



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR TIPO BANDEJAS PARA  
BIOMASA REQUERIDO POR EL CESTTA-ESPOCH”***

**TESIS DE GRADO**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR**

ALEXANDRA MARIBEL JIMÉNEZ JIMÉNEZ

ADRIÁN ALEJANDRO RODRÍGUEZ PINOS

**RIOBAMBA-ECUADOR**

**2014**

## **AGRADECIMIENTO**

*En primer lugar damos gracias Dios por habernos guiado y acompañado a lo largo de nuestra carrera, por ser nuestra fortaleza en los momentos de debilidad y brindarnos una vida llena de aprendizaje, experiencias y sobre todo felicidad. A nuestras familias, que han sido nuestro pilar fundamental para seguir adelante y no desmayar frente a los obstáculos de la vida.*

*A la Escuela de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por ser la institución que nos ha formado como profesionales. Agradecemos también al Ing. Mario Villacrés y al Ing. Marco Chuiza por su gran ayuda para la culminación de este proyecto. Además de ser nuestros tutores y profesores nos brindaron su amistad.*

*Finalmente queremos agradecer al Centro de Servicios Técnicos y Transferencia Tecnológica (CESTTA) por su colaboración y apoyo durante la realización de la presente tesis.*

***Alexandra y Adrián***

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo principalmente a Dios por darme la oportunidad de vivir y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mis padres que hicieron todo en la vida para que yo alcanzara mis sueños aun cuando eso significase renunciar a los suyos, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino terminaba. A mi hija Sarahí, quien con su sonrisa ilumina cada día de mi existir; al amor de mi vida Diego por apoyarme y caminar junto a mi durante todo este tiempo; a mis hermanas Mayra y Elizabeth quienes me motivan a ser mejor cada día.*

***Alexandra J.***

*A mi mamá Rosa Elena Pinos, quien ha sido mi ejemplo de dedicación y esfuerzo para culminar con una de las etapas más importantes de mi vida. A mi papá Fernando Rodríguez y mi hermano Luis Rodríguez, que de muchas formas me han apoyado para siempre seguir adelante.*

***Adrián R.***

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**HOJA DE FIRMAS**

El tribunal de tesis certifica que: El trabajo de investigación **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR TIPO BANDEJAS PARA BIOMASA REQUERIDO POR EL CESTTA-ESPOCH”** de responsabilidad de la señorita Alexandra Maribel Jiménez Jiménez y el señor Adrián Alejandro Rodríguez Pinos ha sido prolijamente revisado por los Miembros del Tribunal de Tesis, quedando autorizado su presentación.

<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Dr. Silvio Álvarez L. <b>DECANO FAC. CIENCIAS</b>	-----	-----
Ing. Mario Villacrés A. <b>DIRECTOR ESC. ING. QUÍMICA</b>	-----	-----
Ing. Mario Villacrés M. <b>DIRECTOR DE TESIS</b>	-----	-----
Ing. Marco Chuiza <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	-----	-----
Tec. Carlos Rodríguez. <b>DIRECTOR CENTRO DOCUMENTACIÓN</b>	-----	-----
Nota de Tesis	-----	

## **HOJA DE RESPONSABILIDAD**

**“Nosotros, ALEXANDRA  
MARIBEL JIMÉNEZ JIMÉNEZ Y  
ADRIÁN ALEJANDRO  
RODRÍGUEZ PINOS** somos  
responsables de las ideas, doctrinas,  
resultados y propuestas expuestas en  
el presente trabajo de investigación y  
el patrimonio intelectual de la  
Memoria de Grado pertenece a la  
**“ESCUELA SUPERIOR  
POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO”**

**Alexandra Jiménez J.**

**Adrián Rodríguez P.**

## Tabla de contenido

AGRADECIMIENTO

DEDICATORIA

HOJA DE FIRMAS

HOJA DE RESPONSABILIDAD

RESUMEN.....I

SUMMARY.....II

INTRODUCCIÓN.....III

ANTECEDENTES.....IV

JUSTIFICACIÓN.....VI

OBJETIVOS.....VII

1. MARCO TEÓRICO .....1

1.1 BIOMASA.....1

1.1.1 Características de la biomasa. ....1

1.1.2 Clasificación de la biomasa. ....2

1.1.3 Aplicaciones de la biomasa. ....4

1.1.4 Pasto azul (*Dactylis glomerata*). ....7

1.1.5 Aprovechamiento de residuos de biomasa agrícola o residuos agrícolas. ....12

1.2 SECADO.....14

1.2.1 Métodos generales de secado. ....15

1.2.2 Definiciones.....16

1.2.3 Fundamentos del secado.....17

1.2.4 Comportamiento general del secado. ....	21
1.2.5 Curvas de Secado. ....	22
1.2.6 Comportamiento de los materiales en el secado. ....	24
1.2.7 Tipos de secadores.....	26
1.2.8 Secadores de biomasa.....	32
1.3 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO .....	32
1.3.1 Ecuaciones para el diseño de un secador de bandejas.....	32
2. PARTE EXPERIMENTAL .....	39
2.1 SIMULACIÓN.....	39
2.1.1 Determinación de la humedad contenida en el pasto azul.....	40
2.2 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS.....	42
2.2.1 Datos de los ensayos.....	42
2.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN .....	46
2.4 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE PROCESO .....	46
3. CÁLCULOS Y RESULTADOS .....	47
3.1 CÁLCULOS.....	47
3.1.1 Datos adicionales para el diseño del equipo.....	47
3.1.2 Cálculos técnicos del equipo .....	47
3.1.3 Capacidad y dimensionamiento.....	53
3.1.4 Tipos de materiales, control y fuente de calor.....	54
3.1.5 Hoja técnica del equipo. ....	60
3.1.6 Requerimiento presupuestario .....	61
3.2 RESULTADOS .....	63
3.2.1 Datos de tiempo real para la validación del diseño de ingeniería .....	63
3.2.2 Curvas de secado. ....	64

3.2.3 Resultados de los cálculos de ingeniería .....	65
3.2.4 Análisis bromatológico de la muestra seca .....	68
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	68
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	71
5.1 CONCLUSIONES.....	71
5.2 RECOMENDACIONES .....	72
BIBLIOGRAFÍA .....	73
ANEXOS	

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

- A: Superficie expuesta al secado, ( $m^2$ )
- $h_i$ : coeficiente convectivo de transferencia de calor, ( $W/m^2K$ )
- k: coeficiente de conductividad térmica, ( $W/mK$ )
- L: espesor de la superficie expuesta al secado, (m)
- Q: calor útil, (W)
- q: Velocidad de transferencia de calor, (W)
- $R_h$ : Resistencia a la transferencia de calor por convección, (W/K)
- $R_k$ : Resistencia a la transferencia de calor por conducción, (W/K)
- S: Peso sólido seco, (kg)
- $T_s$ : Temperatura de bulbo seco, (C)
- $T_h$ : Temperatura de bulbo húmedo, (C)
- W: Velocidad de secado constante, ( $kg/hm^2$ )
- $W_c$ : Velocidad de secado antecrítico, ( $kg/hm^2$ )
- $W_d$ : Velocidad de secado poscrítico o decreciente, ( $kg/hm^2$ )
- $W_f$ : Velocidad de secado final, ( $kg/hm^2$ )
- X: Humedad en base seca del material, (kg agua/ kg sólido seco)
- $X_h$ : Humedad en base húmeda, (kg agua/ kg sólido húmedo)
- $X^*$ : Humedad de equilibrio, (kg agua/ kg sólido seco)
- $X_c$ : Humedad crítica, (kg agua/ kg sólido seco)

$\Delta X$ : Variación de la humedad, (kg agua/ kg sólido seco)

$\Delta\theta$ : Variación del tiempo de secado, (h)

$\theta_a$ : Tiempo de secado antecrítico, (h)

$\theta_p$ : Tiempo de secado poscrítico, (h)

$\theta_T$ : Tiempo de secado total, (h)

$\Delta T$ = Diferencial de temperatura, (C)

$\Sigma R$ = Sumatoria de resistencias a la transferencia de calor, (W/K)

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1.2-1 Clasificación de la biomasa.....	4
Fig. 1.1.4-1 <i>Dactylis glomerata</i> .....	7
Fig. 1.2.3-1 Diagrama temperatura-tiempo .....	19
Fig. 1.2.3-2 Diagrama agua ligada- % Humedad relativa .....	21
Fig. 1.2.5-1 Diagrama Humedad-Tiempo.....	23
Fig. 1.2.5-2 Humedad- Velocidad de secado.....	23
Fig. 1.2.7-1 Secador de Bandejas .....	28
Fig. 1.2.7-2 Secador de túnel .....	29
Fig. 1.2.7-3 Secador rotatorio .....	29
Fig. 1.2.7-4 Secador de lecho fluidizado .....	31
Fig. 3.1.4-1 Sistema de control.....	58
Fig. 3.1.4-2 Circuito de control.....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.4.1-1 Clasificación taxonómica pasto azul.....	8
Tabla 1.1.4.6-1 Composición bromatológica pasto azul húmedo.....	11
Tabla 2.2.1-1 Datos ensayo 1.....	42
Tabla 2.2.1-2 Datos ensayo 2.....	42
Tabla 2.2.1-3 Humedad y velocidad de secado. Ensayo 1 y 2.....	43
Tabla 2.3-1 Resultados de la simulación.....	46
Tabla 2.4-1 Variables del proceso para la operación de secado.....	46
Tabla 3.1.1-1 Datos adicionales del equipo diseñado.....	47
Tabla 3.1.1-2 Datos adicionales para el cálculo del calor perdido.....	47
Tabla 3.1.3.2-1 Dimensiones del secador de bandejas.....	54
Tabla 3.1.6.1-1 Recursos materiales.....	61
Tabla 3.1.6.2-1 Recursos humanos.....	62
Tabla 3.1.6.3-1 Recursos totales.....	62
Tabla 3.2.1-1 Datos experimentales del equipo.....	63
Tabla 3.2.3-1 Resultados de los cálculos.....	65
Tabla 3.2.4-1 Composición bromatológica pasto azul seco.....	67

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 2.2.1-1 Velocidad- Humedad Ensayo 1 .....	44
Gráfica 2.2.1-2 Diagrama Velocidad-Humedad Ensayo 2 .....	45
Gráfica 3.2.2-1 Humedad- tiempo equipo diseñado .....	64
Gráfica 3.2.2-2 Velocidad-humedad media equipo diseñado.....	65
Gráfica 3.2.2-3 1/Velocidad- humedad media equipo diseñado.....	65

## ÍNDICE DE ANEXOS

**ANEXO I:** Análisis bromatológico pasto azul húmedo.

**ANEXO II:** Análisis bromatológico pasto azul seco.

**ANEXO III:** Coeficientes convectivos y conductivos de algunos materiales y sustancias.

**ANEXO IV:** Simulación de la operación de secado.

**ANEXO V:** Vista frontal externa e interna del equipo diseñado.

**ANEXO VI:** Vista lateral del equipo diseñado.

**ANEXO VII:** Bandejas del equipo diseñado

**ANEXO VIII:** Equipo construido

## RESUMEN

El diseño y construcción de un secador de bandejas para biomasa, se lo realizó para reducir la humedad en diferentes materiales pertenecientes a este tipo, basando el diseño en el secado de pasto azul. El tema de investigación se desarrolló en la Escuela de Ingeniería Química, en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Basándonos en el método experimental se procedió a realizar el diseño del equipo. Primero se ejecutó una simulación en un secador del mismo tipo para adquirir las condiciones de secado adecuadas para el material. Considerando las mismas se procedió a realizar la construcción del equipo en sí. El equipo fue fabricado en acero inoxidable AISI 304, cuyas dimensiones son 56cm de ancho, 68cm de largo y 56cm de profundidad. Posee 5 bandejas de dimensiones 42.5cm de largo, 38cm de ancho y 3cm de espesor cada una, cabe indicar que cada bandeja posee una malla metálica de tipo MESH 40. Además posee un tablero de control automático PID, un ventilador con potencia de 1700rpm y una resistencia eléctrica de 2000W como medio de calentamiento. El equipo funciona con una corriente de 220V.

El secador de bandejas nos permitió reducir la humedad del pasto azul desde un 80% hasta alcanzar una humedad igual al 30% sin la afectación de sus propiedades primordiales que son proteína y fibra.

Se concluye que el equipo construido será de gran ayuda al momento de realizar análisis y diferentes procesos de investigación. El presente tema de investigación está dirigido a las personas interesadas en la operación de secado para biomasa.

## SUMMARY

The design and construction of a tray dryer for biomass. It was conducted to reduce the moisture in different materials belonging in this type, basing the design on drying bluegrass. The research topic was developed in the School of Chemical Engineering at the Polytechnic School of Chimborazo.

It based on the experimental method we proceeded to design the equipment. First a simulation was run in a dryer of the same type to acquire suitable drying conditions for the material. Whereas the same we proceeded with construction of the equipment. The equipment was made of stainless steel AISI 304, whose dimensions are 56cm wide, 68cm long and 56cm deep. It has 5 trays of dimensions 42.5cm long, 38cm wide and 3cm thick each one, it is noted that each tray has a metal mesh type MESH 40. It also has an automatic control board PID, a blower rated at 1700rpm and 2000W electrical resistance as a heating medium. The equipment operates on 220 current.

The tray dryer allowed us to reduce moisture of the bluegrass from 80% to a moisture content equal to 30% without impacting its primary properties that are protein and fiber.

We conclude that the equipment built will help at the time of analysis and different research processes. This research topic is aimed at those interested in the drying operation for biomass.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico es uno de los pilares fundamentales para el crecimiento de la mediana y gran industria esto debido a la innovación en cada uno de sus procesos, es por esta razón que el Ingeniero Químico debe estar capacitado para poder diseñar, construir y transformar constantemente los sistemas de producción en las diferentes áreas industriales sin dejar de lado el tema ambiental, ya que hoy en día el cuidar y respetar el ambiente puede marcar el éxito o fracaso en la industria; es por esto que se ha visto la necesidad de diseñar y construir un secador de bandejas para biomasa.

La biomasa es uno de los recursos renovables, que se está empezando a emplear con frecuencia en diferentes procesos industriales amigables con el ambiente, esto debido su facilidad de producción en calidad y cantidad. Antes de que la biomasa sea sometida a un proceso de tipo industrial es necesario que sea sometida a una reducción de humedad conservando parámetros importantes de la misma, cabe indicar que todo esto dependerá del producto final al cual se desee llegar.

En la actualidad existe en la necesidad de aprovechar de mejor manera las fuentes de energía existentes, ya que al ser el petróleo la fuerza motriz del planeta y al ser este un recurso no renovable, su tiempo de existencia en la tierra es limitado, es por esta razón que los científicos se ven la obligación de buscar nuevas fuentes de energía de carácter renovable útiles para el ser humano como por ejemplo la biomasa.

Al referirnos a la biomasa hablaremos de toda la materia orgánica que se encuentra en la tierra. Como fuente de energía presenta una enorme versatilidad, permitiendo obtener mediante diferentes procedimientos tanto combustibles sólidos como líquidos o gaseosos.

Puede ser de origen vegetal o animal, incluyendo todos los materiales que proceden de la transformación natural o artificial, de los mismos.

Antes de que la materia orgánica sea útil deberá pasar por varias operaciones que faciliten su manejo y mejoren su rendimiento, una de ellas el secado que permitirá la reducción de la humedad de la biomasa a tratar.

La operación de secado dentro de la industria es una de la más usadas ya que permite separar un líquido de un sólido. En general, entendemos por secado a la separación de la humedad de los sólidos (o de los líquidos), por evaporación en una corriente gaseosa. Para esto encontramos una gran variedad de secadores como: de bandejas, rotatorio, de túnel, etc.

En lo que se refiere a un secador de bandejas también llamado de charolas o de anaqueles, se conoce que son ideales para secar pequeñas cantidades de muestra y que pueden encontrarse en forma de pasta o terrones, el equipo consta de grupos de bandejas que pueden ser cuadradas o rectangulares de 10-100 mm de espesor, y se fabrican de cualquier material que sea compatible con las condiciones de corrosión y temperatura prevalecientes.

Así pues el secado de biomasa se considera como una operación importante debido al rol que juega en la conservación del medio ambiente.

## ANTECEDENTES

La contaminación es uno de los más grandes problemas a los cuales se ve enfrentada la humanidad, ya que esta pone en peligro la vida existente en el planeta Tierra. Es por esto que el estudio de la reutilización u optimización de todo tipo de materia del que sea posible se ha convertido en una de las principales actividades de científicos, estudiantes y diferentes profesionales. Uno de estos estudios ha impulsado la utilización de biomasa.

La biomasa ha sido el primer combustible empleado por el hombre y el principal hasta la revolución industrial. Se utilizaba para cocinar, para calentar el hogar, para hacer cerámica y, posteriormente, para producir metales y para alimentar las máquinas de vapor. Fueron precisamente estos nuevos usos, que progresivamente requerían mayor cantidad de energía en un espacio cada vez más reducido. Así pues con el pasar del tiempo se promovía el uso de fuentes energéticas más intensivas (con un mayor poder calorífico), y el uso de la biomasa se disminuyó. En los últimos años debido al carácter renovable y no contaminante que tiene y el papel que puede jugar en el momento de generar empleo y activar la economía de algunas zonas rurales, hacen que la biomasa sea considerada una clara opción de futuro.

El secado es uno de los procesos más importantes en las industrias, debido a que la eliminación de agua puede preservar de mejor manera y por más tiempo cierto tipo de producto o facilitar operaciones donde estos vayan a ser materia prima u objeto de análisis.

Los equipos no son solo son proyectos realizados por estudiantes de algunas universidades, sino que también fomentan la creación de empresas destinadas únicamente al diseño, construcción y expendio de los mismos. Pudiendo decir así que los diferentes equipos

diseñados y puestos en marcha a nivel nacional no tienen únicamente fines de aprendizaje sino más bien aplicaciones industriales.

En la actualidad el “Centro de Servicios Técnicos y Transferencia Tecnológica Ambiental” (CESTTA), no dispone de un equipo que permita el secado de componentes sólidos a una temperatura no muy elevada, para conservar propiedades químicas sin pulverizar a la material

## JUSTIFICACIÓN

En la actualidad se ha visto la necesidad de buscar nuevas tecnologías amigables para el ambiente, debido a los graves problemas de contaminación que enfrenta nuestro planeta hoy en día. Por este motivo el laboratorio CESTTA ha visto la necesidad de fomentar el aspecto investigativo de sus colaboradores, brindándoles todas las facilidades tecnológicas posibles, para este grupo de personas el diseño y construcción de un secador para biomasa será de mucha ayuda ya que permitirá secar materias que serán utilizadas para el posterior cultivo de esporas, y que a su vez se convertirán en materia prima para el estudio acerca de la obtención de biofertilizantes

Al ser el secado una de las operaciones unitarias más utilizadas dentro de la ingeniería química, el estudio de la misma es de interés de la Escuela de Ingeniería Química de la ESPOCH. En este proceso la eliminación de agua de diferentes compuestos sólidos es primordial ya que permite un mejor manejo del producto facilitando su estudio o mejor transporte y almacenamiento del mismo del ser el caso.

El alcance de este trabajo es el de diseñar un secador por convección forzada para biomasa en forma científica y técnica, mismo que contribuirá con el ambiente mediante la obtención de fuentes de cultivo para hongos a partir de residuos orgánicos, a más de esta funcionalidad el equipo será capaz de secar cualquier otro tipo de biomasa en estado sólido o semisólido que el laboratorista requiera. El desarrollo en si del proyecto nos permitirá lograr un conocimiento claro y preciso de las diferentes variables de diseño, además de la obtención de datos experimentales y cálculos de ingeniería pertinentes para la correcta validación del equipo en cuestión.

Debido a que el “Centro de Servicios Técnicos y Transferencia Tecnológica Ambiental” ubicado en la ESPOCH no cuenta con este tipo de equipo, el mismo abre camino a diferentes tipos de investigación para el desarrollo biotecnológico, permitiendo el notable crecimiento del laboratorio a nivel no solo local sino nacional.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Diseñar y construir un secador tipo bandejas para biomasa requerido por el CESTTA-ESPOCH.

### **ESPECÍFICOS**

- Realizar una simulación del proceso de secado de biomasa con el fin de obtener las variables del proceso.
- Efectuar el diseño de ingeniería que incluye cálculos técnicos, tipo de materiales y controles, y presupuesto.
- Ejecutar el ensamblaje y construcción del equipo diseñado.
- Realizar las pruebas de validación del diseño de ingeniería.

# **CAPITULO I**

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 BIOMASA

Se denomina biomasa a toda la materia orgánica que se encuentra en la tierra. Como fuente de energía presenta una enorme versatilidad, permitiendo obtener mediante diferentes procedimientos tanto combustibles sólidos como líquidos o gaseosos. Puede ser de origen vegetal o animal, incluyendo todos los materiales que proceden de la transformación natural o artificial, de los mismos.

### *1.1.1 Características de la biomasa.*

La factibilidad técnica y económica de la biomasa se miden de acuerdo al estado físico, composición química, contenido de humedad, porcentajes de cenizas, poder calorífico, densidad aparente; etc.

- **Estado físico:** Corresponde en gran parte a la correlación existente entre las propiedades climáticas y la composición de la materia. En este aspecto se deberá considerar el tipo de biomasa, el tratamiento que se le va a dar y el lugar donde se realizará el mismo ya que de realizarse al aire libre será importante considerar factores climáticos que pueden afectar el transcurso normal de la operación.
- **Contenido de Humedad:** Afecta tanto a la cantidad y calidad de la materia prima, como al proceso. Preferentemente la materia debe tener un contenido inferior al

30%, en casos contrarios a este será necesario un proceso térmico de suministro de calor antes de cualquier tratamiento.

- **Porcentajes de Cenizas:** Define la cantidad de materia sólida no combustible, para la mayor parte de los usos en combustión tendrá que ser inferior al 10%.
- **Poder calorífico (KJ/Kg base seca):** Se refleja como la cantidad de calor liberado en la combustión de 1 Kg de biomasa.
- **Densidad Aparente:** Define la relación peso-volumen de la materia. Esta característica es muy evaluada ya que la influencia del volumen es notoria al momento de establecer las características del transporte del mismo. De aquí deriva el término densificación la cual contribuye a compactar la biomasa para facilitar su traslado.
- **Composición Química:** Hay que efectuar una análisis elemental: C, H, N, S, O, Cl y cenizas. La mayor parte de las biomásas presentan valores más bajos de S, N y cenizas que el carbón, por ejemplo.

### *1.1.2 Clasificación de la biomasa.*

- **Biomasa natural:** Es la que se produce en la naturaleza sin intervención humana (bosque, matorral, herbazales, etc.)

- **Biomasa residual:** Es la que se genera en cualquier tipo de actividad humana fundamentalmente en los procesos productivos de los sectores agrícola, ganadero, así como los residuos sólidos y líquidos de asentamientos urbanos.
  
- **Residuos agropecuarios:** Procesos agrícolas y pecuarios que en su mayoría no reciben una disposición final apropiada, ocasionando contaminación ambiental. Dichos desechos, dependiendo de su naturaleza y composición química pueden por ejemplo alimentar un biodigestor y producir gas metano para usarlo en procesos de calor y electricidad o ser quemados de manera directa.
  
- **Cultivos y plantaciones producidos:** son cultivos que se generan en el medio rural con la única finalidad de producir biomasa con fines nobles, podemos decir que se clasifican en:
  - Cultivos ya existentes como los cereales, oleaginosas, remolacha, etc.
  - Lignocelulósicos forestales (chopo, sauces, etc.).
  - Lignocelulósicos herbáceos como el cardo *Cynaracardunculus*.
  - Otros cultivos como la patata.
  
- **Residuos sólidos urbanos:** son los que se originan en la actividad doméstica y comercial de ciudades y pueblos.

En definitiva podemos resumir los diferentes tipos de biomasa mediante el siguiente diagrama:

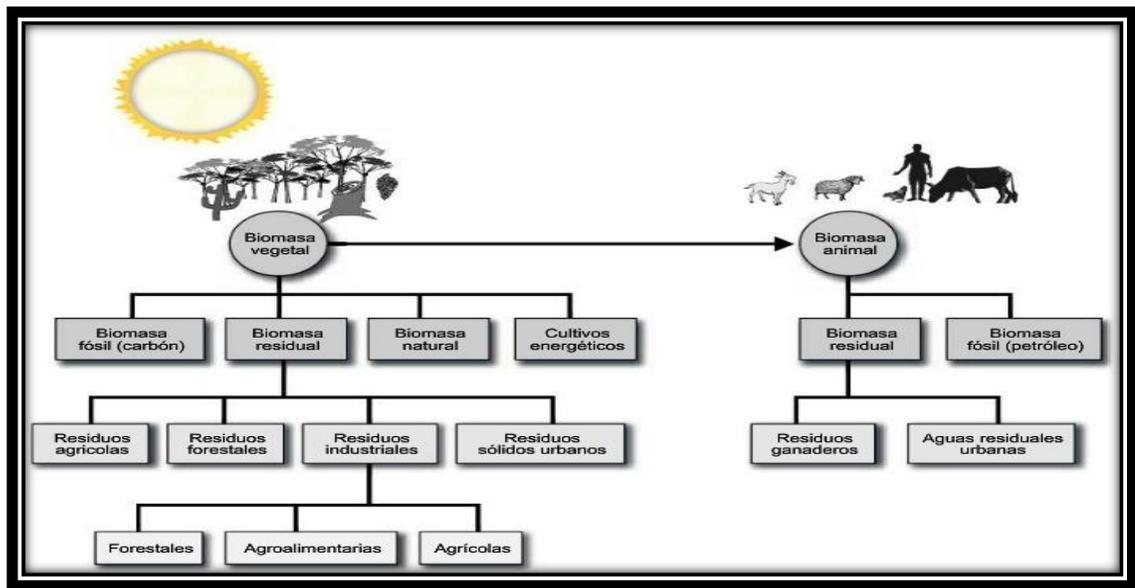


Fig. 1.1.2-1 Clasificación de la biomasa

### 1.1.3 Aplicaciones de la biomasa.

La gran variedad de tipos de biomasa existentes unida al desarrollo de distintas tecnologías de transformación (Combustión directa, Pirolisis, Gasificación, Fermentación, Digestión anaeróbica,...) permiten plantear una gran cantidad de posibles aplicaciones entre las que destacan la producción de energía térmica, electricidad, biocombustibles, gases combustibles; etc.

#### 1.1.3.1 Producción de Energía Térmica.

Es el aprovechamiento convencional de la biomasa natural y residual. Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, como por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de

productos agrícolas. Además, éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad.

Los procesos tradicionales de este tipo, generalmente, son muy ineficientes porque mucha de la energía liberada se desperdicia y pueden causar contaminación cuando no se realizan bajo condiciones controladas

### *1.1.3.2 Producción de Energía Eléctrica.*

Obtenida minoritariamente a partir de biomasa residual (restos de cosecha y poda) y principalmente a partir de cultivos energéticos leñosos, de crecimiento rápido (Sauce, Eucalipto, Coníferas, Acacia, Plátano,...) y herbáceos (Pasto azul). También se utiliza el biogás resultante de la fermentación de ciertos residuos (lodos de depuradora, Residuos Sólidos Urbanos) para generar electricidad.

El rendimiento neto de la generación de electricidad en las plantas de biomasa es bajo. Ello se debe fundamentalmente al pequeño tamaño de la planta de producción. Una posibilidad de incrementar el rendimiento energético en el uso de la biomasa es la cogeneración de calor y electricidad. La condensación del vapor supone una evacuación de calor cercano a la mitad de la energía contenida en la biomasa; la recuperación de parte de ese calor de condensación en forma de vapor de baja temperatura o agua caliente, para usos industriales o domésticos, supone un aumento de la eficiencia energética.

### *1.1.3.3 Biocombustibles.*

Los biocombustibles han dejado de ser una fantasía, para convertirse en una realidad. Ya podemos ver por las calles automóviles que funcionan con estos biocombustibles. En Brasil, por ejemplo, hay unos 2.000.000 de vehículos que se mueven con alcohol casi puro, el cual se obtiene de la caña de azúcar, y 8.000.000 más utilizan una mezcla de gasolina y alcohol. Este alcohol se realiza a partir de melazas de caña de azúcar o de la pulpa de mandioca, para ser utilizado como combustible. Gran parte del etanol se mezcla con gasolina, y constituye el 20 % del combustible que utilizan los automóviles. Básicamente se trabaja en dos alternativas comerciales: el biodiesel y el bioalcohol.

### *1.1.3.4 Producción de gases combustibles.*

Es una aplicación poco utilizada actualmente que consiste en la descomposición de la biomasa en un digestor para obtener un gas, cuyo compuesto combustible es básicamente metano, pero también contienen nitrógeno, vapor de agua y compuestos orgánicos. El proceso es adecuado para tratar biomasa de elevado contenido en humedad y poco interesante en otras aplicaciones, bien por su calidad o por la poca cantidad disponible.

El gas obtenido es de bajo poder calorífico, pero útil en aplicaciones térmicas en el propio entorno ganadero o agrícola, suministrando luz y calor. En el caso de instalaciones de mayor tamaño, se puede llegar a colocar motores diesel de hasta varios cientos de kilovatios de potencia para la generación de electricidad.

#### 1.1.3.5 Otros usos de biomasa.

Además de los usos mencionados ya anteriormente la biomasa que tenga un alto contenido de celulosa puede ser secada, molida y compactada en pellets energéticos. Por otro lado se podrá fabricar papel, abono orgánico o dependiendo del caso suplementos alimenticios de plantas y animales. Por todo lo antes mencionado es de vital importancia el manejo adecuado de la biomasa de acuerdo al uso final que se le vaya a dar, las condiciones en las cual esta llegue a las plantas de tratamiento marcara la eficiencia del proceso de final.

#### 1.1.4 Pasto azul (*Dactylis glomerata*).

Es un pasto relativamente fácil de reconocer por sus inflorescencias (forma de colocación de las flores en las plantas) aglomeradas, su color azulado y su hábitat en sitios perturbados. No se confunde fácilmente. Sus espiguillas están comprimidas, en grupos densos y unilaterales. Los nombres comunes usados en español son: pasto ovillo; dácilo, jopillo.



Fig. 1.1.4-1 *Dactylis glomerata*

#### 1.1.4.1 Clasificación taxonómica.

**Tabla 1.1.4.1-1**

Clasificación taxonómica pasto azul

<b>Reino:</b>	<i>Plantae</i>
<b>División:</b>	<i>Magnoliophyta</i>
<b>Clase:</b>	<i>Liliopsida</i>
<b>Orden:</b>	<i>Poales</i>
<b>Familia:</b>	<i>Poaceae</i>
<b>Subfamilia:</b>	<i>Pooideae</i>
<b>Tribu:</b>	<i>Poeae</i>
<b>Género:</b>	<i>Dactylis</i>
<b>Especie:</b>	<i>D. glomerata</i>

#### 1.1.4.2 Morfología del pasto azul.

Se considera que la morfología del pasto azul es la siguiente:

- **Hábito y forma de vida:** Hierba perenne, con un color ligeramente azulado, de hasta 1.2m de alto.

- **Tallo y hojas:** Rígido, aunque a veces doblado en los nudos, delgado, sin pelos. Además, dispuestas en 2 hileras sobre el tallo, con las venas paralelas, divididas en 2 porciones, la inferior llamada vaina que envuelve parcialmente al tallo y generalmente es más corta que el entrenudo, y la parte superior de la hoja llamada lámina que es larga, angosta y plana, áspera al tacto; entre la vaina y la lámina, por la cara interna, se presenta una prolongación membranosa, algo translúcida y desgarrada en el margen, llamada lígula.
- **Inflorescencia:** Las inflorescencias son espigas angostas, de hasta 25 cm de largo, ubicadas en la punta de los tallos, poco ramificadas. Las ramitas, que van siendo más cortas hacia la punta de la inflorescencia, terminan en numerosas espiguillas.
- **Espiguilla y flores:** Las espiguillas dispuestas en grupos densos casi juntos. Las flores son muy pequeñas y se encuentran cubiertas a veces con pelos, algunas ásperas al tacto.
- **Hábitat:** Crece en clima templado-frío y en suelos ligeramente ácidos; no prospera en suelos salinos o con agua estancada.
- **Propagación, dispersión y germinación:** Se propaga por semillas, tienen un ciclo de vida perenne (más de dos años). Mientras que su forma de polinización se da mediante el viento.

#### *1.1.4.3 Impacto e importancia.*

- **Usos:** Excelente pasto forrajero, produce pasto tierno, adecuado al pastoreo, útil para el ensilado o henificación dando muchas semillas fértiles que pueden cosecharse mecánicamente en regiones templado-húmedas.
- **Impacto sobre la salud humana:** Causa fiebre de heno (alergia), también contiene Fitoestrógenos.

#### *1.1.4.4 Requerimientos ambientales.*

Buena adaptación a distintas condiciones climáticas. Tolera la sequía, el calor y la sombra. Prefiere los terrenos calizos y ricos en materia orgánica, pero vive bien en silíceos no demasiado ácidos (pH entre 6-8).

#### *1.1.4.5 Implantación y persistencia.*

Fácil germinación pero lento establecimiento en campo, dosis de siembra: 15-20 kg/ha. Como consecuencia de su escasa agresividad inicial, el pasto azul permite el crecimiento de otras especies durante el primer año aunque, con el paso del tiempo puede dominar el pasto (sobre todo si los aprovechamientos son escasos).

#### *1.1.4.6 Composición bromatológica.*

La composición bromatológica del pasto azul es como se señala en la siguiente tabla:

Tabla 1.1.4.6-1

Composición bromatológica Pasto azul húmedo

<b>Nutriente</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Materia Seca</b>	%	20,80
<b>Humedad</b>	%	79,20
<b>Cenizas</b>	%	5,18
<b>Materia Orgánica</b>	%	87,51
<b>Proteína</b>	%	4,71
<b>Fibra</b>	%	5,60

**FUENTE:** LABCESTA (27/12/2013)

*1.1.4.7 Fertilización y forma de pastoreo.*

Exigente de nitrógeno, pastoreo directo, poco intensos, siempre por sobre los 5 cm. En cuanto a la frecuencia, se considera la más adecuada aquella que se inicia con una altura de 20 a 25 cm.

*1.1.4.8 Calidad del forraje.*

Produce forraje tierno, de alta palatabilidad y fácilmente aceptado por los animales. El follaje posee alto valor proteico pero los valores energéticos suelen ser más bajos que otras gramíneas.

### *1.1.5 Aprovechamiento de residuos de biomasa agrícola o residuos agrícolas.*

El aprovechamiento se entiende como el conjunto de fases sucesivas de un proceso, siendo la materia prima un residuo, y sabiendo que al final de dicho proceso se obtendrá un producto o subproducto utilizable. Cabe indicar que el aprovechamiento debe realizarse siempre y cuando sea económicamente viable, técnicamente factible y ambientalmente conveniente.

Por otro lado al referirnos al término de biomasa agrícola o residuos agrícolas orgánicos (RAO) tomaremos en cuenta a los productos orgánicos de la agricultura que no son vendidos como alimento ni utilizados in la producción de otros productos.

Mayoritariamente se encuentra en forma de residuos de cosecha, tallos, raíces, cáscaras de semillas, etc.

La reutilización de este tipo de biomasa se ha visto altamente impulsada en los últimos años esto debido a que el cuidado del medio ambiente, es uno de los aspectos importantes que tiene como objetivo la humanidad. Sin embargo hay que tener en cuenta tanto los aspectos positivos como negativos que puede traer la reutilización de estos a continuación citamos algunos de ellos:

#### *1.1.5.1 Ventajas de la reutilización de residuos orgánicos.*

- Reducción de las emisiones de carbono.
- Evitando el uso de combustibles fósiles.
- Evitando la quema a cielo abierto y la putrefacción (emisiones metano).

- Mayor seguridad energética (materia prima disponible localmente).
- Mayor acceso a la energía particularmente en las áreas rurales (donde se genera la biomasa residual).
- Reducción del problema de la gestión y eliminación de residuos.
- Posibles ingresos adicionales para los agricultores.
- Creación de puestos de trabajo.
- Reducción riesgo de incendio.

#### *1.1.5.2 Desventajas de la reutilización de residuos orgánicos.*

- Disponibilidad dispersa en áreas extensas (retos a la recolección).
- Tecnologías para la conversión a pequeña escala no están ampliamente disponibles y no están completamente desarrollados.
- Se precisa desarrollar tecnologías que puedan tratar una amplia variedad de residuos procedentes de diferentes cultivos.
- Disponibilidad estacional, requiere largos periodos de almacenaje (meses).
- Contenido de cenizas y volátiles no deseados.
- Heterogeneidad de suministro.

## 1.2 SECADO

El secado constituye uno de los métodos que permite separar un líquido de un sólido. En general, entendemos por secado la separación de la humedad de los sólidos (o de los líquidos), por evaporación en una corriente gaseosa.

En la mayor parte de casos la humedad (líquido) suele ser vapor de agua y la corriente de gas suele ser aire, en donde existe la transferencia de un líquido desde un sólido húmedo hasta una fase gaseosa no saturada, a esta operación unitaria también se la conoce como deshumidificación.

Una de las utilidades más importantes de esta operación unitaria es la conservación de alimentos, a través de la reducción del contenido de agua perteneciente a los mismos. Esto reduce la posibilidad de un deterioro biológico, la reducción del peso y volumen aumenta la eficacia de los procesos de transporte y almacenaje, incluso se puede conseguir un alimento más apto para el consumo, en el caso de embutidos y conservas.

El estudio del secado y el diseño de un secador deben tomar en cuenta una serie de problemas en las áreas de mecánica de fluidos, química de superficies y estructuras sólidas, y los problemas de velocidad de transferencia. Estos factores fisicoquímicos no son comprendidos de forma completa.

Los materiales sólidos que se van a secar pueden presentar una serie de formas (escamas, gránulos, cristales, polvos, hojas o laminas continuas) y poseen propiedades muy diferentes. El líquido que va a vaporizarse puede encontrarse sobre la superficie del sólido, como en el secado de cristales salinos, parte en el exterior y parte en el interior o completamente en el interior del sólido, en el caso en que se eliminan solventes de láminas

de polímeros. Incluso puede haber casos en el que existen sólidos en suspensión en algunas sustancias líquidas.

El principal problema al someter a un material a secado es el cálculo del tiempo para secar a este desde un contenido de humedad hasta otro menor, en un secador con una corriente dada de material humedecido que lo atraviesa y un aporte dado de calor. Existen otros factores como el tamaño del secador y el caudal de calor.

Los fenómenos principales que se producen en una operación de secado son:

- a) Transferencia de energía (calor) de los alrededores para evaporar la humedad de la superficie.
- b) Transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido.

La velocidad a la cual el secado es realizado está determinada por la velocidad a la cual los dos procesos, mencionados anteriormente, se lleven a cabo. La transferencia de energía, en forma de calor, de los alrededores hacia el sólido húmedo puede ocurrir como resultado de convección, conducción y/o radiación y en algunos casos se puede presentar una combinación de estos efectos.

### *1.2.1 Métodos generales de secado.*

#### *1.2.1.1 Evaporación.*

Esta ocurre cuando la presión del vapor en la superficie del sólido es igual a la presión atmosférica. Esto se debe al aumento de temperatura del líquido a evaporar hasta su punto de ebullición. Si el material que está siendo secado es sensible al calor, entonces la

temperatura a la cual la evaporación ocurre, puede ser disminuida, bajando la presión (evaporación al vacío).

#### 1.2.1.2 Vaporización.

El secado es llevado a cabo por convección, pasando aire caliente sobre el producto. El aire enfriará al producto y la humedad será transferida hacia el aire. En este caso la presión del vapor sobre el sólido es menor que la presión atmosférica.

#### 1.2.1.3 Liofilización.

El agua se sublima directamente del material congelado.

#### 1.2.2 Definiciones.

- **Humedad en base seca:** es la cantidad de agua referida al sólido seco.

Ec. 1.2.2-1

$$X = \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg sólido seco}}$$

- **Humedad en base húmeda:** es la cantidad de agua que contiene el sólido referida al sólido húmedo (sólido seco + agua).

Ec. 1.2.2-2

$$X_h = \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg sólido húmedo}}$$

- **Humedad de equilibrio( $X^*$ ):** cuando un sólido húmedo se somete en contacto con aire a temperatura y humedad constantes se alcanzan condiciones de equilibrio entre el aire y el sólido húmedo. Es el límite al que puede llevarse el contenido de humedad de una sustancia por contacto con aire. El contenido de humedad de un sólido no puede ser inferior al contenido de humedad de equilibrio que posee el aire que entra.
- **Humedad crítica ( $X_c$ ):** La humedad crítica de un sólido es el punto que separa los dos periodos de secado antecrítico y poscrítico.
- **Temperatura de bulbo seco:** temperatura que tendría una mezcla aire-vapor de agua expuesta en forma ordinaria al bulbo seco del termómetro.
- **Temperatura de bulbo húmedo:** temperatura que se alcanza a poner en contacto una cantidad de agua con una corriente de gas en condiciones estables. Se la determina al colocar el bulbo de un termómetro en una gasa húmeda en contacto con una corriente de aire-vapor de agua a una temperatura ( $T$ ), temperatura de bulbo seco.

### *1.2.3 Fundamentos del secado.*

Debido a la gran cantidad de materiales q se someten a secado, y la disponibilidad de una serie de equipos de secado, no existe una teoría q abarque a todos los materiales y equipos.

Las diferentes formas y los diferentes tamaños de los materiales, los equilibrios de humedad a través del sólido, así como el método de transferencia de calor que se requiere para la vaporización, impiden que exista un tratamiento unificado. Los fundamentos que se utilizan son de tipo semi-cuantitativo.

### *1.2.3.1 Modelos de temperatura en secadores.*

La forma en que la temperatura varía en los secadores depende de la naturaleza y contenido de líquido del material de alimentación, de la temperatura del medio de calentamiento, del tiempo de secado y de la temperatura final que toleran los sólidos secos.

Cuando se tiene un secador discontinuo con un medio de calentamiento a temperatura constante, la temperatura de los sólidos húmedos aumenta rápidamente desde su valor inicial hasta su temperatura de vaporización  $T_v$ .  $T_v$  es la temperatura del bulbo húmedo del gas, o un valor muy próximo a ella.

El secado transcurre a  $T_v$  durante un periodo considerable, posteriormente la temperatura de los sólidos húmedos aumenta. Al final del secado la temperatura aumenta rápidamente hasta llegar a un valor mayor denominado  $T_{sb}$  como se muestra en la figura 1.2.3.1-1. La temperatura del medio de calentamiento es constante en casi todo el proceso, aunque puede tener ciertas variaciones.

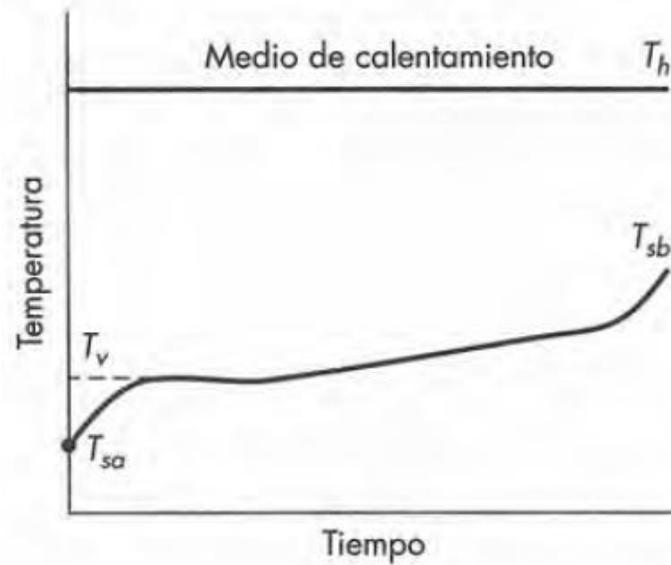


Fig. 1.2.3-1 Diagrama temperatura-tiempo

### 1.2.3.2 *Transferencia de calor en los secadores.*

El secado es por definición un proceso térmico. Aunque existen complicaciones por la difusión en el sólido a través del gas, se pueden secar los materiales solamente alcanzando la temperatura de ebullición del líquido que contiene los sólidos.

Con frecuencia la velocidad de secado es más dependiente de los coeficientes de transferencia de calor que de los coeficientes de transferencia de masa. El calor es utilizado en el secado para cumplir con los siguientes objetivos:

- Calentar la alimentación hasta la temperatura de vaporización.
- Vaporizar el líquido.
- Calentar los sólidos hasta su temperatura final.
- Calentar el vapor hasta su temperatura final.

### *1.2.3.3 Equilibrio entre fases.*

Los datos de equilibrio para sólidos húmedos se expresan en función de la humedad relativa del gas y el contenido de líquido del sólido, en masa de líquido por unidad de masa de sólido completamente seco.

Cuando un sólido húmedo se pone en contacto con aire de humedad inferior, el sólido suele perder humedad y secarse hasta alcanzar el equilibrio con el aire. Cuando el aire es más húmedo que el sólido, el sólido absorbe humedad del aire hasta alcanzar el equilibrio.

### *1.2.3.4 Agua ligada y no ligada.*

En la figura 1.2.3.4-1 se puede observar, si una curva de equilibrio se prolonga hasta su intersección con el eje de 100% de humedad, el contenido de humedad así definido, es la humedad mínima de este material que todavía puede ejercer presión de vapor tan grande como la del agua líquida a la misma temperatura.

EL agua ligada se la puede definir como aquella correspondiente a la menor concentración que está en equilibrio con aire saturado y que está dada por la intersección de las curvas con la línea de 100% de humedad, debido a que ejerce una presión de vapor menor que la del agua líquida a la misma temperatura.

El agua correspondiente a concentraciones mayores que las indicadas por las intersecciones recibe el nombre de agua no ligada.

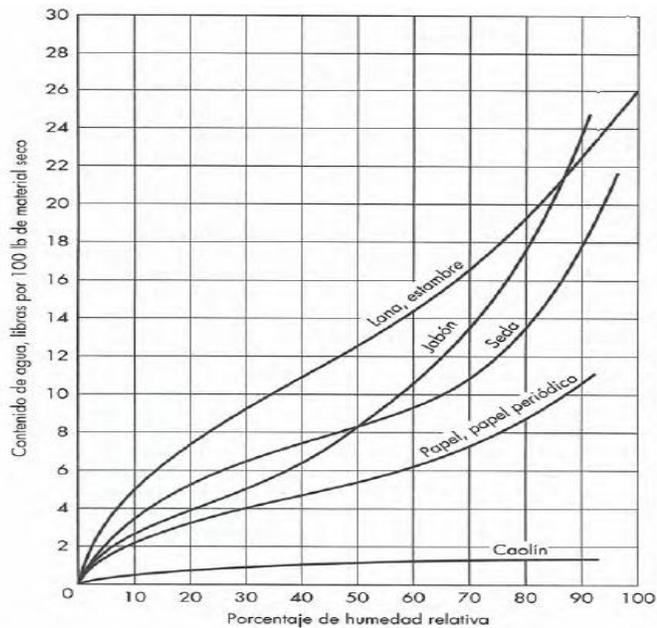


Fig. 1.2.3-2 Diagrama agua ligada- % Humedad relativa

Por ejemplo la curva para lana, esta interseca con la curva de 100% de humedad para una humedad de 26%, entonces, cualquier muestra de lana que contiene menos de 26% de agua solo posee agua ligada. Cualquier muestra con humedad mayor al 26% es agua no ligada.

#### 1.2.4 Comportamiento general del secado.

Al realizar el secado de un material sólido con una corriente de gas a temperatura y humedad fija siempre existe un patrón de comportamiento general. Cuando se produce el contacto inicial entre la muestra y el medio de secado la temperatura del sólido se ajusta hasta alcanzar un estado estable. La temperatura del sólido y la velocidad del secado varían para alcanzar esa condición estable.

A estado estable, un medidor de temperatura determinará que la temperatura de la superficie sólida húmeda es igual a la temperatura de bulbo húmedo del medio de secado. Las temperaturas dentro del sólido sometido al secado tienden a igualarse con la temperatura de bulbo húmedo del gas, pero en este caso, la concordancia puede ser imperfecta debido al retraso en el movimiento de masa y calor.

Una vez que estas temperaturas alcanzan la temperatura de bulbo húmedo del gas, se mantienen casi estables y la velocidad de secado también permanece constante. Esto se conoce como periodo de velocidad constante de secado o periodo de secado antecrítico. Este periodo termina cuando el sólido alcanza el contenido crítico de humedad.

Luego del periodo de velocidad constante, la temperatura de la superficie aumenta y la velocidad de secado decae rápidamente. El periodo de velocidad descendente puede durar más tiempo que el periodo de velocidad constante. La velocidad de secado tiende a cero con cierto contenido de humedad de equilibrio.

#### *1.2.5 Curvas de Secado.*

Para determinar el contenido de humedad de diversos materiales se los debe realizar de forma experimental, en las cuales se estima generalmente las condiciones de operación de humedad, la temperatura del aire empleado y el tiempo necesario para lograr el grado de secado. Estas condiciones se las plasma a través de las curvas de secado. Existen dos curvas que son importantes en el estudio de la operación unitaria de secado:

La figura 1.2.5-1 representa el contenido de humedad en función del tiempo, importante para obtener datos de pruebas de secado.

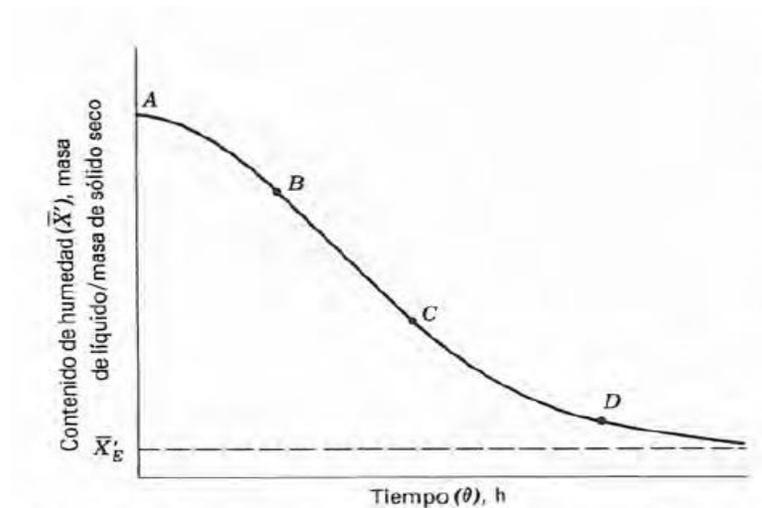


Fig. 1.2.5-1 Diagrama Humedad-Tiempo

La figura 1.2.5-2 representa la velocidad de secado en función de contenido de humedad que es la más descriptiva del proceso de secado.

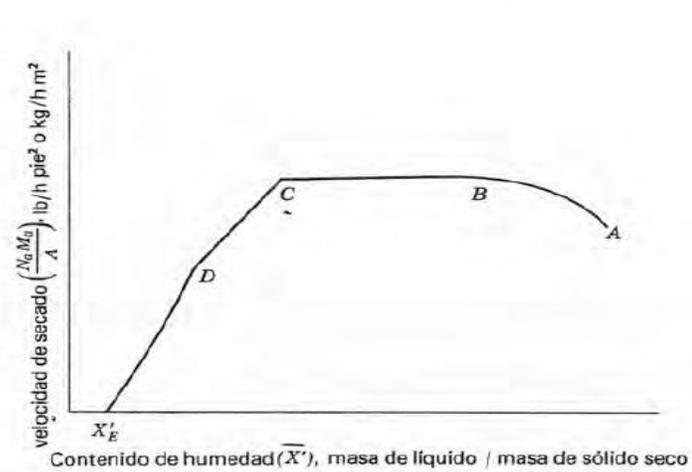


Fig. 1.2.5-2 Humedad- Velocidad de secado

Las etapas en las curvas de secado se describen a continuación:

- **A-B:** etapa inestable en la que la temperatura del sólido alcanza su temperatura estable. A-B se puede representar como una velocidad ascendente o descendente.
- **B-C:** periodo de velocidad constante, donde la superficie total expuesta está saturada de agua. La temperatura de la superficie alcanza la temperatura del bulbo húmedo. El mecanismo del movimiento del líquido, y en consecuencia la velocidad de este movimiento, varían considerablemente con la estructura del sólido.
- **C-D:** se lo conoce como el primer periodo de velocidad descendente, en la cual la superficie comienza agotarse del líquido, hasta que en el punto D no existe un área significativa de superficie saturada de líquido. En esta etapa se alcanza el contenido de humedad de equilibrio cuando la presión de vapor sobre el sólido es igual a la presión parcial del vapor en el gas de entrada de secado. Este periodo se conoce como segundo periodo de velocidad descendente.

#### *1.2.6 Comportamiento de los materiales en el secado.*

En el secado se pueden dividir en dos clases según su comportamiento:

### *1.2.6.1 Sólidos granulares o cristalinos*

Contienen humedad en los intersticios entre partículas o en los poros de poca profundidad. El movimiento de la humedad es relativamente libre y ocurre por la interrelación entre la fuerza gravitacional y de tensión superficial o capilar.

El sólido por lo general es inorgánico y no se ve afectado por la presencia del líquido, y por lo tanto tampoco por el proceso de secado. Es decir que las condiciones de secado son seleccionadas de acuerdo a la conveniencia y ventaja económica. Dentro de estos tipos de materiales encontramos roca triturada, amarillo de cromo, catalizadores, sulfato de zinc y fosfatos de sodio.

### *1.2.6.2 Sólidos orgánicos.*

Son amorfos, fibrosos o en forma de gel. Estos materiales retienen humedad, como parte importante en su estructura, suelen acumularla dentro de las fibras o en el interior de poros finos.

En estos casos el movimiento de la humedad es lento y suele presentarse por difusión del líquido a través de la estructura sólida. Es por esto, que las curvas de secado para estos materiales muestran periodos muy cortos de velocidad constante, que finalizan con valores altos del contenido crítico de humedad, lo que indica que una cantidad significativa de agua se mantiene íntimamente en la estructura sólida o en los poros finos, de manera que la presión de vapor se reduce de manera significativa. La velocidad de secado está controlada por la velocidad de difusión del líquido a través del sólido.

Al saber que la humedad se mantiene íntimamente dentro de los materiales, esta los afecta, las capas de la superficie suelen secarse con mayor rapidez que las del interior. No hay que utilizar una velocidad alta de secado ya que pueden provocar desmoronamientos del material, o a la vez, puede formarse una capa impermeable que impida el secado adecuado.

Debido a estas causas las condiciones de secado son críticas, es por esto que aparte de considerar la parte económica, también se considerara el efecto sobre la calidad del producto. Dentro de estos materiales encontramos detergentes, cereales, hierbas, almidón, extractos de café y de soya, entre otros.

### *1.2.7 Tipos de secadores.*

Podemos mencionar los siguientes tipos de secadores:

- Secadores directos
- Secadores indirectos

#### *1.2.7.1 Secadores directos.*

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

- **Secador de bandejas.**

Un secador de bandejas también llamado de charolas o de anaqueles, es un equipo totalmente cerrado y aislado en el cual los sólidos que pueden encontrarse en forma de pasta o terrones, se colocan en grupos de bandejas que pueden ser cuadradas o rectangulares de 10-100 mm de profundidad, y se fabrican de cualquier material que sea compatible con las condiciones de corrosión y temperatura prevalecientes.

Cuando las características del material y el manejo lo permitan, las bandejas deben tener bases perforadas para proveer una mayor superficie de secado. En general, se prefieren las bandejas metálicas, ya que conducen el calor con mayor facilidad.

Las condiciones de secado se controlan y cambian con facilidad, si las condiciones externas al equipo permanecen constantes, las condiciones de secado para cualquier bandeja serán constantes. Sin embargo las bandejas cercanas a la entrada del aire tendrán diferentes condiciones que las demás. Este problema se lo ha solucionado parcialmente al invertir la trayectoria del flujo del aire.

El aire se hace circular por medio de ventiladores de hélice o centrífugos, también se usa calor eléctrico especialmente cuando el calentamiento es bajo. La recirculación del aire es usualmente del orden del 80 al 95%, excepto durante la etapa inicial de desecación de evaporación rápida.

La transmisión de calor puede ser directa del gas a los sólidos, utilizando la circulación de grandes volúmenes de gas caliente, o indirecta, utilizando repisas o bases calentadas. Otro

factor importante en el diseño de los secadores de bandejas es el costo de energía. Para la conservación de esta se puede recircular parte del aire.

El funcionamiento correcto de los secadores de bandejas depende del mantenimiento de una temperatura constante y una velocidad de aire uniforme sobre todo del material que se esté secando. Conviene tener una circulación de aire con velocidades de 1 a 10m/s para mejorar el coeficiente de transferencia de calor en la superficie. La corriente de aire adecuada para este género de secadores depende de que el ventilador tenga una capacidad suficiente, del diseño de la red de ductos para modificar cambios repentinos de dirección y de desviadores correctamente ubicados.

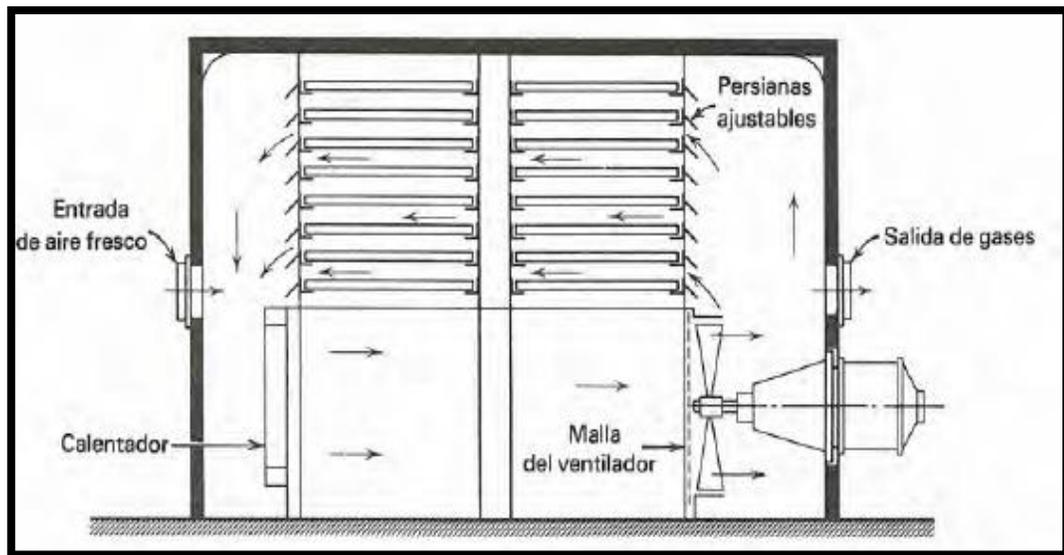


Fig. 1.2.7-1 Secador de Bandejas

- **Secadores de túnel.**

El material colocado en carretillas o bandejas se desplaza a través de un túnel en contacto con gases calientes. El flujo de aire puede ser en contracorriente, en paralelo o una combinación de ambos. Este secador suele tener varias partes, cada una con un ventilador y

serpentines de calentamiento. Se lo utiliza generalmente para secar alimentos como granos y en algunos casos materiales en forma de pasta que previamente son preformados en cilindros.

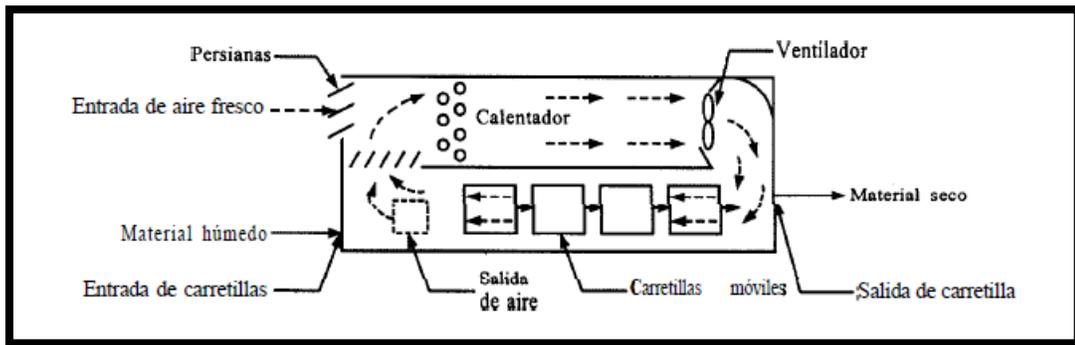


Fig. 1.2.7-2 Secador de túnel

- **Secadores rotatorios.**

Consta de un cilindro hueco que por lo general gira sobre su eje. Los sólidos granulares se alimentan por la parte superior, y se desplazan por el cilindro. Para su calentamiento se lo hace a través del contacto directo con gases calientes que se encuentran en un flujo a contracorriente.



Fig. 1.2.7-3 Secador rotatorio

- **Secadores de tambor.**

Consta de un tambor de metal, el cual es calentado, en cuyo exterior se evapora una capa delgada de un líquido o una suspensión hasta que se seca. El sólido seco final se le raspa al tambor, que gira lentamente.

El tambor funciona como un evaporador y en parte como secador. La alimentación en estos secadores puede ingresar también como inmersión o por la parte superior entre el espacio de dos tambores.

- **Secadores de lecho fluidizado.**

El secador de lecho fluidizado funciona bajo el principio de secado directo, es decir de contacto directo entre aire o un gas calentado y el producto, para lograr transferencia de calor y transferencia de masa. La corriente de gas del proceso ingresa por la cámara de aire del lecho fluidizado pasando a través de la placa distribuidora de gas, que retiene los sólidos arriba. Este proceso de fluidización del secador de lecho fluidizado es efectivo para operaciones como secado, calentamiento, enfriamiento, calcinación, reacción, eliminación de polvo o aglomeración.

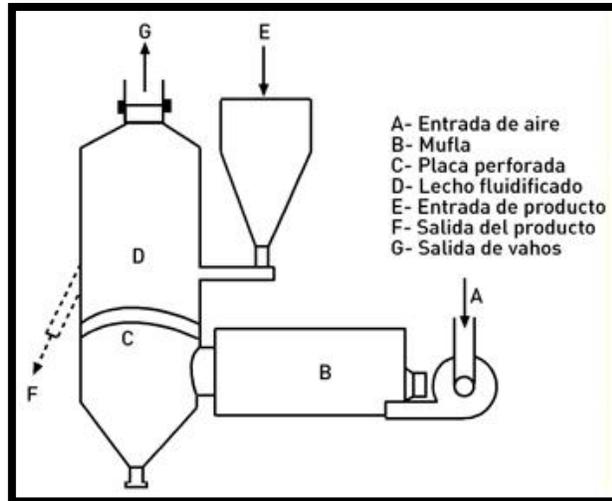


Fig. 1.2.7-4 Secador de lecho fluidizado

### 1.2.7.2 Secadores indirectos.

- **Secadores al vacío con anaqueles.**

Se calientan indirectamente y son de tipo de lotes, el calor de desecación se transfiere al sólido húmedo a través de anaqueles de hierro o acero con puertas herméticas que lo permiten trabajar al vacío. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de desecación depende del contacto que se establezca entre el material mojado y las superficies calientes. Los secadores indirectos se llaman también secadores por conducción o de contacto.

Estos secadores se utilizan para secar materiales costosos o sensibles a la temperatura, o bien que se oxiden fácilmente, útiles para materiales con disolventes tóxicos o valiosos.

### 1.2.8 Secadores de biomasa.

Hay muchos tipos de secadores usados en el secado de biomasa. La selección del secador apropiado depende de muchos factores, entre los cuales están:

- El tamaño y las características de la materia prima.
- Coste de capital.
- Requerimientos de operación y mantenimiento.
- Emisiones ambientales.
- Eficiencia energética.
- Espacio disponible.
- Riesgo de incendio potencial.

## 1.3 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO

### 1.3.1 Ecuaciones para el diseño de un secador de bandejas.

- **Velocidad del periodo contante; W**

Esta ecuación se la utiliza para calcular la velocidad de secado entre dos puntos donde exista una variación de humedad.

Ec. 1.3.1-1

$$W = \frac{S}{A} - \frac{\Delta X}{\Delta \theta}$$

Dónde:

$W$  = *Velocidad de secado constante*

$A$  = *Superficie expuesta al secado*

$S$  = *Sólido seco*

$\Delta X$  = *Variación de la humedad en base seca*

$\Delta\theta$  = *Variación del tiempo de secado*

- **Velocidad del periodo antecrítico ( $W_c$ ).**

Este periodo va desde la humedad inicial  $X_0$ , hasta la humedad crítica  $X_c$ .

Ec. 1.3.1-2

$$W_c = \frac{S}{A} - \frac{X_i - X_c}{\Delta\theta}$$

Dónde:

$W_c$  = *Velocidad de secado periodo antecritico*

$A$  = *Superficie expuesta al secado*

$S$  = *Sólido seco*

$\Delta X$  = *Variación de la humedad en base seca*

$\Delta\theta$  = *Variación del tiempo de secado*

- **Velocidad poscrítica o decreciente (W<sub>D</sub>).**

En general este periodo puede dividirse en dos tramos: uno en la que la velocidad de secado varía linealmente con la humedad desde el punto crítico (primer periodo poscrítico), y otro en que no se cumple esta variación lineal (segundo periodo poscrítico), aunque no puede presentar esta separación neta entre ambos tramos.

Ec. 1.3.1-3

$$W_D = W_c - \frac{X_c - X}{X_c - X_f} (W_c - W_f)$$

Dónde:

$W_D$  = *Velocidad de secado poscrítica*

$W_c$  = *Velocidad de secado crítica*

$X_c$  = *Humedad crítica*

$X$  = *Humedad en cualquier instante*

$X_f$  = *Humedad final*

$W_f$  = *Velocidad de secado final*

- **Tiempo de secado en el periodo antecrítico (θ<sub>a</sub>).**

Ec. 1.3.1-4

$$\theta_a = \frac{S}{A} - \frac{X_i - X_c}{W_c}$$

Dónde:

$\theta_a$  = *Tiempo antecrítico*

$W_c$  = *Velocidad de secado constante*

$A =$  Superficie expuesta al secado

$S =$  Sólido seco

$X_i =$  Humedad inicial

$X_c =$  Humedad crítica

- **Tiempo de secado en el periodo poscrítico ( $\theta_p$ ).**

Ec. 1.3.1-5

$$\theta_p = \frac{S}{A} \int_{X_f}^{X_i} \frac{dX}{W}$$

Este se lo puede realizar por dos métodos:

- a) El método gráfico si no se conoce la relación analítica  $W = f(X)$ , la integración de la ecuación 1.3.1-5 ha de hacerse gráficamente representando  $X$  frente a  $1/W$ .
- b) El Método Analítico si la velocidad de secado varía linealmente con la humedad, desde la humedad crítica hasta la final, la integración de la ecuación 1.3.1-5 conduce a:

Ec. 1.3.1-6

$$\theta_p = \frac{S}{A} \frac{X_c - X_f}{W_c - W_f} \ln \frac{W_c}{W_f} = \frac{S}{A} \frac{X_c - X_f}{W_{log}}$$

En el caso que no se conozca como varía la velocidad de secado con respecto a la humedad, se puede obtener una ecuación aproximada suponiendo la variación lineal de la velocidad de secado con la humedad, lo cual se expresa en la siguiente ecuación:

Ec. 1.3.1-7

$$\theta_p = \frac{S}{A} \frac{X_c - X^*}{W_c} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*}$$

Dónde:

$\theta_p$  = *Tiempo poscrítico*

$W_c$  = *Velocidad de secado constante*

$W_f$  = *Velocidad de secado final*

$A$  = *Superficie expuesta al secado*

$S$  = *Sólido seco*

$X_f$  = *Humedad final*

$X_c$  = *Humedad crítica*

$X^*$  = *Humedad en equilibrio*

- **Tiempo total de secado ( $\theta_T$ ).**

Es la sumatoria de los tiempos antecrítico y poscrítico.

Ec. 1.3.1-8

$$\theta_T = \theta_a + \theta_p$$

Dónde:

$\theta_a$  = *Tiempo para el periodo antecrítico*

$\theta_p$  = *Tiempo para el periodo poscrítico*

- **Velocidad de transferencia de calor.**

Ec. 1.3.1-9

$$q = \frac{\Delta T}{R}$$

Dónde:

$q$  = *Velocidad de transferencia de calor*

$\Delta T$  = *Diferencial de temperatura*

$\Sigma R$  = *Sumatoria de resistencias a la transferencia de calor*

- **Resistencia a la transferencia de calor por convección.**

Ec. 1.3.1-10

$$R_h = \frac{1}{h_i A}$$

Dónde:

$R_h$  = *Resistencia a la transferencia de calor por convección.*

$h_i$  = *Coficiente convectivo de transferencia de calor.*

$A$  = *Área.*

- **Resistencia a la transferencia de calor por conducción.**

Ec. 1.3.1-11

$$R_k = \frac{L}{kA}$$

Dónde:

$R_k$  = Resistencia a la transferencia de calor por conducción.

$k$  = Coeficiente de conductividad térmica.

$L$  = Espesor.

$A$  = Área.

# **CAPITULO II**

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1 SIMULACIÓN

La simulación se la realizó mediante la utilización de un secador de convección forzada, existente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. La práctica se basa en someter la materia prima, para este caso *Dactylis glomerata* conocida comúnmente como pasto azul, a un secado a temperatura constante, registrando continuamente las pérdidas de humedad en un tiempo determinado.

Con los datos obtenidos de forma experimental se procederá a realizar las curvas correspondientes a la operación unitaria de secado, es decir, Humedad vs. Tiempo, Humedad vs. Velocidad de secado; las cuales serán de vital importancia al momento de advertir el comportamiento que tiene el pasto azul en el proceso de deshidratación. De esta forma se podrá elegir la temperatura y el tiempo ideal para el secado de nuestra materia prima.

Se realizaron dos tipos de ensayos diferentes con ocho muestras distintas de las cuales se seleccionaron dos, aquellas que presentaron el mejor comportamiento de secado. El primero se lo realizó a la temperatura 50 C y con un tamaño promedio de 10 cm por planta; mientras que el segundo ensayo se lo hizo con una temperatura de 60 C y con un tamaño no mayor de 5 cm por planta. De esta manera se hizo posible la comparación entre ensayos, pudiendo encontrar el valor óptimo para el proceso de secado y el tamaño de partículas que facilitan dicho proceso.

Para obtener el peso de la muestra en cada análisis se utilizó una balanza mecánica de precisión calibrada. Además cabe indicar que todas las pruebas de secado fueron realizadas en bandejas de acero inoxidable de las siguientes dimensiones: largo 48 cm, ancho 38 cm y espesor 3 cm.

Finalmente, con la utilización de las curvas de secado y de los datos experimentales podemos obtener precisamente las diferentes variables del proceso, como son: la humedad crítica, la humedad de equilibrio y la velocidad de secado. Las variables del proceso de deshidratación permiten diseñar la operación unitaria equipo de acuerdo a las necesidades del producto.

### 2.1.1 *Determinación de la humedad contenida en el pasto azul.*

- **Fundamento.**

La presente técnica tiene como objetivo determinar la cantidad de agua, es decir, la humedad contenida en la muestra, para este caso pasto azul.

- **Materiales.**

- Secador de bandejas
- Balanza
- Cuchillo
- Guantes

- **Técnica.**

- Cortar el material antes de ser ingresado al secador en caso de que el tamaño del mismo sea demasiado grande.
- Pesar una muestra del material a secar ( $P_i$ ).
- Conectar el equipo a una fuente de corriente eléctrica.
- Encender el equipo.
- Fijar la temperatura a la cual se desea realizar el secado.

- Colocar el material a secar en las bandejas del equipo, de forma dispersa evitando agrupamientos excesivos y tratando de que la misma cubra toda el área de secado.
- Ingresar las bandejas al equipo una vez que este haya alcanzado la temperatura deseada.
- Pesar la muestra cada cierto tiempo, hasta que la misma haya alcanzado un peso constante (Pf).
- Retirar las bandejas del secador y proceder a limpiar el equipo.

## 2.2 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

### 2.2.1 Datos de los ensayos.

El primer ensayo se realizó a una temperatura de 50 C y con un tamaño de 10 cm como promedio por cada partícula.

Tabla 2.2.1-1

Datos Ensayo 1

<b>Peso inicial</b>	170 g
<b>Temperatura de secado</b>	50 C
<b>Área de secado</b>	0,1824 m <sup>2</sup>

**FUENTE:** Jiménez A., Rodríguez, A.

Una vez finalizado el proceso de deshidratación se obtiene un peso de sólido seco igual a 49,2 gramos, valor que será usado en la obtención de humedad y velocidad de secado.

Mientras que el segundo ensayo se realizó a una temperatura de 60 C y con un tamaño promedio de 5cm por partícula, además la toma de muestras se lo realizó en intervalos de tiempo más corto todo esto con la finalidad de obtener curvas más representativas. Así pues se obtuvieron siguientes datos:

Tabla 2.2.1-2

Datos Ensayo 2

<b>Peso inicial</b>	170 g
<b>Temperatura de secado</b>	60 C
<b>Área de secado</b>	0,1824 m <sup>2</sup>

**FUENTE:** Jiménez A., Rodríguez, A.

Al final de la operación la masa del sólido seco es igual a 46,4 gramos.

En la tabla 2.2.1-3 se detalla el tiempo en horas, el peso en gramos, la humedad en kg agua/kg sólido seco (X) y la velocidad de secado en kg agua/m<sup>2</sup>.h (W) correspondiente a los dos ensayos.

Tabla 2.2.1-3

Humedad y velocidad desecado. Ensayo 1y 2.

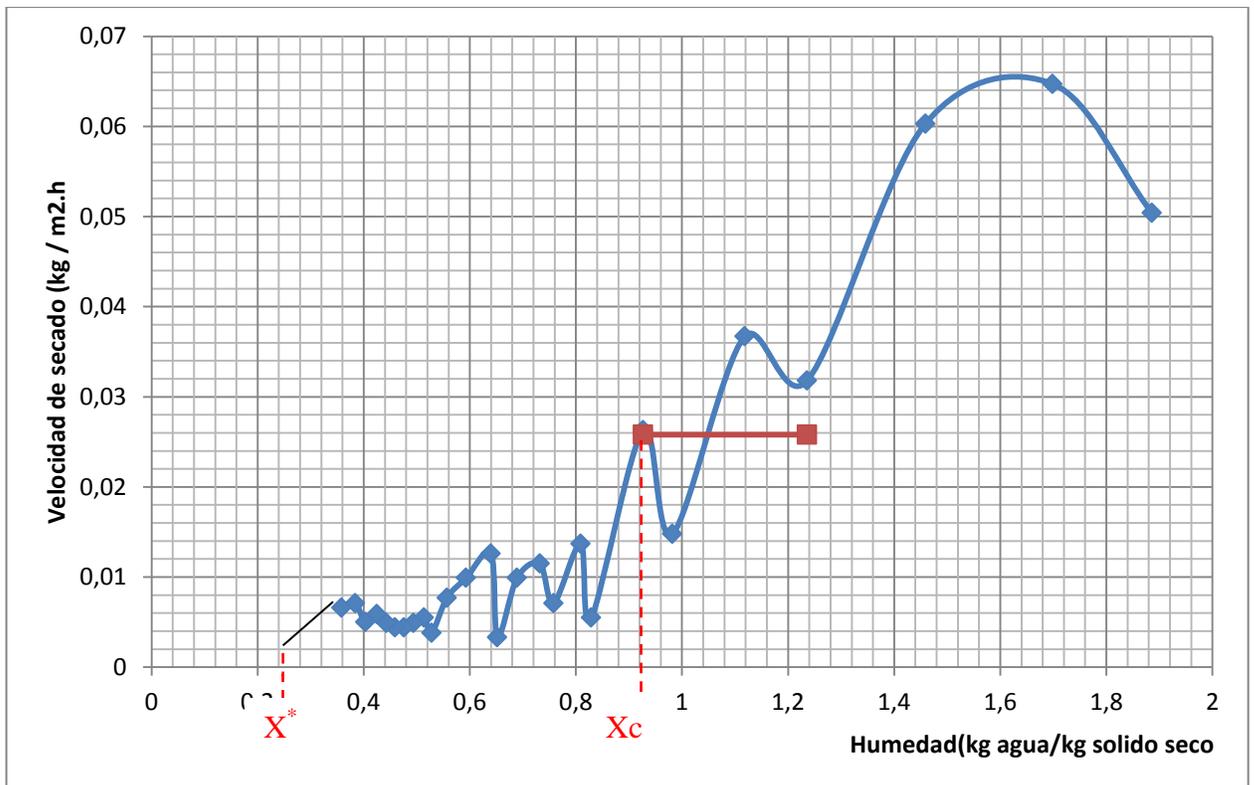
ENSAYO 1				ENSAYO 2							
T	PESO	X	W	T	PESO	X	W	T	PESO	X	W
0	170	2,455	0,1535	0	170	2,664	0,388	12	72,9	0,571	0,007
1	142	1,886	0,0504	0,25	152,3	2,282	0,096	13	71,7	0,545	0,005
2	132,8	1,699	0,0647	0,5	147,9	2,188	0,068	14	70,7	0,524	0,005
3	121	1,459	0,0603	0,75	144,8	2,121	0,096	15	69,8	0,504	0,004
4	110	1,236	0,0318	1	140,4	2,026	0,083	16	69	0,487	0,004
5	104,2	1,118	0,0367	1,25	136,6	1,944	0,081	17	68,2	0,47	0,004
6	97,5	0,982	0,0148	1,5	132,9	1,864	0,075	18	67,5	0,455	0,003
7	94,8	0,927	0,0263	1,75	129,5	1,791	0,11	19	66,9	0,442	0,003
8	90	0,829	0,0055	2	124,5	1,683	0,084	20	66,3	0,429	0,006
9	89	0,809	0,0137	2,25	120,65	1,6	0,073	21	65,2	0,405	0,003
10	86,5	0,758	0,0071	2,5	117,3	1,528	0,077	22	64,7	0,394	0,002
11	85,2	0,732	0,0115	2,75	113,8	1,453	0,044	23	64,3	0,386	0,006
12	83,1	0,689	0,0099	3	111,8	1,409	0,07	24	63,2	0,362	0,002
13	81,3	0,652	0,0033	3,25	108,6	1,341	0,061	25	62,8	0,353	0,004
14	80,7	0,64	0,0126	3,5	105,8	1,28	0,059	26	62	0,336	0,086
15	78,4	0,593	0,0099	3,75	103,1	1,222	0,064				
16	76,6	0,557	0,0077	4	100,2	1,159	0,05				
17	75,2	0,528	0,0038	4,5	95,6	1,06	0,054				
18	74,5	0,514	0,0055	5	90,69	0,955	0,015				
19	73,5	0,494	0,0049	5,5	89,3	0,925	0,032				
20	72,6	0,476	0,0044	6	86,4	0,862	0,025				
21	71,8	0,459	0,0044	6,5	84,1	0,813	0,02				
22	71	0,443	0,0049	7	82,3	0,774	0,019				
23	70,1	0,425	0,0059	7,5	80,6	0,737	0,009				
24	69,02	0,403	0,005	8	79,8	0,72	0,012				
25	68,1	0,384	0,0071	9	77,7	0,675	0,012				
26	66,8	0,358	0,0066	10	75,6	0,629	0,007				

FUENTE: Jiménez A.,  
Rodríguez, A.

27	65,6	0,333	0,0899	11	74,3	0,601	0,008
----	------	-------	--------	----	------	-------	-------

Una vez que se han realizado los cálculos respectivos se nos hace posible graficar las curvas humedad - velocidad de secado, de los dos ensayos, mismas que se muestran a continuación:

Gráfica 2.2.1-1 Velocidad- Humedad Ensayo 1

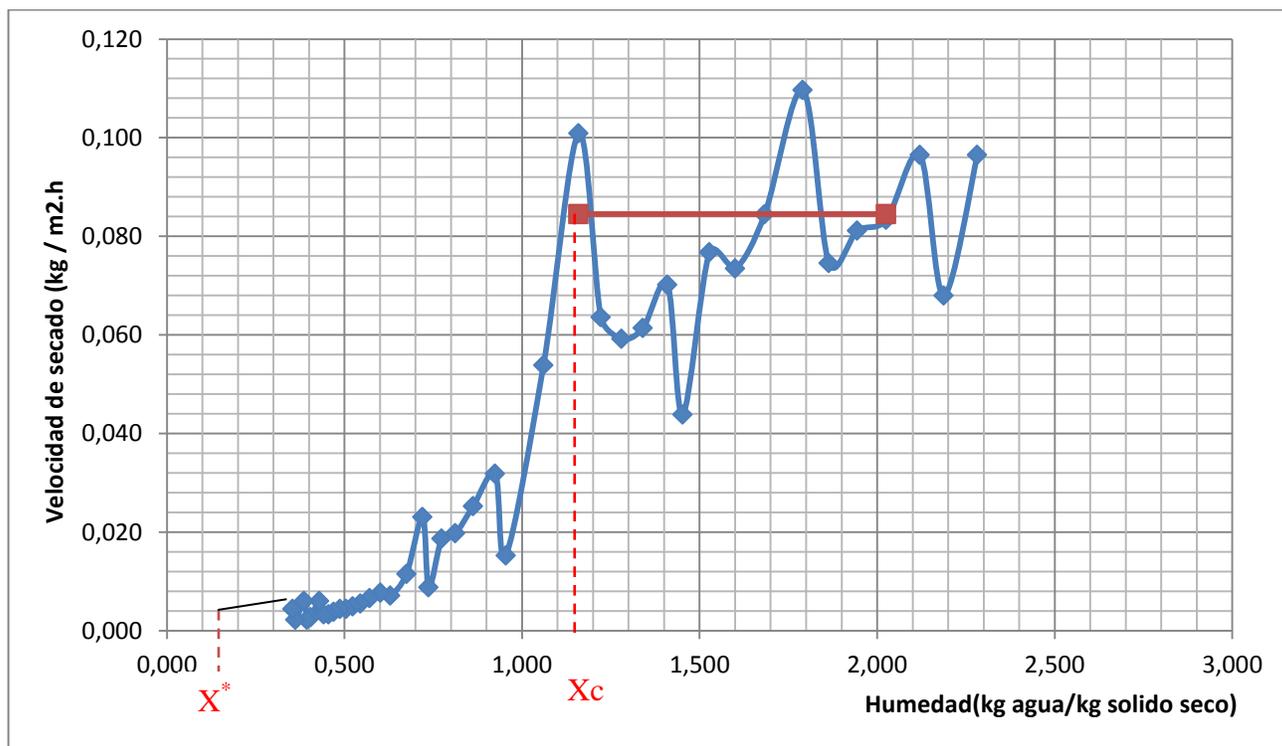


**FUENTE:** Jiménez A., Rodríguez, A.

Al momento de observar la curva se nos hace posible el cálculo de la humedad crítica teniendo un valor estimado de 0,91 kg agua/kg sólido seco, mientras que la humedad de

equilibrio se establece en 0,23kg agua/kg sólido seco, misma que se obtiene al extender la curva desde el último punto hasta que se interseque con el eje de las abscisas.

Gráfica 2.2.1-2 Diagrama Velocidad-Humedad Ensayo 2



**FUENTE:** Jiménez A., Rodríguez, A.

Mediante el análisis de la curva anterior podemos calcular el valor de la humedad crítica misma que es igual a 1,17 kg agua/kg sólido seco, mientras que la humedad de equilibrio se establece en 0,17 kg agua/kg sólido seco.

## 2.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Tabla 2.3-1  
Resultados de la simulación

<b>RESULTADOS</b> <b>PARÁMETRO</b>	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 2</b>
Humedad Crítica	0,91 kg agua/kg sólido seco	1,17 kg agua/kg sólido seco
Humedad de equilibrio	0,23kg agua/kg sólido seco	0,17 kg agua/kg sólido seco
Velocidad antecrítica	0,0258 kg / m <sup>2</sup> h	0,0845 kg / m <sup>2</sup> h

FUENTE: Jiménez A., Rodríguez, A.

## 2.4 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE PROCESO

Sin duda las variable a encontrar son de vital importancia al momento de elegir las condiciones óptimas para el secado de biomasa, en la tabla siguiente se muestran aquellos parámetros que se calcularan y los indicadores de los mismos.

Tabla 2.4-1  
Variables del proceso para la operación de secado

<b>VARIABLES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>INDICADORES</b>
<b>Humedad</b>	kg agua/kg sólido seco	<b>Velocidad poscrítica</b>	kg/m <sup>2</sup> h
<b>Humedad de equilibrio</b>	kg agua/kg sólido seco	<b>Tiempo poscrítico</b>	Horas
<b>Humedad crítica</b>	kg agua/kg sólido seco	<b>Tiempo antecrítico</b>	Horas
<b>Velocidad antecrítica</b>	kg/m <sup>2</sup> h	<b>Tiempo total de secado</b>	Horas

FUENTE: Jiménez A., Rodríguez, A.



# **CAPITULO III**

### 3. CÁLCULOS Y RESULTADOS

#### 3.1 CÁLCULOS

##### 3.1.1 Datos adicionales para el diseño del equipo.

Tabla 3.1.1-1

Datos adicionales del equipo diseñado

<b>Peso de la bandeja (gr)</b>	<b>Área de la bandeja (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Peso sólido seco (Kg)</b>
1528,4	0,1615	0,0351

**FUENTE:** Jiménez A., Rodríguez, A.

Tabla 3.1.1-2

Datos adicionales para el cálculo de calor perdido

<b>k acero (W/mK)</b>	<b>k lana de vidrio (W/mK)</b>	<b>h vapor de agua (W/m<sup>2</sup>K)</b>	<b>ta temperatura ambiente (C)</b>
16,3	0,038	2850	19

**FUENTE:** GEANKOPOLIS, J., *Procesos de transporte y Operaciones Unitarias*,  
Pp.246, 247.

##### 3.1.2 Cálculos técnicos del equipo

###### 3.1.2.1 Velocidad antecrítica gráfica

Para la velocidad antecrítica gráfica se debe ubicar una recta desde la humedad 0.60 hasta 0.40, de tal forma que se considere un periodo totalmente constante como se observa en las curvas de secado teóricas. Este trazado se lo justifica mediante el cálculo de la desviación estándar.

Utilizando la gráfica 3.2.2-2 se obtiene la velocidad antecrítica, mediante la interpolación en el eje de las ordenadas con el valor de la humedad crítica mismo que es igual a 0,399 kg agua/kg sólido seco. Así tendremos que:

$$W_c = 0,0625 \frac{kg}{hm^2}$$

### 3.1.2.2 Velocidad antecrítica analítica.

Ec. 3.1.2.2-1

$$W_a = \frac{S}{A} - \frac{X_i - X_c}{\Delta\theta}$$

$$W_a = \frac{0,0351kg}{0,1615m^2} - \frac{0,615 - 0,399}{0,75h}$$

$$W_a = 0.0625 \frac{kg}{hm^2}$$

### 3.1.2.3 Velocidad poscrítica.

El cálculo de la velocidad poscrítica se lo realizara efectuando una linealización de este periodo, así, se considerará que la velocidad poscrítica está variando linealmente con la humedad. Por este motivo se utiliza la siguiente ecuación:

Ec. 3.1.2.3-1

$$W_D = W_c - \frac{X_c - X}{X_c - X_f} (W_c - W_f)$$

$$W_D = 0,0625 - \frac{0,399 - 0,2}{0,399 - 0,064} (0,0625 - 0,028)$$

$$W_D = 1,332 * 10^{-3} \text{ kg } \text{hm}^2$$

3.1.2.4 *Tiempo de secado en el periodo antecrítico ( $\theta_a$ ).*

Ec. 3.1.2.4-1

$$\theta_a = \frac{S}{A} - \frac{X_i - X_c}{W_c}$$

$$\theta_a = \frac{0,0351 \text{ kg}}{0,1615 \text{ m}^2} - \frac{0,615 - 0,399}{0,0625 \text{ kg } \text{hm}^2}$$

$$\theta_a = 0,75 \text{ h}$$

3.1.2.5 *Tiempo de secado en el periodo poscrítico gráfico ( $\theta_p$ ).*

En la Gráfica 3.2.2-3 se halla el área bajo la curva, la cual representa la integral  $dx/W$  con los límites de la humedad crítica hasta la humedad final en la ecuación 3.1.1.5-1. El área obtenida es 13.144.

Ec. 3.1.2.5-1

$$\theta_p = \frac{S}{A} \int_{x_f}^{x_c} \frac{dx}{W}$$
$$\theta_p = \frac{0,0351}{0,1615} * 13,144$$
$$\theta_p = 2,86h$$

3.1.2.6 *Tiempo de secado en el periodo poscrítico analítico ( $\theta_p$ ).*

Ec. 3.1.2.6-1

$$\theta_p = \frac{S}{A} \frac{X_c - X^*}{W_c} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*}$$
$$\theta_p = \frac{0,0351 \text{ kg}}{0,1516 \text{ m}^2} \frac{0,399 - 0,005}{0,0625 \text{ kg}} \ln \frac{0,399 - 0,005}{0,064 - 0,005}$$
$$\theta_p = 2,77 \text{ h}$$

3.1.2.7 *Tiempo total de secado ( $\theta_T$ ).*

Ec. 3.1.2.7-1

$$\theta_T = \theta_a + \theta_p$$
$$\theta_T = 0,75h + 2,86$$
$$\theta_T = 3,61h$$

### 3.1.2.8 Cálculo del calor perdido

- Resistencia convección al desprenderse vapor de agua del material a secar.

Ec.3.1.2.8-1

$$R_1 = \frac{1}{h_i A}$$

$$R_1 = \frac{1}{2850 \frac{W}{m^2 K} * 0,1615 m^2}$$

$$R_1 = 2,172 * 10^{-3} \frac{K}{W}$$

- Resistencia a la conducción acero.

Ec. 3.1.2.8-2

$$R_2 = \frac{L}{kA}$$

$$R_2 = \frac{0,006m}{16,3 \frac{W}{mK} * (0,374)m^2}$$

$$R_2 = 9,84 * 10^{-4} \frac{K}{W}$$

- Resistencia a la conducción aislante térmico lana de vidrio.

Ec. 3.1.2.8-3

$$R_{3v} = \frac{L}{kA}$$

$$R_{3v} = \frac{0,04m}{0,038 \frac{W}{m^2K} * (0,374)m^2}$$

$$R_{3v} = 2,81 \frac{K}{W}$$

- Velocidad de transferencia de calor (1-2)

Ec. 3.1.2.8-4

$$q_{1-2} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2}$$

$$q_{1-2} = \frac{373 - 292 \text{ K}}{(2,172 * 10^{-3} + 9,84 * 10^{-4}) \frac{K}{W}}$$

$$q_{1-2} = 46197,72 \text{ W}$$

- Velocidad de transferencia de calor (1-3v)

Ec. 3.1.2.8-5

$$q_{1-3v} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2 + R_{3v}}$$

$$q_{1-3v} = \frac{373 - 292 \text{ K}}{(2,172 * 10^{-3} + 9,84 * 10^{-4} + 2,81) \frac{K}{W}}$$

$$q_{1-3v} = 28,79 \text{ W}$$

- Calor útil

$$Q = q_{1-2} - q_{1-3v}$$

$$Q = 46197,72W - 28,79W$$

$$Q = 46168,93 W$$

### 3.1.3 Capacidad y dimensionamiento.

#### 3.1.3.1 Capacidad.

La capacidad del secador de bandejas dependerá directamente del tipo de alimentación que se proceda a utilizar. En nuestro caso, el pasto azul es un material liviano y abultado, por lo cual se cargara nuestro equipo con una baja cantidad de material, de tal manera que este se encuentre bien distribuido en la bandeja y no exceda el espesor de la misma.

- Capacidad por bandeja: 150gr
- Número de bandejas: 5
- Capacidad total: 750 gr

#### 3.1.3.2 Dimensionamiento.

El dimensionamiento del equipo se lo realizó en base a la capacidad de carga que contienen las bandejas. Las bandejas se las dispondrá de tal manera que tengan un espacio de 8cm entre cada una. Además existirá un espacio de 12 cm que separa la última bandeja con la cámara externa en donde se procederá a colocar la resistencia eléctrica.

Las bandejas deben poseer una malla metálica, en la cual se colocara el material a secar. Estas mallas poseen una serie de orificios que tienen una determinada abertura regida por una serie de números estándar. Esta escala de números se la conoce como la escala de MESH. Por las características del material se utilizara una malla metálica de numero MESH 40.

Se debe especificar claramente que existe un espacio de 4 cm en cada lado entre la cámara interna y externa, en donde se colocará el aislante. Mediante el cálculo que se realizó de las pérdidas de calor, determinamos que el material con el cual se tiene una menor cantidad de calor perdido es lana de vidrio, es decir que este será el material aislante.

El secador de bandejas a construirse tendrá las siguientes dimensiones:

Tabla 3.1.3.2-1

Dimensiones del secador de bandejas

	<b>Largo</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>
<b>Exterior</b>	55	55	68
<b>Interior</b>	47	47	50
<b>Bandejas</b>	38	42,5	3
<b>Rompellamas</b>	37.5	42	2

**FUENTE:** Jiménez A., Rodríguez, A.

### 3.1.4 Tipos de materiales, control y fuente de calor.

#### 3.1.4.1 Tipo de Materiales

- **Estructura externa, interna y bandejas**

El material para la construcción de estos elementos será acero inoxidable por sus diferentes características como son: resistencia a la corrosión, resistencia a altas temperaturas, facilidad de construcción, estética, propiedades higiénicas, entre otras.

Existen diferentes tipos de acero inoxidable, y se consideró aquel que mejor se acople a nuestras necesidades. El tipo de material que se utilizara para la construcción de nuestro equipo será acero inoxidable AISI 304. Dentro de las aplicaciones de este tipo de acero se encuentran la fabricación de equipos para procesar alimentos, textiles, farmacéuticos, etc. Este material posee las siguientes propiedades:

**Propiedades acero inoxidable AISI 304**

- Densidad: 7.93 (g/cm<sup>3</sup>)
- Punto de fusión: 1400-1455 (C)
- Alargamiento: <60%
- Coeficiente de expansión térmica 20-100C: 18 (\*10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>)
- Conductividad térmica a 23C: 16.3 (W/mK)
- Excelente soldabilidad.
- Elevada resistencia a la corrosión.
- Sobresaliente maleabilidad y ductilidad.
- Buena resistencia a altas temperaturas.
- No se endurece al ser sometido a calor.
- Excelente factor de higiene y limpieza.

- **Aislante**

La colocación de un material aislante de calor en el secador de bandejas es imprescindible. Un aislante térmico está encargado de evitar la disipación del calor hacia los alrededores del equipo. Esto permitirá que exista una mayor eficiencia energética en el equipo.

Para el equipo que se ha construido se utilizara un aislante de lana de vidrio, que se ha seleccionado luego de la realización de los cálculos respectivos de pérdidas de calor. La lana de vidrio es una material de fibra mineral fabricado con varios filamentos de vidrio aglutinado, el cual es utilizado como aislante térmico y es de fácil manejo.

- **Ventanal**

Para el ventanal que se colocara en la parte frontal del secador se utilizara vidrio templado.

### 3.1.4.2 *Control*

Sea cual sea la operación unitaria con la cual se esté trabajando es de vital importancia mantener controladas las variables existentes en dicho proceso, para lo cual se puede usar un sin número de controladores de diferentes tipos en nuestro caso se usaran controladores PID, esto debido a que son controles que no son más que un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo.

- El valor Proporcional determina la reacción del error actual.
- El Integral genera una corrección proporcional a la integral del error.
- El Derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce.

La suma de estas tres acciones es usada para ajustar el proceso mediante un elemento de control como la posición de una válvula de control o la energía suministrada a un calentador; etc.

Para el correcto funcionamiento de un controlador PID será indispensable el uso de los siguientes componentes:

- Un sensor, que determine el estado del sistema
- Un controlador, que genere la señal que gobierna al actuador.
- Un actuador, que modifique al sistema de manera controlada

Con lo ya antes mencionado se nos hace posible señalar los pasos que sigue un sistema de control, los mismos que son:

1. El sensor proporciona una señal analógica o digital al controlador, la cual representa el punto actual en el que se encuentra el proceso o sistema.
2. El controlador lee una señal externa que representa el valor que se desea alcanzar, la cual es de la misma naturaleza y tiene el mismo rango de valores que la señal que proporciona el sensor.
3. El controlador resta la señal de punto actual a la señal prefijada, obteniendo así la señal de error, que determina en cada instante la diferencia que hay entre el valor deseado y el valor medido.
4. Estas señales serán las que el controlador va a utilizar para gobernar el actuador, y cambiar el valor de la variable medida si es necesario

Lo antes mencionado se puede resumir en el siguiente diagrama:

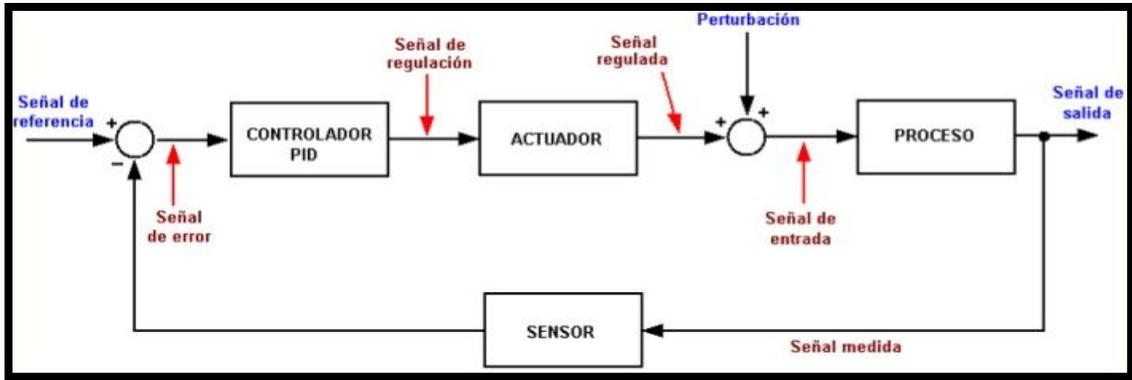


Fig. 3.1.4-1 Sistema de control

Una vez expuesto lo anterior podemos graficar el circuito de control que será:

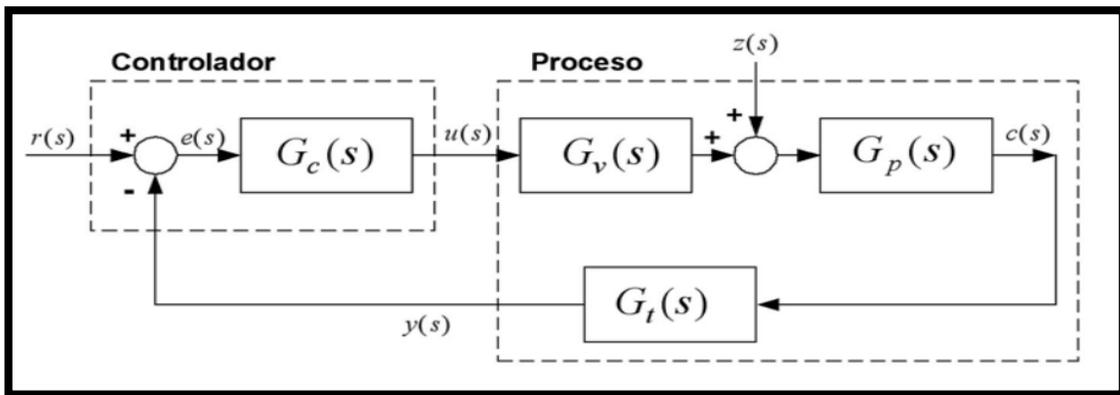


Fig. 3.1.4-2 Circuito de control

Dónde:

$r(s)$  = valor deseado

$e(s)$  = error

$G$  = ganancia

$y(s)$  = variable controlada

$z(s)$  = posible perturbación

$u(s)$  = salida del controlador

El controlador instalado en el equipo tendrá las siguientes características:

- Temperatura: 0-100C.
- Tipo de control ON/OFF.
- Display simple Led de 4 dígitos. (Fijación de temperatura)
- Display simple Led de 4 dígitos. (Marcador temperatura real)
- Alimentación: 220VAC 50/60 Hz.
- Consumo: 0,3 Amp.
- 1 Entrada: Sensor digital de temperatura.
- Termocupla tipo J.
- Condiciones ambientales de funcionamiento.

#### 3.1.4.3 Fuente de calor.

- **Resistencias eléctricas.**

La elección de la fuente de calor, se basó principalmente en el rango de temperatura a la cual se seca nuestra materia prima. Al tener una temperatura media de secado de 60C se pueden utilizar resistencias eléctricas. Se pudo optar por un quemador de gas, pero generalmente este se utiliza para mayores temperaturas y su costo es mayor.

Las resistencias eléctricas son de 4000Watts y alimentación eléctrica de 220 Volts.

- **Ventilador.**

El ventilador es uno de los elementos primordiales en el secador de bandejas, ya que es el medio que al calentarse permite remover la humedad del material que se somete a secado. La elección del ventilador se base principalmente en su velocidad, la cual deberá permitir

una adecuada circulación del aire dentro del equipo y que a la vez no ocasione ningún tipo movimiento brusco del material que se está secando. El ventilador instalado tiene una potencia de 1700rpm.

### 3.1.5 Hoja técnica del equipo.

<b>NUMERO DE BANDEJAS</b>	5		
<b>CAPACIDAD POR BANDEJA</b>	150gr		
<b>CAPACIDAD TOTAL</b>	750gr		
<b>MALLA METÁLICA BANDEJA</b>	MESH 40		
<b>MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN</b>	ACERO INOXIDABLE AISI 304		
<b>MATERIAL DEL AISLANTE</b>	LANA DE VIDRIO		
<b>DIMENSIONES</b>			
<b>Dimensiones</b>	<b>LARGO</b>	<b>ANCHO</b>	<b>ALTO</b>
<b>Elementos</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(cm)</b>
<b>CÁMARA EXTERIOR</b>	55	55	68
<b>CÁMARA INTERIOR</b>	47	47	50
<b>BANDEJAS</b>	38	42,5	3
<b>ROMPELLAMAS</b>	37,5	42	2
<b>CONTROLADOR</b>			
- Controlador completo de temperatura tipo PID (sensor, controlador, actuador e indicador)			
<b>FUENTE DE CALOR</b>			
- Resistencia eléctrica (temperatura 0-100C)			
<b>VENTILADOR</b>			
- Potencia 1700rpm			

**FUENTE:** Jiménez A., Rodríguez, A

### 3.1.6 Requerimiento presupuestario

#### 3.1.6.1 Recursos materiales.

TABLA 3.1.6.1-1

#### Recursos materiales

<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario(\$)</b>	<b>TOTAL (\$)</b>
<b>Ventilador 1700rpm</b>	1	60	60
<b>Resistencia eléctrica 4000W</b>	1	50	50
<b>Plancha de acero inoxidable AISI 304</b>	5	220	1000
<b>Plancha lana de vidrio</b>	1	40	40
<b>Vidrio templado 40 * 50</b>	1	40	40
<b>Soportes de acero inoxidable</b>	4	5	20
<b>Plancha malla metálica MESH 40</b>	1	30	30
<b>Sistema de control automático de temperatura por termocupla tipo J</b>	1	900	900
		<b>TOTAL (\$)</b>	<b>2140</b>

**FUENTE:** Jiménez A., Rodríguez, A.

3.1.6.2 Recursos humanos.

TABLA 3.1.6.2-1

Recursos humanos

Actividad	Costo (\$)
Mano de obra construcción del equipo	1070
Mano de obra instalación del controlador automático	150
<b>TOTAL (\$)</b>	<b>1220</b>

FUENTE: Jiménez A., Rodríguez, A.

3.1.6.3 Recursos totales.

TABLA 3.1.6.3-1

Recursos totales

Actividad	Cantidad	Precio Unitario(\$)	TOTAL (\$)
Impresiones	600	0.03	18
Anillados	6	0.5	3
Empastados	3	5	15
Transporte	---	---	100
Recursos materiales	---	---	2140
Recursos humanos	---	---	1220
		<b>TOTAL (\$)</b>	<b>3496</b>

FUENTE: Jiménez A., Rodríguez, A.

## 3.2 RESULTADOS

### 3.2.1 Datos de tiempo real para la validación del diseño de ingeniería

Tabla 3.2.1-1

Datos experimentales del equipo

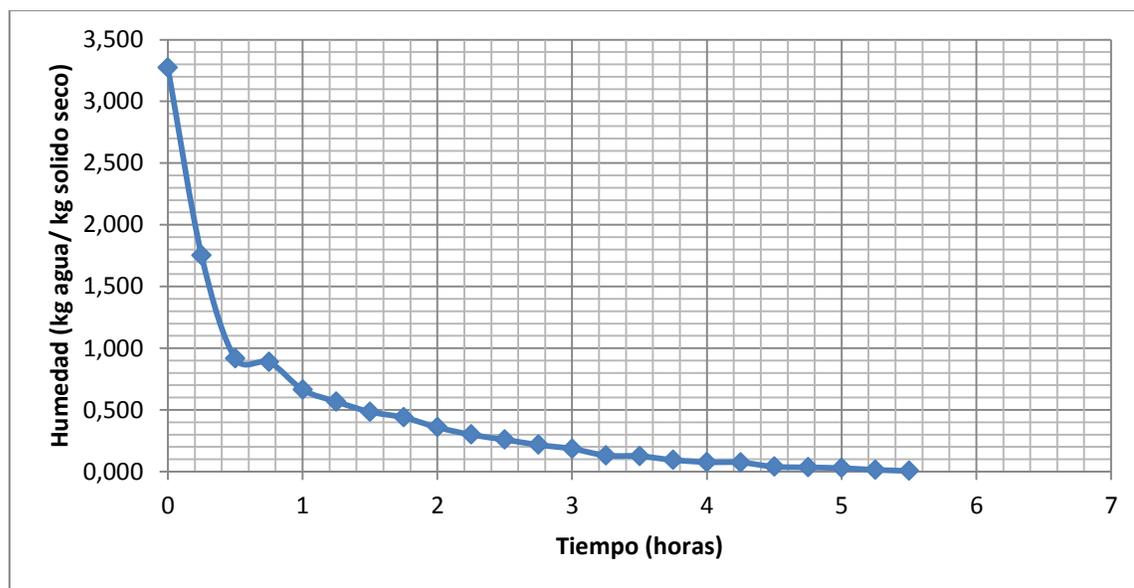
T	PESO+BANDEJ A (gr)	PESO (gr)	HUMEDAD X (kg agua/ kg sólido seco)	VELOCIDAD W (kg/hm <sup>2</sup> )	HUMEDA D MEDIA X	1/W
0	1678,4	150,0	3,274	1,323	2,513	0,756
0,2 5	1625	96,6	1,752	0,726	1,335	1,378
0,5	1595,7	67,3	0,917	0,025	0,903	40,375
0,7 5	1594,7	66,3	0,889	0,196	0,776	5,111
1	1586,8	58,4	0,664	0,084	0,615	11,875
1,2 5	1583,4	55,0	0,567	0,072	0,526	13,922
1,5	1580,5	52,1	0,484	0,040	0,462	25,234
1,7 5	1578,9	50,5	0,439	0,069	0,399	14,420
2	1576,1	47,7	0,359	0,052	0,329	19,226
2,2 5	1574	45,6	0,299	0,035	0,279	28,839
2,5	1572,6	44,2	0,259	0,037	0,238	26,917
2,7 5	1571,1	42,7	0,217	0,027	0,201	36,705
3	1570	41,6	0,185	0,047	0,158	21,250
3,2 5	1568,1	39,7	0,131	0,005	0,128	201,875
3,5	1567,9	39,5	0,125	0,027	0,110	36,705
3,7	1566,8	38,4	0,094	0,015	0,085	67,292

5						
4	1566,2	37,8	0,077	0,002	0,075	403,750
4,2	1566,1	37,7	0,074	0,030	0,057	33,646
5						
4,5	1564,9	36,5	0,040	0,005	0,037	201,875
4,7	1564,7	36,3	0,034	0,005	0,031	201,875
5						
5	1564,5	36,1	0,028	0,012	0,021	80,750
5,2	1564	35,6	0,014	0,007	0,010	134,583
5						
5,5	1563,7	35,3	0,006	0,005		
5,7	1563,5	35,1				
5						

**FUENTE:** Jiménez A., Rodríguez, A.

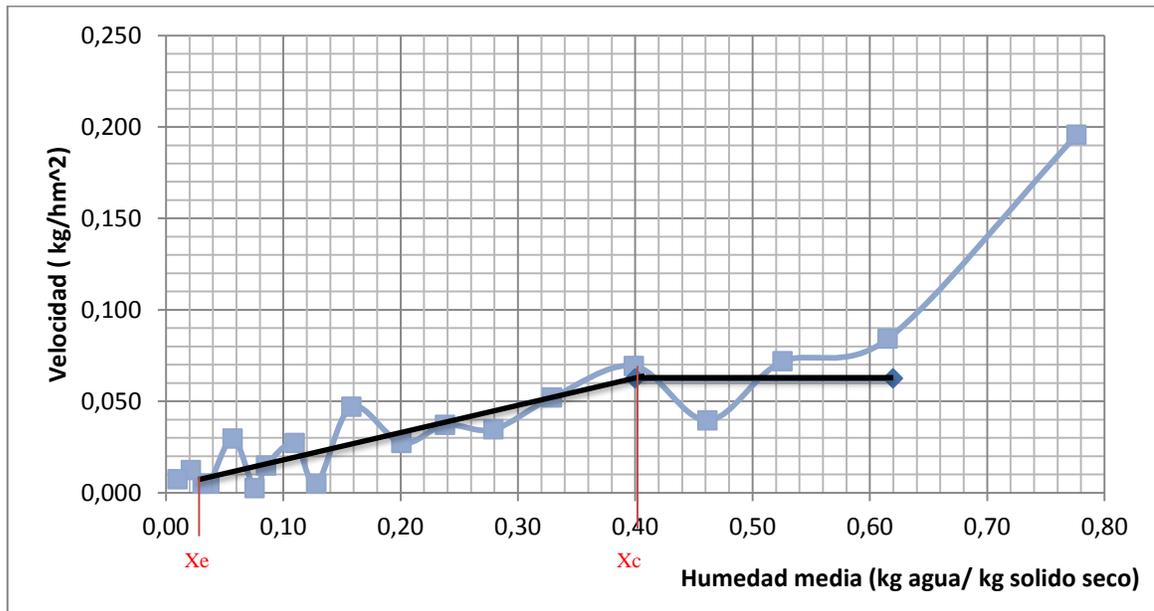
### 3.2.2 Curvas de secado.

Gráfica 3.2.2-1 Humedad- tiempo equipo diseñado



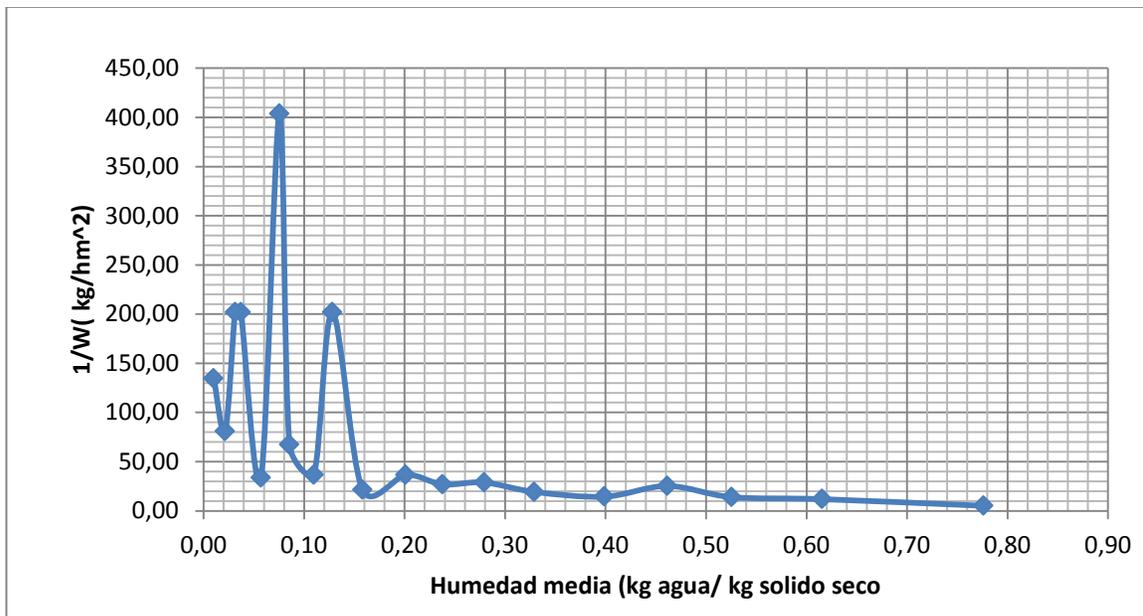
**FUENTE:** Jiménez A., Rodríguez, A.

Gráfica 3.2.2-2 Velocidad-humedad media equipo diseñado



FUENTE: Jiménez A., Rodríguez, A.

Gráfica 3.2.2-31/Velocidad- humedad media equipo diseñado



FUENTE: Jiménez A., Rodríguez, A.

### 3.2.3 Resultados de los cálculos de ingeniería

Tabla 3.2.3-1

Resultados de los cálculos

<b>Medidas de dispersión</b>	Desviación estándar Periodo antecrítico	0,015	-
	Ecuación recta Periodo poscrítico	$y=0.1775x-0.002$	-
	$R^2$	0,7833	-
<b>Humedades</b>	Humedad inicial. $X_i$	0,615	(kg agua/kg sólido seco)
	Humedad crítica. $X_c$	0,399	(kg agua/kg sólido seco)
	Humedad de equilibrio. $X^*$	0,005	(kg agua/kg sólido seco)
	Humedad final. $X_f$	0,064	(kg agua/kg sólido seco)
<b>Velocidad de secado</b>	Velocidad antecrítica gráfica. $W_c$	0,0625	(kg/hm <sup>2</sup> )
	Velocidad antecrítica analítica. $W_c$	0,0626	(kg/hm <sup>2</sup> )
	Velocidad poscrítica. $W_p$	$1,281 \cdot 10^{-3}$	(kg/hm <sup>2</sup> )
<b>Tiempos de secado</b>	Tiempo antecrítico. $\theta_a$	0,75	(horas)
	Tiempo poscrítico gráfico $\theta_p$	2,86	(horas)
	Tiempo poscrítico analítico $\theta_p$	2,77	(horas)
	Tiempo total $\theta_T$	3,61	(horas)
<b>Calor perdido</b>	Resistencia convección vapor de agua $R_1$	$2,17 \cdot 10^{-3}$	(K/W)
	Resistencia conducción acero. $R_2$	$9,84 \cdot 10^{-4}$	(K/W)
	Resistencia conducción lana de vidrio. $R_{3v}$	2,81	(K/W)
	Velocidad de transferencia de calor $q_{R1-R2}$	46197,72	(W)
	Velocidad de transferencia de calor	28,79	(W)

	$q_{1-3v}$		
	Calor útil Q	46168,93	(W)

**FUENTE:** *Jiménez A., Rodríguez, A.*

### 3.2.4 Análisis bromatológico de la muestra seca

Tabla 3.2.4-1

Composición bromatológica pasto azul seco

<b>Nutriente</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Materia Seca</b>	%	85,04
<b>Humedad</b>	%	14,96
<b>Cenizas</b>	%	12,21
<b>Materia Orgánica</b>	%	87,42
<b>Proteína</b>	%	17,66
<b>Fibra</b>	%	26,24

**FUENTE:** LABCESTTA (27/12/2013)

# **CAPITULO IV**

#### **4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Siendo el proceso de secado uno de los más utilizados en la industria, es imprescindible contar con equipos que faciliten dicho proceso, un claro ejemplo es el secador de bandejas, que puede ser usado para el secado de varios materiales en este caso biomasa, específicamente pasto azul, el mismo que para ser usado como materia seca con diferentes fines debe llegar a una humedad del 30%.

Una vez que se realizaron varios ensayos de secado, se encontró que la temperatura de secado ideal es de 60 C puesto que a esta, no existe ninguna degradación de las propiedades del material, como proteína y fibra; se lo pudo verificar mediante la revisión de los análisis bromatológicos de la muestra húmeda y de la muestra seca. La muestra húmeda posee: 20,80% de materia seca; 4,71% de proteína; 5,60% de fibra. Mientras que la muestra seca posee: 85,04% de materia seca; 17,66% de proteína; 26,24% de fibra. Analizando estos resultados podemos evidenciar que los valores de la materia seca son aproximadamente 4 veces mayor que la muestra húmeda, esto sucede ya que en la muestra húmeda existe una mayor cantidad de agua, y para evidenciar q no existen cambios en la proteína y fibra debe haber la misma diferencia de valores.

En el diseño del equipo es de vital importancia conservar el calor dentro de la cámara interna en la cual se realiza el secado, ya que de la distribución uniforme del mismo dependerá el éxito o fracaso de la operación, es por esta razón que es imprescindible colocar un material que cumpla la función de aislante térmico. El aislante escogido fue lana de vidrio por su disponibilidad en el mercado y por su excelente capacidad de evitar la disipación de calor. Al colocar el aislante se obtuvo únicamente una pérdida de calor de 28,79 W mientras que sin el aislante se posee una se perdida igual a 46197,72W, teniendo así un calor útil de 46168,93W.

Una vez ya construido el equipo se procede a realizar un último ensayo, a las condiciones determinadas, es decir, a 60C y con un tamaño de partícula no mayor a 5cm. Con los datos obtenidos de forma experimental se realizaron los cálculos de las diferentes variables del proceso.

Sabiendo que la humedad crítica es aquella que marca el fin del periodo antecrítico y el inicio del periodo poscrítico, fue posible obtenerla empleando la gráfica de velocidad - humedad, siendo su valor igual a 0,399 kg agua/kg sólido seco. La humedad de equilibrio fue obtenida en la misma gráfica su valor es de 0,005 kg agua/kg sólido seo, esta es la humedad limite a la que puede llevarse el material.

El proceso consta con dos periodos de secado, por ende de dos velocidades que representan a cada uno de ellos. La velocidad antecrítica puede ser determinada de dos maneras, sea cual sea la forma a la cual se calcule esta variable, es primordial establecer primero los límites del periodo antecrítico, que son la humedad inicial y la humedad crítica. Mediante la utilización del método analítico se obtuvo una velocidad de 0,0626 (kg/hm<sup>2</sup>), y a través de la interpolación de la humedad crítica en el eje de las ordenadas de la gráfica velocidad - humedad, se tuvo un valor de 0,0625(kg/hm<sup>2</sup>). Analizando estos dos valores podemos determinar q la variable está correctamente calculada ya que los mismos son casi iguales. Para la velocidad poscrítica se consideró el tramo con tendencia lineal para el periodo poscrítico y el valor obtenido fue  $1,332 \cdot 10^{-3}$  (kg/hm<sup>2</sup>); cuya cantidad es muy pequeña ya que en este periodo la perdida de humedad en el material es mínima.

En lo que respecta a los tiempos de secado, se tiene de igual manera dos periodos. El tiempo de secado antecrítico, es aquel que refleja el tiempo en el cual el proceso se mantiene estable, es decir, donde la velocidad de secado es aparentemente constante o no cambia, dicha variable es calculada de manera analítica teniendo un valor de 0,75h. Para el periodo poscrítico gráfico se obtuvo un valor de 2,86 h; mientras que en método analítico

se tuvo una cantidad igual a 2,77 h. Sabiendo que el tiempo total es la sumatoria del tiempo antecrítico y poscrítico, se fija un valor de 3,61 h, hasta llegar a la humedad de equilibrio y despreciando el periodo de inducción. Totalmente inferior al realizado a los ensayos de simulación, esto debido q que el periodo de inducción o de ajuste de la operación de secado no fue considerado ya que en este tramo el secado en sí es muy inestable.

# **CAPITULO V**

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 CONCLUSIONES**

Una vez culminada la ejecución del presente trabajo de investigación se ha llegado a las conclusiones siguientes:

1. La simulación realizada mediante dos ensayos; uno a 50C y un tamaño de partícula de 10cm y otro a 60C y un tamaño de partícula de 5cm, nos permitió identificar que las variables del proceso de secado para el pasto son las del segunda ensayo debido a que el proceso de secado aquí ocurre de forma más rápida y eficiente. El tiempo de secado es igual a 1,63 h, hasta llegar a una humedad igual al 30% necesaria según la revisión teórica.
2. El equipo fue diseñado para una carga de 750 gramos que se distribuyen en 5 bandejas equitativamente; como medio de calentamiento se usó una resistencia eléctrica; en lo que respecta a la fuente de aire se instaló un ventilador de una potencia igual a 1700 rpm ubicado en el interior del equipo; además se instaló un controlador automático PID. El secador está construido casi en su totalidad de acero inoxidable tipo AISI 304.
3. La colocación de lana de vidrio como aislante térmico nos permitió reducir la pérdida de calor desde 46197,72W a 28,79 W. Teniendo así un calor útil de 46168,93W.
4. Las pruebas de validación del equipo se las realizó para la obtención de datos experimentales, que permitieron el cálculo de: la humedad crítica y de equilibrio

que se fijan en 0,399 kg agua/kg sólido seco y 0,005 kg agua/kg sólido seco respectivamente. En lo que respecta a la velocidad de secado, en el periodo antecrítico y poscrítico se tiene valores de 0,0625 kg/hm<sup>2</sup> y 1,332\*10<sup>-3</sup> kg/hm<sup>2</sup> respectivamente. El tiempo total de secado del pasto es igual a 3,61 horas, despreciando el periodo de inducción y hasta llegar a la humedad de equilibrio.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Una vez que se ha encendido el equipo verificar que el ventilador y la resistencia se encuentren funcionando de manera correcta.
- Al colocar la muestra en las bandejas esta debe estar distribuida correctamente evitando abultamientos, ya que esto facilitara un secado más rápido y uniforme.
- Ingresar al equipo las bandejas con la muestra, una vez que el mismo haya alcanzado la temperatura deseada.
- Si se realizan ensayos con tiempos determinados, evitar que la compuerta esté abierta por mucho tiempo, ya que la temperatura de la cámara interna del secador se verá afectada disminuyendo su valor.
- Verificar que la conexión del equipo sea de 220 V ya que a un menor voltaje el equipo no funcionara.
- Después de haber utilizado el equipo y haber secado cualquier tipo de material se debe realizar una limpieza adecuada, de tal forma que la próxima muestra que ingrese al equipo no sea contaminada.
- Es importante realizar la comparación con diferentes tipos de aislantes térmicos, con la finalidad de determinar el más adecuado para su instalación en el equipo.

# **CAPITULO VI**

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **LIBROS**

1. **BADGER, W.**, Introducción a la Ingeniería Química., 1ra Ed., México-México  
Editorial Mcgraw Hill., 1970., Pp. 484-522.
2. **FOUST, A.**, Principios de operaciones unitarias., 2da Ed., México-México  
Editorial Continental., 2006., Pp.461-469.
3. **GEANKOPOLIS, J.**, Procesos de transporte y Operaciones Unitarias., 3ra Ed., México-México  
Editorial Cccsa., 1998., Pp. 241-251, 579-609.
4. **MARTÍNEZ, P.**, Operaciones de separación en Ingeniería Química., 1ra Ed., Madrid-España  
Editorial Pearson., 2004., Pp. 806-816.
5. **MCCABE, W.**, Operaciones Unitarias en Ingeniería Química., 6ta Ed., México-México  
Editorial Mcgraw Hill., 2002., Pp. 835-853.

6. **NOGUES, F.S.**, Energías renovables: Energía de la biomasa., 1<sup>ra</sup> ed., Zaragoza – España  
Prensas Universitarias de Zaragoza., 2010., Pp. 30,31.
  
7. **OCÓN, J.**, Problemas de Ingeniería Química., 1ra Ed., Madrid-España  
Editorial Aguilar., 1970., Pp. 240-278.
  
8. **SARDON, J.**, Energías Renovables para el desarrollo., 1<sup>ra</sup> ed., Madrid-España  
Paraninfo., 2002., Pp. 19-21.
  
9. **TOLOSANA, E.**, Manual técnico para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal., 1<sup>ra</sup> ed., Madrid – España  
Fucovasa y Mundi., 2009., Pp. 65,66.

## **INTERNET**

### **1. BIOMASA**

- <http://www.alu.ua.es/v/vap/biomasa.htm>  
(2013-10-07)
- <http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Energia/EnergiasRenovables/Biomasa/Welcome.asp>  
(2013-10-07)

### **2. APLICACIONES DE BIOMASA**

- <http://www.cdts.espol.edu.ec/documentos/AplicacionesdeBiomasa.pdf>  
(2013-10-07)

### **3. SECADO**

- <http://onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tema6.pdf>  
(2013-10-15)
- [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/davila\\_n\\_jr/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/davila_n_jr/capitulo4.pdf)  
(2013-10-15)

### **4. SECADOR DE BANDEJAS**

- <http://cbi.izt.uam.mx/iq/Laboratorio%20de%20Operaciones%20Unitarias/Practicas%20Laboratorios/PRACTICA6.pdf>  
(2013-10-17)

## **5. ACERO INOXIDABLE 304**

- <http://bonnet.es/clasificacionacerinox.pdf>  
(2013-10-30)
- <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-304.html>  
(2013-10-30)

## **6. PASTO AZUL**

- [http://www.unavarra.es/herbario/pratenses/htm/Dact\\_glom\\_p.htm](http://www.unavarra.es/herbario/pratenses/htm/Dact_glom_p.htm)  
(2013-10-14)

**ANEXOS**

## ANEXO I

### ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DE PASTO AZUL HUMEDO



#### LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL E INSPECCIÓN

Panamericana Sur Km. 1 ½  
Teléf: (03)2998232  
ESPOCH  
FACULTAD DE CIENCIAS  
RIOBAMBA - ECUADOR

**INFORME DE ENSAYO No:** 2881  
**ST:** 13 - 110 ANÁLISIS DE ALIMENTOS

**Nombre Peticionario:** NA  
**Atm:** Adrián Rodríguez  
**Dirección:** Los Álamos 2 Manzana B casa 10  
**FECHA:** 27 de Diciembre del 2013  
**NUMERO DE MUESTRAS:** 1  
**FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:** 2013 / 12 / 18 - 15:00  
**FECHA DE MUESTREO:** 2012 / 12 / 17 - 14:00  
**FECHA DE ANÁLISIS:** 2013 / 12 / 18 - 2013 / 12 / 27  
**TIPO DE MUESTRA:** Pasto  
**CÓDIGO LABCESTTA:** LAB-Alm 235-13  
**CÓDIGO DE LA EMPRESA:** NA  
**PUNTO DE MUESTREO:** Salcedo Pasto Húmedo  
**ANÁLISIS SOLICITADO:** Químico  
**PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA:** Adrián Rodríguez  
**CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS:** T máx.:25.0 °C. T mín.: 15.0 °C

**RESULTADOS ANALÍTICOS:**

PARÁMETRO	MÉTODO /NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LIMITE PERMISIBLE
Proteína	PEE /LABCESTTA 147 AOAC 984.13	%	4,71	-
Materia seca	Gravimétrico	%	20,80	-
Grasa	PEE /LABCESTTA 150 AOAC 920.39	%	1,05	-
Ceniza	PEE /LABCESTTA 149 AOAC 942.05	%	5,18	-
Humedad	PEE /LABCESTTA/148 AOAC 934.01	%	79,20	-
Fibra	PEE /LABCESTTA 103 INEN 542	%	5,60	-
Materia orgánica	Gravimétrico	%	87,51	-

**OBSERVACIONES:**

- Muestra receptada en laboratorio.

**RESPONSABLES DEL INFORME:**

Ing. Verónica Bravo  
RESPONSABLE TÉCNICO

LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL  
E INSPECCIÓN  
LAB - CESTTA  
ESPOCH

Ing. Marcela Erazo  
JEFE DE LABORATORIO

Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.  
Los resultados arriba indicados sólo están relacionados con los objetos ensayados  
MC01-16

Página 1 de 1  
Edición 1

**NOTAS**

**CATEGORÍA DEL DIAGRAMA**

- Certificado     Por Eliminar  
 Aprobado     Por Aprobar  
 Por calificar  Para Información

**ESPOCH**

FACULTAS DE CIENCIAS  
ESCUELA DE ING. QUIMICA

REALIZADO POR:

ALEXANDRA MARIBEL JIMÉNEZ  
JIMÉNEZ  
ADRIAN ALEJANDRO RODRÍGUEZ  
PINOS

Análisis bromatológico de pasto  
azul húmedo

Lámina	Escala	Fecha
1		18/02/14

## ANEXO I

### ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DE PASTO AZUL SECO

 <p><b>LABCESTTA</b> Tecnología &amp; Soluciones SGC</p>	<p><b>LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL E INSPECCIÓN</b></p> <p>Panamericana Sur Km. 1 ½ Teléf.: (03)2998232 ESPOCH FACULTAD DE CIENCIAS RIOBAMBA - ECUADOR</p>
---	---

<p><b>INFORME DE ENSAYO No:</b> 2881 <b>ST:</b> 13 - 110 ANÁLISIS DE ALIMENTOS</p> <p><b>Nombre Peticionario:</b> NA <b>Ab:</b> Adrián Rodríguez <b>Dirección:</b> Los Álamos 2 Manzana B casa 10 <b>FECHA:</b> 27 de Diciembre del 2013 <b>NÚMERO DE MUESTRAS:</b> 1 <b>FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:</b> 2013 / 12 / 18 - 15:00 <b>FECHA DE MUESTREO:</b> 2012 / 12 / 18 - 14:00 <b>FECHA DE ANÁLISIS:</b> 2013 / 12 / 18 - 2013 / 12 / 27 <b>TIPO DE MUESTRA:</b> Pasto <b>CÓDIGO LABCESTTA:</b> LAB-Alm 234-13 <b>CÓDIGO DE LA EMPRESA:</b> NA <b>PUNTO DE MUESTREO:</b> Salcedo Pasto seco <b>ANÁLISIS SOLICITADO:</b> Químico <b>PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA:</b> Adrián Rodríguez <b>CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS:</b> T máx.: 25.0 °C. T mín.: 15.0 °C</p>	<p><b>RESULTADOS ANALÍTICOS:</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>PARÁMETRO</th> <th>MÉTODO / NORMA</th> <th>UNIDAD</th> <th>RESULTADO</th> <th>VALOR LIMITE PERMISIBLE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Proteína</td> <td>PEE / LABCESTTA 147 AOAC 984.13</td> <td>%</td> <td>17.66</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Materia seca</td> <td>Gravimétrico</td> <td>%</td> <td>85.04</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Grasa</td> <td>PEE / LABCESTTA 150 AOAC 920.39</td> <td>%</td> <td>1.40</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Ceniza</td> <td>PEE / LABCESTTA 149 AOAC 942.05</td> <td>%</td> <td>12.21</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Humedad</td> <td>PEE / LABCESTTA/148 AOAC 934.01</td> <td>%</td> <td>14.96</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Fibra</td> <td>PEE / LABCESTTA 103 INEN 542</td> <td>%</td> <td>26.24</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Materia orgánica</td> <td>Gravimétrico</td> <td>%</td> <td>87.42</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>	PARÁMETRO	MÉTODO / NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LIMITE PERMISIBLE	Proteína	PEE / LABCESTTA 147 AOAC 984.13	%	17.66	-	Materia seca	Gravimétrico	%	85.04	-	Grasa	PEE / LABCESTTA 150 AOAC 920.39	%	1.40	-	Ceniza	PEE / LABCESTTA 149 AOAC 942.05	%	12.21	-	Humedad	PEE / LABCESTTA/148 AOAC 934.01	%	14.96	-	Fibra	PEE / LABCESTTA 103 INEN 542	%	26.24	-	Materia orgánica	Gravimétrico	%	87.42	-
PARÁMETRO	MÉTODO / NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LIMITE PERMISIBLE																																					
Proteína	PEE / LABCESTTA 147 AOAC 984.13	%	17.66	-																																					
Materia seca	Gravimétrico	%	85.04	-																																					
Grasa	PEE / LABCESTTA 150 AOAC 920.39	%	1.40	-																																					
Ceniza	PEE / LABCESTTA 149 AOAC 942.05	%	12.21	-																																					
Humedad	PEE / LABCESTTA/148 AOAC 934.01	%	14.96	-																																					
Fibra	PEE / LABCESTTA 103 INEN 542	%	26.24	-																																					
Materia orgánica	Gravimétrico	%	87.42	-																																					

**OBSERVACIONES:**

- Muestra receptada en laboratorio.

**RESPONSABLES DEL INFORME:**

  
 Ing. Verónica Bravo  
 RESPONSABLE TÉCNICO

LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL  
 E INSPECCIÓN  
 LAB - CESTTA  
 ESPOCH

  
 Ing. Marcela Erazo  
 JEFE DE LABORATORIO

Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.  
Los resultados arriba indicados sólo están relacionados con los objetos ensayados.

Página 1 de 1  
Edición 1

<p><b>NOTAS</b></p>	<p><b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA</b></p> <p> <input type="checkbox"/> Certificado    <input type="checkbox"/> Por Eliminar  <input type="checkbox"/> Aprobado    <input type="checkbox"/> Por Aprobar  <input type="checkbox"/> Por calificar    <input checked="" type="checkbox"/> Para Información         </p>	<p><b>ESPOCH</b></p> <p>FACULTAS DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUIMICA</p> <p>REALIZADO POR:</p> <p>ALEXANDRA MARIBEL JIMÉNEZ JIMÉNEZ</p> <p>ADRIAN ALEJANDRO RODRÍGUEZ PINOS</p>	<p>Análisis bromatológico de pasto azul seco</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; text-align: center;"><b>Lámina</b></td> <td style="width: 33%; text-align: center;"><b>Escala</b></td> <td style="width: 33%; text-align: center;"><b>Fecha</b></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td></td> <td style="text-align: center;">18/02/14</td> </tr> </table>	<b>Lámina</b>	<b>Escala</b>	<b>Fecha</b>	2		18/02/14
<b>Lámina</b>	<b>Escala</b>	<b>Fecha</b>							
2		18/02/14							

**ANEXO III**

**COEFICIENTES CONVECTIVOS Y CONDUCTIVOS DE ALGUNOS MATERIALES Y SUSTANCIAS**

**a.)**

TABLA 4.1-I. Conductividades térmicas de algunos materiales a 101.325 kPa (1 atm) de presión (k se da en W/m K)

Sustancia	Temp. (K)	k	Ref.	Sustancias	Temp. (K)	k	Ref.
Gases				Sólidos			
Aire	273	0.0242	(K2)	Hielo	273	2.25	(C1)
	373	0.0316		Ladrillo de arcilla	473	1.00	(P1)
H <sub>2</sub>	273	0.167	(K2)	Papel	-	0.130	(M1)
n-Butano	273	0.0135	(P2)	Caucho duro	273	0.151	(M1)
Líquidos				Corcho prensado	303	0.043	(M1)
Agua	273	0.569	(P1)	Asbesto	311	0.168	(M1)
	366	0.680		Lana mineral	266	0.029	(K1)
Benceno	303	0.159	(P1)	Acero	291	45.3	(P1)
	333	0.151			373	45	
Materiales biológicos y alimentos				Cobre	273	388	(P1)
Aceite de Oliva	293	0.168	(P1)		373	377	
	373	0.164		Aluminio	273	202	(P1)
Came de res magra	263	1.35	(C1)				
Leche descremada	275	0.538	(C1)				
Puré de manzana	296	0.692	(C1)				
Salmón	277	0.502	(C1)				
	248	1.30					

**b.)**

TABLA 4.1-2. Magnitudes aproximadas de algunos coeficientes de transferencia de calor

Mecanismos	Intervalo de valores de h	
	btu/h pie <sup>2</sup> °F	W/m <sup>2</sup> K
Condensación de vapor	1000-5000	5700-28000
Condensación de líquidos orgánicos	200-500	1100-2800
Líquidos en ebullición	300-5000	1700-28000
Agua en movimiento	50-3000	280-I 7000
Hidrocarburos en movimiento	10-300	055-I 700
Aire en reposo	0.5-4	02.8-23
Corrientes de aire	2-10	11.3-55

**NOTAS**

**CATEGORÍA DEL DIAGRAMA**

**ESPOCH**

**Coefficientes convectivos y conductivos de algunos materiales y sustancias**

- Certificado     Por Eliminar  
 Aprobado     Por Aprobar  
 Por calificar     Para Información

FACULTAS DE CIENCIAS  
 ESCUELA DE ING. QUIMICA  
 REALIZADO POR:  
 ALEXANDRA MARIBEL JIMÉNEZ  
 JIMÉNEZ  
 ADRIAN ALEJANDRO RODRÍGUEZ  
 PINOS

a.) Coeficientes conductivos de algunos materiales.  
 b.) Coeficientes convectivos de algunas sustancias

Lámina	Escala	Fecha
3		18/02/14

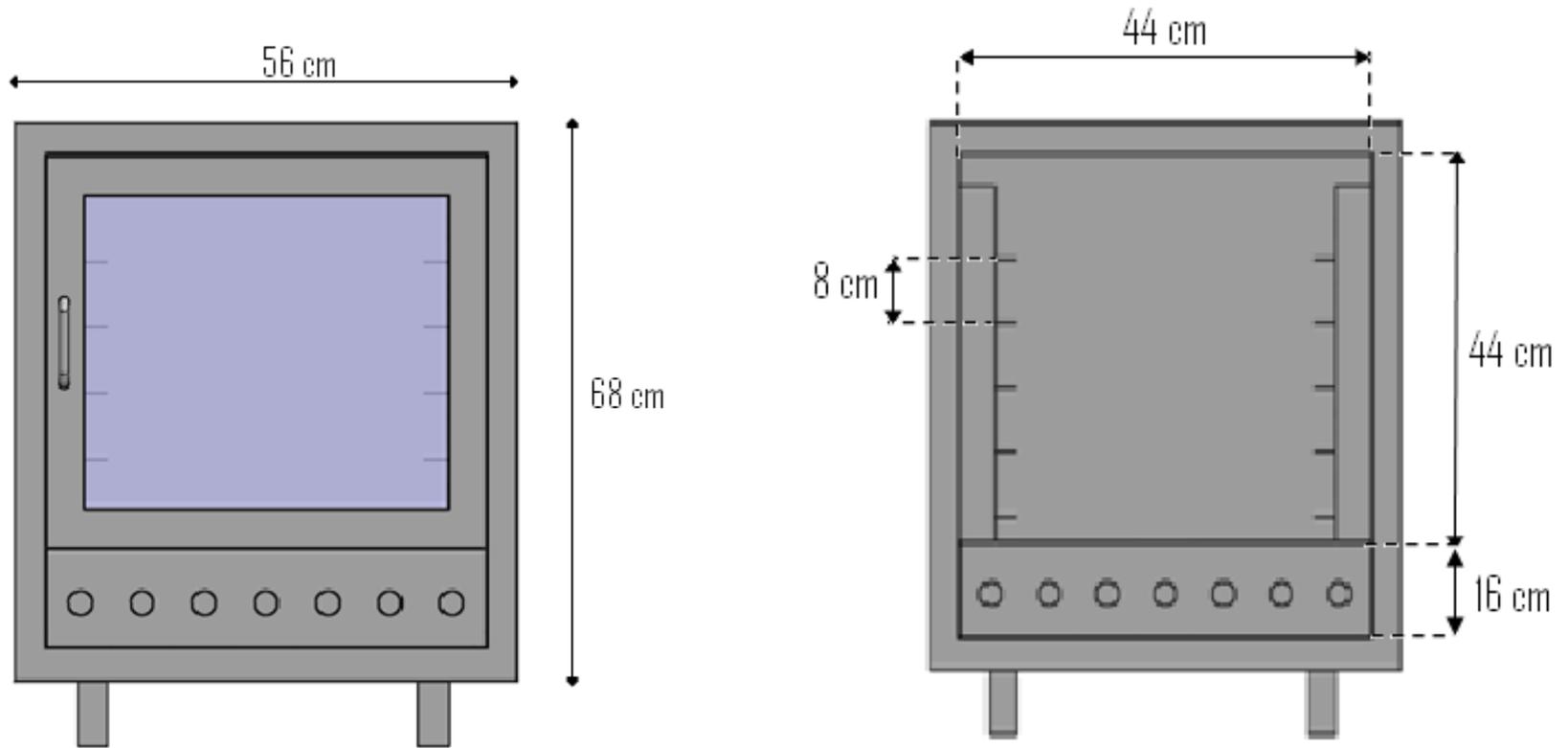
**ANEXO IV**  
**SIMULACION DE LA OPERACIÓN DE SECADO**



<b>NOTAS</b>	<b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA</b>	<b>ESPOCH</b>	Simulación de la operación de secado		
	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por Eliminar <input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Por Aprobar <input type="checkbox"/> Por calificar <input checked="" type="checkbox"/> Para Información	FACULTAS DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUIMICA REALIZADO POR: ALEXANDRA MARIBEL JIMÉNEZ JIMÉNEZ ADRIAN ALEJANDRO RODRÍGUEZ PINOS	<b>Lámina</b>	<b>Escala</b>	<b>Fecha</b>
			4		18/02/14

ANEXO V

VISTA FRONTAL EXTERNA E INTERNA DEL EQUIPO DISEÑADO



NOTAS

CATEGORÍA DEL DIAGRAMA

- Certificado     Por Eliminar  
 Aprobado     Por Aprobar  
 Por calificar     Para Información

ESPOCH

FACULTAS DE CIENCIAS  
 ESCUELA DE ING. QUIMICA  
 REALIZADO POR:  
 ALEXANDRA MARIBEL JIMÉNEZ  
 JIMÉNEZ  
 ADRIAN ALEJANDRO RODRÍGUEZ  
 PINOS

Vista frontal externa e interna del equipo diseñado

Lámina

Escala

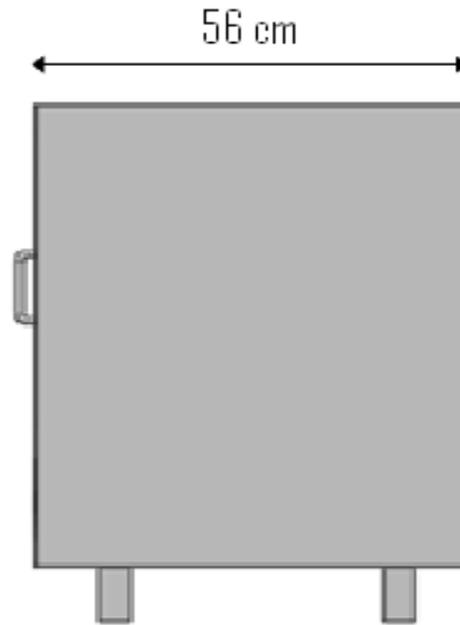
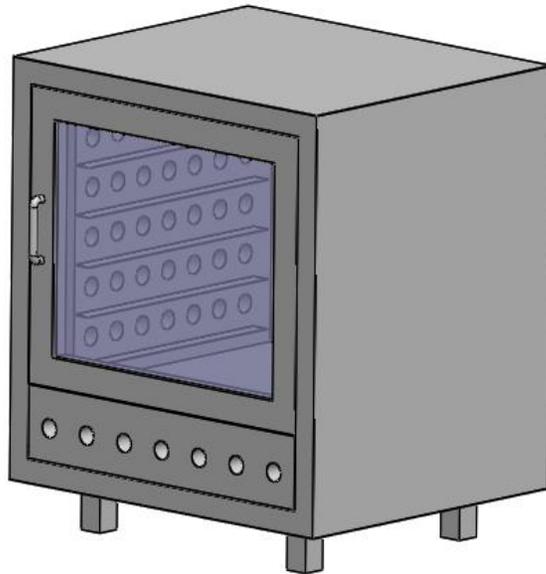
Fecha

5

18/02/14

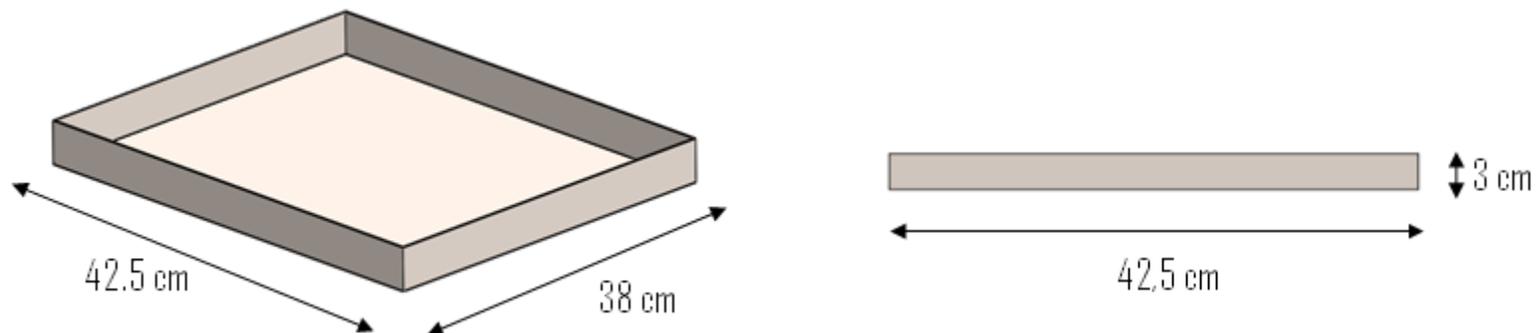
**ANEXO VI**

**VISTA LATERAL DE EQUIPO DISEÑADO**



<b>NOTAS</b>	<b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA</b>	<b>ESPOCH</b>	Vista lateral del equipo diseñado		
	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por Eliminar <input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Por Aprobar <input type="checkbox"/> Por calificar <input checked="" type="checkbox"/> Para Información	FACULTAS DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUIMICA REALIZADO POR: ALEXANDRA MARIBEL JIMÉNEZ JIMÉNEZ ADRIAN ALEJANDRO RODRÍGUEZ PINOS	<b>Lámina</b>	<b>Escala</b>	<b>Fecha</b>
			6		18/02/14

**ANEXO VII**  
**BANDEJAS DEL EQUIPO DISEÑADO**



NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	Bandejas del equipo diseñado		
	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por Eliminar <input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Por Aprobar <input type="checkbox"/> Por calificar <input checked="" type="checkbox"/> Para Información	FACULTAS DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUIMICA REALIZADO POR: ALEXANDRA MARIBEL JIMÉNEZ JIMÉNEZ ADRIAN ALEJANDRO RODRÍGUEZ PINOS			
			<b>Lámina</b>	<b>Escala</b>	<b>Fecha</b>
			7		18/02/14

**ANEXO VIII  
EQUIPO CONSTRUIDO**



NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	Equipo construido		
	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por Eliminar <input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Por Aprobar <input type="checkbox"/> Por calificar <input checked="" type="checkbox"/> Para Información	<p align="center"> <b>FACULTAS DE CIENCIAS</b>  <b>ESCUELA DE ING. QUIMICA</b>  <b>REALIZADO POR:</b>  <b>ALEXANDRA MARIBEL JIMÉNEZ</b>  <b>JIMÉNEZ</b>  <b>ADRIAN ALEJANDRO RODRÍGUEZ</b>  <b>PINOS</b> </p>	<b>Lámina</b>	<b>Escala</b>	<b>Fecha</b>
			8		18/02/14