

Información Importante

La Universidad de La Sabana informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea de la Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad de La Sabana.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento para todos los usos que tengan finalidad académica, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le de crédito al documento y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, La Universidad de La Sabana informa que los derechos sobre los documentos son propiedad de los autores y tienen sobre su obra, entre otros, los derechos morales a que hacen referencia los mencionados artículos.

BIBLIOTECA OCTAVIO ARIZMENDI POSADA
UNIVERSIDAD DE LA SABANA
Chía - Cundinamarca



UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE SECADO PARA LA DESHIDRATACIÓN DE
RESIDUOS SÓLIDOS DE ORIGEN DOMÉSTICO

Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Químico¹ e Ingeniero
Industrial²

JOSSIE EMMANUEL UMBARILA PÉREZ¹
DAVID ERNESTO SALGADO SALGADO²

Diana Milena Caicedo Concha
Profesor Director

María Fernanda Gomez Galindo
Profesor Co-Director

2014
Chía Colombia

*Dedicado a nuestras familias por el constante apoyo,
y a Dios por tan enriquecedora experiencia.*

Agradecimientos

Nuestros agradecimientos son para aquellas personas que confiaron en nuestras capacidades intelectuales, por medio de consejos, compañía y apoyo en este año y medio de realización de este proyecto.

Un especial agradecimiento a la Doctora **Diana Milena Caicedo Concha**, por su constante paciencia, confianza, guía, amabilidad y apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Gracias también a la Doctora **María Fernanda Gomez Galindo** por disposición en el proceso de elaboración de la tesis.

Al profesor **Alfonso Bermeo Muñoz** por el consejo de la implementación de QFD en el desarrollo del diseño.

A la Universidad de La Sabana y todas sus dependencias en particular a la Facultad de Ingeniería por tan valiosa tutela durante valiosos años de nuestras vidas.

Jossie Umbarila
Ingeniería Química

David Salgado
Ingeniería Industrial

Índice general

Agradecimientos	II
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
Abreviaturas	X
Resumen	XI
1. Introducción	1
2. Justificación	3
3. Estado del arte	5
3.1. Secado de residuos sólidos de origen doméstico	5
3.2. Precedentes de diseño para el secado de residuos in situ	7
4. Marco Teórico	10
4.1. Despliegue de la función de calidad	10
4.2. Consideraciones para el diseño de un equipo de secado	11
4.3. Ensayos de tensión- deformación	12
4.4. Fundamentos de transferencia de calor para el calentador	14

4.4.1.	Calentamiento de aire por convección forzada en ductos circulares	15
4.4.2.	Calentamiento por conducción en una pared cilíndrica . . .	17
4.4.3.	Perdidas de calor por convección y radiación	17
4.5.	Calentamiento Eléctrico	19
4.5.1.	Calentamiento por medio de resistencia eléctrica	20
4.6.	Control de temperatura on-off	22
4.7.	Viabilidad económica preliminar	23
5.	Objetivos	25
5.1.	Objetivo General	25
5.2.	Objetivos Específicos	25
6.	Metodología	27
6.1.	Bosquejo de un sistema de secado por metodología QFD	27
6.2.	Diseño del sistema de almacenamiento de residuos sólidos	29
6.2.1.	Metodología para la realización de las pruebas tensión- deformación	29
6.2.2.	Matriz experimental para los ensayos con las probetas plásticas	30
6.3.	Desarrollo del sistema de calentamiento de aire	31
6.3.1.	Definición de los parámetros de calentamiento del aire por convección forzada interna	31
6.3.2.	Definición de los parámetros de calentamiento del ducto por conducción	33
6.3.3.	Definición de los parámetros de calentamiento del ducto por pérdidas de calor	33
6.3.4.	Definición de los parámetros de la resistencia	34
6.4.	Definición de parámetros para el diseño del circuito de control . . .	36
6.5.	Diseño de los Accesorios	36

6.6.	Acople de los diferentes elementos del sistema de secado	37
6.7.	Evaluación preliminar técnico y económica del equipo de secado	38
7.	Resultados	39
7.1.	Resultado de implementación QFD	39
7.2.	Diseño de las diferentes secciones que componen el sistema de secado	40
7.2.1.	Bolsa plástica	40
7.2.2.	Sistema de calentamiento de aire	44
7.2.3.	Sistema de calentamiento eléctrico	46
7.2.4.	Diseño del circuito de control	48
7.2.5.	Diseño de Accesorios	52
7.3.	Evaluación técnico y económica preliminar	54
7.3.1.	Funcionamiento técnico del equipo de secado	54
7.3.2.	Presupuesto inicial y ejecución	55
7.3.3.	Determinación del costo de mano de obra	56
7.3.4.	Precio de coste completo del equipo de secado	57
8.	Análisis de resultados	59
8.1.	Discusión de la metodología QFD	59
8.2.	Discusión del sistema de almacenamiento	60
8.3.	Discusión del sistema de calentamiento eléctrico	61
8.4.	Sistema de control	61
8.5.	Accesorios	62
8.6.	Evaluación económica preliminar	63
9.	Conclusiones	64
10.	Recomendaciones	66
	Referencias	67

Anexos	70
A. Despliegue de la función de calidad (QFD)	74
B. Sistema de calentamiento	78
C. Sistema de control	80

Índice de figuras

4.1. Curva estándar esfuerzo deformación	13
4.2. Coste completo de un producto	24
6.1. Boceto del sistema de secado	28
6.2. Probeta para los ensayos de tensión-deformación	30
6.3. Diagrama de procesos utilizado para conocer las especificaciones del tubo en el calentador eléctrico	32
6.4. Diagrama de procesos utilizado para conocer la temperatura exterior del tubo	34
6.5. Diagrama de procesos utilizado para conocer las dimensiones del aislante	35
7.1. Esquema final del sistema de secado diseñado	40
7.2. Diseño de la bolsa plástica con sus respectivas medidas en centímetros	43
7.3. Perfil de temperatura a lo largo del tubo de calentamiento	45
7.4. Perfil de temperatura radial del tubo de cobre	45
7.5. Perfil de temperatura radial del asilante	46
7.6. Estructura del sistema de calentamiento	48
7.7. Circuito del Sensor	49
7.8. Circuito de Amplificador	50
7.9. Circuito de Comparación	50
7.10. Circuito del Actuador	51

7.11. Trayecto del flujo del aire por el sistema de calentamiento hasta la bolsa	52
7.12. Estructura del sistema de recolección de lixiviados, medidas en cm.	54
1. Fotografía del equipo de secado perfil frontal	71
2. Fotografía del sistema de control	72
3. Fotografía posterior del equipo de secado	73
A.1. Recolección y análisis de las necesidades y expectativas del cliente.	75
A.2. Definición del equipo, en términos de requerimientos de producción	76
A.3. Definición de los componentes.	77
B.1. Hoja de cálculo para la temperatura interna del tubo	78
B.2. Hoja de cálculo para el perfil radial de temperatura en el tubo de cobre	78
B.3. Hoja de cálculo para las dimensiones mínimas del aislante	79
C.1. Primer diagrama del sistema de control de temperatura	80

Índice de tablas

6.1. Matriz experimental para los ensayos de tensión deformación. . .	30
7.1. Promedio de esfuerzo y desviación estándar para cada material plástico	41
7.2. Análisis de los efectos independientes y conjuntos de las varia- bles temperatura y diámetro de agujero para cada material	41
7.3. Matriz de decisión por pesos y resistencias	42
7.4. Comparación de las temperaturas mínimas de tubo de cobre en largos y en diferentes diámetro	44
7.5. Resumen del presupuesto ejecutado	56
7.6. Costo mensual para un operario de perfil técnico	57
7.7. Resumen de toma de datos de tiempo de producción	57
7.8. Cálculo de tiempo aproximado de producción de cada unidad de sistema de secado de residuos sólidos de origen domestico . .	58
7.9. Cálculo del componente del costo para la fabricación de una uni- dad de sistema de secado de residuos sólidos	58

Abreviaturas

Principales abreviaturas utilizadas en este documento:

in situ	En el sitio.
Nu	Nusselt.
offset	Diferencia del valor respecto al set point.
PEAD	Polietileno de alta densidad.
PEBD	Polietileno de baja densidad.
PP	Polipropileno.
PU	Poliuretano.
PVC	Policloruro de vinilo
QFD	Despliegue de la función calidad.
RSD	Residuos sólidos de origen domestico.
setpoint	Valor deseado.
UAESP	Unidad administrativa especial de servicios públicos.

Resumen

Este proyecto busca conocer la viabilidad preliminar técnico y económica en la construcción de un prototipo de equipo de secado para la deshidratación de residuos sólidos domésticos.

Las razón principal para su implementación surge de la necesidad de disminuir los costos de transporte de residuos sólidos de origen domestico, hacia los rellenos sanitarios en Colombia originados por el alto contenido de agua presente en los residuos.

El equipo de secado diseñado cuenta con un sistema de calentamiento de aire para una mayor eficiencia en la deshidratación, complementado con un sistema de control de temperatura, un sistema de almacenamiento de RSD y el acople de los accesorios necesarios para determinar las variaciones de masa de estos residuos.

Se empleo el despliegue de la función de calidad (QFD) como metodología para conocer los requerimientos más importantes del sistema de secado, luego se desarrollo cada sección del equipo por separado, se acoplaron y se realizó una evaluación preliminar técnico y económica.

El principal resultado es que el equipo es técnicamente funcional, y esta en condiciones de realizar la deshidratación de los RSD, la evaluación económica determinó que es posible disminuir el costo de fabricación suprimiendo algunos componentes electrónicos; la operación del equipo en condiciones reales permitirá determinar la eficiencia real del equipo.

Capítulo 1

Introducción

Los RSD (Residuos sólidos de origen domestico) son residuos desechados por las unidades familiares en el área urbana, estos residuos son desechados en plantas integrales, rellenos sanitarios, botaderos comunes, y en ninguna coyuntura se presenta un adecuado tratamiento para estos residuos. (Tchobanoglous, Theisen, y Vigil, 1994)

En los países desarrollados existe una normativa de obliga a las empresas a hacerse responsable de los residuos que emiten sus consumidores, es por eso que se encuentra empresas que tratan los desechos de todo tipo, en especial los residuos orgánicos, lo cual ha generado inversión en la construcción de equipos especializados en estos residuos. (Ahmed Shafiul Azam y Ali Mansoor, 2004)

En los países en vía de desarrollo como Colombia, se desecha una gran cantidad residuos orgánicos a la basura sin una previa separación en la fuente, lo que provoca que muchos residuos reciclables, sean deteriorados debido a su cantidad de humedad, y por lo tanto sean inaprovechados para generar un retorno a la cadena logística de la producción de estos materiales. (UAESP Unidad administrativa especial de servicios públicos, 2011)

Por lo tanto se plantea la posibilidad de construir un equipo innovador para reducir, este contenido de humedad y posiblemente salvaguardar estos re-

siduos reciclables y orgánicos, por medio del un sistema de secado *in situ*, en áreas urbanas; al implementar este sistema, disminuiría la cantidad de residuos que son desalojados por la empresa de alcantarillado de la respectiva ciudad, además de reducir la cantidades de lixiviados y gases que se obtienen en los lugares de desecho.

La propuesta del sistema de secado incluye considerar algunas consideraciones de deshidratación que se pueden obtener para la construcción de un prototipo de equipo de secado, como son la generación de lixiviados, un sistema de flujo de aire adecuado, complementado con un sistema de calentamiento de aire por calentamiento eléctrico; un contenedor apto donde residan los RSD por donde entre el flujo de aire de manera equitativa, un sistema de recolección de datos que permita conocer las posibles variaciones de masa de los RSD por efecto del secado.

Nuestro interés se presenta en realizar una evaluación técnico y económica preliminar del prototipo de secado con el fin de conocer si el equipo construido esta condiciones de funcionar para realizar el secado de los RSD.

Para la construcción del equipo de secado se implemento el despliegue de la función de calidad (QFD) para conocer cuales son las secciones del equipo más relevantes para construir y con que propiedades pueden ser construidas, esta implementación permitió describir una metodología para la construcción de estas secciones y saber cuales eran los requerimientos en el sistema de calentamiento, en el sistema de control, en el sistema de recolección de lixiviados, en el contenedor de los RSD, y en la configuración que se desarrollo para conocer las posibles variaciones de masa en los RSD.

Al final se realizo la respectiva evaluación técnica de cada parte del prototipo, considerando los costos de fabricación y sus respectivos tiempos, también, para realizar la evaluación económica del prototipo; este proyecto incluye la aplicación de conocimientos interdisciplinario en ingeniería química e ingeniería industrial.

Capítulo 2

Justificación

En Colombia el 92% de los residuos sólidos domésticos son dispuestos en rellenos sanitarios, el 1,3% en plantas integrales, y el restante en sitios inapropiados como botaderos a cielo abierto, enterramientos, cuerpos de agua y quemas. (Superintendencia de servicios públicos domiciliarios, 2011)

En la mayoría de los casos los residuos llegan a los rellenos sanitarios sin un proceso de separación en la fuente y con un contenido importante de materiales orgánicos. Una vez los residuos son dispuestos se lleva a cabo un proceso de degradación no controlado que produce lixiviados los cuales se pueden transportar a través de los suelos y contaminar cuerpos de agua.

Según la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (UAESP Unidad administrativa especial de servicios públicos, 2011) los restos alimenticios son los que más favorecen la producción de lixiviados debido a su alto contenido de humedad, el 92% del contenido de humedad de un residuo proviene del material alimenticio, ya que constituyen aproximadamente el 60.58% en peso de los residuos.

Esto es una consideración importante ya que el contenido de los residuos domésticos de la ciudad (67,18%) supera los rangos óptimos recomendados (50%- 60%) (Tchobanoglous y cols., 1994)

En el 2012 el distrito pagó a las empresas prestadoras del servicio de recolección de basuras aproximadamente \$280.644 millones de pesos (Arrieta, 2013) por la disposición de alrededor de 860.000 toneladas, lo que sugiere una tarifa por disposición final de aproximadamente \$ 326.330 pesos por tonelada. Más de la mitad de este pago es causado por la disposición de agua en los rellenos sanitarios.

Lo anterior justifica la conveniencia de reducir el contenido de humedad de los residuos *in situ* (en la fuente). Una operación para eliminar la humedad, ampliamente utilizado en la industria alimenticia, es el secado con aire que se lleva a cabo en equipos especializados. Por lo tanto se propuso el diseño de un equipo de secado para la deshidratación de residuos sólidos de origen doméstico simulando condiciones *in situ*.

Los resultados de este estudio podrían aportar en la disminución de los costos del transporte de los residuos sólidos al relleno distrital, disminuir los tiempos asociados con la operación de recolección y disposición y disminuir la generación incontrolada de lixiviados y gases en el relleno sanitario. Igualmente, disminuiría los malos olores, la generación de humedad, el aumento de temperatura y la reproducción de moscas en el hogar.

El diseño de este sistema propone construir secciones de un equipo de secado como un sistema de control de temperatura, calentador eléctrico para el aire, un sistema de flujo de aire adecuado para el secado, el contenedor apropiado para este tipo de desechos y los accesorios aptos para realizar el secado.

Capítulo 3

Estado del arte

En esta sección se discuten los antecedentes de deshidratación de residuos sólidos de origen domestico y el diseño de equipos para la deshidratación de residuos sólidos de cualquier origen; en la primera parte los ensayos de deshidratación de residuos sólidos de origen domestico se realizaron en reactores industriales, y la segunda parte, se presentan algunos proveedores de equipos para el tratamiento de residuos sólidos de origen industrial, además se discute el diseño del equipo realizado en la universidad Politécnica Nacional de Atenas para residuos domésticos orgánicos. El valor agregado del equipo presentado en este documento, es el diseño del equipo de secado para la deshidratación de cualquier tipo de residuos sólidos de origen domestico *in situ* , idea que hasta la fecha no se ha desarrollado por completo.

3.1. Secado de residuos sólidos de origen doméstico

El proceso de secado de los desechos sólidos orgánicos no ha sido suficientemente estudiado (Adani, Baido, Calcaterra, y Genevini, 2002). Adani y cols. (2002) llevaron a cabo los primeros experimentos usando un reactor de 148 L en el que realizaron experimentos de secado a tres diferentes temperaturas: 70°C,

60°C y 45 °C bajo condiciones controladas de flujo de aire.

El contenido de humedad inicial de los desechos fue de 410 g de agua por Kg de muestra y encontraron que la mejor deshidratación fue cuando se operó el reactor a 70°C, pero generó un residuo no adecuado para ser utilizado como combustible. En la prueba a 60°C encontraron buena remoción de humedad y algunas zonas del residuo secado útiles como combustible. En los experimentos a 45°C no se alcanzaron buenos niveles de deshidratación, pero se generó un residuo útil como combustible.

Adani y cols. (2002) observaron que la degradación de los RSD en los elementos químicos que lo conforman y el proceso de secado están inversamente correlacionados, ya que encontraron que el secado rápido de los RSD da como resultado degradación lenta, en comparación a la degradación que puede sin la operación de secado. Adicionalmente Adani y cols. (2002) reportaron la importancia de girar los residuos dentro del sistema de secado e inconvenientes operacionales asociados a gradientes de temperatura y heterogeneidad en la distribución de humedad cuando el flujo de aire se conservaba en una sola dirección a temperatura ambiente.

Como respuesta Sugni, Calcaterra, y Adani (2005) llevaron a cabo experimentos para estudiar los gradientes de humedad y temperatura en el proceso de secado a una temperatura de 45°C, cambiando la dirección de flujo de aire periódicamente y dividiendo los RSD en tres capas. Sugni y cols. (2005) utilizaron un reactor con la misma capacidad del reportado por Adani y cols. (2002) de 148 L con muestras de residuos sólidos sin separación en la fuente. Los resultados obtenidos de RSD aptos para utilizarse como combustible fueron más bajos que los que se obtuvieron en el estudio de Adani y cols. (2002), debido a una menor temperatura de operación. Sin embargo Sugni y cols. (2005) encontraron que la adición de aire mediante un flujo desde la parte baja del residuo elimina las marcadas diferencias de temperatura dentro del residuo favoreciendo la homogeneidad.

3.2. Precedentes de diseño para el secado de residuos *in situ*

El diseño de equipos para el secado de residuos se ha estudiado debido a obligaciones legales que imponen los gobiernos a empresas como restaurantes, mercados, almacenes e industria alimenticia, generalmente estos gobiernos proceden de economías desarrolladas, donde el cumplimiento de la ley es mucho más desarrollada y exigente que en otros países (Ahmed Shafiul Azam y Ali Mansoor, 2004). Esto ha impulsado al sector privado a innovar en el desarrollo de equipos de secado de residuos industriales para satisfacer estas obligaciones legales, se ha propuesto estimular una relación público-privada para no afectar a la industria ni al ciudadano por un mal manejo de residuos.

Las siguientes empresas son algunas proveedoras de equipos de secado de residuos sólidos.

- ReSource® de Australia.
- GOBI DRYER ® de Reino Unido.
- VANDENBROEK Internacional ® de Países Bajos.
- HUBER Solutions ® de Alemania.
- Wright Tech Systems Inc ® de Canada.

Estas empresas realizan equipos industriales que se utilizan en rellenos sanitarios, restaurantes y empresas alimenticias pero no para uso doméstico; la primera empresa en diseñar un sistema de secado de residuos sólidos para uso industrial fue Vandebroek Internacional, ya que en el año 1948 empezó a desarrollar equipos de secado para residuos de comida; en el año de 1987, en el estado de Carolina, se empezaron a utilizar equipos *in situ* para la producción de biogas, en lugares que contarán con granjas y campos abiertos, para

ello utilizaron sistemas de digestión con calentamiento en corriente de agua y obtuvieron una eficiencia del 55% para retirar la humedad del residuo, dando a lugar productos como fertilizantes. (Environmental Protection Division, 2011).

La universidad Politécnica Nacional de Atenas desarrolló el primer equipo con posibilidad de operar *in situ* en áreas urbanas para eliminar el contenido de humedad al 50%, durante un periodo de 8 horas con costos de mantenimiento y de operación relativamente bajos, arroga un producto apto para ser utilizado como combustible, sin riesgos patológicos y con posibilidad de utilizar el remanente del secado en la producción de biodiesel.

El equipo diseñado por National Technical University of Athens (2012) posee un contenedor cerámico que opera de 70 a 80°C, una cesta para la Colección de residuos con capacidad de 3 Kg, un filtro de carbón activo que se coloca en la parte superior del equipo para disminuir los malos olores que afecten al usuario, una tapa que se utiliza cuando el equipo esta en operación y una cámara de calefacción, diseñada para crear las condiciones adecuadas para el secado

National Technical University of Athens (2012) indica que el equipo diseñado se debe operar en un área de secado despejado para evitar las incomodidades, sin embargo, este equipo solo admite desechos orgánicos, no opera con otros materiales, su periodo de trabajo es de 8 horas, es de una capacidad de 5 litros y deshumedece aproximadamente la mitad del material, Al final del secado se genera un producto apto como combustible, y sin riesgos patológicos.

Actualmente National Technical University of Athens (2012) se esta elaborando experimentos de investigación en productos de valor agregado como materiales que sirven como fuentes de energía verdes para la producción de bio-combustible, biodiésel y Compost; el costo de mantenimiento del dispositivo y de operación es relativamente bajo (National Technical University of Athens, 2012)

En el proyecto presentado en esta tesis, se diseño un equipo que permite

secar cualquier tipo de RSD mezclado, el fundamento que nos permite operar con todos los RSD mezclados recae en la distribución de los componentes del equipo de secado, ya que el calentador de aire se encuentra separado del contenedor, reduciendo el riesgo de avería, en comparación con el equipo registrado por (National Technical University of Athens, 2012) donde este elemento se encuentra en contacto con los RSD.

Capítulo 4

Marco Teórico

En este capítulo se revisarán los siguientes temas; primero el despliegue de la función de calidad como fundamento básico para el diseño de un producto, en la segunda sección se discutirán las consideraciones necesarias para el diseño de un equipo de secado, posteriormente se detallarán los conceptos de los ensayos de tensión deformación para el recipiente o contenedor, después se tratarán los fundamentos necesarios de transferencia de calor para el sistema de calentamiento eléctrico, continuando con una revisión de los principios de un sistema de control y concluyendo con los conceptos aplicados cálculo de rentabilidad para una evaluación económica preliminar del prototipo.

4.1. Despliegue de la función de calidad

El Despliegue de la función de calidad o QFD por sus siglas en inglés (Quality Function Development), es una metodología de diseño de productos y/o servicios (p&s) que busca a través de una secuencia de pasos iterativos, traducir las necesidades específicas de nuestro cliente objetivo, en requerimientos de p&s, de tal manera que durante el proceso de diseño, se pueda desarrollar el concepto del producto y todas sus características técnicas, de acuerdo a los

recursos disponibles, sin perder de vista los intereses del cliente objetivo, ni la relación entre estos y los elementos que componen el producto.

La ejecución de la metodología parte del cliente, de quien se identifican las necesidades a suplir, y la importancia que cada necesidad tiene sobre las demás. Estos requerimientos iniciales se pueden definir como el *¿Qué?*, es decir toda necesidad a satisfacer y que generalmente es cualitativa; posteriormente se identifican satisfactores o *¿Cómo's?* para cada necesidad, buscando que cada *¿Cómo?* sea lo más cuantitativo posible, para definir el *¿Cuánto?*; de esta manera una necesidad se convierte en un requisito de producto.

El carácter iterativo de la metodología recae en la posibilidad de pasar los *¿Cómo's?* identificados a *¿Qué's?*, para identificar satisfactores más específicos a cada necesidad y concluyendo con los parámetros de los componentes específicos del producto.

4.2. Consideraciones para el diseño de un equipo de secado

Se define secado como la eliminación humedad o agua de una sustancia por medio de una corriente de gas, que generalmente es aire, en este proceso involucra la transferencia de calor por evaporación del líquido y la transferencia de masa del líquido y vapor en la superficie del sólido, estas condiciones determinan las características del secador como: propiedades físicas del material, velocidades de flujo, calidad del producto y recuperación del rechazo producido.

Los residuos sólidos de origen doméstico son física, química y biológicamente inestables, esto se debe a que los RSD son heterogéneos, pueden variar drásticamente sus propiedades de acuerdo al desecho generado, por ejemplo el valor de la densidad está en 42 a 131 kg/m^3 (Tchobanoglous y cols., 1994),

por lo que se hace impreciso seleccionar un tipo de secador exacto.

Como los residuos sólidos contienen un porcentaje de humedad de 55% a 85%, según Tchobanoglous y cols. (1994), el equipo de secado *in situ* que se presenta en este documento, es para un sistema de secado en lotes, ya que continuo sería inviable debido a que no es posible conocer las curvas de secado de los RSD.

Según lo indica (Treybal y Rodríguez, 1980) el secado por lotes es una operación relativamente cara, por lo que se limita a operaciones a pequeña escala, a plantas piloto y a trabajos de investigación, la transferencia de calor mejorará cuando el aire es precalentado, estas características se adaptan a los RSD por su heterogeneidad física.

Los componentes de un sistema de secado lotes incluyen los siguientes elementos:

1. Recipiente o contenedor: donde se alojaran los residuos sólidos de origen domestico
2. Sistema de flujo de aire: El recorrido que efectuará el aire para realizar el secado
3. Calentador : Para el aire cuando se efectúa el secado a temperaturas mayores a la temperatura ambiente.
4. Un sistema de control para el calentador con lo que se obtendrá una temperatura del aire estable.
5. Un sistema de recolección de lixiviados generados por el secado.

4.3. Ensayos de tensión- deformación

Los plásticos son materiales poliméricos utilizados para transportar y empaquetar mercancía y objetos de valor, ellos repelen la humedad y la actividad

microbiana y son capaces de soportar líquidos, sin embargo cada plástico posee diferentes propiedades mecánicas de resistencia a una fuerza que ofrece una carga.

Los ensayos de tracción miden la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada, (Askeland y Phulé, 2004) son aplicables a todo tamaño y formas dependiendo del material, experimentalmente se fabrica una probeta del material, se coloca en una maquina de pruebas y se le aplica una determinada fuerza para ocasionar un alargamiento, esto genera datos de elongación contra la masa de la carga, y con ello se determina datos de esfuerzo y deformación, en la figura 4.1 se muestra la curva esfuerzo deformación general correspondiente a un ensayo de tracción.

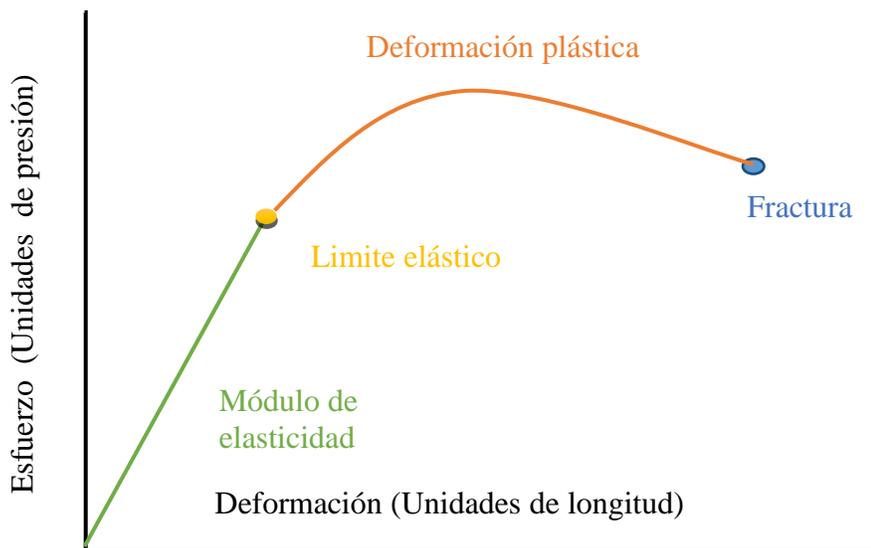


Figura 4.1: Curva estándar esfuerzo deformación

El límite elástico es la tensión máxima que sufre el plástico sin sufrir deformaciones, está ubicado al final de la porción elástica de la curva esfuerzo

deformación, si se supera esta tensión, se traslada a la zona de deformación plástica, donde no hay retorno al estado inicial, al cual, si se intensifica la tensión, el material estará expuesto a fracturarse.

Por ejemplo para un material polimérico si se supera el límite elástico, la deformación *plástica* será mucho mayor que el límite elástico, el polímero no regresará a su estado original ocasionando una deformación irreversible al material.

Los materiales cerámicos tienen un comportamiento diferentes a los materiales plásticos, el límite elástico es mayor que la deformación plástica, y los metales poseen propiedades intermedias, el esfuerzo en el punto de fractura es mayor en los metales, seguido por los cerámicos y por último los poliméricos. (Askeland y Phulé, 2004)

4.4. Fundamentos de transferencia de calor para el calentador

El calor se define como la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura, esta transferencia puede ocurrir de tres modos diferentes, conducción convección y radiación. (Çengel, 2007)

La transferencia de calor por conducción ocurre por interacción de partículas con diferentes niveles de energía, en los sólidos sucede más rápido que en líquidos y en gases debido a que el comportamiento molecular de los sólidos es una combinación de vibraciones de las moléculas mientras que en gases y en líquidos ocurre a colisiones y difusión de las partículas.

La convección ocurre entre una superficie sólida y un fluido en movimiento, es la transferencia de calor por difusión combinado a la mecánica de fluidos, entre mayor es el movimiento, mayor es la transferencia; si el movimiento

del fluido es ocasionado directamente por voluntad de una persona con una máquina, se le denomina convección forzada mientras si ocurre por diferencias de densidad en un sin intervención directa de una persona con una máquina se le denomina convección libre.

4.4.1. Calentamiento de aire por convección forzada en ductos circulares

Para el desarrollo del sistema de calentamiento del aire, se selecciono por medio de una resistencia eléctrica el calentamiento de un tubo de cobre, por el cual fluye aire y ocurre la transferencia de calor, por lo tanto es útil conocer la temperatura a la que debe ser calentada el tubo de cobre, con el fin de conocer la cantidad mínima de resistencia de ferro-níquel, y evitar así un sobrecalentamiento, el ducto circular es más sencillo de obtener que cualquier otra configuración.

La transferencia de calor por convección se expresa como:

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (4.1)$$

Donde:

h = Es la transferencia de calor.

A_s = Es el área superficial.

T_s = Temperatura superficial.

T_∞ = Temperatura de los alrededores.

El coeficiente de transferencia de calor involucra todos los fenómenos de conducción y los movimientos del fluido conductor, es un coeficiente experimental empírico, este se expresa por medio de números adimensionales con el fin de reducir el número de variables totales:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (4.2)$$

Donde:

L_c = Longitud característica.

k = Conductividad térmica.

El número de Nusselt expresa coeficiente adimensional de transferencia de calor por convección. Entre mayor sea el número, mejor es la convección, este número obtiene gran cantidad de representaciones dependiendo del sistema que se está evaluando; para convección forzada interna en ducto circular se expresa dependiendo del régimen del movimiento del fluido.

En régimen laminar se expresa como:

$$Nu = 3,66 + \frac{0,065(D/L)RePr}{1 + 0,04[(D/L)RePr]^{2/3}} \quad (4.3)$$

Donde:

Pr = Número de Prandtl

Re = Número de Reynolds

Para flujo turbulento se expresa como:

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4} \quad (4.4)$$

La temperatura media del aire en la salida (T_e) del tubo se define como

$$T_e = T_s - (T_s - T_i)Exp(-h/mCp) \quad (4.5)$$

Donde:

T_i = Temperatura del fluido en la entrada del ducto.

m = Flujo másico del fluido.

cp = Capacidad calorífica del fluido a presión constante.

4.4.2. Calentamiento por conducción en una pared cilíndrica

A partir de las ecuaciones de transferencia de calor por conducción en una pared cilíndrica, es posible determinar la diferencia de temperatura entre el diámetro interno y el diámetro externo del tubo de cobre que será calentado, la utilidad de estos datos es que el diámetro externo del tubo esta en contacto con la resistencia de ferro-níquel y el diámetro interno esta en contacto con el flujo de aire.

La transferencia de calor por conducción en una pared cilíndrica es utilizada para conocer los perfiles de temperatura a cualquier radio, esta idea se expresa de una forma sencilla cuando se supone que los extremos están aislados, además cuando existe una diferencia de temperatura del radio cilíndrico.

El balance microscópico de energía interna en estado estacionario es:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (4.6)$$

Integrando para las condiciones de contorno $r = R_1 \Leftrightarrow T = T_1$ y $r = R_2 \Leftrightarrow T = T_2$ se obtiene el perfil de temperatura resultante

$$T = \left[\frac{T_1 - T_2}{\ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right)} \right] \ln r + \left[\frac{T_2 \ln R_1 - T_1 \ln R_2}{\ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right)} \right] \quad (4.7)$$

El flujo de calor por unidad de área no es constante sino es variable del radio sin embargo el flujo total de calor permanece constante, Por la ley de Fourier el flujo total de calor es:

$$Q = 2\pi Lk \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right)} \quad (4.8)$$

4.4.3. Perdidas de calor por convección y radiación

Para evitar que el relé del sistema de control actúe de dinámicamente, es necesario aislar térmicamente el calentador eléctrico, con el fin de conservar la

energía térmica y evitar el desgaste de este accesorio, para tal proposito es útil conocer la cantidad mínima de aislante necesario para evitar posibles perdidas de calor.

Los fenómenos de perdida de calor ocurren por convección natural, por ayuda generalmente del aire que circunda el sistema, entre más rápido sea el flujo de aire, mejor es la transferencia de calor, y por lo tanto la pedida calórica; la densidad del aire es inversamente proporcional al aumento de temperatura.

Esto indica que el aire caliente sube y el aire frío baja, generando una corriente de aire hacia arriba cuando se está enfriando a T_{amb} y se genera una corriente de aire hacia abajo cuando se esta descongelando o calentando con el aire a T_{amb} . La convección natural sobre superficies depende de la configuración geométrica y de su orientación, el número de Nusselt se expresa como:

$$Nu = C(Gr_L Pr)^n \quad (4.9)$$

Donde:

C = Coeficiente constante.

n = Exponencial que depende de la geometría y el régimen del flujo.

Los número de Rayleigh y el número de Grashof también de dos números adimensionales y se relacionan como:

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (4.10)$$

Para un cilindro vertical el número de Nusselt se representa como:

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387Ra^{1/6}}{[1 + (0,559/pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (4.11)$$

Esta expresión matemática relaciona las ganancias o perdidas de calor por convección natural, sin embargo existe otro fenómeno que amplifica la transferencia de calor en estos casos llamado radiación y se expresa matemáticamente

como:

$$\dot{Q} = \varepsilon A_s \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (4.12)$$

Donde: ε = es la emisividad del objeto.

σ = es la constante de constante de Stefan-Boltzmann.

La radiación se propaga en forma de ondas electromagnéticas, no necesita un medio conductor y entre mayor sea la diferencia de temperaturas, mayor la transferencia de calor por este medio.

4.5. Calentamiento Eléctrico

Para generar el calor necesario en el equipo de secado es indispensable identificar la fuente de energía para el aumento de temperatura, para el desarrollo del equipo expuesto en este documento, se contemplo el uso de la electricidad, por ser un recurso común, manejable y económico, con el que se puede contar en la mayoría de las zonas residenciales.

El calentamiento de una pieza de material conductor debido a una corriente eléctrica que la atraviesa, es descrito por medio del efecto joule, descubierto por James Prescott Joule. (de Guereñu, Filomena González, Ruíz, y Fraile, 2008)

Matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$Q = I^2 R t \quad (4.13)$$

Donde:

Q = Cantidad de calor disipada, en julios.

I = Corriente que atraviesa el conductor, en amperios.

R = Resistencia del conductor, en ohmios.

t = Tiempo transcurrido, en segundos (este tiempo se toma desde que se da

paso a la corriente hasta que se estabiliza el sistema y no se deja de producir aumento de temperatura por las pérdidas de calor con el medio).

O también al relacionar la potencia.

$$P = I^2R \quad (4.14)$$

Con:

P = Potencia, en watt.

Estas ecuaciones describen la primera ley de la termodinámica aplicada a la transformación de la energía eléctrica en calórica.

4.5.1. Calentamiento por medio de resistencia eléctrica

Fuentes (2010) define el calentamiento por resistencia eléctrica como un sistema económico ya que ofrece una eficiencia de alrededor del 95%, y a diferencia del calentamiento por inducción electromagnética, no involucra el uso de elevadas corrientes eléctricas ni campos magnéticos, lo que disminuye los riesgos de su operación y la posibilidad de generar interferencia con otros equipos electrónicos.

El aumento de temperatura se debe la efecto Joule, al circular corriente por la resistencia, hecha normalmente de alambre delgado de un conductor de alta resistividad; este efecto en conjunto con la ley de ohm, y las propiedades físicas del material del que está hecho la resistencia, como la densidad, el calor específico, y la resistividad, nos permite determinar las dimensiones geométricas (largo, alto, ancho) que la resistencia ha de tener para generar el calentamiento deseado.

Para el calculo de la temperatura que se elevara la resistencia, se debe determinar la corriente que consumirá por medio de la ecuación 4.15:

$$I = \frac{V}{R} \quad (4.15)$$

Donde:

I = Corriente en Amperios

V = Diferencia de potencial en voltios, (toma corriente casera en Colombia 120 v).

R = Resistencia en Ohmios.

Podemos calcular a partir de estos resultados la potencia que se disipa, conociendo las propiedades físicas del material (resistividad, densidad). y teniendo como variables la resistencia (longitud, peso) podemos determinar la temperatura máxima final que se alcanzara.

$$Q = Pt \quad (4.16)$$

$$Q = I^2 R t \quad (4.17)$$

$$\Delta T^\circ = \frac{Q}{S C_p} \quad (4.18)$$

$$T_{final}^\circ = T_0^\circ + \Delta T^\circ \quad (4.19)$$

Donde:

Q = Calor disipado en joule.

I = Corriente en Amperios.

R = Valor de la resistencia en Ohmios.

T = Tiempo de estabilización.

S = Peso de la resistencia, se puede calcular a partir de la geometría y la densidad del material.

C_p Calor específico.

$\Delta T = ^\circ$ Incremento de temperatura.

T_{final}° Temperatura final.

T_0° = Temperatura inicial.

Se optó por diseñar un sistema de calentamiento por medio de una resistencia eléctrica, ya que permite un uso seguro, y el uso de una fuente de energía común y económica.

4.6. Control de temperatura on-off

Según (Seborg, Mellichamp, Edgar, y Doyle, 2010) un sistema de control es aquel conjunto de elementos que se relacionan de tal forma que permiten gobernar o manejar otro sistema. El objetivo de un sistema de control es mantener una variable resultado de la acción de un proceso, en cierto valor o rango de valores deseados, previamente fijados, a través de la variación de una o más entradas del proceso a controlar.

Los sistemas de calentamiento eléctrico como los termostato utilizan el sistema de control *on-off* debido a que la acción del actuador es inmediata y no genera desviación o *offset*,

El **Sensor** es el elemento capaz de convertir las características físicas o químicas que la variable a controlar presenta, en valores eléctricos que pueden ser medibles, comparables y controlables. La **Señal de referencia** es el valor prefijado conocido también como *set point*, al que buscamos coincidir con la variable a controlar, la señal de referencia debe ser comparable con la señal eléctrica entregada por el sensor, generalmente la señal de referencia es generada por un potenciómetro, de manera que se pueda ajustar a las condiciones requeridas.

El **Actuador** es el componente capaz de ejercer control sobre un sistema a regular, este generalmente permite el paso de una señal eléctrica para variar uno o mas recursos del sistema. El **Controlador** tiene la capacidad de comparar las señales del sensor y el *set point* para entregar una señal de respuesta al actuador.

4.7. Viabilidad económica preliminar

Según Pascual y Subías (1988) un proyecto es rentable si el valor de los rendimientos que genera supera a los recursos que utiliza, extendiendo este concepto al producto, podemos entender como rendimientos, todos los resultados obtenidos como consecuencia del uso de un bien y que representan un valor o utilidad por quien lo usa. Y como recursos todos aquellos costos y gastos que se ven sujetos a la producción, mantenimiento y funcionamiento del bien. Una forma de expresar la totalidad de la inversión realizada en la producción y disposición del producto al consumidor final es mediante el precio de coste completo (de Castro y Díaz, 2008); que se entiende como la suma del coste total de producción, coste financiero, coste de marketing y coste administrativo, costos que a su vez se dividen en otros más específicos, mientras que la inversión en mantenimiento es relevante al valor de los elementos susceptibles a cambio por desgaste y al valor de la mano de obra necesaria para el cambio; el de funcionamiento a los recursos como los servicios y los suministros que son consumidos al usar el producto como en la figura 4.2 (de Castro y Díaz, 2008)

COSTE COMPLETO DE UN PRODUCTO

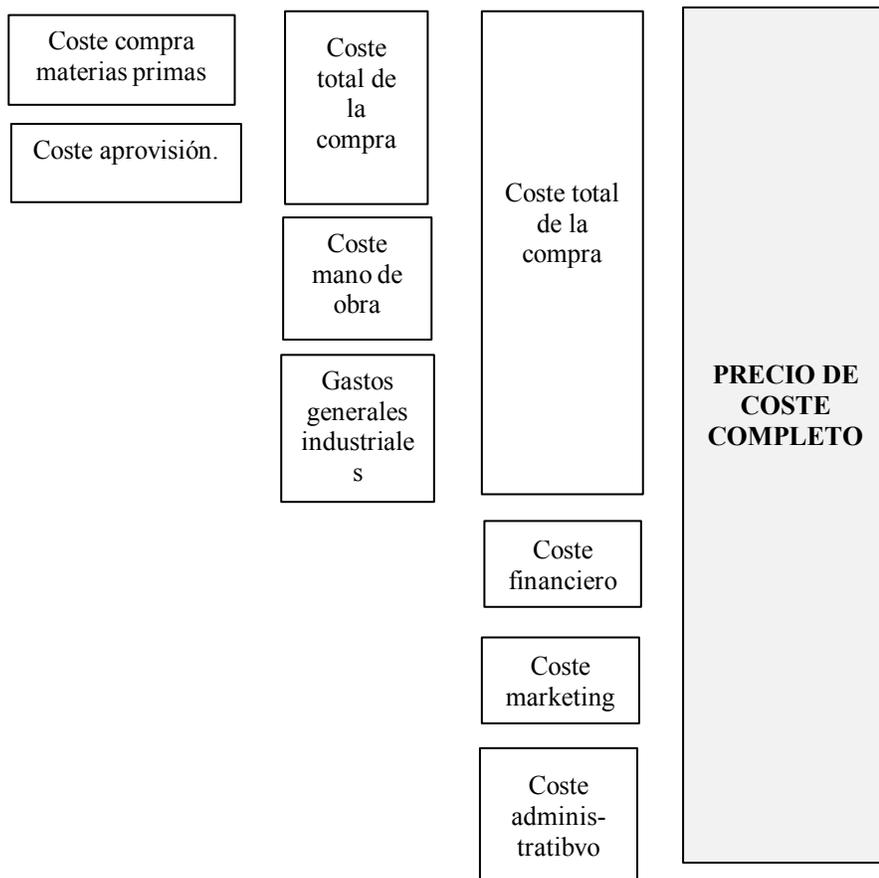


Figura 4.2: Coste completo de un producto

Capítulo 5

Objetivos

5.1. Objetivo General

Diseñar un equipo de secado para la deshidratación *in situ* de residuos sólidos de origen doméstico.

5.2. Objetivos Específicos

1. Esquematización de un sistema de almacenamiento de residuos domésticos para el equipo de secado.
2. Diseño de un sistema de calentamiento de aire por convección forzada interna para el equipo de secado.
3. Diseño de un sistema de control de calentamiento para el flujo de aire del equipo de secado.
4. Selección de los accesorios requeridos para el sistema de secado.
5. Construcción de un prototipo para el secado de residuos de origen doméstico.

6. Evaluación preliminar técnico y económica del equipo diseñado.

Capítulo 6

Metodología

Partiendo de la metodología QFD, se identificaron las principales características del diseño del equipo de secado para la deshidratación *in situ* de residuos sólidos de origen doméstico, los parámetros de sus componentes, y los requerimientos mínimos de calidad que debe tener para garantizar la funcionalidad del equipo; se realizó un esquema general y de cada sección de forma detallada; posteriormente se compararon las características físicas, químicas y cualitativas de los diferentes materiales disponibles en el mercado para la elaboración de cada sección, sistema de almacenamiento, calentador, sistema de control y accesorios. Para finalizar se hizo una evaluación técnico-económica preliminar del equipo de secado.

6.1. Bosquejo de un sistema de secado por metodología QFD

La implementación de la metodología QFD inicio con una lluvia de ideas, se detectaron las principales necesidades y expectativas de un posible usuario, para la metodología, los *¿Que's?*; estos se ponderaron y se procedió a realizar las iteraciones en la matriz QFD definiendo los *¿Cómo's?*, estos se identificaron

teniendo prioridad en utilizar las características mas cuantitativas que se pudieran asociar, así como la formulación de propuestas de mejora que aumentará el valor percibido del equipo y consideraciones técnicas de diseño, luego se asignaron los valores correspondientes a la fuerza de la relación de cada uno de los *¿Cómo's?*, con cada *¿Que's?*, se pondero cada *¿Cómo's?* y se organizo por valor de mayor a menor antes de pasar a la siguiente iteración, finalmente se asignaron magnitudes, los *¿Cuánto's?*, para obtener los parámetros generales del equipo.

El boceto de la figura 6.1 representa los parámetros generales obtenidos de la metodología empleada.

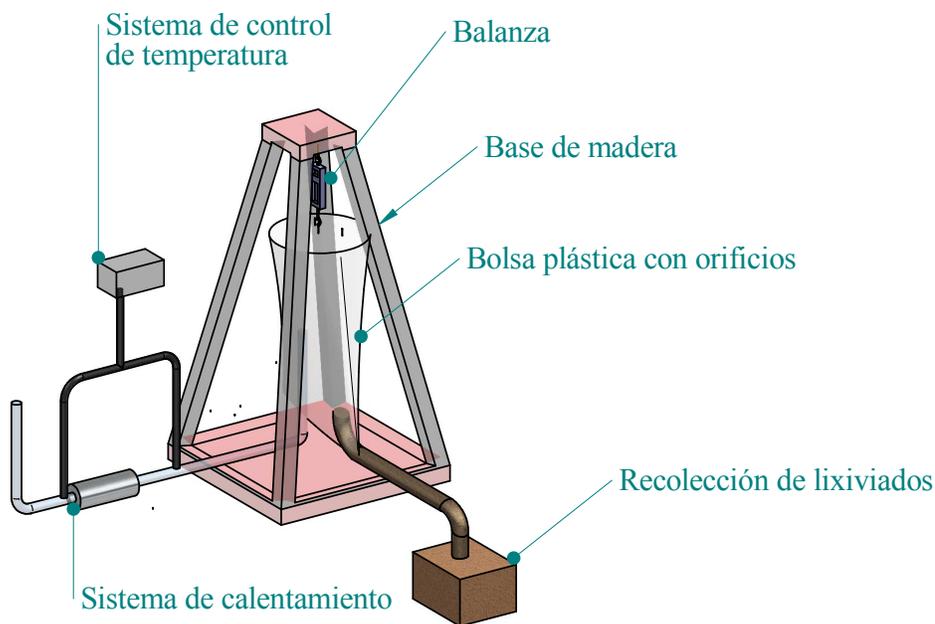


Figura 6.1: Boceto del sistema de secado

Durante la aplicación de la metodología QFD, se tubo en cuenta algunas consideraciones técnicas como: El aire frío es más denso que el aire caliente, lo que garantiza un mayor área de contacto si se emite el aire caliente desde la

parte inferior del recipiente. La bolsa plástica como el material que comúnmente se utiliza para contener los residuos sólidos en casa. Una base piramidal que permita distribuir el peso de los residuos desde arriba, donde estará conectada a una balanza para equipaje para registrar las variaciones de peso, debido al efecto del secado. El sistema de por lotes garantiza conocer la respuesta de los residuos al secado.

6.2. Diseño del sistema de almacenamiento de residuos sólidos

Uno de los objetivos para el diseño de un sistema de secado de residuos sólidos, debido a la cantidad de residuos, las bolsas serán tipo residencial (90cm x 65cm); esta bolsa se debe ajustar el precio, el mayor calibre, tolerancia a la deformación, tolerancia a la temperatura, tolerancia a la deformación con orificios circulares.

6.2.1. Metodología para la realización de las pruebas tensión-deformación

Para conocer la tolerancia de las bolsas a esfuerzos con diferentes condiciones fue necesario realizar pruebas mecánicas de tensión-deformación, estas se realizaron en el equipo SHIMADZU TRAPEZIUM EZ-X del laboratorio del grupo de investigación GEMA. El método requiere probetas plásticas con las proporciones de la norma ASTM D 638-02a. En la figura 6.2 se muestra la probeta para los ensayos de tracción.

Las dimensiones de la probeta son:

Largo: 26,3 cm. **Ancho:** 6 cm. **Distancia entre cuellos:** 14,8 cm. **Ancho en el cuello:** 1,6 cm.

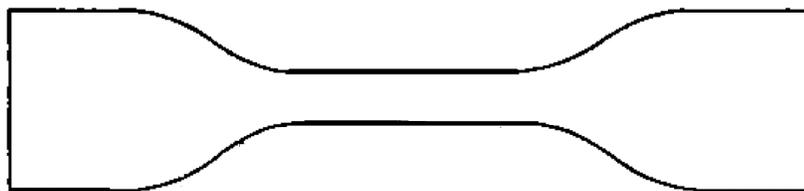


Figura 6.2: Probeta para los ensayos de tensión-deformación

Los ensayos se realizaron a una velocidad fija de 50 mm por minuto y se calcularon datos en la zona elástica, en el límite elástico y en la rotura del material.

6.2.2. Matriz experimental para los ensayos con las probetas plásticas

La bolsa plástica debe tolerar el aumento de temperatura y la deformación con orificios, por lo que se planteó matriz experimental de la tabla 6.1:

Tabla 6.1: Matriz experimental para los ensayos de tensión deformación.

Material de la bolsa	Esfuerzo máximo soportado en el límite elástico					
	Ensayos a 15°C (Sin temperatura)			Ensayos a 60°C (Con temperatura)		
	Ensayos sin perforaciones	Ensayo con orificio de 5 mm	Ensayo con orificio de 8 mm	Ensayo sin perforaciones	Ensayo con orificio de 5 mm	Ensayo con orificio de 8 mm
Polietileno de alta densidad						
Polietileno de baja densidad						
Polipropileno						

Los ensayos a 60°C se realizaron con probetas que fueron sometidas a calentamiento por 3 días y luego enfriadas a temperatura ambiente, ello se realizó con el fin de obtener homogeneidad en las pruebas, los orificios fueron realizados con sacabocados de 5 mm y 8 mm de diámetro, la distancia entre los orificios fue de dos veces su diámetro, en cada probeta se perforaron 3 orificios. En total

fueron 18 ensayos con 4 réplicas cada uno, para un total de 72 ensayos.

Se estimó que la distribución de los orificios se realizaría en la parte media de la bolsa, a cierta distancia del borde inferior de la bolsa, la distancia entre cada orificio fue de dos diámetros, al igual que en los ensayos, la cantidad mínima de orificios corresponde al esfuerzo mínimo que debe tener la bolsa para un peso máximo de 30 kg de RSD.

A partir de los resultados que se registren en la tabla 6.1, se realizó un tratamiento estadístico, para escoger el tipo de bolsa apropiado para ser el contenedor de los RSD, y por último se perforaron orificios de tal forma que la bolsa tenga vías de escape, a los posibles puntos ciegos que presentaría los RSD en la bolsa.

6.3. Desarrollo del sistema de calentamiento de aire

El sistema de calentamiento de aire se diseña con base a las propiedades termoplásticas de la bolsa, la temperatura máxima de utilización es de 60°C a 70°C por lo que una temperatura adecuada del aire dentro de la bolsa es de 60°C, con esto se evitó cualquier reacción de algún material proveniente de los desechos, por lo tanto el material del tubo, la temperatura interna y sus dimensiones se diseñaron con base en el calentamiento por convección forzada interna, la temperatura externa con la conducción y el espesor del aislante se diseñó en consideración con las pérdidas calóricas por convección natural y radiación.

6.3.1. Definición de los parámetros de calentamiento del aire por convección forzada interna

En la figura 6.3 se muestra el diagrama de procesos utilizado para encontrar la temperatura interior del tubo variando la velocidad del flujo de aire para

diferentes dimensiones de contacto:

Se propuso realizar una simulación de calentamiento de aire por convección forzada con 3 materiales de tubos, acero, cobre y aluminio, en estos tubos es donde recorre el aire para ser calentados a 60°C.

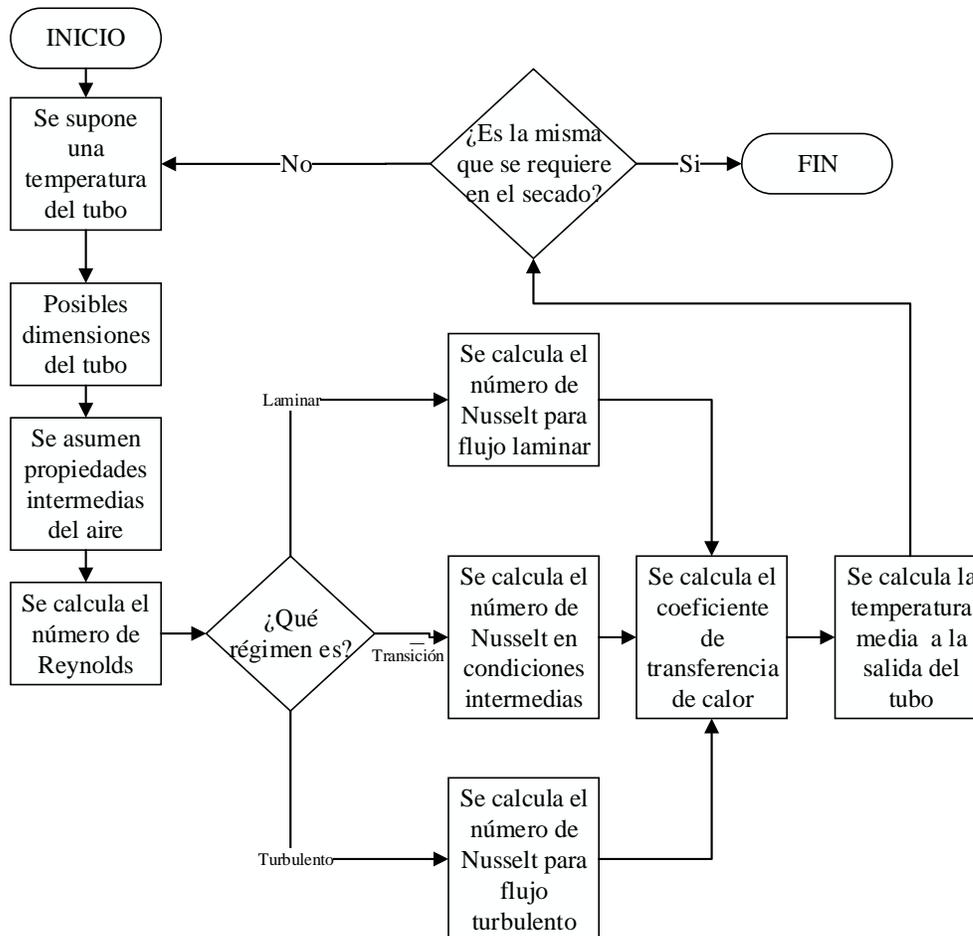


Figura 6.3: Diagrama de procesos utilizado para conocer las especificaciones del tubo en el calentador eléctrico

Para el cálculo del número de Reynolds en la figura 6.3 se define como $\rho v D / \mu$ para ductos circulares, y dependiendo del régimen se aplica en la ecuación (4.3) si es flujo laminar o (4.4) si es flujo turbulento, con lo se conoce el

número de Nusselt (Nu), y a partir de la ecuación (4.2) se despejó el coeficiente de transferencia de calor y con la ecuación (4.5) se obtuvo la temperatura media del aire en la salida del tubo, la cual es contrastada con la temperatura propuesta, y por medio de un solucionador de una hoja de cálculo, se eliminó la diferencia entre la temperatura propuesta y la temperatura obtenida a cero.

6.3.2. Definición de los parámetros de calentamiento del ducto por conducción

En la figura 6.4 se presenta el diagrama de procesos utilizado para encontrar la temperatura exterior del ducto, para el cálculo del flujo de calor a través del tubo se utilizó la ecuación 4.8, si el flujo es equivalente al flujo de de por convección interna del tubo, se calculó el perfil de temperatura, con esto se observó la temperatura mínima que debe tener el tubo en el diámetro exterior para garantizar la temperatura interna de debe tener el tubo, en caso que no, se utilizó un solucionador que disminuya esta diferencia variando la temperatura propuesta.

6.3.3. Definición de los parámetros de calentamiento del ducto por pérdidas de calor

En la figura 6.5 se presenta el diagrama de procesos utilizado para encontrar el grosor del aislante, en este diagrama intervienen las pérdidas de calor por convección externa, y radiación que se comparan con el flujo de calor en el aislante:

$$\dot{Q}_{\text{aislante}} = \dot{Q}_{\text{radiacion}} + \dot{Q}_{\text{conveccion}} \quad (6.1)$$

El flujo de calor perdido por radiación se calcula con la ecuación (4.12), el número de Rayleigh, Nusselt y el coeficiente de transferencia de calor se calcu-

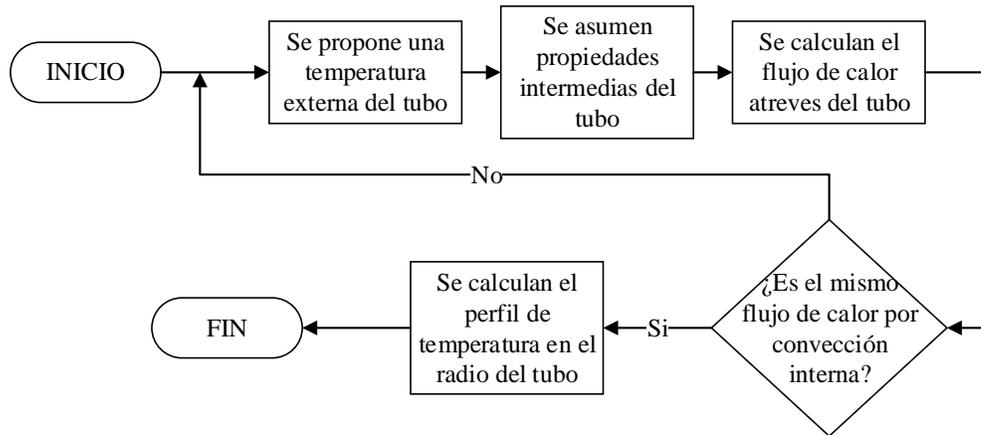


Figura 6.4: Diagrama de procesos utilizado para conocer la temperatura exterior del tubo

lan con las ecuaciones (4.10) (4.11) y (4.2) respectivamente, también por medio de un solucionador de una hoja de cálculo se realiza el balance de la ecuación (6.1), con ello se calcula el perfil de temperatura a lo largo del tubo.

6.3.4. Definición de los parámetros de la resistencia

Para la definición de los parámetros de resistencia donde se produce el calentamiento se partió de la elección del material para elaborarla, este fue elegido teniendo en cuenta los costos, las presentaciones y la disponibilidad en el mercado.

Habiendo concebido la resistencia como espiral por la elección del tubo como medio para la transferencia de calor, y teniendo en cuenta la ubicación que esta iba a tener, se eligió alambre de Ferro-níquel de diámetro $0,7\text{ mm}$, luego se busco determinar el largo del alambre requerido para satisfacer la temperatura necesaria en la superficie del tubo, fijada anteriormente.

Una vez conocidas las propiedades físicas del material como resistividad,

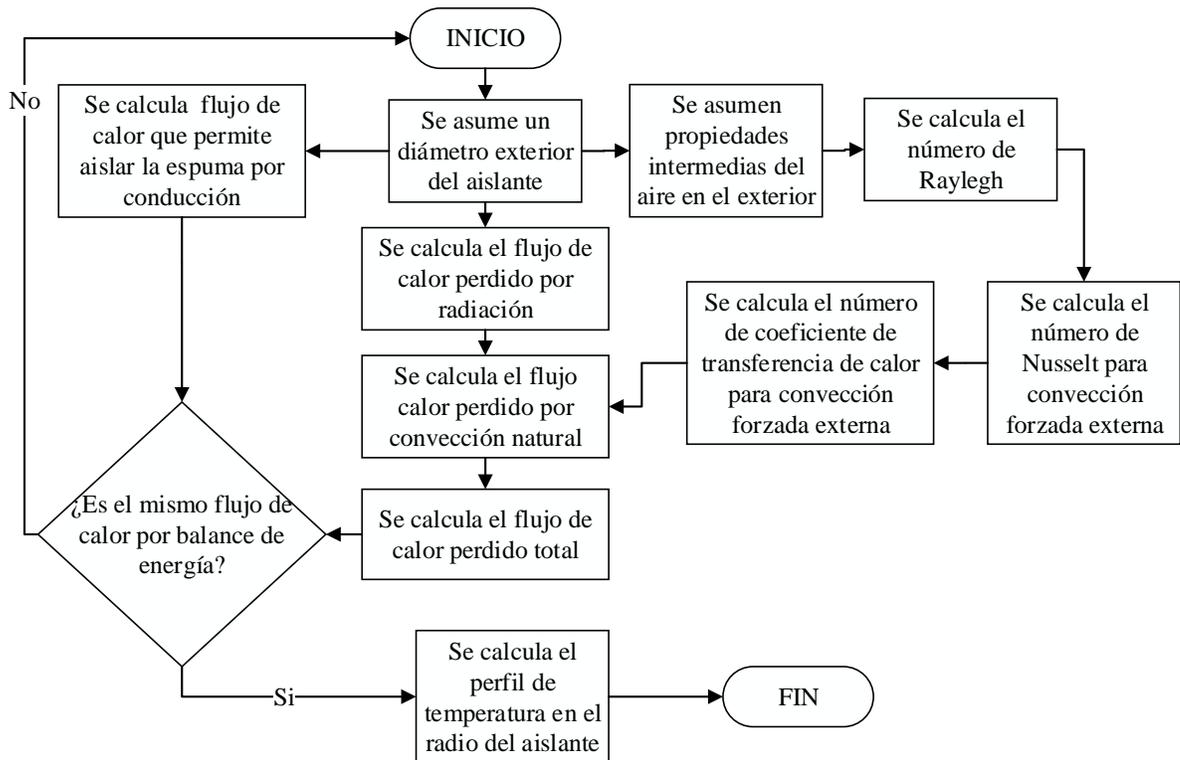


Figura 6.5: Diagrama de procesos utilizado para conocer las dimensiones del aislante

densidad y calor específico, se procedió a calcular el aumento de temperatura en función del largo del alambre, este calculo se realizo por medio de las ecuaciones de ley de ohm (ecuación 4.15), potencia y efecto Joule (ecuación 4.17), en el solucionador de la hoja de calculo del perfil de temperatura del tubo por convección forzada interna, teniendo un tiempo de estabilización entre el calor generado por el efecto joule y las perdidas con el ambiente de 15 segundos.

6.4. Definición de parámetros para el diseño del circuito de control

Se diseño un circuito de control de temperatura del aire basados en los parámetros obtenidos del la metodología QFD y en la estructura típica de un sistema de control, definiendo posteriormente los componentes electrónicos que por disponibilidad, funcionalidad y diseño mejor se adaptan a las necesidades requeridas, los requerimientos por cada parte del sistema de control son:

Sensor: Capaz de Medir variaciones de temperatura con precisión, con capacidad de respuesta en lapsos de tiempo mínimos (menor de 20 segundos), rangos de medida de 0°C a 70°C o mas, y con un voltaje de alimentación no superior a 9 V DC .

Señal de referencia: Componente capaz de entregar una señal de referencia comparable con la señal del sensor, con alimentación menor o igual a 9 V DC , y amplio rango de variación de la señal.

Actuador: Componente capaz de ejercer control sobre el sistema con una señal de no más de 9 V DC , y capaz de cerrar y abrir un circuito de 120 V AC con capacidad para soportar más de 5 A , aislar ambos circuitos y permitir un uso continuo, con tiempos de respuesta cortos (menor a 1 segundo).

Controlador: Capacidad de comparar las señales del actuador y sensor y entregar una señal de respuesta en lapsos menores a 1 segundo, con alimentación no mayor a 9 V DC .

6.5. Diseño de los Accesorios

Los accesorios del sistema de secado corresponden a la balanza, la base de madera y el sistema de recolección de lixiviados; la balanza es una bascula digital de equipaje con funcionalidad de soportar un peso de hasta 40 kg por

medio de una correa que conecta directamente con la abertura de la bolsa, para garantizar un completo equilibrio del peso de la bolsa con respecto a la balanza, se sujetó la parte cilíndrica externa de la abertura de una caneca plástica de pintura a la abertura de la bolsa, con el objetivo de darle mayor rigidez a esta; de la parte plástica salen 4 cables de acero equidistantes al gancho de la balanza.

La base de madera se fabricó en un taller de carpintería, para soportar el peso necesario y permitir la ubicación de la balanza en la parte superior, se diseñó de forma piramidal, para soportar la carga máxima de los RSD (48 kg), permitiendo el libre movimiento de la bolsa en la parte inferior, la altura de la pirámide es 110 metros, el lado de la parte superior de la pirámide que tiene forma de cuadrado es de 0.20 metros y la parte inferior 0,60 metros; la pirámide está fabricada en madera triplex recubierta de material formica para que protejerla de la humedad.

El sistema de recolección de lixiviados se diseñó con base a las conexiones de flujo de aire que se dirigen a la bolsa, para evitar posibles interferencias del flujo de aire, por lo que el desagüe se realizó por una de las esquinas inferiores de la bolsa, con el arreglo de los cables de acero que equilibran a la bolsa, se generó una pequeña desviación para forzar la salida en una esquina, por esta salen los lixiviados a un tanque cerrado de medio litro.

6.6. Acople de los diferentes elementos del sistema de secado

El diseño de los acoples de las diferentes secciones que componen el sistema de secado, se realizó luego de tener cada sección elaborada, la distribución en la estructura piramidal obedeció al cumplimiento de los requisitos de calidad obtenidos de la metodología QFD, como: Seguridad, disminución de cantidad de fuentes de peligro de operación, tamaño, y facilidad de uso. Los elementos

de unión y de mas suministros (elementos de anclaje y sujeción) entre las diferentes secciones, se eligieron basados en las referencias comerciales existentes en el mercado.

6.7. Evaluación preliminar técnico y económica del equipo de secado

La evaluación técnica preliminar del equipo de secado se realizo examinando la respuesta que tiene el diseño cuando se somete a un flujo de aire durante 8 horas seguidas; después se experimento con el funcionamiento del sistema de calentamiento de aire conjunto al sistema de control, se produjo un flujo de aire por 40°C y 60°C , durante 4 horas respectivamente.

En seguida se examino la respuesta de la bolsa plástica expuesta aun masa de 42 *kg* durante 3 días, comprobando la exactitud de la balanza; por último se disperso medio litro de agua en la bolsa para conocer la respuesta del sistema de recolección de lixiviados.

Para el estudio económico preliminar, se procedió a determinar el costo total del producción del prototipo elaborado, para este calculo, se realizó un presupuesto inicial para los insumos y materias primas, que se contrastó con con la ejecución, se analizó y se determino el costo final de materias primas.

Para el calculo del valor de la mano de obra empleada, se hicieron tomas de tiempos de la fabricación de cada sección del equipo y el acople final de cada una, considerando repeticiones en las secciones que por disponibilidad de materia prima era posible, y por ultimo se estimó como consideraciones los suplementos de tiempo y ocio productivo, para simular las condiciones que comúnmente se tienen presente en una produccion a escala real; definido el tiempo de fabricación por unidad se valoro el costo final de mano de obra.

Capítulo 7

Resultados

Con fundamento en las necesidades y expectativas evaluadas por medio de la metodología QFD, se consolidó un conjunto de parámetros de diseño, posteriormente se desarrolló cada sección del equipo de secado, se definieron los componentes a usar y se construyó cada parte. Finalmente se ensamblaron todas las secciones (figura 7.1 y anexo 10) y se realizaron pruebas preliminares de funcionamiento y un análisis preliminar de los costos de producción.

7.1. Resultado de implementación QFD

Los parámetros cualitativos y cuantitativos necesarios para satisfacer las necesidades y expectativas de un usuario, fueron resultado de la implementación de la metodología QFD (como se puede detallar en el anexo A), los parámetros técnicos fueron la guía para la búsqueda en el mercado de los componentes de cada sección del equipo de secado, y los parámetros cualitativos fueron la base para el ensamble.

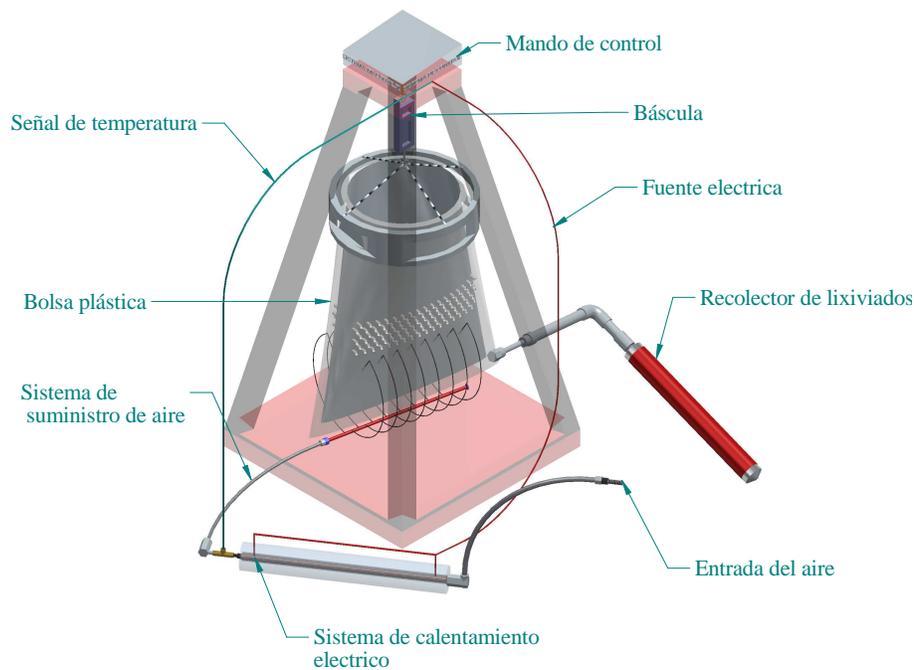


Figura 7.1: Esquema final del sistema de secado diseñado

7.2. Diseño de las diferentes secciones que componen el sistema de secado

7.2.1. Bolsa plástica

En el tabla 7.1 se registran el promedio de esfuerzo y la desviación estándar para cada condición, basados en el modelo de diseño de experimentos para factoriales mixtos propuesto por D. Montgomery (Montgomery, 2005), se realizó un análisis de los efectos independientes y conjuntos de las variables temperatura y diámetro de agujero para cada material, obteniendo resultados del tabla 7.2.

Desde el punto de vista físico el polímero a emplear debe ser aquel que presente la mayor resistencia a la deformación y la menor reducción de las mismas como efecto del tratamiento conjunto de las variables estudiadas.

Para tal propósito se propuso emplear el producto del valor de la fuerza ne-

Tabla 7.1: Promedio de esfuerzo y desviación estándar para cada material plástico

Material de la bolsa	Esfuerzo máximo soportado en el límite elástico N					
	Ensayos a 15°C			Ensayos a 60°C		
	Ensayos sin perforaciones	Ensayo con orificio de 5 mm	Ensayo con orificio de 8 mm	Ensayo sin perforaciones	Ensayo con orificio de 5 mm	Ensayo con orificio de 8 mm
Polietileno de alta densidad	2,42	2,52	1,83	2,66	2,27	1,32
	$\sigma=0,34$	$\sigma=0,44$	$\sigma=0,32$	$\sigma=0,19$	$\sigma=0,25$	$\sigma=0,66$
Polietileno de baja densidad	4,63	3,86	2,87	4,28	3,52	3,13
	$\sigma=0,3$	$\sigma=0,44$	$\sigma=0,43$	$\sigma=0,17$	$\sigma=0,22$	$\sigma=0,27$
Polipropileno	5,9	5,09	4,03	4,7	3,84	2,40
	$\sigma=1,08$	$\sigma=0,76$	$\sigma=0,62$	$\sigma=0,77$	$\sigma=0,69$	$\sigma=1,28$

cesaria para iniciar la deformación del material en newton a condiciones normales, entendiéndose por estas, temperatura de 15°C sin orificio, con un peso asignado según la resistencia de cada material a los efectos de las variables.

Tabla 7.2: Análisis de los efectos independientes y conjuntos de las variables temperatura y diámetro de agujero para cada material

Material	Efecto	Temperatura	Orificios
Polietileno de alta densidad	<i>Efecto conjunto</i>	-0,21	-1,06
	<i>Efecto independiente</i>	-0,24	-0,83
Polietileno de baja densidad	<i>Efecto conjunto</i>	-0,06	-1,65
	<i>Efecto independiente</i>	-0,66	-2,09
Polipropileno	<i>Efecto conjunto</i>	-0,56	-1,93
	<i>Efecto independiente</i>	0,63	-1,03

Así se asignó un peso a cada polímero según su grado de susceptibilidad a los tratamientos siendo uno y tres, el más y menos susceptible respectivamente, en la tabla 7.3 presenta la matriz de decisión por pesos y resistencias donde 1 es

la menor puntuación y 3 la mejor y las condiciones normales son a temperatura de 15°C y diámetro de orificio de 8 mm

Tabla 7.3: Matriz de decisión por pesos y resistencias

	PP	PEBD	PEAD
Tratamiento conjunto	1	2	3
Resistencia promedio del material en condiciones normales	5,21	4,85	2,60
TOTAL	5,21	9,70	7,79

EL material de la bolsa plástica fue de PEBD, debido a que presentó mayor resistencia a la deformación que los otros 2 plásticos.

El caudal máximo que pasará por el sistema de secado es de 2,3 cfm que corresponde a $1,09 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, al plástico seleccionado se le perforo orificios de 0,8 cm de diámetro que tiene una resistencia a la temperatura y a la deformación de $3,13 \text{ N/mm}^2$ según el tabla 7.1.

La probeta de ensayos de la figura 6.2 tiene un área de de ruptura de $1,91 \text{ mm}^2$ por lo que la razón de resistencia a una temperatura de 60°C y formación de orificios es de $1,63 \text{ N/mm}^2$.

El volumen de una bolsa residencial es de 100 litros, la densidad varia de 131 a 481 kg/m^3 (Tchobanoglous y cols., 1994) varia para los residuos solidos de origen domésticos, entonces el peso máximo que puede soportar la bolsa plástica es de 13 kg a 48 kg por lo que la fuerza máxima ejercida en dirección vertical es de 436 N, el espacio mínimo para esta fuerza es de $436 \text{ N} \div 1,63 \text{ N/mm}^2 = 267 \text{ mm}^2$ en la figura 7.2 se muestra la configuración del área donde se realizó la distribución de los orificios,

Los 20 cm que hay entre la parte inferior de la bolsa y los orificios corresponden a la necesidad de evitar que por estos orificios no sean una vía de escape

de los lixiviados, ya que por se diseño un ducto especialmente para su recolección, la distancia entre cada orificio fue de $1,6\text{ cm}$, debido a que la probeta del tabla 7.1 se diseño de tal forma que la distancia de cada orificio es el doble del diámetro de este.

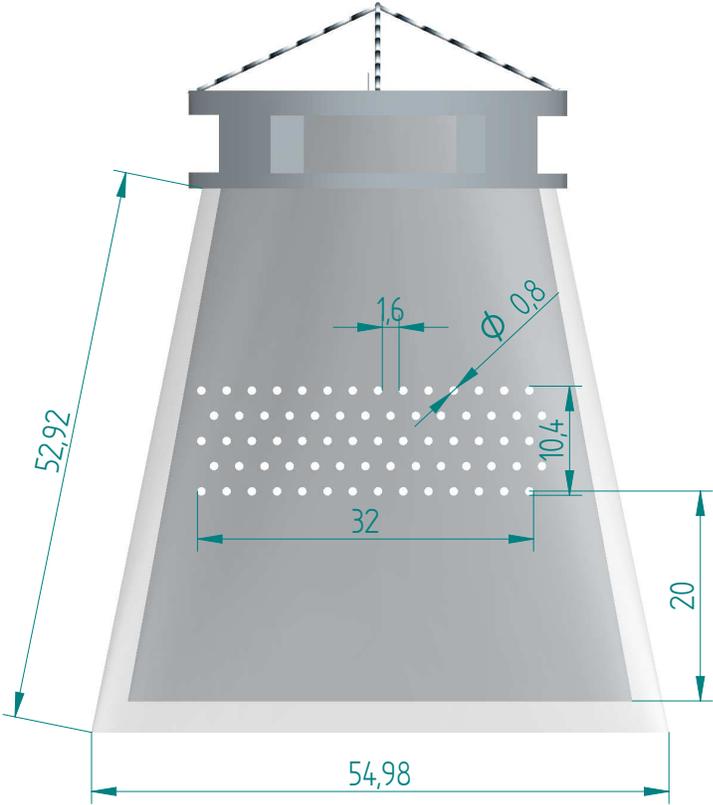


Figura 7.2: Diseño de la bolsa plástica con sus respectivas medidas en centímetros

El área donde están ubicados los orificios corresponde a un área mayor que 180 mm^2 , debido a las múltiples posibilidades de distribución de los RSD la parte superior no esta con orificios debido a como se muestra en la figura 7.1 estará abierta para la salida del aire.

7.2.2. Sistema de calentamiento de aire

La selección de los materiales del sistema de calentamiento dependen de su conductividad térmica y eléctrica, no se localizo un tubo con propiedades intermedias que permita el contacto con la resistencia eléctrica y con el flujo del aire, esto se debe a que un buen número de materiales económicos que son aislantes eléctricos son aislantes térmicos, por lo que se opto de cubrir con pintura para alta temperatura base de aceite el tubo de un material con gran conductividad térmica y económico, el cobre, en la tabla 7.4 se presenta el cuadro comparativo de las posibles dimensiones del tubo de cobre. A partir de la figura 6.3

Tabla 7.4: Comparación de las temperaturas mínimas de tubo de cobre en largos y en diferentes diámetro

Temperatura mínima del tubo para el calentamiento del aire a 60°C			
Largo / Diametro	1/2 pulgada	3/4 pulgada	1 pulgada
0,3 m	150°C	196°C	290°C
0,5 m	107,68 °C	134°C	172°C
0,8 m	84°C	100,71°C	123°C

se calculó que la temperatura interior necesario para calentar el aire a 60°C es de 108°C en régimen de transición, las dimensiones del tubo adecuadas son 0,5 *pulg* de diámetro y 50 *cm* de largo, en la figura 7.3 se muestra el perfil de temperatura dentro del tubo.

En la figura B.1 se presenta la hoja de cálculo empleada en el desarrollo del perfil de temperatura a lo largo del tubo, el coeficiente de transferencia de calor entre el tubo de cobre y el aire que fluye a través de este es de 46,22 $w/m^2\circ C$ y el flujo total de calor es en los 50 *cm* de área de contacto es de 52,68 *w* para un Reynolds de 6556.

El perfil de temperatura a lo largo del radio del tubo de cobre no presentó mucha diferencia con respecto a la temperatura interna del tubo, lo que

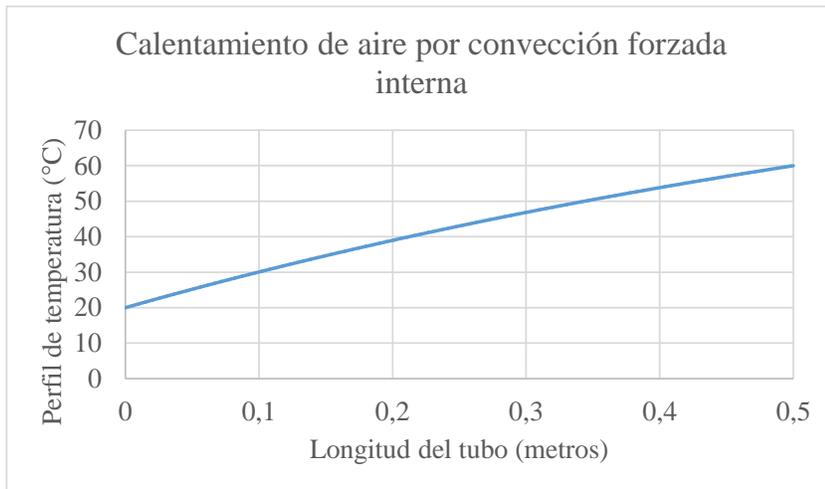


Figura 7.3: Perfil de temperatura a lo largo del tubo de calentamiento

se deduce despreciable, en la figura 7.4 se presenta el perfil de temperatura a lo largo del tubo.

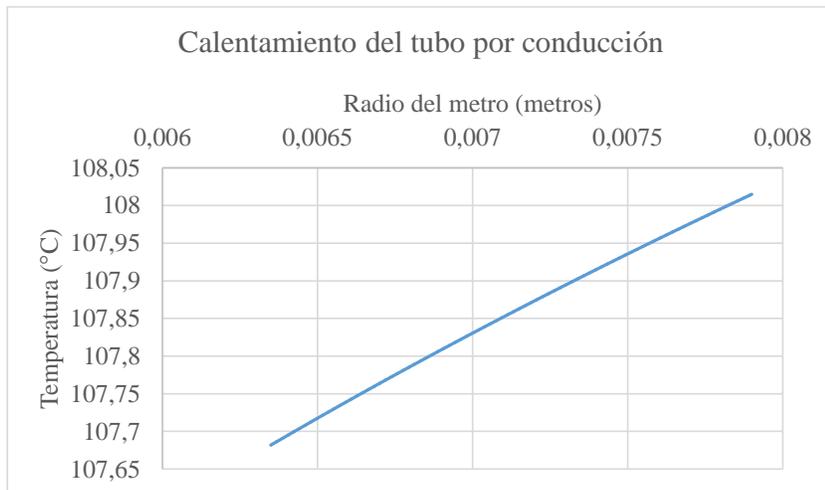


Figura 7.4: Perfil de temperatura radial del tubo de cobre

Para evitar el contacto directo entre la resistencia eléctrica y el aislante, se ubico un tubo de aluminio también aislado electricamente con pintura para alta temperatura, esto evita que la espuma sea cargada electricamente y pueda alterar el sistema.

El aislante que se selecciono fue de poliuretano (PU), ya que es económico y

se utiliza para aislar térmicamente tubos metálicos, el diametro interno del PU es de 1 *pulg* debido al tubo de aluminio, y el exterior corresponde a 8,06 *cm* en la figura 7.5 se presenta el perfil radial de temperatura en la espuma de PU.

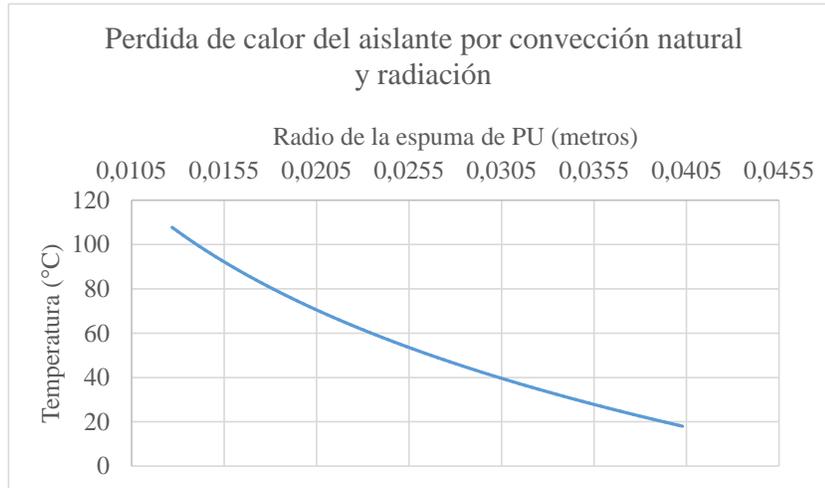


Figura 7.5: Perfil de temperatura radial del asilante

En el Anexo B las hojas de cálculo utilizadas en las figuras 7.3, 7.4 y 7.5

7.2.3. Sistema de calentamiento eléctrico

Basados en la temperatura obtenida de 108°C como necesaria para elevar la temperatura del aire a 60°C , se determinaron las características de la resistencia a elaborar. Se planteó diseñar la resistencia para lograr un calentamiento máximo de 135°C , aproximadamente un 25% más de la temperatura calculada (108°C), esto con el objetivo de compensar los factores no controlables del sistema como, variaciones en la corriente o perdidas no calculadas que indujeran al sistema a calentar el aire por debajo de las condiciones requeridas. La resistencia se diseñó de ferro-níquel en forma espiral para contener el tubo de cobre recubierto con la pintura de alta temperatura, buscando de esta manera lograr un calentamiento uniforme cubriendo la mayor superficie posible del tubo, en el anexo se encuentra en detalle los cálculos de las dimensiones de resistencia

eléctrica.

El el ferro-níquel (NI 55%, FE 43%, OTROS 0.7%), es comercialmente accesible y económico, de propiedades físicas adecuadas para el calentamiento (resistividad: $0,8 \times 10^{-6} \Omega m$, Densidad: $8900 \text{ kg}/m^3$, Calor específico: $444 \text{ J}/\text{Kg}^\circ\text{C}$).

Teniendo en cuenta la superficie toroide disponible para la resistencia, formada por espacio comprendido entre el tubo de cobre y el tubo de aluminio; y los diámetros disponibles comercialmente se eligió de alambre de 0.7 mm de diámetro.

De acuerdo a la ecuación 4.14 la potencia para una intensidad de $3,17 \text{ A}$ y una resistencia de $33,52 \text{ ohmios}$ es de 430 J , por lo que el caudal de calor respecto a la ecuación 4.16, el volumen de un alambre de ferroniquel de 15 metros es de $5,77 \times 10^{-3} m^3$, este alambre tiene una masa de $51,37 \text{ g}$ por lo que se calculó una relación de calor disipado sobre masa de $Q/m = 60200 \text{ J}/\text{Kg}$ por lo que la temperatura del alambre para calentar el tubo a 108°C es de $60200 \text{ J}/\text{Kg} \div 444 \text{ J}/\text{Kg}^\circ\text{C} = 137^\circ\text{C}$.

En síntesis el sistema de calentamiento esta integrado por los componentes que se presentan en la figura 7.6 y son:

- Tubo de cobre: Este tubo tiene un diámetro interno de media pulgada o $1,27 \text{ cm}$ y un diámetro externo de $1,58 \text{ cm}$, se ignora el aumento del diámetro externo por la aplicación de varias capas de alta temperatura.
- Resistencia eléctrica en espiral: La resistencia tiene una medida de 15 cm y esta enrollada a lo largo de todo el tubo de cobre.
- Tubo de protección de aluminio: Este tubo tiene un diámetro interno de $0,22 \text{ cm}$ y un diámetro externo de una pulgada también tiene una capa interna de temperatura para alta temperatura, este tubo tiene funciones de seguridad.
- Espuma de poliuretano: Sirve como aislante térmico, su diámetro interno

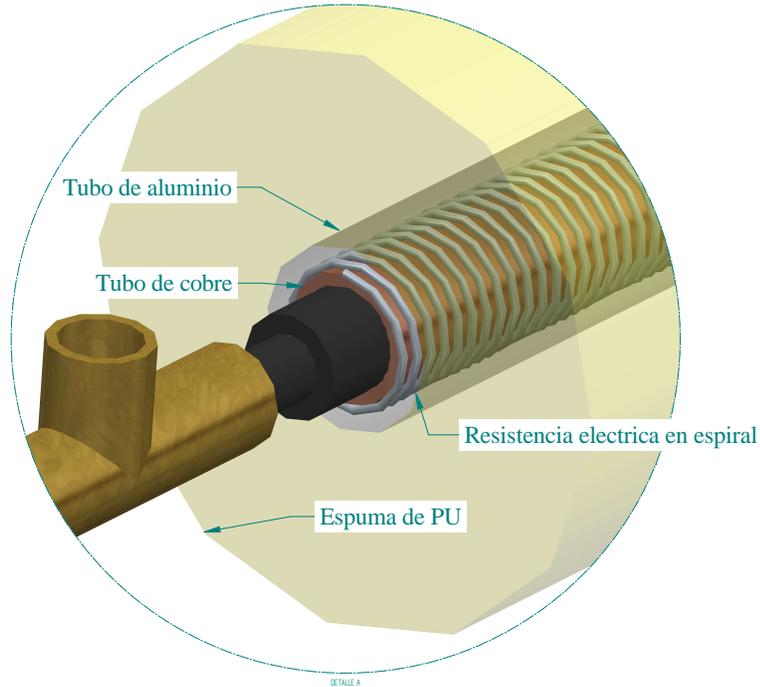


Figura 7.6: Estructura del sistema de calentamiento

es de una pulgada y su diámetro externo es de $8,05\text{ cm}$.

7.2.4. Diseño del circuito de control

Se optó por utilizar un sistema de control tipo ON-OFF en feedback, la idea de este sistema es controlar la temperatura del aire a partir del tiempo de exposición de la resistencia a la corriente. Así el sistema de control cortara el suministro de corriente alterna, a la resistencia eléctrica y por ende su calentamiento y el del tubo.

Se propone un sistema de control analógico, conformado por 4 etapas:

Fase 1: Sensor

El diseño contempla un sensor de temperatura LM35 en encapsulado tipo T92. Por su precisión, sensibilidad, rango de operación, y linealidad. Conectado a una diferencia de potencial continua de 9 voltios. Esta fase nos arroja un valor de 1 milivoltio por cada grado centígrado.

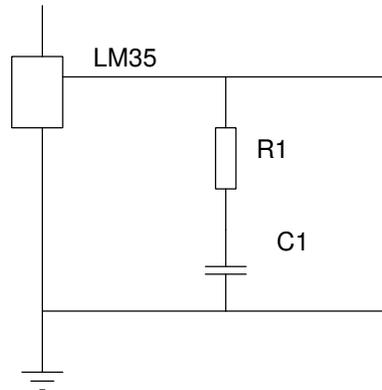


Figura 7.7: Circuito del Sensor

Se agrega un bypass formado por una resistencia en serie de 75 ohmios con un capacitor de 1 microfaradio, conexión según como se sugiere en la datasheet del fabricante.

Fase 2: Amplificador

Con el objetivo de hacer más preciso el sistema de control, se amplifica la diferencia de potencial arrojada por la fase 1. Por medio de un amplificador operacional LM324, conectado en modo “No inversor”. La configuración usada permite una amplificar 10 veces el voltaje de entrada si el valor de la resistencia R3 es de 99k y el da la resistencia 2 R2 de 10k, esto viene dado por la fórmula:

$$V_{amplificado} = 1 + \frac{R2}{R3} \quad (7.1)$$

Especificada por el fabricante en la datasheet¹

¹Datasheet lm324

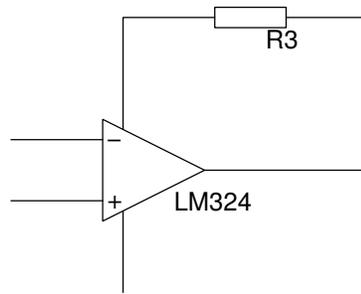


Figura 7.8: Circuito de Amplificador

Para adaptar el sistema a los componentes comerciales se cambia la resistencia de 99k por una de 82k en serie con otra resistencia de 8,2k, ya que una resistencia de valor superior, da un sesgo por exceso, permitiendo el paso de aire menos caliente que el valor ubicado en el setpoint.

Fase 3: Comparación

: Esta fase se compone de un amplificador operacional LM324, usado como comparador el cual es alimentado por dos fuentes de voltaje, la que proviene de la fase 2, y una segunda que proviene de un potenciómetro, alimentado por 9 voltios, será este potenciómetro nuestro *set point*.

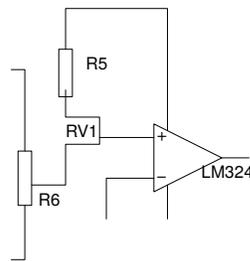


Figura 7.9: Circuito de Comparación

Cuando el voltaje proveniente de la fase 2, es inferior al voltaje de referencia proveniente del *set point*, un voltaje de 8 voltios es liberado a la fase 4.

Fase 4: Actuador

Esta fase recibe como estímulo una diferencia de potencial proveniente de la fase 3, que permite el paso de corriente alterna al calentador, a través de un Relé.

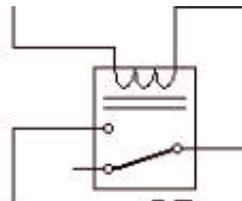


Figura 7.10: Circuito del Actuador

Componentes del sistema de control adicionales

1. Termocupla: Se ubicó una termocupla en la salida da aire cerca a los micro tubos para identificar la temperatura de salida del aire.
2. Potenciómetro de calibración: Se agregó un potenciómetro a la salida del sensor LM 35, ya que este se encuentra en la salida del calentador y no en la salida de aire a la bolsa se agregó un potenciómetro para poderlo calibrar con el calor obtenido en la termopila y enviar a la fase 2 de amplificación una diferencia de potencial correspondiente a la medición en la salida del aire registrando el cambio de temperatura sin afectar la medición.
3. SWICTH'S: Para el paso de corriente alterna al relé, para el paso de corriente DC de 9 V al sistema de control, para el paso de corriente DC 3V a la termocupla. Y un swicth de pulso para la salida de corriente del relé a la resistencia, como SWITCH de emergencia.
4. FUSIBLE de 5 Amp: Como medida de seguridad para proteger el circuito de control, conectado a la salida de corriente alterna del circuito de control

a la resistencia.

En el anexo C se presentan los planos de los circuitos del control de temperatura y del control eléctrico.

7.2.5. Diseño de Accesorios

Suministro de aire al sistema

Se propone una potencia de un motor de 250 w que normalmente se encuentra en el mercado para todo tipo de sopladores, estos motores producen un caudal máximo de 2,3 cfm (pies cúbicos por minuto). En la figura 7.1 se presenta el sistema de flujo de aire que recorre desde la entrada, hasta la salida en las micro-mangueras.

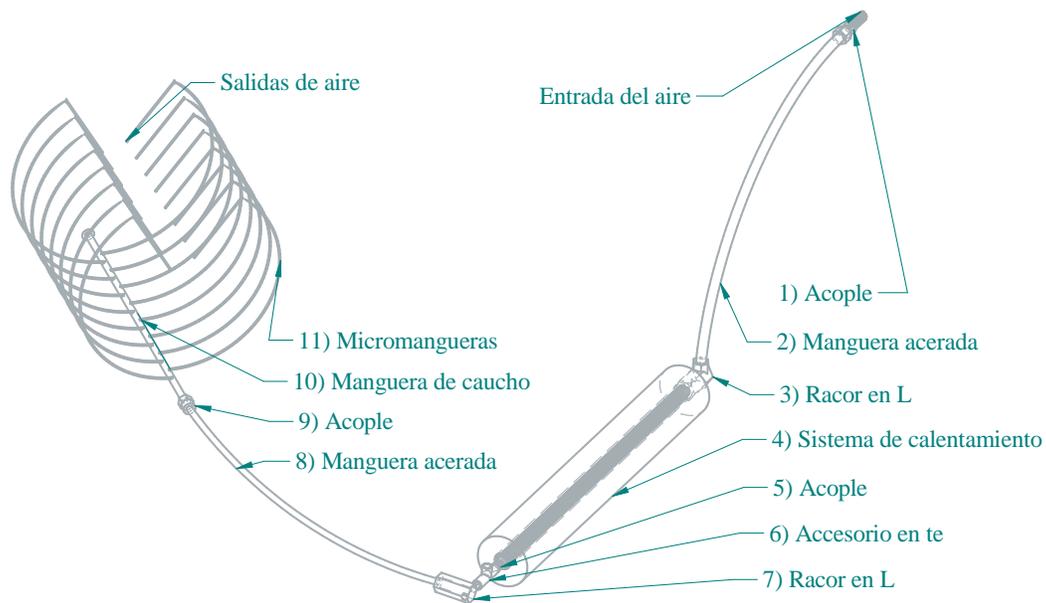


Figura 7.11: Trayecto del flujo del aire por el sistema de calentamiento hasta la bolsa

El sistema de flujo de aire está compuesto por una entrada adaptable a un acople a cualquier tipo de suministro de aire, según la figura 7.11.

1. Acople de 1/2 de pulgada a 5/8 de pulgada.
2. Manguera acerada de 5/8 de pulgada de 60 cm de largo.
3. Racor en L de 5/8 de pulgada a 1/2 de pulgada.
4. Calentador eléctrico de 50 cm de largo.
5. Acople de 1/2 de pulgada a 1/4 de pulgada.
6. Accesorio en te de 1/4 de pulgada en donde sale la señal al control de temperatura
7. Racor en L de 1/4 de pulgada a 1/2 de pulgada-
8. Manguera acerada de 1/2 de pulgada de 60 cm de largo.
9. Acople de 1/2 de pulgada a 0,8 *cm*
10. Manguera de material reciclado de 40 *cm* de largo.
11. 16 micro mangueras de silicona a 2 *cm* de distancia de cada una, de 0,2 *cm* de diámetro

Las micromangueras aparecen en la figura 7.11 dobladas, debido a que se propuso a que el flujo del aire dentro de la bolsa empezara en la parte inferior y no en el medio, debido a la dirección del aire caliente dentro de la bolsa.

Sistema de recolección de lixiviados

La recolección de lixiviados se efectúan en un contenedor de PVC, conectado a la bolsa plástica levemente inclinada, en la figura 7.12 se presenta las medidas de la línea que recorren los lixiviados, la capacidad del contenedor es de 0,5 litros, con posibilidad de vacío en el transcurso de la operación de secado con el equipo.

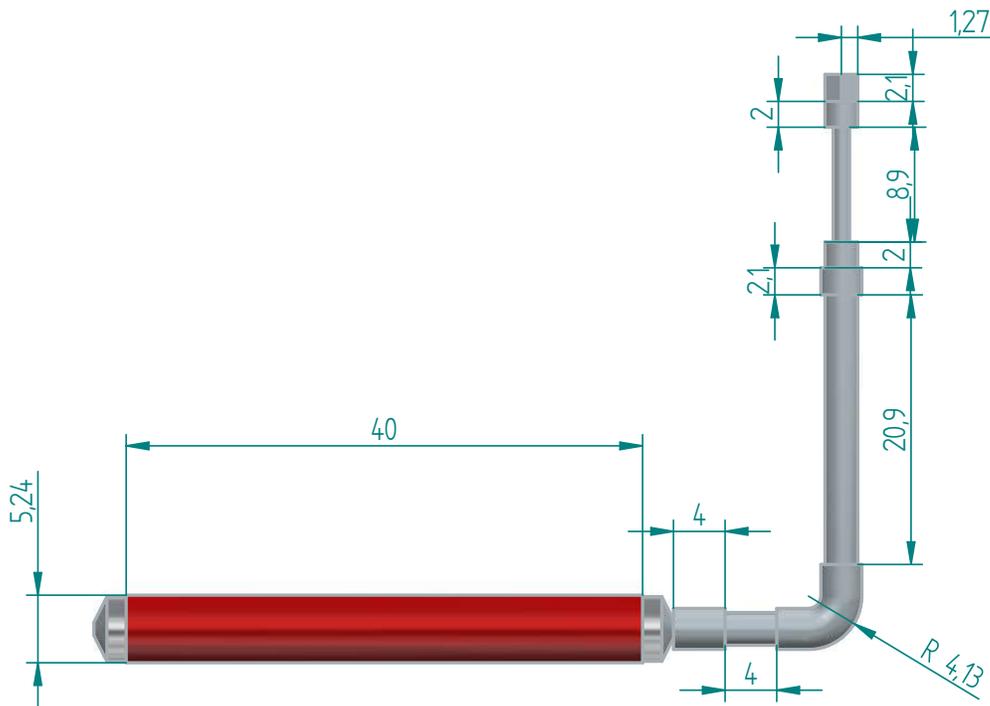


Figura 7.12: Estructura del sistema de recolección de lixiviados, medidas en cm.

7.3. Evaluación técnico y económica preliminar

7.3.1. Funcionamiento técnico del equipo de secado

El flujo de aire fue examinado en el equipo durante 8 horas a temperatura ambiente con un caudal de $0,00109m^3/s$, en este lapso de tiempo el equipo tolero velocidades en el sistema de hasta $8,6 m/s$.

El sistema de calentamiento estuvo a prueba durante 4 horas a $40\text{ }^\circ\text{C}$, el tiempo muerto en el que la temperatura del aire coincidía con la temperatura del *set point*, fue de 50 segundos; en la prueba del sistema de calentamiento a $60\text{ }^\circ\text{C}$ el tiempo muerto fue de 85 segundos, para ambas pruebas, el prototipo se mantuvo estable.

La bolsa plástica toleró el peso de 42 kg durante 3 días sin sufrir defor-

mación, donde se cambiaba el peso para analizar la exactitud de la balanza, mostrando exactitud del equipo.

La dispersión de agua en la bolsa plástica presente ausencia de derramamiento de líquido dentro de ella, y se recolecto el medio litro de agua que se había derramado con anterioridad.

7.3.2. Presupuesto inicial y ejecución

Para el desarrollo del equipo de secado, se fijó un presupuesto inicial de \$300.000, basado en cotizaciones de almacenes locales, correspondientes a materia prima, suministros y componentes electrónicos: Sin embargo la inversión real por estos mismos conceptos fue de \$343.250, el sobre costo en la ejecución que corresponde al 14% del presupuesto inicial, obedeció a factores como:

Variación de los precios de insumos

Ya que la materia prima se compró de acuerdo a la evolución de cada etapa del proyecto, y el presupuesto inicial fue fijado a fecha de noviembre de 2013, por lo que se vio afectado por el incremento del IPC de los meses 2013-12 a 2014-10 que en promedio fue de 2,64% (Banco de la Republica, 2014) para artículos no alimenticios, transables y no transables, que aplicado al presupuesto total inicial representa \$8.000.

Estimación de costos adicionales y otros

Los insumos adicionales y otros costos fijados para el presupuesto inicial no fueron suficientes, esto corresponde a inversiones adicionales como la pintura aislante, las ruedas, la pintura en agua, tornillos, soportes y otros suministros no contemplados inicialmente.

La compra de materiales en almacenes no cotizados

Debido a la disponibilidad inmediata de los productos en los almacenes cotizados. En la tabla se detalla el resumen del presupuesto inicial vs el presupuesto ejecutado y sobre costo por sección del equipo.

Tabla 7.5: Resumen del presupuesto ejecutado

RESUMEN DE EJECUCION DE LA INVERSION		PRESUPUESTO INICIAL	DIFERENCIA	SOBRE COSTOS
SECCION	VALOR	VALOR	VALOR	PORCENTAGE
SITEMA DE CONTROL	\$ 65.950,00	\$ 60.650,00	\$ 5.300,00	9%
CALENTADOR ELECTRICO Y TUBERIA	\$ 96.000,00	\$ 83.000,00	\$ 13.000,00	16%
RECOLECCION DE LIXIVIADOS	\$ 15.300,00	\$ 13.000,00	\$ 2.300,00	18%
SISTEMA DE SUGECION DE LA BOLSA	\$ 123.000,00	\$ 123.000,00	\$ -	0%
FERRETERIA Y OTROS	\$ 43.000,00	\$ 20.350,00	\$ 22.650,00	111%
TOTAL MATERIALES, COMPONENTES Y SUMINISTROS	\$ 343.250,00	\$ 300.000,00	\$ 43.250,00	14%
MANO DE OBRA	\$ 67.600,54	\$ 67.600,54	\$ -	0%
TOTAL EQUIPO	\$ 410.850,54	\$ 367.600,54	\$ 43.250,00	12%

7.3.3. Determinación del costo de mano de obra

Se estimó el costo la mano de obra por unidad producida en \$ 67.600 equivalentes a un día de trabajo de 8 horas; basados en el pago de un salario mensual de \$1'000.000 más prestaciones de ley (Villa, 2006), equivalentes a un costo mensual de \$1'622.413 para un operario de perfil técnico. Cuadro 7.6

El tiempo de producción que se presenta en el tabla 7.7 se calculó de acuerdo a los datos adquiridos por experiencia al momento de realizar el ensamble del prototipo; debido a las características del proceso productivo se hicieron tomas de tiempo por cada sección fabricada, se efectuaron 4 repeticiones en las actividades que no hubo limitante por materia prima y se calculó el promedio de tiempo invertido en la fabricación de cada sección (como cada sección termina ensamblada en la estructura de soporte no se contempla una etapa de ensamble final).

Se calculó de esta manera un contenido básico del trabajo de 05:07:21 horas,

Tabla 7.6: Costo mensual para un operario de perfil técnico

SALARIO MENSUAL	\$ 1.000.000,00
Transporte	\$ 72.000,00
PRESTACIONES SOCIALES	
Cesantías	\$ 89.333,00
Primas	\$ 89.333,00
Intereses sobre cesantías	\$ 10.720,00
DESCANSO REMUNERADO	
Vacaciones	\$ 41.667,00
APORTES A LA SEGURIDAD SOCIAL	
Pensiones (AFP)	\$ 120.000,00
Salud (EPS)	\$ 85.000,00
Riesgos Laborales (ARL)	\$ 24.360,00
PARAFISCALES	
Parafiscales	\$ 90.000,00
TOTAL MENSUAL	\$ 1.622.413,00

Tabla 7.7: Resumen de toma de datos de tiempo de producción

RESUMEN TOMA DE DATOS DE TIEMPOS DE PRODUCCION					
SECCION	TOMA 1	TOMA 2	TOMA 3	TOMA 4	PROMEDIO
SISTEMA DE CONTROL	2:59:41	2:42:59	2:39:24	2:41:00	2:45:46
CALENTADOR ELECTRICO Y TUBERIA	1:34:52	1:38:06	1:33:30	1:35:57	1:35:36
RECOLECCION DE LIXIVIADOS	0:10:37	0:10:20	0:10:29	1:20:58	0:28:06
SISTEMA DE SUGECION DE LA BOLSA	0:18:04	0:18:23	0:18:07	0:16:55	0:17:52
TOTAL	5:03:14	4:49:48	4:41:30	5:54:50	5:07:21

aproximado a 05:10:00 horas, dato sobre el cual se calcularon los suplementos correspondientes a ocio productivo esperados para este tipo de operación, según metodología expuesta por Villa (2006) en el tabla 7.8.

7.3.4. Precio de coste completo del equipo de secado

A continuación se presenta el resumen del coste completo de la fabricación de una unidad de equipo de secado, bajo las siguientes premisas, para generar el costo de tabla ara la fabricación de una unidad de sistema de secado de residuos sólidos (Cuadro7.9).

Tabla 7.8: Cálculo de tiempo aproximado de producción de cada unidad de sistema de secado de residuos sólidos de origen domestico

CALCULO DE TIEMPO APROXIMADO DE PRODUCCION	
CONTENIDO BASICO DE TRABAJO	5:10:00
SUPLEMENTOS FISICOS	0:45:00
SUPLEMENTO POR LIMPIEZA	0:15:00
SUPLEMENTOS MISCELANEOS	0:23:15
SUPLEMENTO POR POLITICA	0:45:00
SEPLEMENTO POR INICIO Y FIN	0:30:00
TIEMPO APROXIMADO DE PRODUCCION	7:48:15

1. El coste de aprovisionamiento corresponde al 10% del valor de la materia prima, por conceptos de transporte y almacenaje.
2. Se desprecia coste de marketing, puesto que no se han efectuado acciones de marketing.
3. Se desprecia coste financiero, debido a que el proyecto se financio con recursos propios.
4. Se desprecia costo Administrativo por la cuantía de los recursos y la carencia de estructura empresarial que administrar.

Tabla 7.9: Cálculo del componente del costo para la fabricación de una unidad de sistema de secado de residuos sólidos

COMPONENTE DEL COSTO	VALOR	COSTO
COSTE DE COMPRA DE MATERIA PRIMA	\$ 343.250,00	-
COSTE DE APROVISIONAMIENTO	\$ 34.325,00	-
COSTE TOTAL DE LA COMPRA		\$ 377.575,00
COSTE DE LA MANO DE OBRA		\$ 67.600,54
GASTOS GENERALES INDUSTRIALES		\$ 563,08
PRECIO DE COSTE TOTAL DE LA PRODUCCION		\$ 445.738,62

Capítulo 8

Análisis de resultados

8.1. Discusión de la metodología QFD

La metodología QFD favoreció la visión integral del proyecto, lo que permitió entenderlo no como un equipo cuya finalidad es efectuar una tarea específica, si no como una herramienta que va a ser usada por alguien y por lo que debe ajustarse a las necesidades del usuario, esta concepción fue bastante útil al momento de realizar el ensamble final del equipo, por lo tanto se consideró las variables más importantes de una futura operación, ya en un ambiente domestico (*in situ*).

El desconocimiento de estos tratamientos en la metodología, tendría como consecuencia el desarrollo de un diseño de equipo de secado, carente de satisfactores las necesidades del cliente, generando posibles causas de errores al momento de su experimentación.

El diseño del equipo trascurrió centrados más en objetivos como % de ahorro de servicios de alcantarillado y aseo el tiempo necesario de uso del equipo que el peso que podría tener este o el espacio ocupado.

Estas variables fueron interpretadas posteriormente como el desarrollo de un equipo como eficiencia, mínimo consumo energético y materiales económi-

cos, en donde se dio prelación a la disminución de costos que a la sofisticación de los sección del equipo y componentes electrónicos

8.2. Discusión del sistema de almacenamiento

Los ensayos de tensión-deformación, determinaron que el PEBD es el material para la fabricación de la bolsa, para contener los RSD; basados en la experiencia obtenida al momento de trabajar este material, podemos afirmar que el PEBD soportara los tratamientos conjuntos de flujo de aire, temperatura, peso y tracción-deformación de los residuos solidos que va a contener, durante mínimo 3 días.

En la tabla 6.1 se presenta el esfuerzo máximo a la deformación de una probeta con la forma de la figura 6.2, podemos identificar que la efectuación de estos ensayos sin el tratamiento con la formación de orificios, daría como resultado que el PP, sería el material con una mejor resistencia a la deformación, sin embargo el PEBD fue favorecido en el descenso de la deformación con el tratamiento conjunto con formación de orificios y temperaturas mayores a la ambiente; el material que menos reduce la resistencia a la deformación fue el PEAD para cualquier tipo de tratamiento.

La bolsa es operativa con cualquier tipo de desecho, inclusive aquellos corto punzantes como vidrio y latas, es decir, es operable con cualquier mezcla heterogénea de RSD, y no es necesario realizar una previa separación en la fuente para el secado. a excepción de los desechos que constituyen riesgo biológico, que por normatividad colombiana deben tener otra disposición.

8.3. Discusión del sistema de calentamiento eléctrico

El calentador eléctrico demostró en las pruebas ser operativo y soportar su uso intermitente, no presentó mayores signos de desgaste y un tiempo de eliminación de *offset* menor a 2 minutos, en régimen de transición, este tiempo muerto muestra que los cálculos de convección forzada interna fueron aproximados a la realidad, ya que las ecuaciones de Nusselt, fueron obtenidas de ensayos experimentales.

El perfil radial de temperatura en el tubo de cobre permitió conocer que la diferencia de temperatura entre el diámetro exterior e interior es poco significativa ($0,3^{\circ}\text{C}$) por lo que se pudo asumir despreciables las posibles pérdidas en este entorno, y por lo tanto una rapidez del calentamiento del tubo de cobre por parte de la resistencia eléctrica, el tubo de aluminio que rodea la resistencia tiene un menor coeficiente térmico, por lo que el gradiente de temperatura va a estar favorecido hacia los exteriores del sistema de calentamiento.

La protección de espuma fue eficiente con el control de temperatura, ya que permitió que el relé no se deteriorara como actuador del sistema de control; esto se debe a que fue mínima la flujo de calor con los alrededores, reduciendo las pérdidas y por lo tanto el consumo eléctrico

También el funcionamiento del sistema eléctrico en el equipo evidenció que al haber incorporado varias capas de pintura esmaltada, no permitió ningún contacto entre la resistencia eléctrica y el tubo de cobre, evitando así, cualquier corto eléctrico en el sistema de calentamiento.

8.4. Sistema de control

La caja de mando de control es la que se encuentra el sistema de control, resulto ser ergonómica y dar facilidad al usuario para verificar el proceso de

secado; el sistema de control permitió controlar la temperatura final de una forma eficiente, con un *offset* bajo.

Esta mando de control le permite al usuario variar la temperatura del flujo del aire a la temperatura que considere, desde la temperatura ambiente hasta los 60°C, con el fin de que el secado se mejore con algunas posibles curvas de secado que se pueden realizar con el presente equipo.

Durante la operación de secado, no se recalentaron los componentes, y los dispositivos de seguridad reaccionaron de acorde a lo diseñado. El relé fue el único componente que deforma indeseada presenta un sonido debido a su acción de conmutación; lo que puede producir molestias al usuario final.

Con el control *on-off* se pudo comprobar lo indicado por la literatura que es el control apropiado para el calentamiento eléctrico.

8.5. Accesorios

La balanza digital fue ensayada durante 3 días verificando los pesos cada media hora, durante 8 horas por día, no se presentó variación mayor a 10 gramos, el inconveniente que presento este accesorio es que debe ser reiniciada en cada toma, ya que no registra el peso en tiempo real ni puede hacer una toma y guarda el peso, por lo tanto es necesario hacer una tara o reiniciar para tenerla una medición.

Este accesorio puede resultar en una incomodidad, ya que el usuario desea ver las posibles variaciones de RSD en tiempo real, por lo tanto puede ser una sección del equipo con posibilidad de seguir mejorando

El sistema de recolección de lixiviados fue funcional, ya que no se permitió el derrame de liquido en la parte exterior de la bolsa, sin embargo debido al desconocimiento del equilibrio aire agua en las posibles interfaces de los RSD, a partir varias experimentaciones puede cambiar el tanque de almacenamiento de residuos sólidos de origen doméstico.

La pirámide de madera no presento inconveniente en resistir el peso máximo que puede producir los RSD; la forma piramidal de este accesorio permitió un cambio accesible de la bolsa plástica, y poderla reemplazar por otra.

8.6. Evaluación económica preliminar

Se pudo estimar un costo de producción de una unidad del equipo en \$ 445.738,62, en un tiempo de fabricación de 8 horas; el prototipo diseñado, además de incluir los componentes necesarios para satisfacer los requerimientos del cliente, contiene componentes exclusivos para la experimentación, como es el caso de la balanza, y la termocupla digital, por lo que pensando en una producción netamente enfocada en el cliente final, es posible disminuir el costo de fabricación, suprimiendo estos componentes o cambiándolos por versiones más simples.

Preliminarmente no se puede afirmar que el equipo es rentable ya que es necesario determinar la cantidad de humedad que puede ser removida de los RSD, y la temperatura adecuada para el proceso, antes de calcular la reducción de costos por servicios de recolección que generaría; pero aun así, se calcula que de alcanzar un 50%¹ de reducción de los RSD, el equipo sería competente, pues alcanzaría el mismo porcentaje de reducción que otros equipos como el fabricado por la National Technical University of Athens (2012)

¹Este valor equivale al porcentaje de deshidratación obtenida por el equipo diseñado por la National Technical University of Athens (2012)

Capítulo 9

Conclusiones

El diseño del equipo de secado para la deshidratación de residuos sólidos de origen domestico, se caracterizo por ser funcional porque se implemento desde un principio el despliegue de la función de calidad, esta herramienta nos permitió enfocar la construcción del diseño del equipo con materiales económicos sin desatender la eficiencia del equipo, mediante la evaluación preliminar técnico económica.

El diseño del sistema de almacenamiento fue utilitario, ya que las bolsas plásticas son los contenedores universales para los RSD, con la perforación de lo orificios permite ajustar a las muchas disposiciones de espacio que tendrá los RSD en las bolsas de PEBD.

El sistema de calentamiento se adapto con el sistema de control debido a que se aplico una capa de pintura esmaltada para alta temperatura, evitando cualquier posible riesgo de corto eléctrico, además por la implementación de aislante térmico en el sistema de calentamiento, se pretendió utilizar la resistencia eléctrica el menor tiempo posible, esto se evidencio en la funcionalidad del sistema de calentamiento de aire.

La selección de los accesorios permitió una correcta construcción del prototipo, debido a que a pesar de ser económicos, se ensamblaron permitiendo un

adecuado flujo de aire desde el suministro, y una apropiada recolección de lixiviados, lo que no obstruye a los demás elementos que componen el prototipo; la balanza es un aspecto por mejorar debido a que no capta los datos en tiempo real.

La evaluación técnico-económica preliminar del prototipo fue posible porque se utilizó cada una de las secciones del equipo por separado, respaldando que en el momento de la experimentación, no acontezca imperfecciones por funcionalidad, sin embargo para una mejor evaluación es necesaria una experimentación bajo condiciones representativas de uso del equipo

Capítulo 10

Recomendaciones

Para una mejor evaluación de la función de calidad, se pudo haber considerado la una posible competencia del equipo, cuando exista un desarrollo en equipos de secado de RSD más evolucionado que se tiene hoy en día, sin embargo, en el entorno Colombiano no fue posible considerar alguna competencia, para la implementación de este proyecto con la misma metodología, sería interesante incluir el producto desarrollado por alguna compañía, para mejorar los aspectos básicos del equipo.

La principal recomendación que se puede hacer en este proyecto es evaluar el equipo sustentado en condiciones *in situ*, con RSD propios de una ciudad como Bogota D.C.

Además, debido a que no posee datos del equilibrio gas-líquido en este equipo, una posible evaluación de las alternativas *in situ* de recolección de lixiviados, con su posterior uso o tratamiento.

Referencias

- Adani, F., Baido, D., Calcaterra, E., y Genevini, P. (2002, 7). The influence of biomass temperature on biostabilization–biodrying of municipal solid waste. *Bioresource technology*, 83(3), 173-179.
- Ahmed Shafiul Azam, y Ali Mansoor. (2004, sep). Partnerships for solid waste management in developing countries: linking theories to realities. *Habitat International*, 28(3), 467–479. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0197397503000444>
- Arrieta, L. A. (2013). *Así cambiaron los ingresos de los privados de las basuras antes y después de petro* (Inf. Téc.). Universidad Javeriana.
- Askeland, D., y Phulé, P. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Thomson. Descargado de <http://books.google.com.co/books?id=2kpDKWJ7eYIC>
- Banco de la Republica. (2014). *Índice de precios al consumidor (ipc)* (Inf. Téc.). Banco central de Colombia.
- Çengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. McGraw-Hill. Descargado de <http://books.google.com.co/books?id=uxLCMQAACA AJ>
- de Castro, E., y Díaz, I. (2008). *Gestión de precios*. ESIC Editorial. Descargado de <http://books.google.es/books?id=17xMiFQldrkC>
- de Guereñu, F., Filomena González, M., Ruíz, M., y Fraile, R. (2008). *Diversificación ii ámbito científico-tecnológico*. Editorial Editex. Descargado de <http://books.google.com.co/books?id=p19Q8gG9lQMC>
- Environmental Protection Division. (2011). *A technical review of municipal solid*

waste thermal treatment practices (Inf. Téc. n.º 1231-10166). Stantec.

Fuentes, J. R. (2010). *Estudio comparativo técnico-económico de sistemas de calentamiento de fluidos basados en resistencias eléctricas, inducción magnética y calderas diésel*. (Tesis de Master no publicada). UNIVERSIDAD DE CHILE.

Montgomery, D. (2005). *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley. Descargado de <http://books.google.com.co/books?id=TJFoAAAACAAJ>

National Technical University of Athens. (2012, junio). *Development and demonstration of an innovative household dryer for the treatment of organic waste*. Descargado de <http://www.uest.gr/drywaste/>

Pascual, R., y Subías, A. (1988). *Planificación y rentabilidad de proyectos industriales*. Marcombo. Descargado de <http://books.google.com.co/books?id=6PNr1sPd-AoC>

Seborg, D., Mellichamp, D., Edgar, T., y Doyle, F. (2010). *Process dynamics and control*. John Wiley & Sons. Descargado de http://books.google.com.co/books?id=_PQ42kOvtfwC

Sugni, M., Calcaterra, E., y Adani, F. (2005, 8). Biostabilization–biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow. *Bioresource technology*, 96(12), 1331-1337.

Superintendencia de servicios públicos domiciliarios. (2011). *Situación de la disposición final de residuos sólidos en Colombia diagnóstico 2011* (Inf. Téc.). República de Colombia, Libertad y Orden.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., y Vigil, S. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos*. McGraw-Hill. Descargado de <http://books.google.com.co/books?id=tHXQMwEACAAJ>

Treybal, R., y Rodríguez, A. (1980). *Operaciones de transferencia de masa*. McGraw-Hill. Descargado de <http://books.google.com.co/books?id=u3TfPwAACAAJ>

UAESP Unidad administrativa especial de servicios públicos. (2011). *Caracteri-*

zación de los residuos sólidos residenciales generados en la ciudad de bogotá d.c:
(Inf. Téc.). Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.

Villa, M. (2006). *Estudio del trabajo*. Itm. Descargado de <http://books.google.com.co/books?id=Wb85eivgonQC>

Anexos



Figura 1: Fotografía del equipo de secado perfil frontal



Figura 2: Fotografía del sistema de control



Figura 3: Fotografía posterior del equipo de secado

Anexo A

Despliegue de la función de calidad (QFD)

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> QUE'S COMO'S </div>		Mínimo consumo energético	Materiales económicos	Elementos pequeños y livianos	Eficiente	Fácil mantenimiento	Partes sustituibles	Silencioso	Sin combustibles	Temperatura segura de secado	Flujo seguro y efectivo de aire	Recolección de lixiviados	Espacio mínimo	No queme	No contamine	Controlable	Importancia
		% de ahorro de servicio de alcantarillado	9	9	1	3				1							
Tiempo necesario de uso	3			9				3	3	3					1	104	
Vida útil		9		3	9	9			1	1						102	
Ruido							9									95	
Costo de funcionamiento	9	9		9	3	3			1	1		9			1	92	
% co2 ahorrado	9	1	1	3				9								88	
Temperatura de secado	3			9					9	9	9		9	3	9	86	
% de secado de residuos solidos	1			9					9	9	1				9	66	
% humedad emitido		3		3	1	1			3	1		9		9		59	
Precio	9	9		3	3	3	3	9				3			3	55	
Peso		1	9	3	3	1					1	1				53	
Cantidad de fuentes de riesgo		3	3	1			1		9	9	3		9	9	9	50	
Flujo de aire																41	
Espacio ocupado			9	3	1							9			1	19	
PONDERADO		3832	3795	1006	4653	1594	1469	1065	1715	2484	2367	1037	1739	1215	2184		
CUANTOS		Menos de 1000W	Presupuesto	Partes no mayores a un metro	Rentable	Partes basicas	Partes comerciales	No mayor a 70 DB'	0% de uso de combustibles	C=0L > 70C, 0L > 2,7 mmf	tanque de 500 m	menos de 2 m3	sistema de control	diseño de la bolsa	diseño de control		

Figura A.1: Recolección y análisis de las necesidades y expectativas del cliente.

QUE'S	COMO'S																		
	Capacidad de almacenamiento	Poder de calentamiento	Flujo del aire	Operación con baja corriente	Sin temperaturas extremas	Aislado eléctricamente	Aislado térmicamente	Switch de seguridad	Controles sencillos	Suministros sencillos	Suministros resistentes	Fuente de potencia portable	Fuente de potencia facil de usar	Sin instalaciones especiales	Facil de trabajar	De forma familiar	Tamaño adecuado	Componentes económicos	Importancia
Potencia de uso	9	9	9	1	3	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	3	0
Confiabilidad	0	0	0	9	9	9	9	9	1	3	9	0	3	0	0	0	0	3	5
Operatividad	1	0	0	0	1	3	3	9	9	9	9	1	1	9	3	3	9	0	3
Portable	3	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	9	9	9	9	3
Bajo costo de operación	0	9	9	9	9	1	1	0	0	3	1	0	0	9	0	0	0	0	3
Bajo costo de fabricación	0	0	0	0	0	0	0	1	9	9	0	0	0	0	0	0	1	9	1
Diseño estetico	3	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	9	0	0	9	0	1
Total	60	72	72	86	90	57	57	73	50	74	90	30	45	90	36	9	79	24	
CUANTOS	De 10 a 30 kg																		
	Max. 600 W																		
	Max 2.3 cfm																		
	Max. 10 Amp																		
	De 20°C a 100°C																		
	Contactos eléctricos visuales																		
	Superficies cubiertas																		
	2 Switch de seguridad																		
	Con control visual Display																		
	Bolsas Plásticas																		
	Resistentes al desgaste																		
	Baterias 5V																		
	Toma corriente: 120V 50 Hz																		
	Sin Combustion																		
	Con Ruedas																		
	Estético																		
	Altura max. 1,5 m																		
	Componentes comerciales																		

Figura A.2: Definición del equipo, en términos de requerimientos de producción

COMO'S QUE'S	Costo de funcionamiento		% de ahorro de servicio de alcantarillado		% de secado		Tamaño espacio ocupado	Ruido	Peso	Cantidad de fuentes de riesgo	Precio	Tiempo necesario de uso	Temperatura de secado	Flujo de aire	% humedad emitido	Vida útil	% co2 ahorrado	Importancia de la necesidad
	Fácil de usar					3	9	9					3			3		
Seguro						9	1	9				1	3	3				3,5
Estético					1						3							2,5
Barato	9	9	1	1			3			9						3		5,0
Eficiente	3	9	9				1				9	3	3	3	9	9		5,0
Durable				1		1	3	1	9	3	1	3	1	3	9			2,5
Amigable con el ambiente			3		9							1	3				9	4,0
No genere humedad												3	3	3	9	3	1	3,0
No sobrecaliente	9	9	1				3			3	9	1			3	1		3,5
PONDERADO	92	122	66	19	95	53	50	55	104	86	41	59	102	88				

Figura A.3: Definición de los componentes.

Anexo B

Sistema de calentamiento

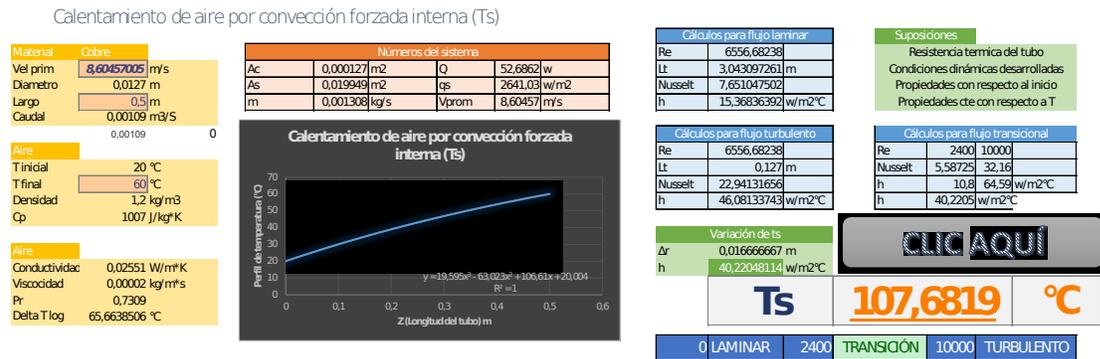


Figura B.1: Hoja de cálculo para la temperatura interna del tubo



Figura B.2: Hoja de cálculo para el perfil radial de temperatura en el tubo de cobre

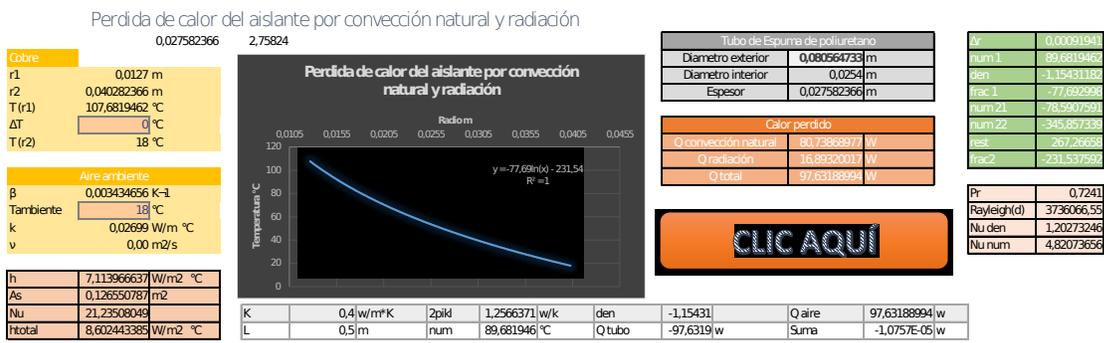


Figura B.3: Hoja de cálculo para las dimensiones mínimas del aislante

