegetal dentro de los cilindros rotativos en el proceso de secado, la velocidad de transferencia de masa aumenta y el secado del material vegetal será uniforme.

El dispositivo de secado propuesto en este proyecto se logró cumplir con los objetivos propuestos por el CENIVAM para el secado de las plantas aromáticas que van a ser destiladas.

La constante de transferencia de masa de cada material, no se puede asumir como una constante debido a que la transferencia de masa no solo depende de la velocidad del aire, la temperatura y la humedad relativa, también influyen las propiedades internas del material.

Se recomienda ubicar el sensor del termostato en la mitad del invernadero para asegurar que en ese punto el aire esté a la temperatura que el material necesita para el proceso de secado.

BIBLIOGRAFIA

ALPI, A. TOGNONI, F. Cultivo en invernadero. Madrid. 2 ed. 1987. p 1-135.

MERCADO, Oscar. RUEDA, Jesús. Diseño y construcción de un prototipo de secador de bagazo para trapiches paneleros. Tesis de grado ingeniería mecánica. Universidad Industrial de Santander. 1979.

BADGER, W. BANCHERO, J. Introducción a la ingeniería química. McGraw-Hill. 1964. 763 p.

CENGEL, Yunus. Transferencia de calor y masa. México: McGraw-Hill, 3 ed. 2007. 930 p.

DENNY, Tim. Field distillation for herbaceous oils. Australia: Denny Mackenzie Associates. 2001. 3 ed. 288p.

INCROPERA, Frank. DEWITT, David. Fundamentos de transferencia de calor. México: Prentice Hall, 4 ed. 881 p.

JARA, Freddy. Rediseño de hornos de curación de tabaco Virginia para mejorar la eficiencia energética de la empresa PROTABACO S.A. Tesis de grado Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander. 2006

MARADAY, Juan Francisco. Termodinámica aplicada. Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander, p 127-177;

MONTOYA, José. OROZCO, Hincapié. Fundamentos prácticos del secado de guadua-bambú. Pereira: Editorial Universidad Tecnológica de Pereira

UNE-EN 13031-1. Invernaderos, proyecto y construcción. Parte 1: invernaderos para producción comercial. Madrid: AENOR, 105 p.

ANEXOS

Anexo A. Curvas de secado para material fresco sin aporte solar.

Tabla 28. Identificación de la prueba y resultados de la prueba

ESPECIE		<i>Cymbopogon</i>		
Temperatura del recinto		50°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx Kg/hm ²	%Bh(t)
0	48,8	0	0	76,14
15	45,9	2,9	0,129	70,2
30	42,9	5,9	0,131	64,05
45	40,13	8,67	0,128	58,38
60	36,63	12,17	0,135	51,2
75	34,53	14,27	0,127	46,9
90	34,2	14,6	0,108	46,22
105	30,96	17,84	0,113	39,58
120	27,18	21,62	0,120	31,84

Figura 67. Curvas de secado para el cymbopogon 50°C sin aportes de energía solar

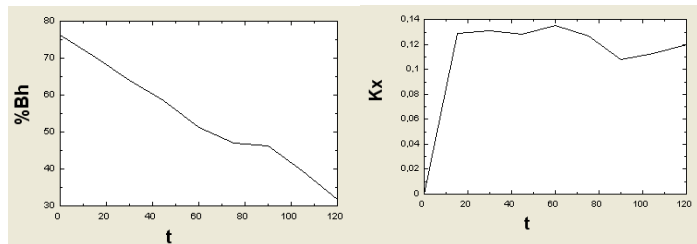


Tabla 29. Identificación de la prueba y resultados de la prueba

ESPECIE		<i>Cymbopogon</i>		
Temperatura del recinto		60°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx Kg/hm ²	%Bh(t)
0	22,95	0	0	76,14
15	20,65	2,3	0,184	66,12
30	17,56	5,39	0,215	52,66
45	13,93	9,02	0,241	36,84
60	10,14	12,81	0,256	20,32
75	7,59	15,36	0,246	9,21
90	5,9	17,05	0,227	1,85
105	5,82	17,13	0,196	1,5
120	5,8	17,15	0,171	1,41

Figura 68. Curvas de secado para el cymbopogon 60°C sin aportes de energía radiación solar

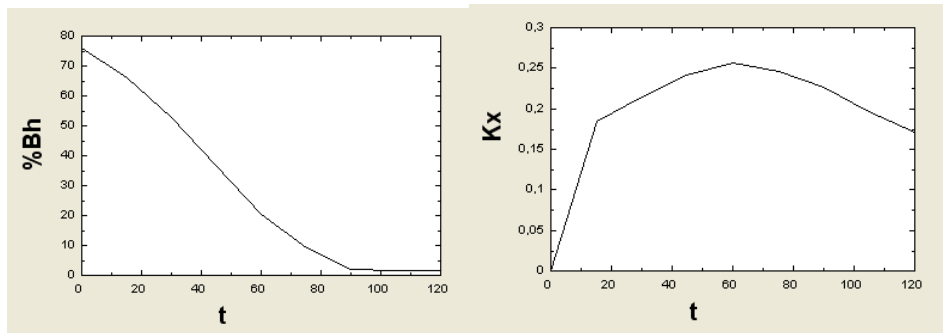


Tabla 30. Identificación de la prueba y resultados de la prueba

ESPECIE		<i>Swienglia</i>		
Temperatura del recinto		50°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx Kg/hm ²	%Bh(t)
0	38,87	0	0	67,67
15	35,65	3,22	0,129	59,39
30	33,61	5,26	0,105	54,14
45	30,48	8,39	0,112	46,09
60	26,63	12,24	0,123	36,17
75	24,48	14,39	0,115	30,65
90	22,83	16,04	0,107	26,41
105	21,48	17,39	0,099	22,93
120	20,35	18,52	0,092	20,02

Figura 69. Curvas de secado para la swienglia a 50°C sin aportes de energía solar

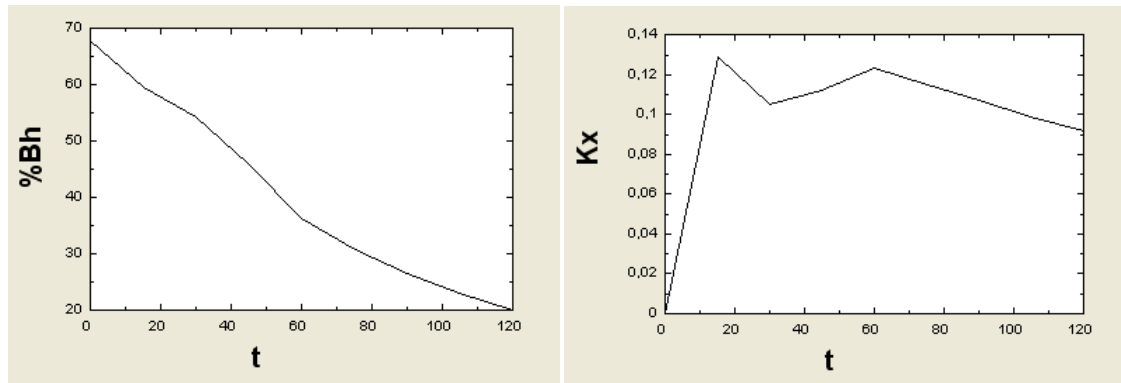
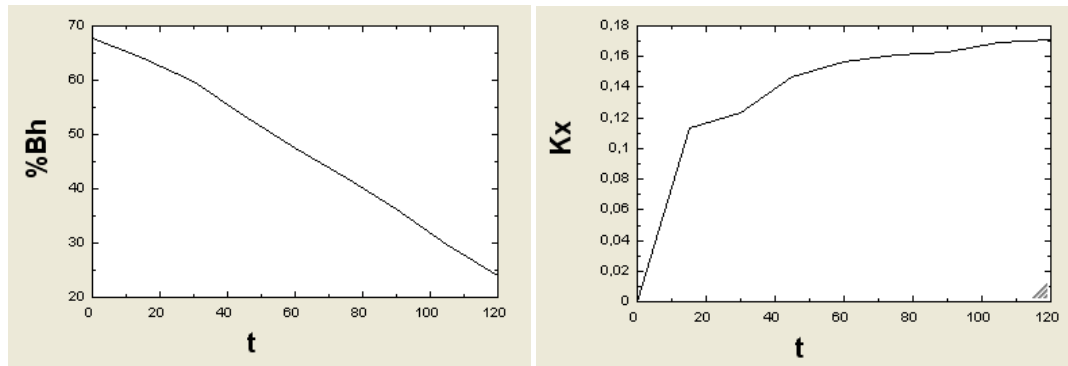


Tabla 31. Identificación de la prueba y resultados de la prueba

ESPECIE		<i>Swienglia</i>		
Temperatura del recinto		60°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx Kg/hm ²	%Bh(t)
0	23,45	0	0	67,67
15	22,6	0,85	0,113	64,05
30	21,61	1,84	0,123	59,82
45	20,13	3,32	0,147	53,51
60	18,74	4,71	0,157	47,59
75	17,43	6,02	0,161	42
90	16,11	7,34	0,163	36,37
105	14,57	8,88	0,169	29,81
120	13,2	10,25	0,171	23,96

Figura 70. Curvas de secado para la swienglia a 60°C sin aportes de energía solar



Anexo B. Curvas de secado para material fresco con aporte solar.

Tabla 32. Identificación de la prueba y resultados de la prueba

ESPECIE		<i>Cymbopogon</i>		
Temperatura del recinto		50°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx Kg/hm ²	%Bh(t)
0	11,89	0	0	76,14
15	10,93	0,96	0,171	68,07
30	9,94	1,95	0,173	59,74
45	8,47	3,42	0,203	47,38
60	7,11	4,78	0,212	35,94
75	6,77	5,12	0,182	33,08
90	6,66	5,23	0,155	32,15
105	5,61	6,28	0,159	23,32
120	4,72	7,17	0,159	15,84

Figura 71. Curvas de secado para cymbopoggon 50°C con aportes de energía solar

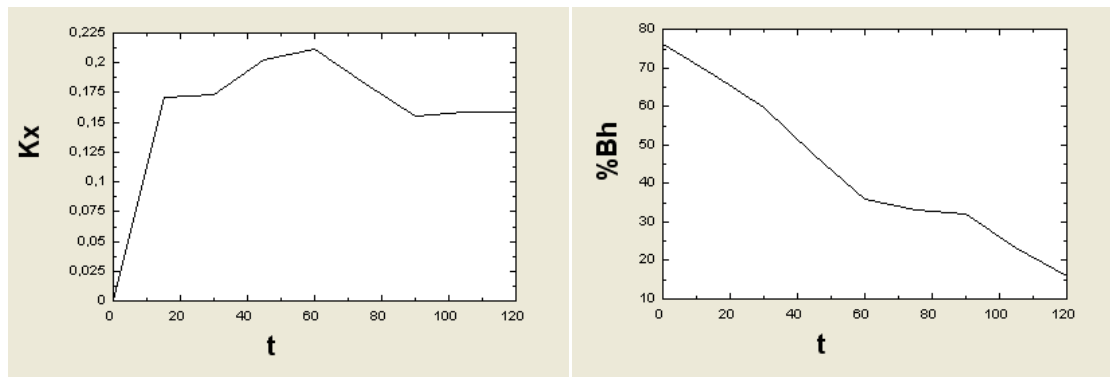


Tabla 33. Identificación de la prueba y resultados de la prueba

ESPECIE		<i>Cymbopogon</i>		
Temperatura del recinto		60°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx Kg/hm ²	%Bh(t)
0	6,61	0	0	76,14
15	5,19	1,42	0,210	54,66
30	4,20	2,41	0,179	39,68
45	3,49	3,12	0,154	28,94
60	3,36	3,25	0,120	26,97
75	2,72	3,89	0,115	17,29
90	2,50	4,11	0,101	13,96
105	2,31	4,30	0,091	11,09
120	2,14	4,47	0,083	8,52

Figura 72. Curvas de secado para cymbopogon 60°C con aportes de energía solar

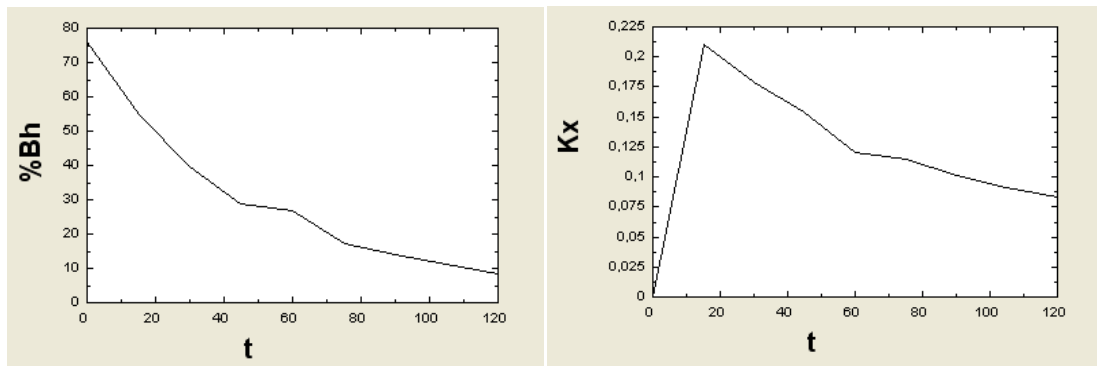


Tabla 34. Identificación de la prueba y resultados de la prueba

ESPECIE		<i>Swienglia</i>		
Temperatura del recinto		50°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx Kg/hm ²	%Bh(t)
0	23,16	0	0	67,67
15	20,23	2,93	0,147	55,02
30	17,19	5,97	0,149	41,89
45	15,69	7,47	0,125	35,42
60	14,24	8,92	0,112	29,16
75	12,28	10,88	0,109	20,69
90	11,72	11,44	0,095	18,27
105	10,93	12,23	0,087	14,86
120	10,21	12,95	0,081	11,75

Figura 73. Curvas de secado para la swienglia a 50°C con aportes de energía solar

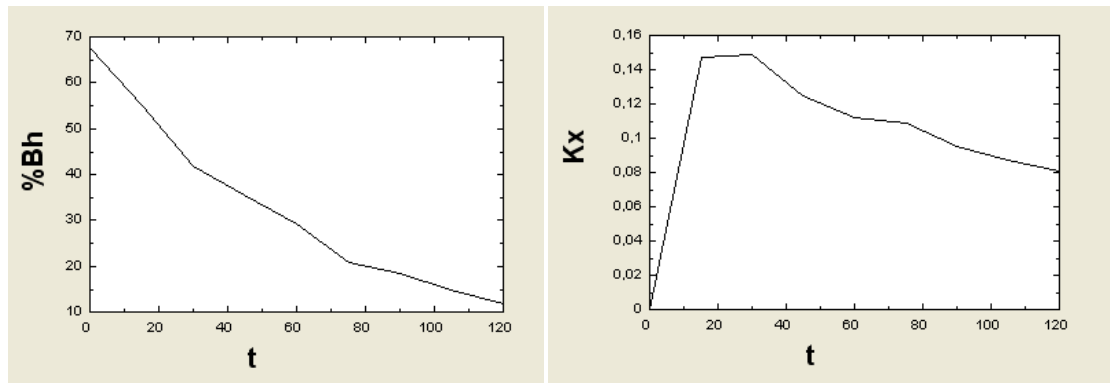


Tabla 35. Identificación de la prueba y resultados de la prueba

ESPECIE		<i>Swienglia</i>		
Temperatura del recinto		60°C		
TIEMPO [min]	W(t)	ΔW [g]	Kx Kg/hm ²	%Bh(t)
0	23,16	0	0	67,67
15	20,87	2,29	0,115	57,78
30	18,38	4,78	0,120	47,03
45	16,45	6,71	0,112	38,70
60	14,47	8,69	0,109	30,15
75	12,97	10,19	0,102	23,67
90	11,82	11,34	0,095	18,71
105	11,21	11,95	0,085	16,07
120	10,83	12,33	0,077	14,43

Figura 74. Curvas de secado para la swienglia a 60°C con aportes de energía solar

