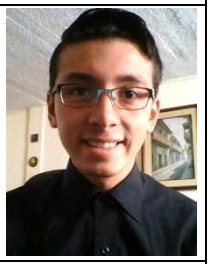
UNIVERSIDAD DISTRITAL "FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS" - FACULTAD TECNOLÓGICA **PROYECTO CURRICULAR DE TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA** **FORMATO DE PROYECTOS DE GRADO**			
Nº DE RADICACIÓN: _____			
INFORMACIÓN EJECUTORES			
Ejecutor 1			
Nombre (s):	Manuel Alexander		
Apellido (s):	Cañón Acosta		
Código:	20121074062		
E-mail:	manuelcannon30@gmail.com		
Teléfono fijo:	3719934		
Celular:	3003037697		
INFORMACIÓN DEL PROYECTO			
Título del Proyecto:	DISEÑO DE UN SECADOR SOLAR DE RESIDUOS ORGÁNICOS ALIMENTARIOS COMO PASO PREVIO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN		
Duración (estimada):			
Tipo de Proyecto: (Marque con una "x")	Innovación y Desarrollo Tecnológico	X	
	Prestación y Servicios Tecnológicos		
	Otro		
Modalidad del Trabajo de Grado:			
Línea de Investigación de la Facultad*:	Desarrollo tecnológico local e institucional		
Línea de Investigación del Proyecto Curricular**:	Conversión de energías y mecánica de fluidos		
Grupo de Investigación:			
Proyecto de Investigación:			
Áreas del conocimiento que involucra:	Energías alternativas, transferencia de calor, termodinámica y diseño		
INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA			
Director: (Vo. Bo.)	Camilo Andrés Arias Henao		
Proyecto de Pasantía: (Tutor): (Vo. Bo.)			
Formulación Proyecto de Grado: (Profesor): (Vo. Bo.)			

DISEÑO DE UN SECADOR SOLAR DE RESIDUOS ORGÁNICOS ALIMENTARIOS COMO PASO PREVIO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

CAÑÓN ACOSTA MANUEL ALEXANDER

20121074062

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

TECNOLOGÍA EN MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2015

DISEÑO DE UN SECADOR SOLAR DE RESIDUOS ORGÁNICOS ALIMENTARIOS COMO PASO PREVIO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

MANUEL ALEXANDER CAÑÓN ACOSTA

20121074062

Trabajo de tesis para optar el título de Tecnólogo en Mecánica

Ph D. CAMILO ANDRÉS ARIAS HENAO

DIRECTOR

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

TECNOLOGÍA EN MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2015

CONTENIDO

Pág.

1. CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 10

1.1 Descripción del problema 10

1.2 Delimitación del problema 10

1.2.1 Delimitación espacial 10

1.2.2 Delimitación temporal 10

1.2.3 Delimitación social 10

1.3 Estado del arte 11

1.3.1 Origen de la deshidratación solar de alimentos 11

1.3.2 Basuras y sus tratamientos 11

1.3.3 Tratamientos térmicos, origen y evolución 13

1.3.4 Secado solar 14

1.3.5 Secadores solares 15

1.3.6 Avances en Latinoamérica acerca de la deshidratación de desechos 19

1.3.7 Avances dentro de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas 20

1.4 Justificación 21

1.5 Objetivos de la investigación 21

1.5.1 Objetivo general 21

1.5.2 Objetivos específicos 21

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO 22

2.1 Humedad 22

2.2 Circulación del aire 23

3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 24

3.1 Fase de documentación 24

3.1.1 Modelamiento matemático 24

3.2 Fase de diseño y fabricación 29

3.3 Fase de pruebas y funcionamiento 30

4. CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES 43

5. CAPÍTULO V: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES 45

6. CAPÍTULO VI: PRESUPUESTO 46

7. CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA 47

LISTADO DE ABREVIACIONES

$\propto_c$	*Absortividad de la capa basura*
A_c	*Área de la capa de basura*
C_c	*Calor específico de la capa de basura*
H_f	*Humedad fresca en %*
H_f	*Humedad seca en %*
K_v	*Conductividad térmica del aire húmedo*
M_c	*Masa de la basura*
P_f	*Peso fresco*
P_{ms}	*Peso materia seca*
P_s	*Peso seco*
T_1	*Temperatura inicial de la capa de basura*
T_a	*Temperatura ambiente*
T_c	*Temperatura de la capa de basura*
T_{ch}	*Temperatura de la cámara de secado*
T_e	*Temperatura del cielo*
$\frac{dT_c}{dt}$	*Cambio en la temperatura de la basura en un dt*
h	*Coeficiente de transferencia de calor*
$C\ y\ n$	*Constantes a determinar*
Gr	*Número de Grashof*
$I(t)$	*Intensidad solar en el tiempo t*
$P(T_c)$	*Presión en función de la temperatura de la capa de basura*
$P(T_e)$	*Presión en función de la temperatura del cielo*
Pr	*Número de Prandtl*

R *Rendimiento*

X *Dimensión característica*

γ *Humedad relativa*

ε *Emisividad de la superficie de la basura*

λ *Calor latente de vaporización*

σ *Constante de Stefan-Boltzmann*

τ *Transmisividad de la cubierta de vidrio*

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura No. 1. Secador solar tipo carpa. Fuente: Guía de uso de secadores solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes, UNESCO. 16

Figura No.2.Esquema de un sistema de secado solar indirecto. Tomado de Agro Waste 17

Figura No. 3. Secador solar tipo túnel. Fuente: Guía de uso de secadores solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes, UNESCO. 18

Figura No. 4. Secador solar terminado. 30

Figura No. 5. Residuos orgánicos alimentarios molidos. 31

Figura No. 6. Carga de los desechos orgánicos alimentarios en el colector 31

Figura No. 7. Secado en horno eléctrico a temperatura constante. 32

Figura No. 8. Acomodamiento del secador solar para el segundo día de pruebas. 35

Figura No. 9. Desechos orgánicos alimentarios deshidratados. 37

LISTADO DE GRÁFICAS

Pág.

Gráfica No 1. Temperatura ambiente e interna en tres los tres tramos del secador solar respecto al tiempo, día 1. 34

Gráfica No 2. Temperatura ambiente e interna en tres los tres tramos del secador solar respecto al tiempo, día 2. 36

Gráfica No 3. Comparación de las temperaturas ambientes de los dos primeros días de prueba. 37

Gráfica No 4. Temperatura interna en el punto medio del secador respecto a la variación de pesos, día 1. 40

Gráfica No 5. Temperatura interna en el punto medio del secador respecto a la variación de pesos, día 2. 43

Gráfica No. 6 Cronograma de actividades. 46

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Coeficientes utilizados en la ecuación de Antoine 28

Tabla 2. Materiales utilizados para la construcción del secador solar. 29

Tabla 3. Resultados prueba de humedad 32

Tabla 4. Resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento, día 1. 33

Tabla 5. Resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento, día 2. 35

Tabla 6. Resultados obtenidos de las prueba No. 2 de funcionamiento a la entrada del sistema, día 1. 38

Tabla 7. Resultados obtenidos de las prueba No. 2 de funcionamiento en el punto medio del sistema, día 1. 39

Tabla 8. Resultados obtenidos de las prueba No. 2 de funcionamiento en la salida del sistema, día 1. 39

Tabla 9. Resultados obtenidos de las prueba No. 2 de funcionamiento en la entrada del sistema, día 2. 41

Tabla 10. Resultados obtenidos de las prueba No. 2 de funcionamiento en el punto medio del sistema, día 1. 41

Tabla 11. Resultados obtenidos de las prueba No. 2 de funcionamiento en la salida del sistema, día 2. 42

Tabla 12. Presupuesto general del proyecto. 47

1. CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción del problema

Mucha de la basura que tenemos en nuestro hogar y que es llevada al botadero o inclusive a la calle, es orgánica, lo cual nos indica que tiene un alto contenido de carbono que mediante un proceso específico, nos ayudaría como combustible para una producción de energía. El problema es que para que estos desechos sean utilizados como combustible, se tendrían que quemar, pero, al ser desechos orgánicos, tienen una gran cantidad de agua que habría que retirar. Es necesario un dispositivo que seque y recupere el agua eliminada con fuente energética solar y aire caliente de procesos de residuos orgánicos alimenticios que serían utilizados como combustible en un proceso posterior de quema.

1.2 Delimitación del problema

1.2.1 Delimitación espacial

El proyecto de investigación y desarrollo se realiza en la ciudad de Bogotá D.C., la cual no es la mejor si se habla de captación de energía solar, sin embargo, se pueden lograr buenos resultados dependiendo del diseño y el rendimiento del secador solar.

1.2.2 Delimitación temporal

Es necesario un tratamiento específico para los desechos orgánicos antes de que ésta entre al secador solar, que llevará un tiempo. Igualmente, el tiempo necesario para un secado óptimo es alrededor de 2 a 5 días dependiendo de factores como el tipo de producto, el tamaño de los trozos del producto, la temperatura, humedad relativa y la velocidad del aire.

1.2.3 Delimitación social

Uno de los principales limitantes para desarrollar el proyecto es la misma obtención de desechos orgánicos ya que es un proceso manual el de escoger qué puede y qué no puede entrar al secador solar.

1.3 ESTADO DEL ARTE

Para nosotros como seres humanos es de vital importancia una adecuada alimentación sobre todo si es de origen vegetal. Según su contenido de agua y sus características como la acidez, los alimentos de tipo vegetal pueden ser clasificados según su perecibilidad. Entre más agua posean y pH más cercanos a la neutralidad, son más propensos al rápido deterioro, sobre todo por causa de origen microbiológico.

1.3.1 Origen de la deshidratación solar de alimentos

Desde hace mucho tiempo, hablando más exactamente, desde el período del Neolítico, el hombre ha buscado preservar los alimentos por distintos métodos, y uno de ellos, generalmente el más utilizado, es el proceso de deshidratación por medio de la energía solar. Por ejemplo, los Incas, hace alrededor de tres mil años antes de Cristo, para conservar las patatas, las extendían a lo largo de las altas cumbres para exponerlas al sol y al frío durante la noche, evitando así el deterioro y la germinación de brotes estos tubérculos, e incluso, facilitando su posterior rehidratación. Como se puede ver, ésta es una forma rudimentaria de secado en estado congelado. Sin embargo, lo que se quiere desarrollar en este proyecto es un secador solar para la deshidratación de basuras orgánicas para una post producción de energía, y no es para una preservación de alimentos como se ha desarrollado a través de la historia alrededor del mundo.

1.3.2 Basuras y sus tratamientos

Alrededor del mundo se producen aproximadamente unas 5250000 Toneladas de basura al año. En Colombia, se producen 27000 Toneladas al año y tan sólo el 13% de este valor se recicla. Es algo crítico ver estos números, y no se procederá en estos momentos a evaluar los costos del reciclaje, obtención y demás de la basura. Lo que sí entro a mirar es lo que se ha estudiado a través del tiempo con el qué hacer con los desechos tanto orgánicos como inorgánicos. Se comienza entonces con su tratamiento.

Existen varios tipos de tratamiento de residuos, en general:

- Tratamiento físico
- Tratamiento químico
- Tratamiento mecánico
- Tratamiento térmico
- Tratamiento electrónico

Sin embargo hay ciertos tratamientos específicos como lo son:

- Tratamiento de los materiales orgánicos
- Tratamiento de los plásticos
- Tratamiento del vidrio
- Tratamiento del papel y cartón
- Tratamiento de los metales
- Tetrabrik
- Otros residuos

Los materiales orgánicos se llevan a dos procesos conocidos como proceso anaerobio y proceso aerobio. El primero de estos se conoce como digestión anaerobia o biometanización. Consiste en llevar estos residuos orgánicos a condiciones donde hay muy poco oxígeno y substratos orgánicos. Desde allí se obtiene una mezcla de 99% de metano y dióxido de carbono, y un 1% de ácido sulfúrico y amoniaco. Este primer porcentaje se utiliza como combustible que ayudará a producir energía eléctrica. El segundo proceso es conocido también como compostaje, y es allí donde bajo unas condiciones de humedad pH y temperaturas controladas, se llega a la obtención de compost el cual se utiliza como fertilizante.

En lo que respecta al tratamiento de los plásticos, se derivan pequeños procesos, reciclado mecánico, químico y valorización energética. El primero de estos solamente se puede aplicar a plásticos termoplásticos que son aquellos que se funden por la acción de la temperatura; estos plásticos son troceados para introducirlos posteriormente en una máquina extrusora-graneadora que después pasarán a moldearse por los métodos tradicionales.

El reciclado químico se utiliza para plásticos que ya están muy degradados o es imposible aislarlo de la mezcla en que se encuentra. Según el tipo de polímeros se distinguen dos clases de procesos:

Por último la valorización energética es un tratamiento adecuado para plásticos muy degradados. Es una variante de la incineración en la que la energía asociada con el proceso de combustión es recuperada para generar energía (Gestión y tratamiento de los residuos orgánicos. España: UNED).

Siguiendo con el tratamiento de los vidrios, estos se pueden reciclar siempre y cuando el material no pierda sus propiedades. Una vez el vidrio ha sido recogido, éste se tritura de manera que se forma un polvo llamado calcín el cual se somete a altas temperaturas en un horno para ser fundido y nuevamente moldeado sin perder sus propiedades.

El tratamiento del papel y del cartón consiste en la recuperación de las fibras mediante la separación de las fibras en soluciones acuosas en donde se trata también de eliminar la tinta que posteriormente se podrá volver a utilizar. Retirada la tinta, se dejan las fibras

sobre una superficie plana que pasará sobre un rodillo que las aplanan y las compactan dejando una nueva lámina de papel reciclado.

1.3.3 Tratamientos térmicos, origen y evolución

Voy a hacer un enfoque en los tratamientos térmicos y más exactamente, a los tratamientos térmicos solares ya que este proyecto de grado retoma esta área. Primero que todo el origen de la quema de residuos urbanos. A finales del siglo XIX se instaló en Nottingham (Reino Unido) el primer incinerador de desechos urbanos que después Estados Unidos tomaría como una idea más propuesta en su país cumplida en masa (más de 200), empezando con el primer incinerador en Governor Island en New York. Muchos de estos sistemas operaban precariamente, tenían un sistema de alimentación por cargas y en algún caso tenía un sistema de recuperación de vapor (Suelos y residuos: Incineración y tratamientos térmicos. Newsletter Ambientum: Las Rozas, Madrid).

Fue entonces que terminó la Primera Guerra Mundial y con esto, empezó el decaimiento de este sistema de quema de desechos debido al empobrecimiento en contenido energético de éstos. Sin embargo, debido a la aparición de nuevas tecnologías de combustión y depuración de gases, como la evolución favorable de la composición de los residuos sólidos urbanos desde el punto de vista energético y el aumento de su poder calorífico, se retomó la utilización de la quema de residuos urbanos, pero con esto llegaron nuevas normas acerca de la contaminación del aire que le puso un tope a esta tecnología de reducción de basuras. Fue hasta los años sesenta y setenta que a través de tecnologías como la alimentación en continuo al horno incinerador, mejoras en el control de la combustión, el uso de cámaras múltiples de combustión, la recuperación de energía de forma sistemática y la aplicación de sistemas de depuración para los gases de combustión se elevó de nuevo la utilización de quema de basuras. Aun así, fue en los años ochenta que los avances tecnológicos como mejores sistemas de combustión y tratamiento de los gases de combustión ayudaron tanto a este sistema de reducción de basuras que hoy en día se siguen utilizando en los países más desarrollados como Alemania, Japón, Suiza, entre otros.

Entonces, la incineración, que es el proceso de conversión de residuos sólidos urbanos en gases de combustión, escorias y cenizas, elimina hasta un 90 % de volumen y un 75% en peso los desechos urbanos. Son necesarios unos cálculos fundamentales para las instalaciones de incineración como lo son:

- Densidad de los residuos
- Heterogeneidad
- Humedad
- Material inerte

- Poder calorífico

Haciendo cierto énfasis en este último, el poder calorífico (es el que presenta la cantidad de calor generada por la combustión completa de una unidad de masa de dicho combustible, tomando el combustible y el comburente a una temperatura y presión de referencia) ya que éste valor ayuda a diseñar las plantas incineradoras que a su vez dependen de la economía del país. Por ejemplo, en España, el PCI está en aproximadamente 2200 Kcal/ Kg de basura, en Europa occidental oscila entre los 1500 a 220 Kcal/Kg, y en Estados Unidos se encuentran valores de 2500 a 3500 Kcal/Kg.

La recuperación de energía es posible con la mayoría de los sistemas de incineración existentes. La decisión sobre su instalación vendrá condicionada por otro tipo de factores, como son el tipo de residuo que se vaya a incinerar, la cantidad que se tratará, la existencia de mercado para la aplicación térmica: vapor, agua caliente, electricidad, y el peso de los costes que conlleve (Suelos y residuos: Incineración y tratamientos térmicos. Newsletter Ambientum: Las Rozas, Madrid).

Existen entonces tres tipos generales de sistemas de recuperación de calor:

- Gas-agua
- Gas-aire
- Gas-fluido orgánico

El primero de estos genera vapor y es uno de los sistemas de recuperación de calor más usados. Este vapor generado es utilizado principalmente para mismos funcionamientos internos y externos de la instalación, igualmente, es utilizado para sustituir calderas alimentadas con combustible estándar. El segundo sistema es usado para satisfacer necesidades del propio proceso de incineración, es decir, este aire caliente es utilizado para precalentar el aire de combustión o de los residuos líquidos a incinerar, reduce apreciablemente el tiempo necesario para alcanzar su temperatura de oxidación. Igualmente, reduce la cantidad de combustible auxiliar necesario para mantener una mínima temperatura. Por último está el proceso de gas-fluido orgánico que comparte el proceso mencionado anteriormente.

1.3.4 Secado solar

Hablando del secado solar, éste es el proceso donde se aprovecha una corriente de aire mezclada con la radiación solar en donde se intercambian calor y masa. Desde allí hay una transferencia de un líquido procedente de un sólido húmedo a una fase gaseosa no saturada. Para lograr este intercambio, el material húmedo se expone a una corriente de aire con determinadas condiciones de temperatura y velocidad. Sin

embargo, esto no es suficiente para desarrollar un óptimo secado y se deben tener tres condiciones en general:

- Aire caliente a una temperatura entre 40° y 70° C
- Aire con un bajo contenido de humedad
- Movimiento constante del aire

En los últimos años, la escasez y mayores precios de los combustibles ha despertado un nuevo interés en el secado basado en el uso de la energía solar, tratando de desarrollar diversas técnicas que permiten solucionar los problemas mencionados en relación al secado al aire libre.

1.3.5 Secadores solares

Existen dos tipos de secadores solares, directo e indirecto. El primero es cuando el colector y la cámara de secado están juntos, mientras que en el indirecto, aparte de que el colector y la cámara de secado están separados, el aire se calienta en el colector y la radiación no incide sobre el producto a secar. Es así que se obtienen entre los más principales, los siguientes tipos de secadores solares directos e indirectos:

Tipo carpa

Es el modelo más sencillo de secador solar, consiste en una estructura metálica o de madera, de forma de carpa triangular cubierta de una lámina de plástico resistente a los rayos ultravioleta (polietileno de larga duración). Tiene una abertura en su parte inferior longitudinal y otra arriba por el otro costado longitudinalmente también. Éstas tienen una malla mosquitero para evitar el ingreso de insectos. Aproximadamente a 20 centímetros del suelo se encuentra una bandeja de secado removible en la cual hay una malla fina o gasa donde se colocan los productos a secar.

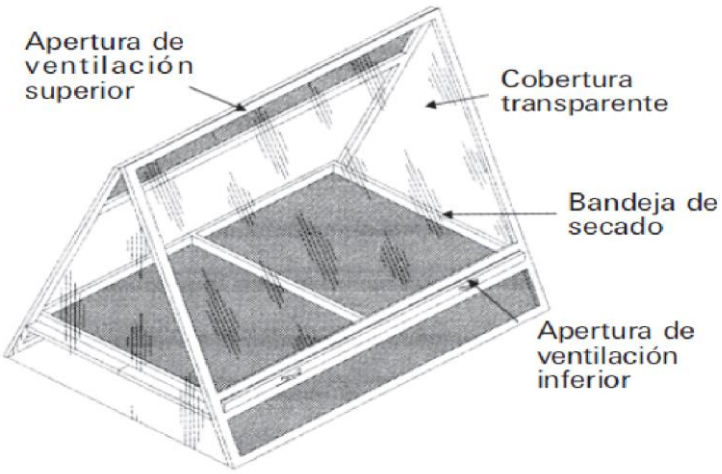


Figura No. 1. Secador solar tipo carpa. Fuente: Guía de uso de secadores solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes, UNESCO.

Tipo armario

Este tipo de secador es algo complejo de armar ya que requiere otras partes adicionales, además es utilizado sobre todo para la conservación de alimentos que requieran mantener un buen color y proteger sus propiedades naturales. Se trata de una cámara de secado y un colector solar inclinado unidos entre sí en la parte inferior de la cámara. En ésta se encuentran varias bandejas de secado removibles, también cubiertas con una malla fina o gasa; el colector solar está cubierto por vidrio y tiene en su interior un intercambiador de calor.

El aire ambiental entra por la parte inferior del colector cubierta con una malla mosquitero para evitar la entrada de insectos, y se calienta hasta unos 15° a 25° C superior a la temperatura ambiental, de allí pasa a la cámara donde atraviesa las bandejas y va secando los productos allí metidos. Finalmente, un extractor eléctrico ejerce su función y ayuda a la adecuada ventilación del secador. Junto con el secador de tipo carpa, pueden albergar hasta 12 Kg/m.

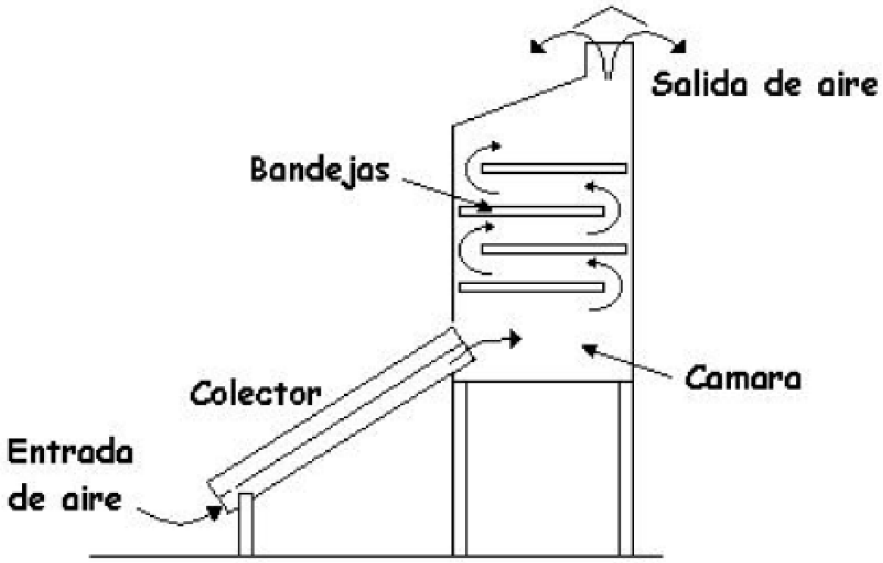


Figura No. 2. Esquema de un sistema de secado solar indirecto. Tomado de Agro Waste

Tipo túnel

Este tipo de secador solar consiste en un túnel horizontal elevado con una base rígida de hierro y, al igual que un secador de tipo carpa, está recubierto con una lámina de polietileno de larga duración. Esta estructura se coloca sobre caballetes. El túnel se encuentra dividido en varios sectores alternantes de colector y secador. Como ya se sabe, el colector se encarga del calentamiento del aire mientras que el secador retira la humedad de los productos. El aire circula en forma horizontal y generalmente es impulsado por un ventilador eléctrico. Igual que en los demás secadores, las bandejas son removibles y, al igual que los cajones de un clóset, se pueden sacar y volver a dejar en su posición. Por la altura relativamente grande de las bandejas es posible secar también productos más grandes y con más porcentaje de humedad como lo son flores o hierbas (este tipo de secador alcanza a una capacidad de 15 kg/m). Igualmente, las entradas y salidas están cubiertas de mosquiteros para evitar el ingreso de insectos. Con este secador se pueden lograr temperaturas con 20 a 25°C más altos que la temperatura ambiente.

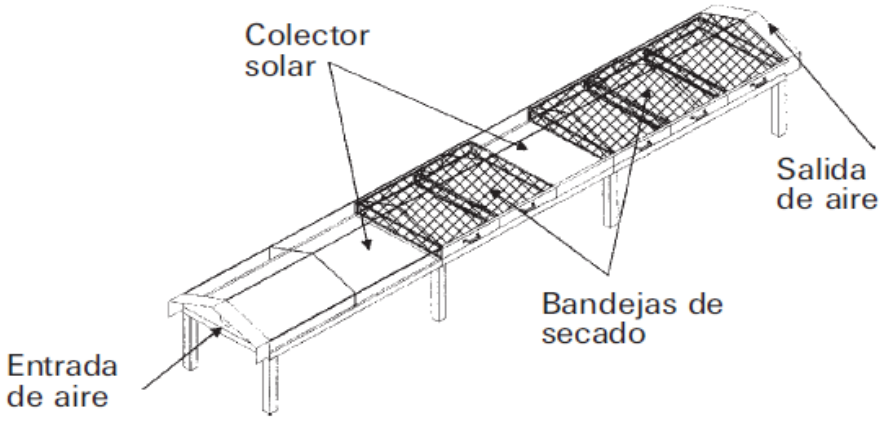


Figura No. 3. Secador solar tipo túnel. Fuente: Guía de uso de secadores solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes, UNESCO.

Se continúa entonces con las ventajas y desventajas de este proceso de secado. Dentro de las ventajas se encuentran:

- Es un proceso técnicamente sencillo
- Tiene un bajo coste de implantación y mantenimiento
- No requiere mano de obra especializada
- No hace uso de combustibles
- Evita problemas de transporte y almacenamiento posterior
- Su peso y volumen disminuye sustancialmente, lo cual facilita su manejo, manipulación y transporte.
- A pesar de ser altamente perecible en fresco, adquiere gran estabilidad para ser almacenado en condiciones ambientales ordinarias por largo tiempo.

En cuanto a las desventajas se obtiene que:

- Dependiendo del tipo de secador, el proceso es lento debido a la elevada humedad en el ambiente
- Requiere grandes superficies para aplicar capas delgadas y aumentar el rendimiento del secado o más tiempo.
- Requiere personal que remueva el material o que el sistema está automatizado
- Si el secado es malo, aumenta la probabilidad de descomposición, se pudren o enmohecen
- No se puede controlar ni la temperatura ni la velocidad apropiadas del aire.

Se deben tener en cuenta que estas ventajas y desventajas no aplican 100% a este proyecto de grado ya que lo que se va a manejar aquí son residuos orgánicos y no alimentos para un futuro consumo.

1.3.6 Avances en Latinoamérica acerca de la deshidratación de desechos

En México, por ejemplo, un sistema para deshidratar basura orgánica en casa fue desarrollado en el año 2012 por los investigadores del Instituto Politécnico Nacional, del CETIS 56 y del Colegio de Posgraduados de la Ciudad de México. Este deshidratador podría reducir entre un 30% y un 70% de residuos orgánicos caseros; es parecido a una alacena con repisas, pero sus paredes están hechas con materiales traslúcidos, como el acrílico, los cuales tienen espacios huecos que se rellenan con dióxido de carbono (CO2), el cual es un gas de efecto invernadero. Una vez que se rellenan con CO2 las cubiertas, se arma el mueble reductor y que se colocan los materiales orgánicos dentro de las diferentes repisas del contenedor. Todo se mete por una puerta que al final queda sellada con imanes. Una vez cerrado el contenedor, se le expone al sol (en una azotea o una terraza). Al recibir la radiación solar, el gas aumenta la absorción de calor, como consecuencia se acelera el efecto invernadero y se hace más rápida la deshidratación y reducción del tamaño de la basura (*Novedoso sistema para deshidratar basura orgánica en casa*. Crónica: México). Este deshidratador solar se hizo con la intención de reducir en tamaño y peso los desechos orgánicos para su posterior traslado a los botaderos.

Sin embargo, en Junio del año pasado, empezó un proyecto, también en el país de México, en donde se está utilizando el método de deshidratación de basuras a gran escala de manera industrial. Es decir, en un horno cilíndrico de 10 metros de largo con una temperatura de 140 °C, se introduce toda la basura posible (orgánica e inorgánica) y se deshidrata. Lo resultante de este proceso es utilizado como combustible para el Metro y el alumbrado público, además de un perfecto abono para la agricultura. Gracias a este método, es posible reducir una gran cantidad de basura ya que en tan sólo 15 minutos una tonelada de ésta podría ser deshidratada; aparte de esto, su costo es más bajo ya que se necesitan alrededor de 50 a 55 pesos mexicanos (8.549 a 9.404 pesos colombianos) por tonelada para su futura deshidratación, mientras que en grandes municipios de este país se gastan alrededor de 750 y 1000 pesos mexicanos (128.240 a 170.897 pesos colombianos) para recolectar y procesar la misma tonelada de basura. Sin embargo, el costo de crear una planta de éstas está alrededor de 120 millones de pesos mexicanos (20.518’452.000 de pesos colombianos), lo que lleva a un debate por la utilización de este tipo de tecnología. Sin embargo, para este proyecto lo que se busca es usar la energía solar para la deshidratación de la basura orgánica, aun así, esta noticia enlaza las ideas de producción de combustible y reducción de basuras.

1.3.7 Avances dentro de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Los estudiantes David Leonardo Mayorga Céspedes y Carlos Andrés Romero Ariza están desarrollando como proyecto de grado un análisis de los residuos alimenticios por combustión directa en un micro CHP para la generación de potencia y secado de los residuos. Su justificación se explica a continuación: “El propósito de orientar el proyecto de investigación hacia el aprovechamiento de los desperdicios alimentarios como combustible sólido, va enfocado a buscar su utilidad dentro de los espacios de generación, en otras palabras los hogares. Los beneficios que se pueden obtener son: eliminación del coste de transporte de los desperdicios alimentarios a los rellenos sanitarios, generación de energía eléctrica y de calor que pueden ser utilizados en el mismo lugar y finalmente se contribuya a garantizar el uso de energías renovables.

Para usar los desperdicios alimentarios como combustible en el lugar de generación, se puede hacer uso de los micros CHP, ya que su tecnología ya ha sido implementada para generar energía eléctrica y térmica, a partir de biomasa. Cabe resaltar que la biomasa que se ha utilizado en estos desarrollos, en cuanto a desechos orgánicos se refiere, ha sido biogás, es decir biomasa en fase gaseosa, adicionalmente la energía térmica generada por estos micro CHP se utiliza para procesos externos al ciclo de cogeneración como el calentamiento de agua. Lo que lleva a investigar si es posible usar residuos alimenticios en fase sólida como combustible de un micro CHP, que a su vez va entregue la energía térmica que genere al mismo combustible para secarlo y así llevarlo a unas condiciones óptimas de combustión.” Y como objetivo principal, ellos quieren determinar el potencial de recuperación energética en un micro CHP (Combined Heat and Power) a partir de los RA (Residuos Alimenticios) producidos en el conjunto residencial Sabana Grande II SL3 ubicado en la ciudad de Bogotá D.C. para la generación de potencia y secado.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Lo que se quiere desarrollar es un secador o deshidratador solar como complementación del proyecto de grado de los estudiantes David Leonardo Mayorga Céspedes y Carlos Andrés Romero Ariza, quienes están desarrollando un análisis de los residuos alimenticios por combustión directa en un micro CHP para la generación de potencia y secado de los residuos.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

- Construir un sistema de secado solar y con aire caliente de desecho para el secado y recuperación de agua de desechos orgánicos alimentarios para prepararlos como combustible en un proceso de quema.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Encontrar el secador solar apropiado para el retiro de humedad de desechos orgánicos.
- Encontrar todos los parámetros necesarios como lo son la radiación solar, la humedad relativa, la temperatura del aire y demás, para el secado de estos residuos orgánicos en la ciudad de Bogotá D.C.
- Recuperar la humedad retirada para una futura utilización y/o estudio.
- Acoplar un sistema de circulación de aire caliente que provenga del sistema de recuperación del ciclo de generación.
- Construir el dispositivo de secado solar.
- Realizar pruebas de funcionamiento suficientes del secador solar.
- Presentar un artículo con los resultados más relevantes a una revista indexada en la cual participe el director del proyecto.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Humedad

La UNESCO desarrolló una guía de uso donde se puede apreciar el manejo de los secadores solares alimenticios y su explicación teórica. Tomando como base este documento, se puede determinar entonces el fin de secado para el producto destinado. El criterio más importante para definir el secado del material es determinar el contenido de humedad designado bajo la siguiente tabla:

Contenido de humedad de algunos productos y temperatura máxima tolerable

Producto:	fresco(%)	seco(%)	°C
Granos:			
arroz	24	14	50
maíz	35	15	60
poroto	70	5	n/d
maní	40	9	n/d
café	50	11	n/d
Tubérculos:			
papa	75	13	55
mandioca	62	13	n/d
batata	80	13	70
Hortalizas:			
arveja	80	5	60
cebolla	80	4	55
hortalizas en hoja	80	10	50
tomate	95	8	65
repollo	94	4	55
zanahoria	70	5	60
locote y ají	86	5	60
ajo	80	8 a 10	55
Frutas:			
durazno	85	18	n/d
manzana	84	14	50
banana	80	15	70
guayaba	80	7	n/d
uva	80	15 a 20	55
mango	85	12 a 15	65
mamón	85	2 a 15	65
pescado (sin salado)	80	15	40
pescado (con salado)	80	35 a 45	40

Fuente: Guía de uso de secadores solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes, UNESCO.

Entonces, se puede determinar cuándo es el final del secado dependiendo de su peso.

1. En este caso, como son desechos orgánicos, se puede introducir el material a secar en un horno eléctrico a temperatura constante entre unos 30° a 70° C y midiendo la muestra cada 30 minutos, así se obtiene la humedad fresca del producto.
2. Con este dato, se procede a calcularH_s, con la ecuación (1)

$$H_f = \frac{P_f - P_{ms}}{P_f} * 100\% \qquad (1)$$

$$R = \frac{100\% - H_f}{100\% - H_s} = \frac{P_s}{P_f} \qquad (2)$$

$$P_s = R * P_f \qquad (3)$$

H_f = Humedad fresca en %, es el cociente entre la masa de agua dentro del material y su masa total.

H_s = Humedad seca en %, compara la masa de agua que contiene un material sólido con su masa seca.

P_f = Peso fresco P_s = Peso seco

P_{ms} = Peso materia seca R = Rendimiento

3. Con la ecuación (2) se calcula R que va a ser constante para cada producto.
4. Se elige una muestra del producto fresco que se va a secar y se le pesa (P_f). Este valor se anota en una tabla.
5. Calcular con la fórmula (3) el P_s que corresponde a la H_s recomendable.
6. En el transcurso del secado (un tiempo por ejemplo de 2 horas) pesar la misma muestra y anotar los valores correspondientes en la mencionada tabla. Continuar con el secado hasta que el P_s medido corresponda al P_s calculado.

2.2 Circulación del aire

Circulación forzada:

El aire es movido por un ventilador que consume energía eléctrica o mecánica. Este tipo de circulación ayuda mucho en la parte del diseño además de facilitar el control del proceso de secado, sin embargo, una limitante es que debe disponer de una fuente de energía eléctrica para el ventilador. Se pueden tomar velocidades del aire desde 0.5 hasta 1 m/s.

Circulación por convección natural:

Este tipo de circulación se aplica, sobre todo, a equipos medianos o pequeños. El aire es movido por las diferencias de temperatura entre las distintas partes del equipo, que promueven la convección térmica del aire. Con este tipo de circulación se pueden obtener velocidades de 0.4 a 1 m/s en equipos medianos o pequeños, pero si se llega a utilizar en equipos grandes, se toman velocidades de 0.1 a 0.3m/s.

3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Fase de documentación

Gracias a una tesis doctoral de la Universidad de Extremadura en la Escuela de Ingeniería Industrial, se recolectó suficiente información para llegar a la conclusión de que un secador solar tipo túnel es la mejor opción para el secado de los residuos. Pero no solamente el tipo de secador funciona, sino también, la disposición de colocar los residuos influye mucho en el secado.

Se encontró un secador solar activo de tipo integral, el cual maneja circulación de flujo de aire forzado y en donde una de sus características es que la cámara de secado también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar; sus costos son reducidos al igual que su mantenimiento; además tienen la capacidad de almacenar grandes cantidades de materia a secar.

Siendo así, esta es la mejor opción a considerar para el diseño del secador solar. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la disposición de la materia orgánica a deshidratar es importante. En esta misma tesis doctoral exponen varios tipos de captadores solares, entre ellos, una superficie captadora de placa suspendida, en donde la superficie absorbedora se encuentra fijada entre la cubierta y un aislamiento para que el flujo de aire pase tanto por encima como por debajo del material a secar, es decir, aumenta la superficie de transferencia de calor y así, se obtiene una mayor eficiencia en el secado.

3.1.1 Modelamiento matemático

No se debe escoger simplemente un secador solar y probarlo para ver si funciona o no. Es necesario de un modelamiento matemático del sistema para determinar su eficiencia, adaptabilidad, dimensiones, entre otros factores. Para esto, fue necesario buscar un modelo aplicable al secador escogido y adaptarlo para su comprobación. Siendo así, el capítulo número 7 del libro “Solar Energy: Fundamentals, Design, Modelling and Applications” de G.N. Tiwari, expone un modelo matemático para el

secado de una cama delgada (no mayor a 5 mm) de granos de pimientos verdes (se recuerda que la función original de un secador solar es deshidratar frutas, verduras y hortalizas para su conservación y futuro consumo). Este modelo aplica muy bien para el sistema a desarrollar ya que se dan ecuaciones generales que con ayuda de conocimientos básicos de transferencia de calor se adaptan al sistema a desarrollar.

Se encuentran entonces las siguientes ecuaciones, teniendo en cuenta que:

- La capacidad calorífica de la cubierta, bandeja de material, muros del secador solar y el aire han sido descuidados.
- La contracción de volumen es descuidada durante el proceso de secado
- La conducción de partícula a partícula es descuidada
- El flujo de calor es descuidado
- No hay condensación de vapor de agua en la cámara de secado
- No hay estratificación a lo largo de la profundidad del material debido a su pequeña profundidad

Siendo así, la ecuación de balance de energía para la superficie del material está dada como sigue:

$$[\propto_c \tau I(t)]A_c = M_c C_c \frac{dT_c}{dt} + h(T_c - T_{ch})A_c \qquad (4)$$

En donde:

$\propto_c$: Absortividad de la capa basura
τ : Transmisividad de la cubierta de vidrio
$I(t)$: Intensidad solar en el tiempo t
A_c : Área de la capa de basura
M_c : Masa de la basura
C_c : Calor específico de la capa de basura
$\frac{dT_c}{dt}$: Cambio en la temperatura de la basura en un *dt*
h : Coeficiente de transferencia de calor
T_c : Temperatura de la capa de basura
T_{ch} : Temperatura de la cámara de secado

Se exponen uno a uno de estos coeficientes:

- $\propto_c$ se encuentra en “Heat and Mass Transfer” de Incropera, página 803. Allí indica que el valor adecuado para esta aplicación es de 0.75
- τ tiene un valor de 0.9 según la tabla 4.3 del documento “Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo” de Nicolás Castilla.

- $I(t)$ es un dato experimental que se puede hallar con la ayuda de un piranómetro. Para el lugar donde se encuentra el secador solar, varía entre los 400 W/m^2 a los 1500 W/m^2.
- A_c se despeja posteriormente de la ecuación.
- M_c es la cantidad de materia a secar, que según necesidades será de aproximadamente 120 Kg.
- C_c no se puede determinar con instrumentos apropiados ya que no se manejan muestras orgánicas en los laboratorios de la facultad, sin embargo, se asume este valor como uno muy alto, en este caso, el calor específico del agua que es de 4180 J/Kg.
- T_c se mide directamente con un termómetro.
- T_{ch} se asume ya que por teoría, un secador solar puede incrementar la temperatura ambiente hasta en 40°C. Siendo así, se toma un valor de 45°C.
- h se encuentra de la siguiente forma:

$$h = h_{rc} + h_{cc} + h_{ec} \qquad (5)$$

En donde h_{rc} es el coeficiente de transferencia de calor radiativo de la placa absorbedora al fluido de trabajo, h_{cc} es el coeficiente de transferencia de calor convectivo de la capa de basura a la cámara, y h_{ec} es el coeficiente de transferencia de calor evaporativo de la capa de basura a la cámara.

Estos valores se calculan de la siguiente manera:

$$h_{cc} = \frac{K_v}{X} C(GrPr)^n \qquad (6)$$

$$h_{rc} = \frac{\varepsilon\sigma[T_1^4 - T_a^4]}{T_1 - T_a} \qquad (7)$$

$$h_{ec} = \frac{0.016 h_{cc}[P(T_c) - \gamma P(T_e)]}{T_c - T_e} \qquad (8)$$

Se definen entonces los coeficientes de las ecuaciones (6), (7) y (8).

De la ecuación (6) se tiene que:

- K_v es la conductividad térmica del aire húmedo y su valor es de 0.0235 $W/m^{o}C$ encontrado en el libro “Transferencia de calor” de J. P. Holman en su 8va edición, página 6.

- X es una dimensión característica que se expresa como el área sobre el perímetro, en este caso, de la abertura por donde pasa el fluido de trabajo.

- C y n son unas constantes a determinar que dependen del número de Grashof (Gr) y de Prandtl (Pr). Como se mencionó al principio del capítulo, Goyal y Tiwari desarrollaron este modelo experimentalmente para pimientos verdes, de allí se toman los valores de Grashof y Prandtl (página 228) que son $1{,}1 * 10^6$ y 2.8 respectivamente. Con esto se procede a buscar el valor de C y n los cuales fueron encontrados en el capítulo 10 del libro "Fundamentals of Heat and mass transfer" de C. P. Kothandaraman con un valor de 0.54 y 0.25 de nuevo, respectivamente.

De la ecuación (7) se tiene:

- ε es la emisividad de la superficie de la basura que se toma con un valor aproximado de 0.84 encontrado en tablas presentadas por la Academia Testo en Argentina. Se aclara que este valor es para hojas de plantas, pero por sus propiedades es el que más se le asemeja a los desechos orgánicos.

- σ es la constante de Stefan-Boltzmann que como se sabe, es de $5.670373 * 10^{-8}\ \frac{W}{m^{2º}K^4}$

- T_1 es la temperatura inicial que tiene la capa de basura que se asume con un valor de 12ºC.

- T_a es la temperatura ambiente que se asume también con un valor de 18ºC.

Por último, de la ecuación (8) se tiene que:

- γ es la humedad relativa que aproximadamente es de 72% en la ciudad de Bogotá D.C. según fuentes climáticas como el IDEAM.

- T_e es la temperatura del cielo y se expresa como

$$T_e = 0.0552 T_a^{1.5} \qquad (9)$$

- $P(T_c)$ y $P(T_e)$ son las presiones en función de la temperatura para lo cual se utiliza la ecuación de Antoine expresada como

$$\log_{10} P = A - \frac{B}{T + C} \qquad (10)$$

Gracias a bibliografía encontrada en el laboratorio de ciencias térmicas de la facultad tecnológica de la Universidad Distrital, se tienen los datos correspondientes de A, B y C presentados a continuación:

	A	B	C
mm Hg y ºC no absoluta	8,14019	1810,94	244,485
Pa y ºK absoluta	10,265093	1810,94	-28,665

Tabla 1. Coeficientes utilizados en la ecuación de Antoine

Teniendo claros todos los coeficientes de las ecuaciones, se procede a reemplazar los valores en las ecuaciones (5), (6), (7), (8), (9) y (10) para llevarlos a la ecuación (4) y obtener un área aproximada del secador solar para su respectiva construcción:

$$h_{cc} = 3.68506\ \frac{W}{m^2\ ºK} \qquad h_{rc} = 4.5583\ \frac{W}{m^2\ ºK} \qquad h_{ec} = -0.13331\ \frac{W}{m^2\ ºK}$$

$$h = 8\ \frac{W}{m^2\ ºK}$$

Siendo así, se procede a realizar el despeje adecuado de A_c como sigue:

$$[\propto_c \tau I(t)]A_c - h(T_c - T_{ch})A_c = M_c C_c \frac{dT_c}{dt}$$

$$A_c = \frac{M_c C_c \frac{dT_c}{dt}}{[\propto_c \tau I(t)] - h(T_c - T_{ch})} \qquad (11)$$

Y reemplazando los valores obtenidos anteriormente:

$$A_c = \frac{(120\ Kg)\left(4180\ \frac{J}{Kg ºK}\right)\left(\frac{(318{,}15 - 288{,}15)ºK}{3600\ s}\right)}{\left[(0.75)(0.9)\left(400\ \frac{W}{m^2}\right)\right] - 8\ \frac{W}{m^2\ ºK}(283{,}15 - 318{,}15)ºK}$$

$$A_c = 3.4591\ m^2$$

Ésta es el área que se utilizará para la construcción del secador solar.

Del modelo matemático desarrollado por Goyal y Tiwari, se encuentra otra ecuación bastante importante la cual muestra la masa evaporada dada por la siguiente expresión:

$$m_{ev} = 0.016 + \frac{h_c}{\lambda}[P(T_c) - \gamma P(T_e)]A_c t \qquad (12)$$

Donde λ es el calor latente de vaporización que se encontró con un valor de 2500 KJ/KgºK según “Colección de tablas, gráficas y ecuaciones de transmisión de calor” versión 3.5 de la Universidad de Sevilla.

Como se tienen los valores ya encontrados, se procede a reemplazar en la fórmula y así hallar teóricamente la cantidad de masa evaporada.

$$m_{ev} = 0.016 + \frac{3{,}68506\,\frac{W}{m^2\,ºK}}{2500000\,\frac{J}{Kg ºK}}[1409 - (0.72)(880)](3.4591\,m^2)(3600s)$$

$$m_{ev} = 14.1956Kg$$

Con estos datos se puede seguir a la siguiente parte de metodología la cual es la fase de diseño y fabricación.

3.2 Fase de diseño y fabricación

Como su nombre lo dice, se procederá a fabricar el secador solar dentro de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, facultad tecnológica. Es allí donde se realizarán las pruebas necesarias para comparar resultados experimentales con los teóricos y así, poder llegar a las conclusiones finales de la tesis de grado. El docente Camilo Arias asignó un espacio correspondiente para la instalación del secador solar, el cual se ubica encima del cuarto de motor de generación eléctrica de emergencia de la Facultad. Allí se encuentra también el secador solar de fresas y algunos otros proyectos de termodinámica como destiladores solares.

Uno de los éstos últimos estaba en malas condiciones, se propuso modificarlo y de allí obtener parte del secador solar. La propuesta fue aprobada y, del destilador solar, salieron dos “colectores” o fases del sistema con medidas de 80 cm de ancho por 154 cm de largo, por lo tanto se requirió una tercera parte de 142 cm de longitud por el mismo ancho para obtener un área total de 3.5 m^2 como se requiere según el modelo matemático.

Materiales	Medidas	Cantidad
Ángulos de acero	¾ ‘’	3
Lámina de acero calibre 20	142 cm x 90 cm	1
Tablas de madera	153 cm x 18 cm	4
	142 cm x 18 cm	2
Madera	18 cm x 8 cm	24
Tornillos para madera		24
Vidrios	154 cm x 42 cm	4
	142 cm x 42 cm	2
Malla de zaranda 5 x 5	150 cm	6

Tabla 2. Materiales utilizados para la construcción del secador solar.

Se procedió entonces a modificar los dos primeros colectores y fabricar el tercero en el taller de soldadura para, posteriormente, llevarlos a la terraza del cuarto de motor de generación eléctrica en donde se realizarían las pruebas correspondientes.



Figura No. 4. Secador solar terminado.

3.3 Fase de pruebas y funcionamiento

Posteriormente, fue necesario conseguir los desechos orgánicos suficientes para la realización de pruebas de funcionamiento del secador. Gracias a la colaboración de restaurantes ubicados alrededor de la Universidad fue posible reunir estos residuos fácilmente con un total de 69 Kg en tres días; sin embargo, después de esto, fue necesario un proceso de molienda de la basura, ya que éste ayuda a retirar un gran porcentaje de humedad de los desperdicios además de una mayor comodidad a la hora de introducirlos al secador solar.



Figura No. 5. Residuos orgánicos alimentarios molidos.

Después de la molienda de los desechos, se alcanzó un peso aproximado de 48 Kg, los cuales fueron dispuestos en el secador solar, en donde se midieron temperaturas internas en 3 tramos de éste cada 30 minutos hasta el tiempo total de secado de la basura.



Figura No. 6. Carga de los desechos orgánicos alimentarios en el colector.

Sin embargo, se realizaron antes las pruebas de secado para un muy pequeña parte de la basura molida con ayuda de un horno eléctrico y una balanza prestada por el laboratorio de física para poder determinar cuándo está seco el material según la teoría encontrada por la UNESCO (Marco teórico).



Figura No. 7. Secado en horno eléctrico a temperatura constante.

De allí se obtuvieron los siguientes resultados:

Cantidad de muestra a secar (P_f): 47,54 gr

Tiempo (min)	Peso (gr)
5	41.67
10	37.87
15	30.50
20	23.69
25	19.43

Tabla 3. Resultados prueba de humedad

Siendo así, se realiza el procedimiento dado en la Guía de secadores solares de la UNESCO, para determinar el peso que se obtendrá al tener un 1% de humedad en las muestras (H_s). De la ecuación (1):

$$H_f = \frac{47.54\ gr - 19.43\ gr}{47.54\ gr} * 100\% = 59.13\ \%$$

De la ecuación (2):

$$R = \frac{100\% - 59.13\%}{100\% - 1\%} = 0.412828$$

Reemplazando en (3):

$$P_s = 0.412828 * 47.54\ gr = 19.62\ gr$$

Es decir que en un caso especial, si se realizan las pruebas en el secador solar con una muestra inicial de 47.54 gr, después del secado, ésta tendrá un peso de 19.62 gr con un contenido de humedad de 1%. Trasladándolo a los 48 kilos en existencia que irán al secador se tiene que con un 1% de humedad el peso final será de:

$$P_s = 0.412828 * 48\ kg = 19.82\ kg$$

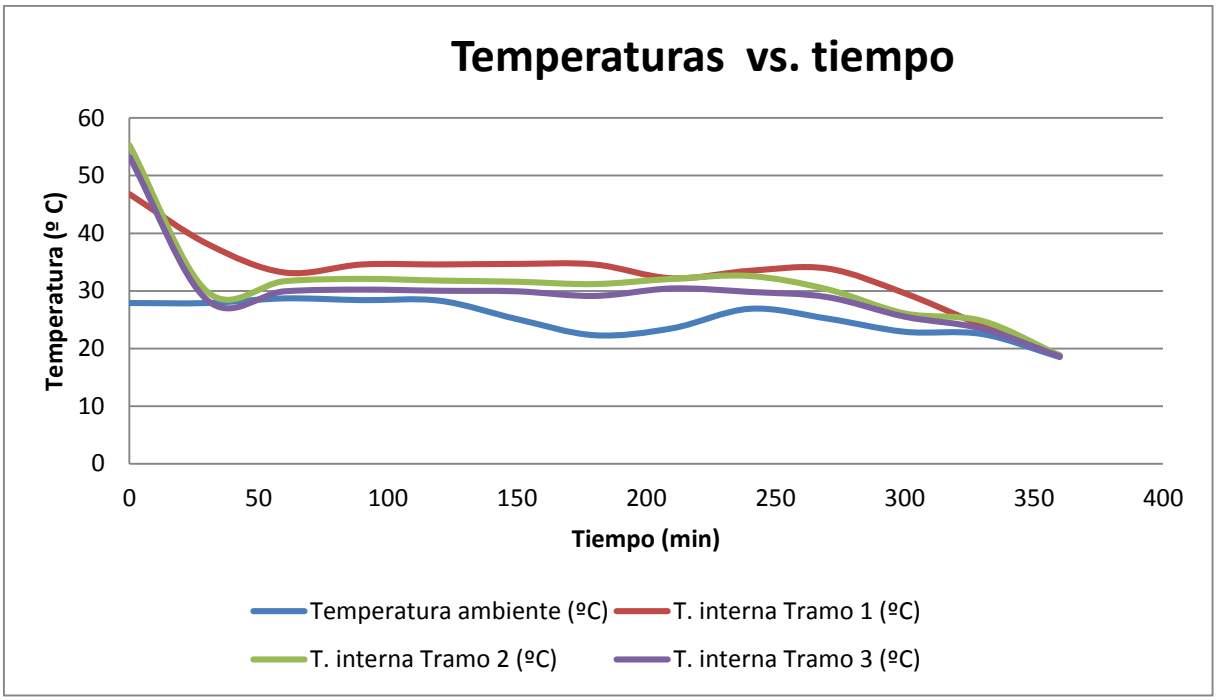
Sabiendo esto, se procede a realizar las pruebas correspondientes junto con la toma de datos que se registran en la siguiente tabla:

Día 1

Tiempo (min)	Temperatura ambiente (ºC)	Temp. interna Tramo 1 (ºC)	Temp. interna Tramo 2 (ºC)	Temp. interna Tramo 3 (ºC)
0	27.9	46.8	55.3	53.2
30	27.9	38.2	29.9	28.4
60	28.7	33.2	31.7	29.9
90	28.4	34.6	32.1	30.2
120	28.3	34.6	31.8	30
150	25.1	34.7	31.6	29.9
180	22.3	34.6	31.2	29.1
210	23.5	32.2	32.1	30.4
240	26.9	33.5	32.6	29.8
270	25.2	33.9	30.3	28.9
300	22.9	29.6	26.1	25.5
330	22.5	24	24.8	23.4
360	18.5	18.8	18.8	18.6

Tabla 4. Resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento, día 1.

Las pruebas iniciaron a las 11:00 am y como se puede observar, el pico de temperatura de 28.7 ºC se dio a medio día. Posterior a esto, hubo un descenso alrededor de las 2:00 pm, un incremento a las 3:00 pm y de nuevo un descenso mucho mayor hasta las 5:00 pm, hora de finalización del experimento. Todo esto, debido a la declinación solar en el lugar de prueba del secador solar.



Gráfica No 1. Temperatura ambiente e interna en tres los tres tramos del secador solar respecto al tiempo, día 1.

Se puede destacar que la temperatura interna del secador solar se mantiene casi constante con la carga adentro lo que indica un equilibrio de energía en forma de calor que no varía notablemente, exceptuando las horas de la tarde en donde la temperatura ambiente disminuye drásticamente debido a la declinación solar, que en el caso de las zonas tropicales, cuando ésta coincide con la latitud de una determinada zona, la radiación solar incide perpendicularmente a la superficie terrestre que hace que los Índices UV disminuyan de manera significativa, particularmente si se presentan condiciones de cielo despejado o parcialmente nublado.

Después de 6 horas de secado, se retiran los desechos para su respectivo pesaje con un total de 36 kg, es decir, que estos aún contienen humedad que se puede hallar con la ecuación (1) de la siguiente forma:

$$H_f = \frac{48\ Kg - 36\ Kg}{48\ Kg} * 100\% = 25\ \%$$

Por lo tanto se realiza un segundo día de pruebas con menor intensidad horaria para obtener el porcentaje de humedad deseado.

Día 2

Se realizaron unas modificaciones en cuanto a la posición del deshidratador solar ya que se colocó sobre unas mesas para que hubiese un flujo natural adicional de aire lo que beneficia de gran medida el secado.

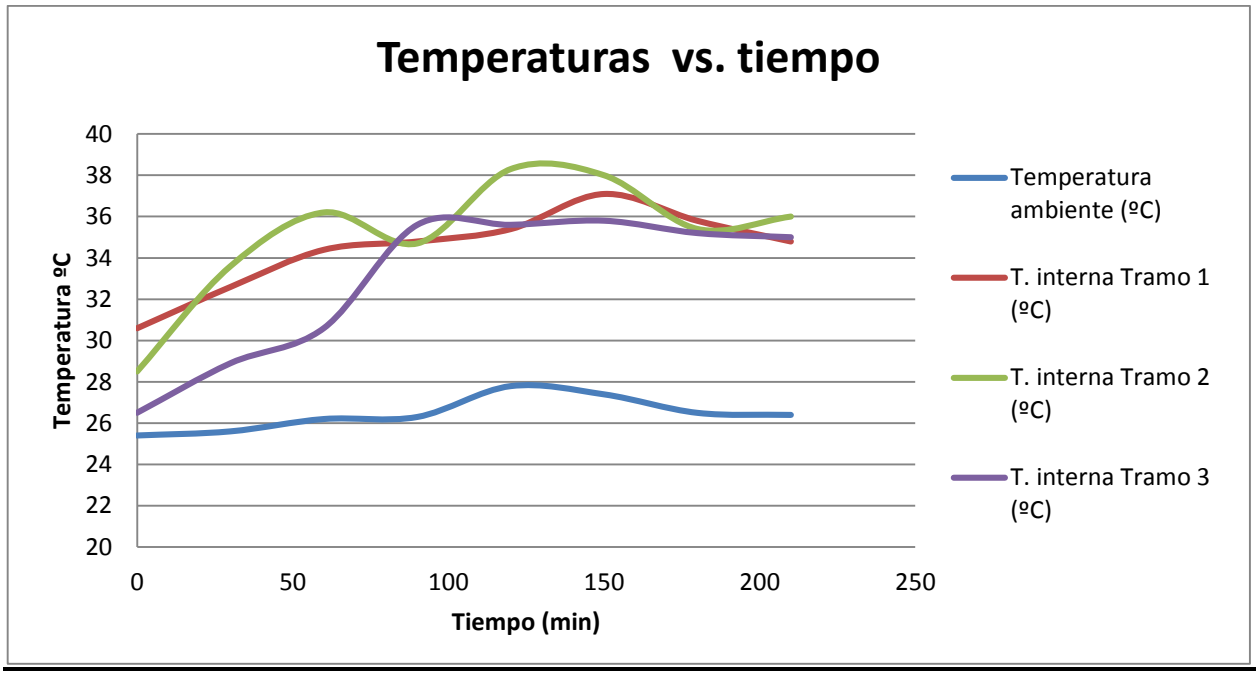


Figura No. 8. Acomodamiento del secador solar para el segundo día de pruebas.

Siendo así, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tiempo (min)	Temperatura ambiente (ºC)	T. interna Tramo 1 (ºC)	T. interna Tramo 2 (ºC)	T. interna Tramo 3 (ºC)
0	25.4	30.6	28.5	26.5
30	25.6	32.6	33.6	28.9
60	26.2	34.4	36.2	30.6
90	26.3	34.8	34.7	35.6
120	27.8	35.4	38.3	35.6
150	27.4	37.1	38	35.8
180	26.5	35.8	35.4	35.2
210	26.4	34.8	36	35

Tabla 5. Resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento, día 2.

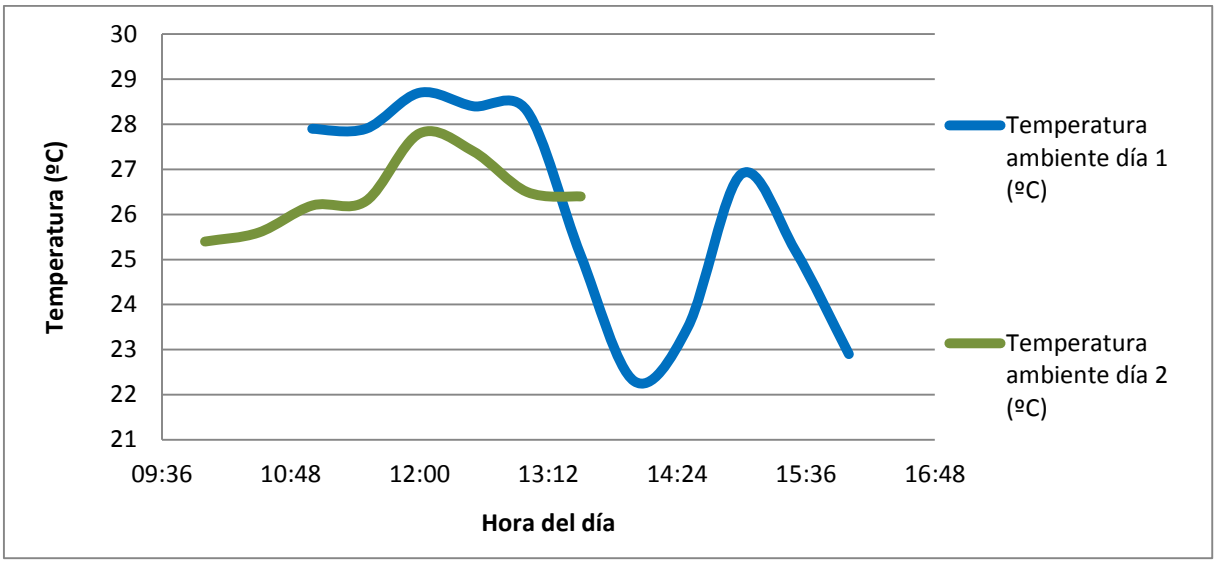


Gráfica No 2. Temperatura ambiente e interna en tres los tres tramos del secador solar respecto al tiempo, día 2.

Para este segundo día de prueba de secado, que empezó a las 10:00 am, se puede observar que la temperatura interna del secador solar está alrededor de 10 ºC por encima de la temperatura ambiente, esto debido a que los desechos, al tener un gran porcentaje de humedad, tienen una temperatura superficial e interna mucho menor a la del ambiente y a la del secador, lo que conlleva a que haya un equilibrio térmico dentro del sistema

Debido a que la temperatura ambiente estaba algo baja al inicio de la segunda prueba, la temperatura interna del secador también lo representaba, sin embargo, poco a poco se fue incrementando hasta alcanzar una continuidad como se puede observar en la gráfica. Después de esto, se obtuvieron los residuos con un porcentaje de humedad muy bajo (<1%) y una reducción de peso bastante grande, es decir, de 48 Kg que se tenían después de moler los desechos, quedan posterior al secado 21 Kg, lo que significa que se retiraron 27 Kg de agua.

Adicionalmente, se comparan las temperaturas ambientes del día 1 y 2 de pruebas:



Gráfica No 3. Comparación de las temperaturas ambientes de los dos primeros días de prueba.

Aquí se observa la diferencia de temperaturas ambiente entre ambos días de prueba donde indica que el pico de temperatura fue al medio día lo cual significa que en este momento se puede obtener la mayor respuesta y eficiencia del secador solar debido a la alta temperatura.



Figura No. 9. Desechos orgánicos alimentarios deshidratados.

Prueba No. 2

Se pudo realizar una prueba adicional con instrumentos de laboratorio más precisos para medir parámetros importantes como lo son radiación solar, velocidad del viento y temperatura superficial de la capa de basura. De nuevo se realizó el proceso de obtención, molienda y secado de la basura, pero, esta vez se realizó el secado en uno de los tramos del secador, por ende, la carga de basura fue menor.

Se recolectaron 23 Kg de basura que pasaron a ser 17 Kg después del proceso de molido, los cuales se colocaron en el secador para su respectiva prueba. Para la medición de la radiación solar incidente se necesitó un piranómetro; la velocidad del viento se halló con un anemómetro; para medir el peso de una pequeña parte de la basura se empleó una balanza digital; la temperatura superficial de la capa de basura se pudo determinar con una pistola infrarroja; y para las temperaturas ambiente e interna del secador solar se aprovechó el mismo termómetro utilizado en la prueba 1. Todos estos instrumentos de laboratorio fueron prestados tanto por el laboratorio de ciencias térmicas, como el laboratorio de física de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital.

Siendo así, se obtuvieron y organizaron los datos de la siguiente forma:

Día 1

Entrada							
Tiempo (min)	**Temp. Ambiente (ºC)**	**Radiación solar (W/m²)**	**Temp. Superficial (ºC)**	**Temp. Interna (ºC)**	**Vel. Viento (m/s)**	**Peso (gr)**	**Δ de pesos (gr)**
0	15.9	18.6	16.5	17.7	0.86	50	0
30	17.3	21	15.3	17.6	0.87	49.5	0.5
60	-	-	-	-	-	-	-
90	17.7	176	14.8	18.4	1.61	48.8	1.2
120	17.6	32.4	14.6	17.9	1.55	47.2	2.8
150	17.8	140.5	14.9	17.8	1.83	46.4	3.6
180	18.3	270.1	15.1	18.5	1.13	45.1	4.9
210	18.6	198.3	16.4	18.8	1.24	44.4	5.6
240	18	153.5	17.3	18.3	1.03	43.6	6.4
270	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 6. Resultados obtenidos de las prueba No. 2 de funcionamiento a al entrada del sistema, día 1.

Se puede observar que en este día, la radiación solar incidente estuvo muy por debajo de lo necesitado y se aclara que, en la tercera fila de la Tabla 10 no se tomaron datos ya que empezó a lloviznar; adicional, en la última fila de la mencionada tabla tampoco

se tomaron datos y se canceló la continuidad de la prueba ya que empezó a llover. Por esta misma razón, se necesitó de un día adicional para el secado de los desechos. Como la temperatura ambiente, la radiación solar y el peso de la basura se mantienen “constantes” a través del secador solar, es suficiente tomar solo una medición cada lapso de tiempo determinado. En la siguiente tabla entonces, se toma sólo la temperatura interna.

Medio	
Tiempo (min)	**Temperatura interna (ºC)**
0	17.8
30	17.6
60	-
90	17.7
120	17.6
150	17.8
180	18.5
210	18.6
240	18
270	-

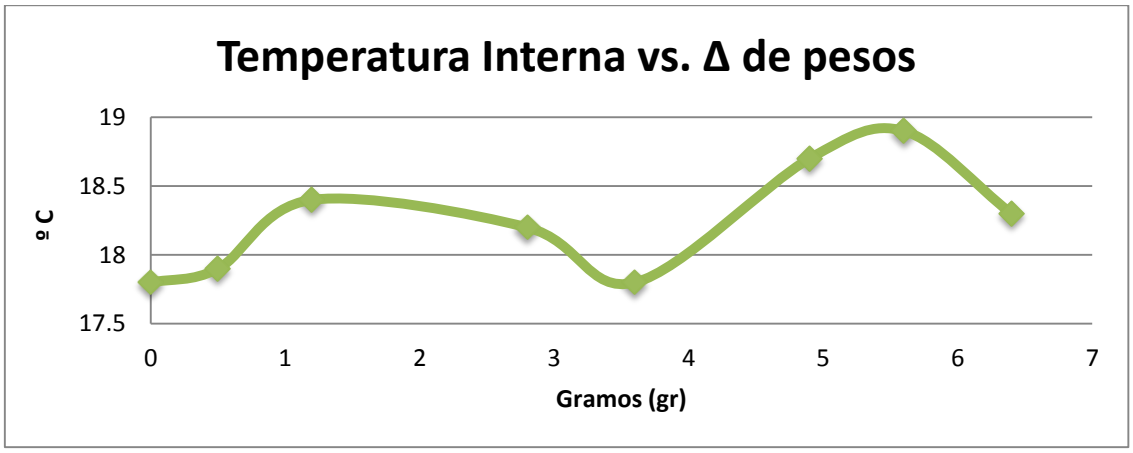
Tabla 7. Resultados obtenidos de las prueba No. 2 de funcionamiento en el punto medio del sistema, día 1.

Es importante conocer la velocidad del viento adentro del sistema, pero el anemómetro es bastante grande para ponerlo en medio de la cámara del secador solar, por eso se toman datos de entrada y salida del sistema recordando que hay un extractor que ayuda a que el flujo de aire sea alto.

Salida		
Tiempo (min)	**Temperatura (ºC)**	**V. Viento (m/s)**
0	17	1.42
30	16.3	2.32
60	-	-
90	16.2	2.48
120	16.5	2.63
150	16.6	2.88
180	17.1	2.66
210	17.3	2.89
240	17.1	3.01
270	-	-

Tabla 8. Resultados obtenidos de las prueba No. 2 de funcionamiento en la salida del sistema, día 1.

Se presentan las siguientes gráficas para comparar ciertos aspectos de la prueba en este día:



Gráfica No 4. Temperatura interna en el punto medio del secador con respecto a la variación de pesos, día 1.

Se puede observar que no hay una tendencia en la gráfica, sin embargo, el valor (alto o pequeño) de estos tres factores (radiación solar y temperatura) influyen en el valor del peso o en este caso específico, el valor de la diferencia de peso casi que de manera directamente proporcional.

Día 2

Las pruebas para este día comenzaron a las 9:30 am y se obtuvieron los siguientes resultados:

Entrada							
Tiempo (min)	**Temp. Ambiente (ºC)**	**Radiación solar (W/m²)**	**Temp. Superficial (ºC)**	**Temp. Interna (ºC)**	**Vel. Viento (m/s)**	**Peso (gr)**	**Δ de peso (gr)**
0	22.5	1674	17.1	23.2	1.52	42.4	1.2
30	21.2	1774	15.5	21.5	2.09	40.1	3.5
60	23.5	1704	17.4	24.4	2.86	37.4	6.2
90	25	1643	17.3	26.1	2.72	34.2	9.4
120	25.2	1176	17.2	26.4	2.04	32.4	11.2
150	24.3	118	17.2	25.3	1.82	30.5	13.1
180	24.6	1009	17.3	26.7	1.56	28.8	14.8
210	24.3	527	16.1	24.8	1.58	27.2	16.4
240	24.9	710	15.7	25.9	1.96	26.3	17.3
270	21.4	678	17.5	24.6	2.43	24.1	19.5

Tabla 9. Resultados obtenidos de las prueba No. 2 de funcionamiento en la entrada del sistema, día 2.

Como se puede observar, las condiciones atmosféricas estuvieron bastante favorables para la prueba de secado ya que hubo un alto flujo de aire y unas temperaturas ambientes óptimas.

Igual que el día de pruebas anterior, se toman los datos para el punto medio y salida del secador solar:

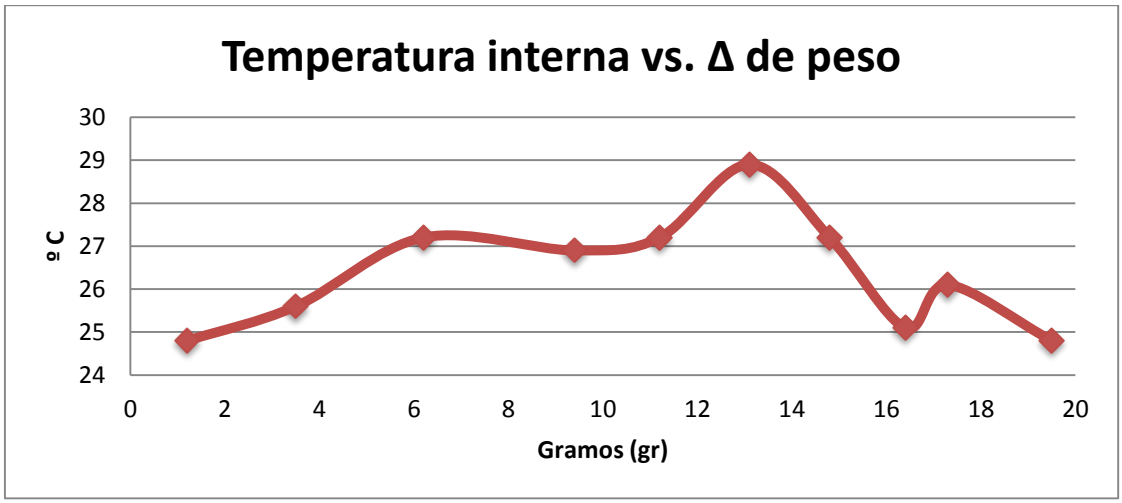
Medio	
Tiempo (min)	**Temperatura (ºC)**
0	24.8
30	25.6
60	27.2
90	26.9
120	27.2
150	28.9
180	27.2
210	25.1
240	26.1
270	24.8

Tabla 10. Resultados obtenidos de la prueba No. 2 de funcionamiento en el punto medio del sistema, día 1.

Salida		
Tiempo (min)	**Temperatura (ºC)**	**V. Viento (m/s)**
0	24	3.01
30	24.5	2.69
60	24.8	3.27
90	25.7	4.23
120	26	2.89
150	27.4	3.66
180	26.4	3.42
210	24	3.11
240	25.2	3.11
270	23.9	3.48

Tabla 11. Resultados obtenidos de la prueba No. 2 de funcionamiento en la salida del sistema, día 2.

Se proceden a realizar la correspondiente gráficas para su respectivo análisis, obteniendo:



Gráfica No 5. Temperatura interna en el punto medio del secador respecto a la variación de pesos, día 2.

Se puede ver en esta gráfica que el valor de la diferencia de pesos depende también del valor de temperaturas. Por ejemplo, un incremento de casi dos grados centígrados, sumado con el flujo de aire y la radiación incidente, hace que la diferencia de pesos sea más de dos gramos en algunos casos como se puede observar en la gráfica.

De igual modo, a pesar de que la radiación incidente es muy baja, hay una diferencia de pesos existente que nos indica que por otros factores influyentes como la velocidad del viento dentro del sistema y diferencia de temperaturas superficiales, se retira humedad de la capa de basura.

4. CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

El modelo matemático encontrado resultó ser viable en cuanto a diseño y fabricación ya que permitió identificar y posteriormente, encontrar todos los parámetros necesarios para la construcción del secador solar; sin embargo, no se obtuvieron todos los resultados deseados como el tiempo de secado que, teóricamente es de 4 horas y 41 minutos, mientras que experimentalmente se dio en alrededor de 8 horas. Igualmente, en los resultados teóricos se observa que se retirará aproximadamente 14 Kg de agua lo cual fue incierto ya que se retiró aproximadamente la mitad del peso después de la molienda (23 Kg). Estos errores de comparación entre teoría y mundo real se deben a múltiples aspectos, uno de ellos es la disposición de los desechos orgánicos ya que se vuelve complejo colocarlos de tal forma que quedara una capa uniforme de menos de 8 mm de espesor, ya que al estar bastante húmedos, no se dejan moldear fácilmente. Sin embargo, después del secado se observa que los desechos quedan con forma de pellets mucho más fáciles de manejar en tal caso de llevar a un posterior tamizado.

No se pudo recuperar la humedad total de los desechos al momento del secado solar, aunque con la diferencia de pesos se pudo determinar qué tanto porcentaje de humedad se retiró, sin embargo, en el proceso de molienda se pudo obtener una cantidad de agua (lixiviados) que están dispuestos a futuros estudios.

Se encontró también que, sin introducir los desechos orgánicos al secador solar, se obtenía una temperatura bastante alta (> 50 ºC), pero a la hora de introducirlos, la temperatura descendía (~30 ºC) lo que indica que se da un equilibrio térmico entre el deshidratador y los desechos orgánicos debido al diferencial de temperaturas entre la ambiente y la superficial de la capa de basura, que involucra el contenido de humedad de los desechos orgánicos alimentarios. Sin embargo, la temperatura interna dentro del secador solar se mantiene constante como se pudo observar según las gráficas 2, 3, 4, 6, 7 y 8.

Las pruebas se realizaron en la ciudad de Bogotá en épocas de calor intenso (alrededor de 25 ºC) gracias al fenómeno del niño que afecta el país; si se lleva este modelo de secador solar a ambientes donde se logren dar unas temperaturas más altas aún, la eficiencia del sistema mejoraría drásticamente, lo que significa menor cantidad de tiempo de secado e incluso mayor capacidad de masa a deshidratar.

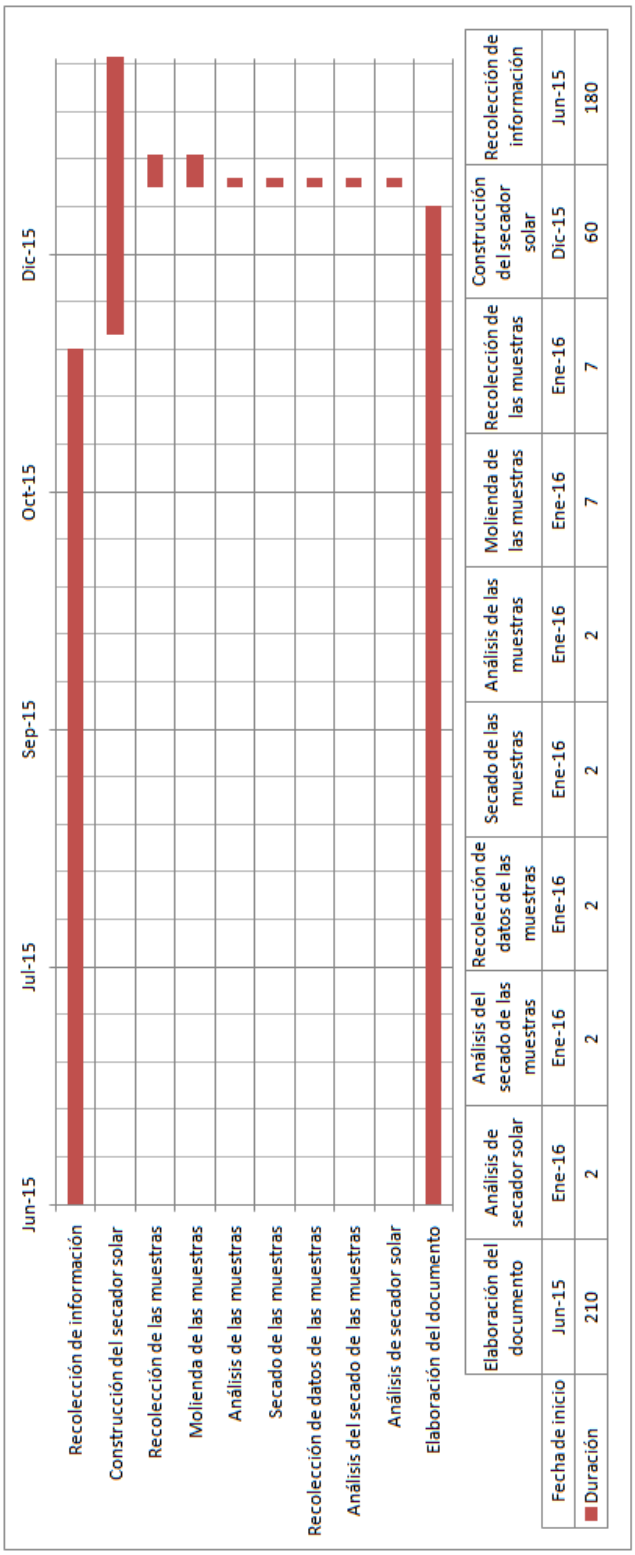
Al realizar una segunda prueba de secado, se utilizó una parte del colector solar y se obtuvieron resultados de secado de aproximadamente 8 horas con climas tanto deficientes como óptimos. Siendo así, una posibilidad adicional de mejorar el tiempo secado sería con una reducción de masa a deshidratar.

Quedaron, después de ambas pruebas de secado, alrededor de 30 Kilogramos de desechos orgánicos alimentarios deshidratados disponibles para quemar y realizar pruebas de análisis de gases, PCS, entre otros.

Es necesario un dispositivo de molienda más eficiente ya que el tiempo de triturado manual fue bastante grande (alrededor de 36 horas distribuidas en 4 días) gracias a que el molino de maíz tradicional no tiene una capacidad muy grande, tanto de cantidad como de molienda de producto.

Existe la posibilidad de mejorar este proyecto añadiéndole calor a través de gas natural, resistencias eléctricas o incluso, paneles solares; aumentando el flujo de aire que pasa a través del túnel; o combinándolo con el secador solar de fresas tipo armario disponible en la facultad tecnológica, todo esto para obtener un menor tiempo de secado de los desechos.

5. CAPÍTULO V: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES



	Elaboración del documento	Análisis de secador solar	Análisis del secado de las muestras	Recolección de datos de las muestras	Secado de las muestras	Análisis de las muestras	Molienda de las muestras	Recolección de las muestras	Construcción del secador solar	Recolección de información
Fecha de inicio	Jun-15	Ene-16	Ene-16	Ene-16	Ene-16	Ene-16	Ene-16	Ene-16	Dic-15	Jun-15
Duración	210	2	2	2	2	2	7	7	60	180

Gráfico No. 6. Cronograma de actividades

6. CAPÍTULO VI: PRESUPUESTO Y FUENTES DE FINANCIACIÓN

PRESUPUESTO GENERAL DEL PROYECTO		
Descripción	**Costo asociado**	**Fuentes de financiación**
Ángulos de acero	$ 80.000	Personal / Institucional
Lámina de acero calibre 20	$ 60.000	Personal / Institucional
Tablas de madera	$ 35.000	Personal
Madera	$ 2.000	Personal
Tornillos para madera	$ 3.000	Personal
Vidrios	$ 94.000	Personal
Malla zaranda 5 x 5	$ 61.000	Personal
Pintura	$8000	Personal
Transportes	$45.000	Personal
TOTAL	**$ 388.000**	

Tabla 12. Presupuesto general del proyecto.

7. CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA

Tiwari G. N., Solar Energy: Fundamenals, Design, Modelling and Applications. Editorial Narosa Publishing House. [2012] California, Estados Unidos.

Incropera P. Frank, DeWitt P. David., Fundamentos de transferencia de calor. Cuarta edición. Editorial Prentice Hall. [1999] Ciudad de México, México.

McCaughey Sames Charles, A pocket - book of Mechanical Engineering. Editorial Forgotten Books. 2013

UNESCO, Fundación Celestina Pérez de Almada, COSUDE: Agencia Suiza para el desarrollo y la cooperación. *Guía de uso de secaderos solares de frutas legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes.* [2005] Asunción, Paraguay.

Chávez Paredes Enrique, Jornada Técnica sobre Assecatge Solar de Vegta Materia. *Secado solar de alimentos.* [6 de noviembre de 2010] Manresa, Barcelona, España.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial. *Manual de construcción del deshidratador solar Aureliano Buendía.* Argentina

Agro Waste, Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación, Agrupal, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. *Secado Solar.* [2014] Unión Europea.

PhD. Nandwani S. Shyam. *Secadores solares en Costa Rica – Experiencia Personal.* [Julio de 2013]. Universidad Nacional de Costa Rica.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. *Deshidratación de frutas*. Disponible en http://www.corpoica.org.co/sitioweb/Archivos/Foros/CURSODESHIDRATACIONDEFRUTASCINATAIMA.pdf

Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de contaduría y administración. [03 de mayo de 2012] *Investigación de basura orgánica en el D.F.* Disponible en https://investigacion-2257-2012-2.wikispaces.com/file/view/Basura-Organica-DF_Eq3.pdf

Revista Crónica Mx. *Desarrollan novedoso sistema para deshidratar basura orgánica en casa.* [28 de abril de 2012]. Disponible en http://www.cronica.com.mx/notas/2012/656822.html

Revista Milenio. *Deshidratación, una alternativa tecnológica, limpia y eficiente.* [13 de julio de 2014]. Disponible en http://www.milenio.com/df/Deshidratacion-alternativa-tecnologica-limpia-eficiente_14_316908308.html

Greenpeace. *Nuevas tecnologías para el tratamiento de residuos urbanos: riesgos y ninguna solución.* [2011]. Disponible enhttp://noalaincineracion.org/wp-content/uploads/riesgos-tecnologias-residuos-urbanos.pdf

Dr. Vidal Santo Adrián, Dr. Velásquez Oscar Camilo, Dr. Iñaqui de la Cruz Roberto, Ing. Ortega Montiel Gerardo. *Diseño y construcción de un secador portátil.* [2012] Disponible en: http://www.uv.mx/personal/avidal/files/2013/06/Secador-Solar.pdf

Universidad Nacional de Educación a Distancia. *Gestión y tratamiento de los residuos urbanos. Madrid, España.* [2013] Disponible en http://www.uned.es/biblioteca/rsu/pagina4.htm#Cabecera

Caracol Radio. *De las 27 mil toneladas de basura que genera Colombia sólo se recicla el 13 %: Minvivienda.* [20 de septiembre de 2012] Disponible en http://www.caracol.com.co/noticias/actualidad/de-las-27-mil-toneladas-de-basura-que-genera-colombia-solo-se-recicla-el-13--minvivienda/20120928/nota/1769910.aspx