



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR POR FLUIDIZACIÓN  
PARA LA DESHIDRATACIÓN DE TRIGO (*Triticum vulgare*)”**

**TESIS DE GRADO  
Previa la obtención del Título de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**JAIRO SANTIAGO GONZÁLEZ SÁNCHEZ**

**EDGAR ROLANDO PAUCAR TOROSINA**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2009**

Agradecemos a Dios, por guiar nuestros pasos y llevarnos a alcanzar nuestras metas y objetivos.

A nuestras familias que con su incondicional apoyo permanente supieron ser un soporte en todo momento de nuestras vidas.

De igual manera al Ing. Hanníbal Brito, Ing. José Usiña, Ing. Cesar Avalos; Director y Miembros del Tribunal de Tesis, quienes con su aporte de conocimientos, experiencia y esfuerzo para la culminación de este trabajo de investigación.

Por último, queremos dejar constancia de nuestro agradecimiento a todas y cada una de las personas que de una u otra forma han contribuido con su granito de arena para hacer real el presente trabajo.

Dedico este trabajo a mis padres Lidia y Juan, por ser un ejemplo de vida, a mis hermanos Karen, Pablo y Eliborio; a los cuales toda la vida les estaré infinitamente agradecido por la comprensión, paciencia y su gran apoyo que me han brindado incondicionalmente para enfrentar los retos de la vida. A todos mis amigos y familiares, que siempre estuvieron junto a mí formando un lazo mutuo, lleno de respeto y sobre todo confianza.

**Jairo Santiago González Sánchez**

Dedico estas páginas a mis padres por permitirme ver la luz, inclusive cuando todo pareció gris, viviré infinitamente honrado y agradecido por eso, y sobre todo a mi madre, María, quien es mi vida, mi orgullo e inspiración en todo momento, a mis hermanos Edison y Benjamín compañeros y amigos incondicionales a lo largo de mi vida.

A todos mis amigos, compañeros y familiares que confiaron en mí, compartiendo un espacio suyo conmigo en los buenos y malos momentos, mil y un gracias por su apoyo incondicional.

**Edgar Rolando Paucar Torosina**

**NOMBRE**

**FIRMA**

**FECHA**

Dr. Edmundo Caluña  
**DECANO FAC. CIENCIAS**

-----

-----

Ing. Mario Villacres  
**DIRECTOR ESC. ING. QUÍMICA**

-----

-----

Ing. Hanníbal Brito  
**DIRECTOR DE TESIS**

-----

-----

Ing. José Usiña  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

-----

-----

Ing. Cesar Avalos  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

-----

-----

Tec. Carlos Rodríguez  
**DIRECTOR CENTRO DOCUMENTACIÓN**

-----

-----

**“Yo JAIRO SANTIAGO GONZALEZ SANCHEZ, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis; y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO”**

---

**JAIRO SANTIAGO GONZALEZ SANCHEZ**

**“Yo EDGAR ROLANTO PAUCAR TOROSINA, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis; y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO”**

---

**EDGAR ROLANTO PAUCAR TOROSINA**

## INDICE DE BREVIATURAS

X	Humedad
$\theta$	Tiempo de secado
W	Velocidad de secado
T	Temperatura
$\Delta\theta$	Diferencia de tiempo de proceso
$\Delta T$	Diferencia de temperatura de proceso
A	Área
G <sub>s</sub>	Caudal del sólido
G	Caudal del fluido
Y	Humedad del aire
C <sub>p</sub>	Capacidad calorífica
$\rho$	Densidad
m	Masa
V	Volumen
D <sub>p</sub>	Diámetro de la partícula
$\Gamma$	Factor de forma
$\alpha_s$	Superficie específica
L	Altura
$\varepsilon$	Porosidad
$\Delta P$	Diferencial de presión
g	Aceleración de la gravedad
g <sub>c</sub>	Factor gravitacional
N <sub>Re</sub>	Numero de Reynolds
$\mu$	Viscosidad
H	Entalpía
q	Calor
U	Coefficiente global de transmisión de calor
K	Conductividad térmica
h <sub>g</sub>	Coefficiente de convección
C	Grados centígrados

s	Segundos
%	Porcentaje
m	Metro
Kg	Kilogramo
Kcal	Kilocaloría
Kmol	Kilomol
Kgf	Kilogramo-fuerza
atm	Atmosfera
INEN	Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización.
AACC	Asociación Americana de Químicos Cerealistas

# INDICE DE CONTENIDOS

Pp.

CARÁTULA	
AGRADECIMIENTO	
DEDICATORIA	
HOJA DE FIRMAS	
HOJA DE RESPONSABILIDAD	
INDICE DE ABREVIATURAS	
INDICE DE CONTENIDOS	
INDICE DE FIGURAS	
INDICE DE TABLAS	
INDICE DE GRAFICOS	
INDICE DE ANEXOS	
INDICE DE ECUACIONES	
INTRODUCCION.....	I
ANTECEDENTES.....	II
JUSTIFICACION.....	III
RESUMEN.....	IV
SUMMARY.....	V
OBJETIVOS.....	VI

## CAPITULO I

<b>1.</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.</b>	<b>EL TRIGO.....</b>	<b>1</b>
1.1.1.	GENERALIDADES.....	1
1.1.2.	DEFINICIÓN DEL TRIGO.....	2
1.1.3.	VARIEDADES DE TRIGO.....	3
1.1.3.1.	SEGÚN LA COSECHA.....	3
1.1.3.2.	SEGÚN EL GRANO.....	4
1.1.3.3.	SEGÚN EL COLOR.....	4
1.1.4.	ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN NUTRITIVA DEL TRIGO.....	4
1.1.5.	VITAMINA E.....	6
1.1.6.	MÉTODOS DE CONSERVACIÓN PARA CEREALES.....	7
1.1.6.1.	TIPOS DE CONSERVACIÓN.....	7
1.1.6.2.	DESHIDRATACIÓN POR CALOR.....	7
1.1.6.3.	SECADO COMO CONSERVACIÓN.....	7



	Pp.
<b>1.2.</b> FUNDAMENTOS DEL SECADO.....	8
1.2.1. SECADO.....	8
1.2.1.1. HUMED.....	9
1.2.1.2. CINÉTICA DEL SECADO.....	10
1.2.1.3. VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE .....	11
1.2.1.4. PERÍODOS DE SECADO.....	11
1.2.1.5. TIEMPO DE SECADO.....	13
1.2.1.5.1. DURACIÓN DEL SECADO EN CONDICIONES CONSTANTES.....	13
PERÍODO ANTECRÍTICO.....	14
PERIODO POSCRÍTICO.....	14
1.2.1.6. TIPOS DE SECADORES.....	14
1.2.2. SECADO POR FLUIDIZACIÓN.....	15
1.2.2.1. LECHO FLUIDIZADO POR BATCHES.....	17
1.2.2.2. FLUIDIZACIÓN DE PARTÍCULAS.....	18
1.2.2.2.1. VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN.....	19
Régimen laminar.....	20
Régimen turbulento.....	20
Régimen de transición.....	21
1.2.2.2.2. POROSIDAD MINIMA DE FLUIDIZACIÓN.....	21
1.2.2.2.3. ALTURA DEL LECHO.....	22
1.2.2.2.4. PÉRDIDA DE PRESIÓN EN UN LECHO FLUIDO.....	22
<b>1.3.</b> DISEÑO DEL TIPO.....	24
1.3.1. PRUEBAS DE ENSAYO DE SECADO.....	24
1.3.2. ECUACIONES DE SECADO POR FLUIDIZACION.....	24
1.3. DISEÑO DEL EQUIPO.....	24
1.3.1. PRUEBAS DE ENSAYO DE SECADO.....	24
1.3.2. ECUACIONES PARA EL DISEÑO DEL SECADOR POR FLUIDIZACIÓN.....	24

## CAPITULO II

2	PARTE EXPERIMENTAL.....	36
2.1.	MUESTREO.....	36
2.2.	METODOLOGÍA.....	36
2.2.1	MÉTODOS.....	36
2.2.1.1.	DEDUCTIVO.....	36
2.2.1.2.	INDUCTIVO.....	36
2.2.1.3.	EXPERIMENTAL.....	37
2.3.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	37
<b>2.3.1.</b>	ANÁLISIS ORGANOLÉPTICAS DEL TRIGO.....	37
<b>2.4.</b>	TÉCNICAS.....	37
2.4.1.	TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DEL GRANO.....	38
2.4.1.1.	DETERMINACIÓN DE HUMEDAD (NORMA INEN 1462).....	38
2.4.1.2.	DETERMINACIÓN DE PROTEÍNA (Método 2.057 A.O.A.C. del INIAP).....	39
2.4.1.3.	DETERMINACIÓN DE CENIZAS (AACC Americana de Químicos Cerealistas).....	40
2.4.1.4.	DETERMINACIÓN DE GRASA (AACC Americana de Químicos Cerealistas).....	41

	Pp.
2.4.1.5. DETERMINACIÓN DEL FIBRA (AACC Americana de Químicos Cerealistas).....	42
2.4.1.6. DETERMINACIÓN DE VITAMINA E (Ensayo de John Wiley).....	43
2.4.1.7. DETERMINACIÓN DEL EXTRACTO LIBRE DE NITRÓGENO.....	44
2.5. DATOS EXPERIMENTALES.....	45
2.5.1. ANÁLISIS PROXIMAL.....	45
2.5.2. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO.....	45
2.5.3. ANÁLISIS DE HUMEDAD.....	46
2.5.4. DATOS EXPERIMENTALES DE SECADO PARA EL SECADOR DE BANDEJAS.....	46
2.5.5. DATOS EXPERIMENTALES DE SECADO PARA EL SECADOR POR FLUIDIZACIÓN.....	47
2.6. DATOS ADICIONALES.....	48

### CAPITULO III

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR POR FLUIDIZACION.....	49
3.1. DISEÑO DEL EQUIPO DE SECADO.....	49
3.1.1. PRUEBAS DE ENSAYO.....	49
3.1.2. VARIABLES DE PROCESO.....	49
3.1.2.1. CÁLCULOS DE LA HUMEDAD; X.....	49
3.1.2.2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL TRIGO.....	49
3.1.2.2.1. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL; $\rho_p$ .....	49
3.1.2.2.2. ESTIMACIÓN DEL DIÁMETRO DE LA PARTÍCULA; $D_p$ .....	50
3.1.2.2.3. DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD DE FLUIDIZACIÓN; $\epsilon$ .....	50
3.1.2.3. DETERMINACIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN; $\Delta P$ .....	51
3.1.2.3. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD CRÍTICA; $v_{mf}$ .....	52
3.1.2.3.1. POROSIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN; $\epsilon_{mf}$ .....	52
3.1.2.3.2. CÁLCULO DEL NÚMERO DEL REYNOLDS; $N_{Re}$ .....	52
3.1.2.4. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA DEL AIRE; $\theta_g$ .....	53
3.1.2.5. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD MÁSICA REAL DEL AIRE; G.....	53
3.1.2.6. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE SECADO; $W_T$ .....	54
3.1.2.7. CÁLCULO DEL TIEMPO DE SECADO; $\theta_T$ .....	55
3.1.3. BALANCE DE MASA Y ENERGIA DEL SECADOR POR LECHO FLUIDIZADO.....	56
3.1.3.1. BALANCE DE MASA.....	56
3.1.3.2. BALANCE DE ENERGIA.....	57
3.1.3.2.1. CÁLCULO DE LAS ENTALPIAS DEL SÓLIDO (Trigo); $H_S$ .....	57
3.1.3.2.2. CÁLCULO DE LAS ENTALPÍAS DEL AIRE; $H_A$ .....	57
3.1.3.2.3. CÁLCULO DE LA HUMEDAD DE SALIDA DEL AIRE; $Y_1$ .....	58
3.1.3.2.4. CÁLCULO DE LA ENTALPÍA DEL AIRE A LA SALIDA; $H_{A1}$ .....	59
3.1.3.2.5. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE CALOR PERDIDO; $q_p$ .....	59
3.1.3.3. CÁLCULOS DEL NÚMERO DE ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN; $N_{OT}$ .....	59
3.1.3.4. CÁLCULO DE LA LONGITUD DE LA UNIDAD DE TRANSMISIÓN; $H_{OT}$ .....	61
3.1.3.5. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR; $U_\delta$ .....	62
3.1.3.6. CÁLCULO DEL CALOR NECESARIO PARA CALENTAR EL SOLIDO (22 C a 55C)...	62
3.1.3.7. CÁLCULO DEL CALOR NECESARIO PARA EVAPORAR EL AGUA DEL SÓLIDO..	62
3.1.3.8. CÁLCULO DE DEL COEFICIENTE DE CONVECIÓN; $h_g$ .....	63

		Pp.
3.1.	RESULTADOS.....	64
3.2.	CURVAS DE SECADO.....	68
3.3.1.	CURVAS DE VARIACIÓN DE HUMEDAD PARA EL SECADOR DE BANDEJAS.....	68
3.3.2.	CURVAS DE VARIACIÓN DE HUMEDAD PARA EL SECADOR POR FLUIDIZAC...	72
3.3.1.	VALIDACIÓN DEL SECADOR POR FLUIDIZACION.....	75
3.4.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	76
3.5.	COMPONENTES DEL EQUIPO.....	76
3.5.1.	CÁMARA DE SECADO.....	76
3.5.2.	FUENTE DE CALOR.....	77
3.5.3.	LLAVES DE PASO.....	77
3.5.4.	VENTILADORES.....	77
3.5.5.	MATERIALES AUXILIARES.....	77
3.5.5.1.	CONTROLADOR DE TEMPERATURA.....	78
3.6.	ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES PARA SECADOR.....	79
3.7.	COSTOS.....	80
3.7.1.	RECURSOS HUMANOS.....	80
3.7.2.	RECURSOS MATERIALES.....	80
3.7.3.	RECURSOS TOTALES.....	80
3.7.4.	MATERIALES UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.....	81
3.8.	TÉCNICA DE CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO.....	82
3.8.1.	TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN.....	82
3.8.2.	FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO.....	82

## **CAPITULO IV**

4.1.	CONCLUSIONES.....	83
4.2.	RECOMENDACIONES.....	84

## **BIBLIOGRAFÍA**

<b>CITAS</b> .....	85
<b>ESPECÍFICA</b> .....	87
<b>WEB</b> .....	87

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA	Pp.
1.1.4. -1. Estructura de un cereal .....	4
1.1.5-1. Estructura Química de la vitamina E .....	6
1.2.1.4-1. Periodos de secado (Curva tradicional de secado).....	12
1.2.1.4-2. Velocidad para distintos materiales.....	12
1.2.1.4-3. Curva de la velocidad diferencial d secado para calcular el tiempo de secado.....	13
1.2.2-1. Formación de un lecho fluidizado a partir de un lecho fijo de partículas.....	23

## INDICE DE TABLAS

TABLA		Pp.
1.1.4-1	Propiedades de algunos granos y cereales.....	5
2.4.1.1-1	Determinación de Humedad .....	38
2.4.1.2-1	Determinación de Proteína.....	39
2.4.1.3-1	Determinación de Ceniza.....	40
2.4.1-1	Determinación de Grasa.....	41
2.4.1.5-1	Determinación de Fibra.....	42
2.4.1.6-1	Determinación de Vitamina E.....	43
2.4.1.7-1	Determinación del Extracto Libre de Nitrógeno .....	44
2.5.1-1	Análisis proximal del trigo a temperatura de secado 110 C.....	45
2.5.2-1	Análisis microbiológico del trigo a temperatura de 22 C.....	45
2.5.2-2	Análisis microbiológico del trigo a temperatura de 60 C.....	45
2.5.3-1	Humedad luego de secado a 60 C.....	46
2.5.3-2	Humedad luego de secado a 110 C.....	46
2.5.4-2	Datos para el secado de trigo en el sacador de bandejas.....	46
2.5.5-1	Datos para la densidad real de la partícula en una probeta.....	47
2.5.5-2	Datos de longitud; $l$ y diámetro; $dP$ , para la partícula de trigo.....	47
2.5.5-3	Datos de tiempo y peso del solido húmedo y seco para 1Kg y 2Kg.....	47
2.5.5-5	Datos experimentales y asumidos para el dimensionamiento del fluidizador.....	48
2.6-1	Datos adicionales para el diseño del secador por fluidización.....	48
3.2-1	Valores calculados para el dimensionamiento del equipo.....	64
3.2-2	Valores caudal másico, velocidad y tiempo para el secador de bandejas y fluidización.....	65
3.2-3	Valores de caudal aire, humedad y calor perdido secador de bandejas y fluidización.....	66
3.2-4	Valores calculado para la zona de secado fluidización.....	67
3.3-1-1	Datos experimentales de para las curva de secado a $T = 60\text{ C}$ en el de bandejas.....	68
3.3.2-1	Datos para las curvas de secado a 1 Kg.....	72
3.3.2-2	Datos para las curvas de secado a 2 Kg.....	72
3.2.4-1	Validación de datos teóricos y prácticos de diseño.....	75
3.6-1	Especificación de los materiales utilizados .....	79
3.7.1-1	Recursos Humanos.....	80
3.7.2-1	Recursos Materiales.....	80
3.7.3-1	Recursos Totales.....	80
3.7.4-1	Materiales utilizados para la construcción del secador por fluidización.....	81

## INDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO		Pp.
3.1.3.3-1	Representación esquemática de las zonas de secado.....	59
2.7-1	Curva de velocidad en función de la humedad media para secador de bandejas.....	51
2.7-2	Humedad en función tiempo para secador de bandejas a diferente T.....	52
2.7-3	Velocidad en función de la humedad media para secador de bandejas a varias T.....	53
3.1.3-1	Velocidad en función del tiempo.....	72
3.1.3-2	Velocidad en función del humedad media a diferentes pesos.....	73
3.1.3-3	Inversa de la velocidad en función de la humedad media a diferentes pesos.....	73

## INDICE DE ANEXOS

ANEXO		Pp.
<b>I</b>	DIAGRAMA PSICOMETRICO.....	90
<b>II</b>	PROPIEDADES FISICAS DEL AIRE, AGUA Y VAPOR DE AGUA A 1 at.....	91
<b>III</b>	EQUIPO DE SECADO POR LECHO FLUIDIZADO.....	92
<b>IV</b>	BASE DEL CONDUCTO DE AIRE CALIENTE.....	93
<b>V</b>	CÁMARA DEL EQUIPO DE SECADO.....	94
<b>VI</b>	GENERADOR DE CALOR DEL EQUIPO DE SECADO.....	95
<b>VII</b>	CONDUCTO DE SALIDA DE AIRE HUMEDO.....	96
<b>VIII</b>	DISTRIBUIDOR DE FLUJO DEL EQUIPO DE SECADO.....	97
<b>IX</b>	SECADOR CONSTRUIDO POR LECHO FLUIDIZADO.....	98

## INDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN	Pp.	
1.2.1-1	Humedad en base seca.....	9
1.2.1-2	Humedad en base húmeda.....	9
1.2.3-3	velocidad de secado.....	10
1.2.1-4	Difusión de vapor.....	11
1.2.1-5	Relación con el coeficiente de transferencia.....	11
1.2.2-1	Fuerza de arrastre en fluidización particular.....	18
1.2.2-2	Fuerza de arrastre agrupada .....	19
1.2.2-3	Fuerza gravitacional.....	19
1.2.2-4	Fuerza ejercida fluido-partícula.....	19
1.2.2-5	Fuerza del gravitacional=fuerza fluido-partícula.....	19
1.2.2-6	Caída de presión según Ergun.....	20
1.2.2-7	Caída de presión en régimen laminar.....	20
1.2.2-8	Velocidad mínima de fluidización en régimen laminar.....	20
1.2.2-9	Caída de presión en régimen turbulento.....	20
1.2.2-10	Velocidad mínima de fluidización en régimen turbulento.....	21
1.2.2-11	Velocidad mínima de fluidización en régimen de transición.....	21
1.2.2.2-1	Porosidad mínima de fluidización.....	21
1.2.2.2-2	Altura del lecho.....	22
1.3.2-1	Cálculos de la humedad.....	24
1.3.2-2	Determinación de la densidad real.....	24
1.3.2-3	Diámetro de la partícula.....	25
1.3.2-4	Superficie de la partícula.....	25
1.3.2-5	Volumen de la partícula.....	25
1.3.2-6	Superficie específica de la partícula.....	25
1.3.2-7	Determinación de la porosidad de fluidización.....	25
1.3.2-8	Determinación del Volumen del lecho.....	26
1.3.2-9	Determinación de la densidad del lecho .....	26
1.3.2-10	Determinación de la caída de presión.....	26
1.3.2-11	Determinación de la densidad del fluido .....	27
1.3.2-12	Cálculo del número del Reynolds.....	27
1.3.2-13	Cálculo de la velocidad crítica.....	27
1.3.2-14	Cálculo del tiempo de residencia del aire.....	28
1.3.2-15	Cálculo de la velocidad másica real del aire de secado .....	28
1.3.2-16	Cálculo de la velocidad de secado.....	28
1.3.2-17	Velocidad Periodo Contante.....	28
1.3.2-18	Velocidad poscrítica o decreciente.....	29
1.3.2-19	Cálculo del tiempo total de secado.....	29



	Pp.
<b>1.3.2-20</b>	Cálculo del tiempo de secado en el periodo constante..... 30
<b>1.3.2-21</b>	Cálculo del tiempo de secado poscrítico..... 30
<b>1.3.2-22</b>	Cálculo del tiempo de secado poscrítico integrada..... 30
<b>1.3.2-23</b>	Cálculo del tiempo de secado poscrítico calculada..... 30
<b>1.3.2-24</b>	Balace de materia proceso de secado..... 31
<b>1.3.2-25</b>	Humedad de salida del aire..... 31
<b>1.3.2-26</b>	Calculo del balance total entálpico..... 32
<b>1.3.2-27</b>	Cálculo de las entalpias del solido (trigo)..... 32
<b>1.3.2-28</b>	Cálculo de las entalpias del aire; $H_A$ ..... 32
<b>1.3.2-29</b>	Cálculo de la cantidad de calor perdido..... 33
<b>1.3.2-30</b>	Temperatura de salida del aire de las diferentes zonas del secadero..... 33
<b>1.3.2-31</b>	Cálculo de la temperatura de salida del aire de la zona II..... 33
<b>1.3.2-32</b>	Cálculo de la capacidad calorífica del solido húmedo..... 33
<b>1.3.2-33</b>	Cálculo de la capacidad calorífica del aire húmedo..... 33
<b>1.3.2-34</b>	Número de elementos de transmisión de cada una de las zonas..... 34
<b>1.3.2-35</b>	Longitud de la unidad de transmisión..... 34
<b>1.3.2-36</b>	Longitud total del secador de por fluidización..... 34
<b>1.3.2-37</b>	Cálculo del coeficiente de transferencia de el calor..... 34
<b>1.3.2-38</b>	Cálculo del calor necesario para calentar el sólido..... 34
<b>1.3.2-39</b>	Cálculo del calor necesario para evaporar el agua del solido..... 34
<b>1.3.2-40</b>	Cálculo de del coeficiente de convección..... 35

# INTRODUCCIÓN

El trigo es una planta gramínea de la familia del césped, de altura promedio de un metro, siendo uno de los tres cereales más ampliamente cultivada en el mundo junto con el arroz y el maíz, muy utilizado desde tiempos remotos para el proceso de panificación y de varios productos alimenticios, hoy en día se procesa a nivel industrial, por tal razón se tiene una estricta manipulación a través de los procesos.

La producción a nivel nacional es insuficiente para cubrir el mercado, siendo la producción solamente de un 4%, tanto las importaciones como las producidas necesitan condiciones de almacenamiento y transporte con la finalidad de preservar el producto. Una aplicación para la conservación del trigo es el secado con aire caliente.

El secado es una operación unitaria utiliza para varios fines como la conservación, uno de los secadores más utilizados en la industria alimenticia y química es el secador por fluidización con aire, el cual consiste en someter a las partículas de trigo (Material granular para el secado) a corrientes de aire caliente, de tal manera que éstas floten en dicho fluido.

Para realizar el diseño y construcción del equipo se emplean análisis de laboratorio de una muestra a secar, seleccionada aleatoriamente con un contenido de humedad inicial de 16%, llevando hasta una humedad básica (12-14%) de norma INEN.

A través de datos proximales, fisicoquímicos, microbiológicos se determinó las variables de proceso, mismos que sirvieron, para el dimensionamiento y posterior construcción, también se tomó en cuenta el desarrollo de las pruebas de secado a fin de valorar las condiciones de operación del producto, equipo y del medio más adecuados con la finalidad de conservar el valor nutritivo del trigo.

## **ANTECEDENTES**

El trigo es uno de los cereales más utilizados industrialmente y consumidos por la población mundial, el Ecuador lleva un consumo de 400 mil toneladas métricas anuales, de las cuales el 4% corresponde a la producción nacional, siendo la provincia de Bolívar una de las mayores productoras.

El proceso de secado por fluidización con aire, es empleado en la industria química a partir de 1948. De ahí en adelante se viene perfeccionando para procesos específicos de la industria, los avances en la tecnología hicieron que los equipos fueran más controlables, con la implementación de sensores y circuitos electrónicos, permitiendo un mejor funcionamiento y utilización, además que pueda ser aprovechado para fines didácticos permitiendo un mayor enfoque en lo que es el proceso de secado.

Actualmente en la ESPOCH existen estudios realizados para la operación unitaria de secado en equipos de bandejas, túnel, rotatorios, solares y otros, pero no en secadores por lecho fluidizado con aire caliente, a fin de ampliar las líneas de investigación y desarrollo se ha visto en la necesidad de implementar un estudio enfocado en este tipo de secadores, para la conservación de trigo producido en la provincia de Chimborazo, a través de parámetros establecidos por las normas INEN. Los estudios para el diseño y construcción de equipos siendo una de las líneas establecidas por la Escuela de Ingeniería Química, hace que los estudiantes egresados y tecnólogos puedan acceder y contribuir de forma científica y tecnológica en investigación, con miras a las necesidades del sector industrial del país.

## **JUSTIFICACIÓN**

El trigo es utilizado a nivel industrial como materia prima para diferentes productos, de modo que debe ser manipulado en condiciones estrictas, a fin de preservar no solo su forma sino también su valor nutritivo, un método utilizado es el secado por fluidización con aire caliente.

El diseño y construcción facilita comprobar de manera práctica la deshidratación del trigo a nivel de laboratorio, siendo utilizado como patrón para procesos productivos de conservación a nivel industrial, equipo que servirá también para el avance y desarrollo práctico, productiva y científico del intelecto de los alumnos de Ingeniería Química en los laboratorios de Ciencias.

Buscando nuevos métodos de deshidratación para conservar y preservar el trigo producido en la provincia de Chimborazo, se desarrolla un modelo de secador por fluidización minimizando el tiempo de secado a una determinada temperatura, incrementando su eficiencia respecto a otros secadores, debido a contacto directo de aire caliente el cual neutraliza la acción microbiana, responsable de la degradación y pérdida del valor nutritivo del trigo.

## RESUMEN

El objetivo de esta tesis es realizar el diseño y construcción de un secador por fluidización para la deshidratación de trigo (*Triticum vulgare*), haciendo que el material se encuentre suspendido, arremolinándose con él, formando el lecho fluidizado.

El equipo está diseñado y construido de una cámara de secado de forma cilíndrica de acero inoxidable AISI 304 y 430, siendo un secador discontinuo tipo Batch, con dimensiones de: 70,0 cm de altura y 19,6 cm de diámetro, quemadores múltiples que calientan aire, circulado a través de un tubo (hierro dulce), impulsado por un veterol de 3600 rpm, un sensor manual para regular la temperatura, y un controlador de tiempo digital que controla la temperatura y tiempo.

Los análisis para el diseño y construcción del equipo se realizaron en el Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Escuela de Ingeniería Química.

El secador por fluidización opera a una temperatura (60 C), con capacidad (10 Kg/h), a un  $N_{Re}$  (711,22 Régimen turbulento) producto del arremolinamiento, con una altura de lecho fluidizado de 12cm, secando a velocidad (4,478 Kg/m<sup>2</sup>h) en un tiempo máximo de secado  $\leq 5$  min por Kg, alcanzando una humedad de 12,7% b.s. obteniendo un rendimiento 10 veces mayor respecto al de bandejas, tomando en consideración las propiedades físicas y químicas del trigo, establecidas por las normas, cumpliendo de forma satisfactoria los objetivos propuestos.

## SUMMARY

The aim of this thesis is to design and construct a dryer for the dehydration of wheat (*Triticum vulgare*), such that the wheat is suspended in a bed of continuous motion.

The dryer is cylindrical and made of stainless steel AISI 304 and 430, a discontinuous Bach-type dryer, 70,0 cm high and 19,6 cm in diameter, with multiple air heaters, surrounded by a tube (wrought iron), driven by a motor running at 3,600 rpm, with a manual temperature-regulating sensor, and a digital time meter to control temperature and time.

The analysis of design and construction of the dryer took place in the chemistry laboratory of the Faculty of Sciences, School of Chemical Engineering.

The dryer operates at a temperature (60 °C), with capacity (10 Kg/h), at a  $N_{Re}$  (711, 22 turbulent system) produced through a vortex, with a bed of continuous motion at a height of 12 cm, drying at a rate of (4,478 Kg/m<sup>2</sup>h) in a maximum drying period  $\leq 5$  minutes per Kg, reaching a humidity of 16 % up to 12,7% of dry solid. The results obtained by using the dryer are 10 times better than those obtained by using trays due to the physical and chemical properties of wheat, as established by the regulation. The aim of the thesis has been achieved with satisfaction.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

- Realizar el diseño y construcción de un secador por fluidización para deshidratar trigo (*Triticum vulgare*).

### **ESPECÍFICOS**

- Identificar las variables de diseño para la deshidratación de trigo por fluidización.
- Dimensionar el equipo en base a las variables de proceso.
- Construir el equipo para un funcionamiento a nivel de laboratorio.
- Evaluar el funcionamiento del equipo y sus componentes.
- Conocer la factibilidad económica del secador.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO



## **2. MARCO TEÓRICO.**

### **2.1. EL TRIGO.**

#### **2.1.1. GENERALIDADES.**

“A nivel mundial el trigo es uno de los tres cereales más producidos, junto con el maíz y el arroz, y a su vez, el más consumido por los países. El grano del trigo es utilizado para hacer harina integral, sémola, cerveza y una gran variedad de productos alimenticios.

Hay dos especies de trigo mayoritarias: el trigo blando y el trigo duro. La principal diferencia entre dichas especies radica en que cuando se muele el trigo blando se obtiene la harina y cuando se muele el trigo duro se obtiene la sémola o semolina (que es algo más fina que la sémola).

El trigo generalmente es molido como harina para su utilización. Un gran porcentaje de la producción total de trigo es utilizada para el consumo humano en la elaboración de pan, galletas, tortas y pastas; otra parte es destinada a la alimentación animal y el restante se utiliza en la industria o como simiente (semilla); aunque también se utiliza para la preparación de aditivos para la cerveza y otros licores.

En razón de su importancia nutritiva para el hombre y de la especialización entre productores y consumidores, el trigo se ha convertido en uno de los principales productos de intercambio a nivel mundial.

El trigo se presta muy bien al mercado mundial porque viaja fácilmente, no se aplasta, se conserva indefinidamente, siempre que se le preserve de la humedad y de los roedores, y se puede transportar y negociar como producto semielaborado (harina). Asimismo, es un factor importante en el comercio internacional por la necesidad de proveerse de trigos duros para mezclarlos con los blandos, con objeto de mantener la calidad de la harina”. (1)

“La calidad de los granos está dada por las características físicas de los mismos, su composición química y las propiedades funcionales de sus componentes. Si conceptualmente se entiende por calidad a la aptitud de un producto o servicio para determinado fin, se desprende de esta definición que no siempre se buscarán los mismos atributos de un lote de granos, dado

que no siempre se destinará a un mismo uso y por otro lado el responsable de su manipulación tendrá determinados propósitos.

En general los atributos presentados hacen referencias a características de granos de cereales por lo que al indicar calidad de proteínas apunta a las características funcionales de este componente (por Ej. en trigo) pero en especial alta extracción de aceite y valor nutritivo de las proteínas son caracteres deseables también en granos de oleaginosas. Por otro lado una baja proporción de materias extrañas es un atributo deseable en ambos tipos de granos y de interés para la mayoría de los usuarios dado que facilita la conservación y aumenta el rendimiento de los productos y subproductos a obtener cuando no interfieren en su valor nutritivo.

El almacenaje y el secado de los granos influyen en gran medida sobre la calidad del producto luego que el grano es sometido a tales procesos.”(2)

“Como la mayor parte del trigo está destinada a la industria molinera y panadera, se conocen diversos parámetros que permiten evaluar la calidad de una partida de este cereal.

Como norma general aceptada, en la mayoría de los países se ha establecido una temperatura máxima del aire de secado de 90°C. A estos valores el grano de trigo no superará los 50-60°C de temperatura y mantendrá así una calidad aceptable para la industria.

Según otros autores, la sensibilidad del trigo a las altas temperaturas de secado es función del contenido de proteínas”. (3)

### **2.1.2. DEFINICIÓN DEL TRIGO.**

“El trigo es un grano maduro, entero, sano y seco del género triticum, de las especies vulgare, compactum y durum.

Es una planta gramínea de crecimiento anual de la familia del césped, de altura promedio de un metro. Sus hojas verdes, parecidas a las de otras gramíneas, brotan muy pronto y van seguidas por tallos muy delgados rematados por espigas de cuyos granos molidos se saca la harina. El trigo, la avena y la cebada tienen semejantes prácticas de cultivo, objetivos y usos.

Los requisitos del clima y suelo que necesita un cultivo de trigo no son estrictos, se siembra en condiciones diversas pero principalmente se buscan zonas templadas. La temperatura adecuada para cultivarlo varía entre 15 y 31°C.

Para obtener una buena cosecha, es necesario que la condición física del suelo tenga las siguientes características:

Una estructura granular, que permita la aireación y el movimiento del agua.

Un perfil de tierra cultivable de hasta unos 30cm, para un enraizamiento adecuado. Que no sea susceptible a la formación de costras que dificulten la germinación.

Otras cualidades del suelo que determinan las características del trigo son su fertilidad, acidez y salinidad. La acidez determina la variedad de trigo a cultivar. La salinidad en exceso, disminuye o impide la germinación del grano y afectar su productividad.

La fertilidad permite orientar la variedad del grano y afecta el rendimiento y calidad del trigo.

### **2.1.3. VARIEDADES DE TRIGO.**

#### **2.1.3.1. SEGÚN LA COSECHA.**

➤ “*Trigo de Otoño-Invierno (O-I)*. Se conoce como aquel grano sembrado que germina en otoño e invierno y crece lentamente hasta cosecharse en la primavera, es el que se utiliza en nuestro país.

➤ *Trigo de Primavera-Verano (P-V)*. Es el grano que fue sembrado en primavera, germina mucho más rápido y se cosecha en el verano, es propio de países muy fríos. De esta forma se evitan las heladas del invierno que estropearían el trigo.

Desde luego esta referencia puede depender de la ubicación de cada país y de sus condiciones climáticas particulares

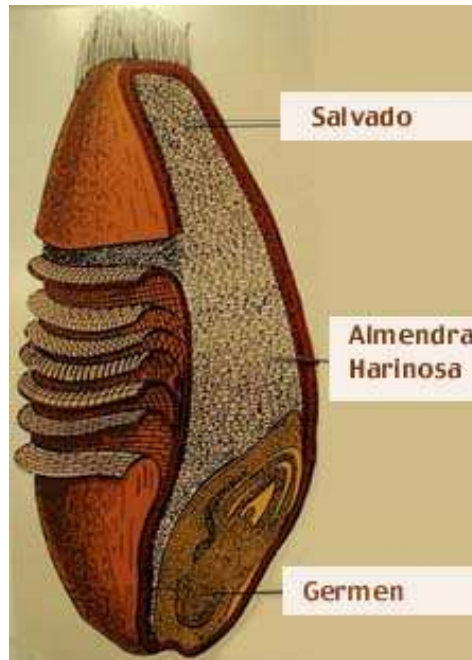
### 2.1.3.2. SEGÚN EL GRANO.

- **Trigo común:** También llamado vulgar o candeal, es el más cultivado y se utiliza para la panificación.
- **Trigo duro:** Proporciona el grano que se utiliza para la fabricación de pastas alimenticias (macarrones, fideos, etc.), es muy rico en proteínas.
- **Trigo compacto:** Es de calidad relativamente baja y es el que se utiliza para repostería, tiene pocas proteínas.

### 2.1.3.3. SEGÚN EL COLOR.

- Ambarinos
- Rojos
- Blancos” (4)

### 2.1.4. ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN NUTRITIVA DEL TRIGO.



**Fig.1.1.4 -1.** Estructura de un cereal

“Vamos a ver la estructura del grano de trigo, otros granos de cereales tienen estructura semejante.

- El grano de cereal está formado por dos partes bien diferenciadas: Las cubiertas o envolturas y la parte interna o endospermo.
- Cubierta externa o cascarilla y cubierta interna o salvado: Están formadas por celulosa (fibra vegetal), son ricas en vit.B1, contienen una pequeña cantidad de proteínas y elementos minerales (calcio, hierro).
- Capa de aleurona: Es una capa muy fina que envuelve a la almendra harinosa, es muy interesante desde el punto de vista nutritivo porque contiene proteínas de alto valor biológico.
- Almendra harinosa: Es el alimento de la futura planta si creciera, de ella obtenemos la harina. Está compuesta principalmente por almidón y un complejo de proteínas llamado gluten.
- Germen o embrión: Es la parte del grano que daría lugar a la planta si se encuentra en condiciones adecuadas. Es rico en proteínas de alto valor biológico, ácidos grasos esenciales, Vitaminas E y B1 y elementos minerales.”(5)

**Tabla 1.1.4-1**

**Propiedades del grano de trigo**

<b>Propiedades físicas</b>					
<b>Diámetro (mm)</b>		<b>Porosidad</b>	<b>Factor Forma</b>	<b>Tipo de Lecho</b>	
3,92		0,4175	1,14	Normal	
<b>Propiedades químicas</b>					
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>		<b>Humedad del grano fresco.</b>			
<b>Absoluta</b>	<b>Aparente</b>	<b>Bajo</b>	<b>Bajo-Medio</b>	<b>Bajo-Alto</b>	
1370	800	Hasta 14%	14-16%	Mayor a 16%	

Fuente: [http://www.molinovillafane.com/todo\\_acerca\\_del\\_trigo.html](http://www.molinovillafane.com/todo_acerca_del_trigo.html).

### 2.1.5. VITAMINA E.

“La vitamina E se encuentra en muchos alimentos, principalmente de origen vegetal, sobre todo en los de hoja verde, semillas, entre ellos el brócoli, las espinacas, la soja, el germen de trigo y la levadura de cerveza; también puede encontrarse en alimentos de origen animal como la yema de huevo.

➤ **Salvado de trigo crudo:** 2, 320 mg. /1,440 mg

El enranciamiento oxidativo que ocurre en algunos alimentos destruye las vitaminas liposolubles, particularmente las vitaminas A y E (tocoferoles).

➤ **Estructura**

La vitamina E en estado natural tiene cerca de ocho diferentes formas de isómeros, cuatro tocoferoles y cuatro tocotrienoles. Todos los isómeros tienen anillos aromáticos con un grupo hidroxilo el cual puede donar un átomo de hidrógeno para reducir los radicales libres de los materiales que componen las membranas biológicas hidrófugas de las paredes de las células. Existen formas alfa  $\alpha$ , beta  $\beta$ , gamma  $\gamma$  y delta  $\delta$  para ambos isómeros, y se determina por el número de grupos metílicos en el anillo cromático. Cada una de las formas tiene su propia actividad biológica.” (6)

	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	<p>Chroman-Ringsystem (hydrophil) R1, R2, HO, CH<sub>3</sub> H<sub>3</sub>C H<sub>3</sub>C H<sub>3</sub>C H<sub>3</sub>C Phytol (lipophil) <b>Tocopherol</b></p>
R1:	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>3</sub>	-H	-H	
R2:	-CH <sub>3</sub>	-H	-CH <sub>3</sub>	-H	

**Fig. 1.1.5-1** Estructura Química de la vitamina E

## **2.1.6. MÉTODOS DE CONSERVACIÓN PARA CEREALES.**

### **2.1.6.1. TIPOS DE CONSERVACIÓN.**

“Existen varios métodos para lo que es la conservación, y éstos tienen fundamento en la transferencia de calor y de masa.

*Conservación por calor* como la liofilización, la deshidratación y la irradiación.

*Conservación por frío* como la refrigeración y la congelación.

### **2.1.6.2. DESHIDRATACIÓN POR CALOR.**

Por medio del calor se elimina el agua que contienen algunos alimentos mediante la evaporación de esta. Esto impide el crecimiento de las bacterias, que no pueden vivir en un medio seco” (7)

### **2.1.6.3. SECADO COMO CONSERVACIÓN.**

“Los granos, como es bien conocido, no pueden conservarse almacenados si no están secos. La cuestión es determinar cuándo un grano se considera "seco". Como término general, para los cereales, una humedad del 15% se considera el límite para estimarlo como "seco". Pero este valor es relativo, pues depende de diversos factores.

En un país de clima frío, un cereal como el trigo puede conservarse a 15% de humedad, pero en un país de clima cálido, la humedad de conservación deberá ser de 12 - 13%.

Los granos oleaginosos, tienen que ser almacenados a humedades aún menores, 10 a 11%, y todavía más bajas.

Temperaturas máximas que puede alcanzar el grano durante el secado, para evitar pérdidas de calidad, según deferentes fines.”(8)

## **2.2. FUNDAMENTOS DEL SECADO.**

“En términos generales, el secado es una operación unitaria en la cual ocurre una reducción del contenido de humedad de cierto producto, hasta un nivel que se considera seguro para su almacenamiento. Así el secado de harina de granos se puede definir como un proceso en el que hay un intercambio de simultáneo de calor y producto (masa), entre el aire caliente y el producto a secar.

La humedad varía de acuerdo a las condiciones ambientales de cada país, y para los granos más comunes, abarca un rango entre 10 y 14% de humedad en el producto seco. La remoción de la humedad de un producto es conocida como secado o deshidratación.”(9)

### **2.2.1. 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 consecuencia en cualquier proceso de secado debemos tener en cuenta los mecanismos de transmisión de calor y transporte de materia. En mayor parte de los problemas prácticos de secado, la humedad suele ser vapor de agua, y el gas empleado para el secado suele ser aire.

La operación de secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas- sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa. Cuando estas dos presiones se igualan, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio y el proceso de secado cesa.

El secado puede darse por contacto directo e indirecto, por contacto directo el calor necesario para la vaporización del agua lo suministra el aire, mientras que el indirecto el calor se suministra por una fuente térmica a través de una superficie metálica en contacto con el objeto a secar.

El secado directo puede llevarse de un modo continuo o discontinuo. En el método discontinuo, una vez cargado el secadero, se hace circular el aire de secado y se supone que sus condiciones



permanecen constantes con el tiempo. Mientras que el método continuo tanto la alimentación del sólido a secar como el aire entran continuamente en el secadero, variando a través del mismo las condiciones del aire y del sólido a secar.

En el método discontinuo el aire de secado puede circular sobre el objeto a secar o pasar a través del mismo.

### 2.2.1.1. HUMEDAD.

El contenido en humedad de un sólido puede expresarse sobre base seca o base húmeda. En cálculos de secado resulta más conveniente referir la humedad a base seca, debido a que ésta permanece constante a lo largo del proceso de secado, de acuerdo a la Ec, 1.3.2-1

Contenido de humedad, base seca:

$$\frac{\text{Kg Humedad}}{\text{Kg sólido seco}} \quad \text{Ec. 1.2.1-1}$$

Contenido de humedad, base húmeda:

$$\frac{\text{Kg Humedad}}{\text{Kg sólido húmedo}} = \frac{\text{Kg Humedad}}{\text{Kg humedad} + \text{Kg sólido seco}} \quad \text{Ec.1.2.1-2}$$

➤ **Humedad de equilibrio:  $x^*$** , Humedad del sólido cuando su presión de vapor se iguala a la presión de vapor del gas. Es decir, humedad del sólido cuando está en equilibrio con el gas. Se denomina humedad de equilibrio del sólido a la humedad alcanzada por el sólido en el equilibrio con el aire en las condiciones dadas. La humedad de equilibrio, ( $x^*$ ) es el límite al que puede llevarse el contenido de humedad de una sustancia por contacto con aire de humedad y temperatura determinadas.

Si la humedad del sólido es mayor que la del equilibrio, el sólido se secará hasta alcanzar la humedad de equilibrio, mientras que si la humedad es menor que la de equilibrio absorberá agua del aire hasta que alcance las condiciones de equilibrio.

Para condiciones dadas de aire la humedad de equilibrio es función de la naturaleza del cuerpo, del estado de su superficie y de la temperatura.

➤ **Cuerpos húmedos y cuerpos higroscópicos**, Para una temperatura determinada, la presión de vapor del agua contenida en el sólido húmedo aumenta con la humedad para todas las sustancias, hasta alcanzar el valor de todas de la tensión de vapor es agua pura a temperatura considerada.

Cuando la presión de vapor del agua que acompaña al sólido es menor que la tensión de vapor del agua a la misma temperatura, se dice que el sólido es higroscópico, recibiendo el nombre de sólido húmedo cuando la presión de vapor del agua que acompaña al sólido es igual a la tensión de vapor del agua a esa temperatura.

➤ **Humedad libre:  $x - x^*$** , Es la humedad del sólido; que es la humedad que está en exceso con relación a la humedad de equilibrio. Es ésta la humedad que se puede evaporar y depende de la concentración de vapor en la corriente gaseosa.

➤ **Humedad ligada o agua ligada**, es el valor de la humedad de equilibrio del sólido en contacto con aire saturado; o bien la humedad mínima del sólido necesaria para que éste deje de comportarse como higroscópico.

➤ **Humedad desligada o agua desligada**, es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad ligada; o bien la humedad libre del sólido en contacto con el aire saturado. Es evidente que si el sólido tiene humedad desligada se comportará como húmedo.”(10)

### 2.2.1.2. CINÉTICA DEL SECADO.

“Se define la velocidad de secado por la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo, y más exactamente por el cociente diferencial  $(-dX/d\theta)$  operando en condiciones constantes de secado, es decir con aire cuyas condiciones (temperatura, presión, humedad y velocidad) permanecen constantes con el tiempo.” (11)

“Analíticamente, la velocidad de secado se refiere a la unidad de área de superficie de secado, de acuerdo con la ecuación.

$$W = \frac{S}{A} = \left( -\frac{dX}{d\theta} \right) \quad \text{Ec. 1.2.1-3}$$

### 2.2.1.3. VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE.

El secado tiene lugar desde la superficie del sólido saturada de líquido, por difusión del vapor de agua hacia la corriente de aire. La ecuación que regula el proceso basada en la Ec.1.3.2-17 dándonos así:

$$h = c \cdot G^{0.8} \quad \text{Ec. 1.2.1-4}$$

Donde:

$G =$  Velocidad másica de flujo de aire, ( $\text{Kg}/\text{sm}^2$ ).

$c = 14,5$  para flujos paralelos a la superficie del sólido.

$\lambda =$  Calor latente de vaporización ( $\text{J}/\text{Kg}$ )

En esta expresión debería tenerse en cuenta que el coeficiente de difusión depende de la velocidad de la corriente de aire ( $u^{0.8}$ ). Asimismo, considera que la velocidad de secado es independiente de la forma geométrica de la superficie; pero se ha visto, posteriormente, que influye la relación entre la longitud y la anchura de la superficie.

Resulta más adecuado expresar el coeficiente de transferencia de materia en función de la humedad, por lo que la expresión anterior cambiaría como se indica a continuación

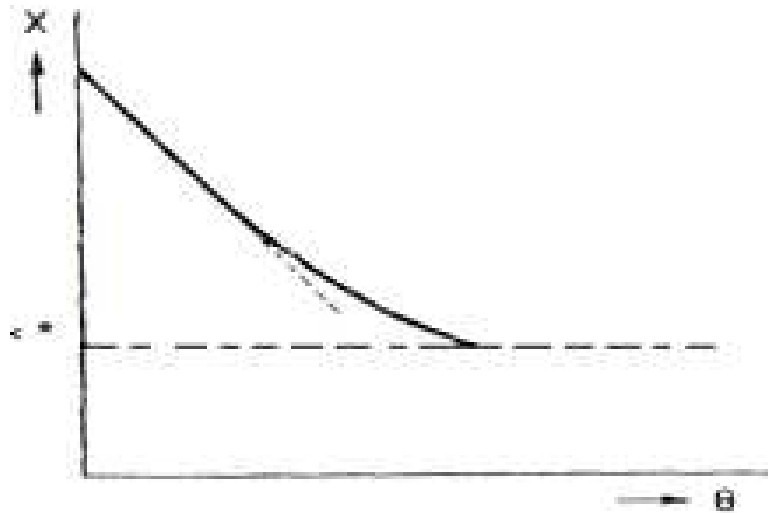
$$K_G A (P_s - P_w) = k A (H_s - H) \quad \text{Ec. 1.2.1-5}$$

### 2.2.1.4. PERÍODOS DE SECADO.

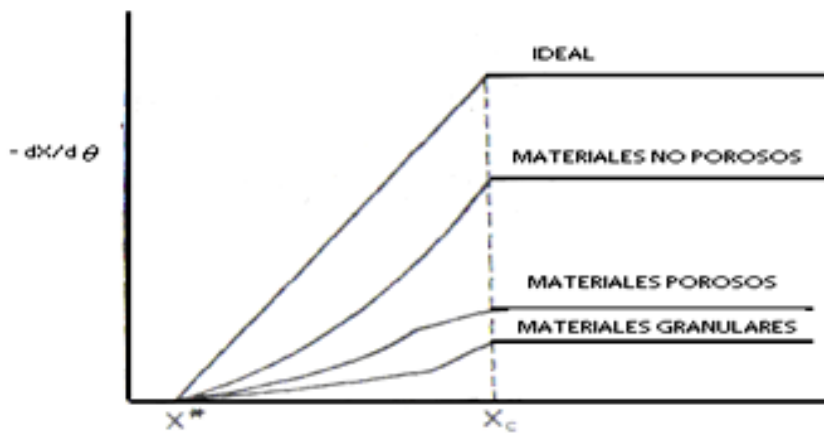
En las experiencias de secado, al representar la humedad del sólido frente al tiempo, operando en condiciones constantes de secado y circulando el aire sobre el objeto a secar, se obtienen curvas del tipo indicado en la figura 1.2.1.4-1, en la que puede observar que al principio la humedad del sólido disminuye linealmente con el tiempo de secado (porción recta de la representación), o lo que es lo mismo durante este período la velocidad de secado ( $-dX/d\theta$ ) permanece constante.

Se efectúa el secado a esta velocidad constante hasta que la humedad del sólido alcanza un valor *crítico*, a partir del cual la velocidad de secado disminuye, anulándose cuando la humedad

del sólido alcanza el valor de equilibrio con el aire en las condiciones constantes de operación, es decir cuando la humedad libre es cero.



**Fig. 1.2.1.4 - 1** Periodos de secado (Curva tradicional de secado)

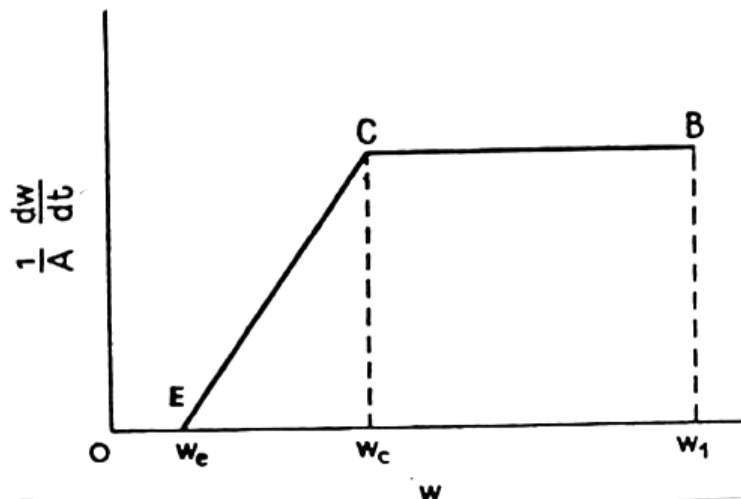


**Fig. 1.2.1.4 - 2** Velocidad para distintos materiales

A partir de los datos de secado empleados para la construcción, se pueden obtener los datos de la velocidad de secado:  $(dX/ d\theta)$  o  $S/A (- dX/ d\theta)$  frente a la humedad, tal como indicamos en la figura 1.2.1.4-2 para distintos tipos de materiales según en mecanismo de secado. En esta

figura se presentan dos tramos diferentes: uno que corresponde a un periodo de velocidad constante y otro a un periodo de velocidad decreciente.

Si el secado de un material se consigue haciendo circular aire caliente sobre su superficie mojada; la curva de velocidad de secado se muestra en la figura 1.2.1.4-3



**Fig. 1.2.1.4 - 3** Curva de la velocidad diferencial de secado para calcular el tiempo de secado

Donde:

$w$  = Humedad final (kg agua/kg sólido)

$w_e$  = Humedad de equilibrio (E)

$w_c$  = Humedad crítica (C)

$w_1$  = Humedad inicial (B)

## 2.2.1.5. TIEMPO DE SECADO.

### 2.2.1.5.1. DURACIÓN DEL SECADO EN CONDICIONES CONSTANTES.

A partir de la ecuación [1.2.1 -3] puede calcularse la duración del secado por integración entre las humedades inicial y final de acuerdo a la Ec. 1.3.2-20

Para calcular esta integral es necesario conocer  $W=f(X)$ , y, en general, hemos de distinguir dos períodos:

➤ **PERÍODO ANTECRÍTICO.**

Como durante este período  $W = \text{constante}$ , la integración de la ecuación [1.3.2-21] desde la humedad inicial  $X_i$  hasta la humedad crítica  $X_c$  nos lleva a la Ec.1.3.2-20

Naturalmente que si la humedad final  $X_f$  es mayor que la humedad crítica ha de sustituirse  $X_c$  por  $X_f$  en la ecuación [1.3.2-20].

➤ **PERÍODO POSCRÍTICO.**

**Método gráfico:** Si no se conoce la relación analítica  $W = f(X)$ , la integración de la ecuación [1.3.2-21] ha de hacerse gráficamente representando  $X_c$  frente a  $1/W$ . El valor de la integral será el área limitada por la curva, el eje de abscisas y las ordenadas extremas  $X_c$  y  $X_f$ .

**Métodos analíticos:** Si la velocidad de secado varía linealmente con la humedad, desde la humedad crítica hasta la final, la integración de la ecuación [1.3.2-21] conduce a la expresión en la Ec,1.3.2-22

Si no se conoce la forma en que varía la velocidad de secado en este período se puede obtener una expresión aproximada suponiendo que la variación es lineal desde la humedad crítica hasta la de equilibrio. Admitiendo esta hipótesis se llega a la expresión siguiente Ec,1.3.2-23:

En las ecuaciones [1.3.2-22] y [1.3.2-23] se supone que la humedad inicial es mayor que la crítica; en caso contrario, ha de sustituirse  $X_c$  por  $X_i$ .”(12)

### **2.2.1.6. TIPOS DE SECADORES.**

“De acuerdo a la clasificación de la operación de secado encontramos los siguientes tipos de equipos.

***Secaderos de calentamiento directo.***

Tenemos los discontinuos y continuos:

***a) Equipos discontinuos***

- Secaderos de bandejas con corriente de aire.
- Secaderos de cama fluidizada.
- Secaderos con circulación a través del lecho sólido.
- Secaderos de bandejas a vacío.
- Secaderos de bandejas a presión atmosférica.
- Secaderos por congelación.

***b) Equipos continuos***

- Secaderos de túnel.
- Secaderos neumáticos.
- Secaderos ciclónicos.
- Secaderos de cama chorreada.
- Secaderos de cama vibratoria.
- Secadero de cama fluidizada.
- Secaderos sprays.
- Secaderos de tipo turbina.
- Secaderos rotatorios.
- Secaderos de calentamiento indirecto.”(13)

**2.2.2. SECADO POR FLUIDIZACIÓN.**

“Se da el nombre de fluidización al proceso de contacto que ocurre entre un sólido y un fluido (gas o líquido) en el cual el lecho formado por partículas sólidas finamente divididas se levanta y se agita por medio de una corriente ascendente de fluido.

El secado por fluidización es una técnica para eliminar humedad de un sólido mediante el paso de una gas, o de un líquido a través de un lecho por donde pasa el sólido. La velocidad del fluido debe ser tal que los sólidos “floten” en él. La principal variable en el proceso de fluidización es vital mantener la temperatura constante, preestablecida por un operador, durante todo el tiempo que dura el secado, por lo tanto se requiere un control de temperatura para neutralizar las perturbaciones (temperatura del medio ambiente, contenido de humedad de los materiales, etc.)

Los secadores de cama fluida trabajan mejor con partículas de unas cuantas décimas de un milímetro de diámetro, pero han sido procesadas por encima de los 4 mm. Por razones de seguridad la velocidad del gas es el doble de la mínima velocidad de fluidización. En operación continua, un tiempo de secado es 1- 2 min. Es suficiente, pero secadores “Batch” de algunos productos farmacéuticos usan tiempos de 2 – 3 h.

En la actualidad se cuenta con diversos sistemas de secado por lecho fluidizado, estos pueden ser de trabajo continuo o por baches, de ciclo abierto, en los que se evapora agua o de ciclo cerrado, en los que se evaporan en su gran mayoría solventes orgánicos.

El proceso se desarrolla en equipos que pueden tener muchas configuraciones dependiendo de las características de producto final; las más comunes son lechos fluidos circulares o rectangulares, con o sin vibración y con o sin baffles.

Sin importar la configuración, el estado de fluidización se desarrolla al hacer pasar un gas (usualmente aire) a una determinada velocidad continuamente a través de una cama con perforaciones donde se deposita el producto.

En el caso del secado, el aire es calentado bien sea de forma directa o indirecta y es obligado a pasar a través del producto, fluidizándolo y removiendo humedad. Al salir este del lecho, es dirigido a un dispositivo de recolección de polvos que usualmente es un ciclón, filtro de talegas, lavador de gases por vía húmeda o una combinación de estos dependiendo de los requerimientos del proceso y regulaciones locales.

El Secador de lecho fluidizado de laboratorio tiene varias ventajas importantes si se compara con técnicas de secado convencionales.

- Altas tasas de transferencia de calor y masa.
- Los tiempos de secado y por tanto los tiempos de permanencia varían entre unos segundos y unos minutos a menudo se necesitan menos minutos para un secado completo, bajando a veces hasta más de 10 veces.
- Pueden secarse materiales con contenido de humedad desde menos del diez por ciento hasta más del 80 por ciento.



- El intervalo de temperaturas de secado varía desde temperatura ambiente hasta 200 C, que cubre la mayoría de las operaciones de secado.
- Puede procesarse una amplia variedad de materiales, incluyendo compuestos orgánicos e inorgánicos, fármacos, alimentos y combustibles, minerales y materiales aglomerantes.
- Pueden investigarse otros procesos además del secado, por ejemplo, mezcla y homogenización de sólidos, reducción de tamaño, aglomeración y granulación, clasificación en tamaños y enfriamiento de partículas.”(14)

### **2.2.2.1. LECHO FLUIDIZADO POR BATCHES.**

“Dependiendo de los requerimientos y el gas de secado, pueden emplearse un ventilador de inducción o dos ventiladores; uno de inducción y otro de extracción. El proceso de calentamiento del aire puede realizarse de forma directa con quemadores de gas o de forma indirecta con intercambiadores de calor y vapor.

El secador puede utilizarse con una amplia variedad de materiales incluyendo polvos finos, partículas gruesas, cristales, gránulos o incluso pulpas o pastas (tras decantado o pre-secado o por atomización sobre un lecho inicial del material seco).

Los materiales sensibles al calor, por ejemplo alimentos tales como guisantes, trigo o lentejas, pueden ser secados en un lecho a temperaturas relativamente bajas. El secador es de diseño sencillo, compacto y fácil de operar.

El aire es aspirado a través de un filtro de malla en la base del armario, y luego soplado por un ventilador centrífugo sobre un calentador a través de un filtro de malla fina de acero inoxidable, antes de pasar a la malla del distribuidor en la base del cuerpo del secador, que actúa de soporte al lecho y distribuye el aire de manera uniforme.

El soplador de aire es controlado para que tenga una vibración homogénea en un amplio intervalo de velocidades de motor, lo que permite obtener una fluidización eficiente para una variedad de materiales y ofrece un control preciso de la temperatura de secado. Las lecturas son seleccionadas y mostradas usando un medidor digital. La unidad puede ser operada manualmente, o utilizando el temporizador, para notificar del final de la operación.

Se utiliza una bolsa filtrante que retiene cualquier partícula que se escapa de la muestra que se está fluidizando, permitiendo el paso de los gases de salida.

➤ *Trabajos experimentales*

- a) Secado simple de un material según el contenido en humedad y el tiempo de secado (o de permanencia) requeridos
- b) Determinación de curvas de secado para evaluar la viabilidad del secado en lecho fluidizado de un material a escala industrial. Las curvas de secado son relevantes para el mecanismo de secado pueden utilizarse como base para el equilibrio de calor y masa, la eficacia térmica del secado y el diseño del secador
- c) Cálculo de coeficientes de transferencia térmica para diferentes condiciones de importancia para el diseño de secadores y la comparación de lechos fluidizado con otros métodos de secado.” (15)

**2.2.2.2. FLUIDIZACIÓN DE PARTÍCULAS.**

“La fluidización es una operación básica por la que un sólido finamente dividido se transforma en un estado “como líquido” mediante el contacto con un fluido, gas o líquido. Un lecho de partículas se empieza a fluidizar cuando la fuerza de arrastre debida al flujo es igual al peso de éstas:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Pérdida de} \\ \text{presión del} \\ \text{lecho} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Sección} \\ \text{del} \\ \text{lecho} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Volumen} \\ \text{del} \\ \text{lecho} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Fracción} \\ \text{de} \\ \text{partículas} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Peso específico} \\ \text{aparente del} \\ \text{sólido} \end{array} \right)$$

o sea,

$$\Delta P \cdot S = W = S \cdot L_{mf} \cdot (1 - \epsilon_{mf}) \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g \quad \text{Ec. 1.2.2-1}$$

Reagrupando términos, se obtiene que:

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g) \cdot g \quad \text{Ec. 1.2.2-2}$$

Donde  $\varepsilon_{mf}$  es la porosidad para la fluidización incipiente.

### 2.2.2.2.1. VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN.

La velocidad a la que empieza la fluidización del lecho se conoce como velocidad mínima de fluidización en este punto existe un equilibrio dinámico entre la fuerza de campo y gravitatorio ejercido sobre las partículas.

La fuerza gravitatoria ejercida sobre las partículas viene dada por la expresión

$$F_G = (\rho_p - \rho)SL(1 - \varepsilon)g \quad \text{Ec. 1.2.2-3}$$

En la que  $\rho_p$  y  $\rho$  son las densidades de la partícula y del fluido respectivamente:  $S$  la selección de paso de la columna que contiene las partículas:  $L$  la altura del lecho:  $\varepsilon$  su porosidad, y  $g$  la constante de gravedad.

La fuerza que el fluido ejerce sobre el lecho de las partículas es la presión, y que se calcule por la expresión:

$$F_p = (-\Delta P)S \quad \text{Ec. 1.2.2-4}$$

En la que  $(-\Delta P)$  es la caída de presión que experimenta el fluido al travesar el lecho, y cuya expresión depende del régimen de circulación del fluido.

Por tanto, para el cálculo de la velocidad mínima de fluidización deben igualarse las dos fuerzas, la de gravedad y la presión  $F_G = F_p$  o lo que es lo mismo:

$$(\rho_p - \rho)SL(1 - \varepsilon)g = (-\Delta P)S \quad \text{Ec. 1.2.2-5}$$

La expresión de la caída de presión viene por la ecuación de Ergun:

$$\frac{(-\Delta P)}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \eta}{\varepsilon^3 d_p^2} v + 1,75 \frac{(1-\varepsilon) \rho}{\varepsilon d_p} v^2 \quad \text{Ec. 1.2.2-6}$$

A pesar de que esta es la ecuación general para el cálculo de la caída de presión. Según sea el régimen de circulación del fluido podrá simplificarse. A continuación se obtendrán las diferentes ecuaciones que permitirán el cálculo de la velocidad mínima de fluidización, dependiendo del tipo de régimen de circulación del fluido.

➤ **Régimen laminar**

Cuando el régimen de circulación del fluido sea laminar, el segundo término del segundo miembro de la ecuación de Ergun es despreciable frente al primero, con lo que su expresión se simplifica.

$$\frac{(-\Delta P)}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \eta}{\varepsilon^3 d_p^2} v \quad \text{Ec. 1.2.2-7}$$

Por lo que al suministrar esta expresión en la ecuación, es posible determinar la velocidad mínima de fluidización en régimen laminar.

$$v_{mf} = \frac{1}{150} \frac{(\varepsilon_{mf})^3}{(1-\varepsilon_{mf})} \frac{(\rho_p - \rho)}{\eta} g d_p^2 \quad \text{Ec. 1.2.2-8}$$

➤ **Régimen turbulento**

Cuando el régimen de circulación es turbulento en la reacción de Ergun, es el término de velocidad el que es despreciable frente al del cuadrado de la velocidad.

Por tanto, la caída de presión que experimenta el fluido se podrá expresar como:

$$\frac{(-\Delta P)}{L} = 1,75 \frac{(1-\varepsilon) \rho}{\varepsilon^3 d_p} v^2 \quad \text{Ec. 1.2.2-9}$$

Al sustituir esta expresión en la ecuación es posible determinar la velocidad mínima de fluidización en régimen turbulento.

$$v_{mf} = 0,756 \left[ \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho} g (\varepsilon_{mf})^3 d_p \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 1.2.2-10}$$

➤ **Régimen de transición**

Puede ocurrir que el fluido circule con un régimen superior al laminar, pero no esté completamente desarrollada el turbulento. En estos casos es necesario aplicar la ecuación de Ergun para el cálculo de la caída de presión. A pesar de ellos, se aconseja utilizar esta ecuación cualquiera que sea el régimen de circulación.

En estos casos, al sustituirla expresión de Ergun en la ecuación se obtiene una ecuación de segundo grado, que es necesario resolver para hallar la velocidad mínima de fluidización.

$$(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho)g = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2 \eta}{(\varepsilon_{mf})^3 d_p^2} v_{mf} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})\rho}{(\varepsilon_{mf})^3 d_p} (v_{mf})^2 \quad \text{Ec. 1.2.2-11}$$

**2.2.2.2. POROSIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACION.**

Lo mismo que ocurría con la caída de presión del fluido, que variada con la velocidad de circulación, la porosidad del lecho también experimenta variación. Para velocidad baja, la fuerza de presión no es suficiente para variar la estructura del lecho, y su porosidad no varía, pero a velocidades más altas, el lecho se expansiona aumentando el volumen de huecos.

A velocidades bajas la porosidad no varía, pero puede aumentar con la velocidad, siendo esta variación lineal, la cual ocurre a velocidades más altas que es la mínima de fluidización.

Para el calcula de la porosidad mínima de fluidización puede utilizarse una grafica si no la expresión:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - 0.356 (\log d_p - 1) \quad \text{Ec. 1.2.2.2.-1}$$

Ecuación en la que el diámetro de partícula debe expresarse en micrómetros ( $10^{-6} m$ )

Y es válida para valores de  $d_p$  comprendidos entre 50 y 500 micrones.

### **2.2.2.2.3. ALTURA DEL LECHO.**

Al aumentar la velocidad de circulación de fluido a través del lecho, no solo aumenta la caída de presión, sino que el aumento de porosidad es debido a que la altura del lecho también aumenta. Este aumento de altura de lecho esta inmediatamente ligado al aumento de porosidad, de forma que las porosidad correspondientes a dos alturas cualquiera están relacionadas por la expresión.

$$L_1(1 - \varepsilon_1) = L_2(1 - \varepsilon_2) \quad \text{Ec. 1.2.2.2.-2}$$

### **2.2.2.2.4. PÉRDIDA DE PRESIÓN EN EL LECHO FLUIDIZADO.**

Se considera un lecho granular de partículas a través del cual asciende un fluido. Se acepta que las partículas sólidas que componen el lecho son independientes; estando soportadas sobre una placa porosa o parrilla. Mientras el fluido circule por el lecho y las partículas estén fijas, la pérdida de carga se podrá calcular mediante la ecuación de Ergun.

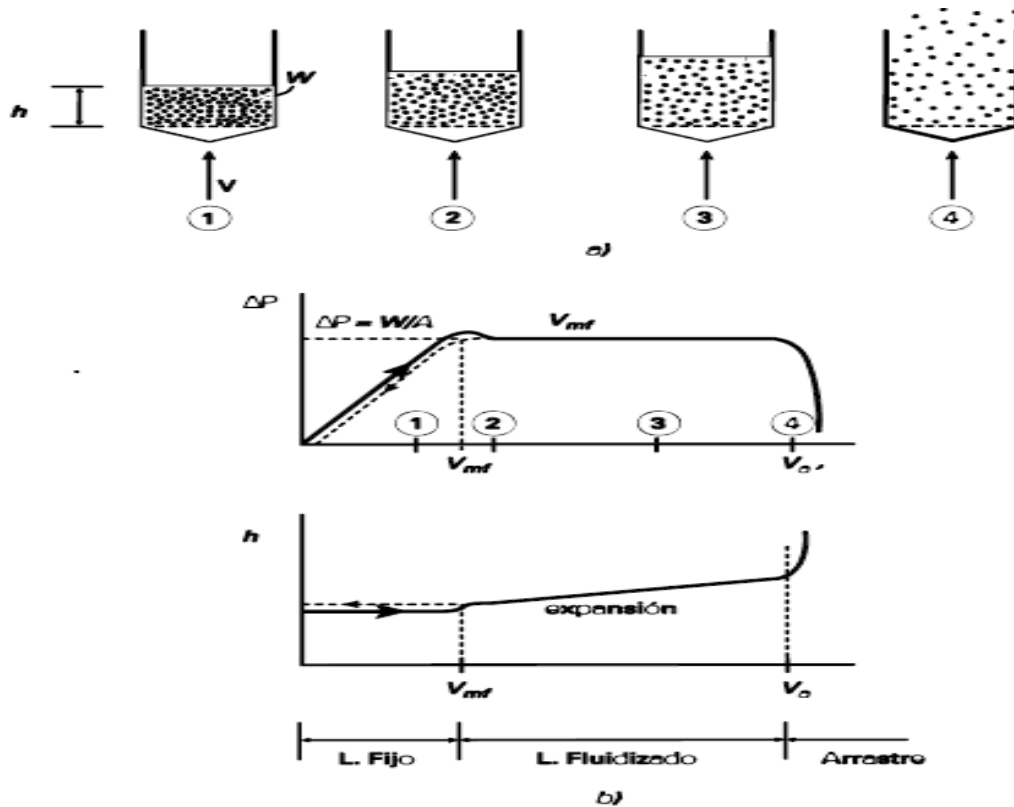
Al aumentar la velocidad del fluido se observa cómo aumenta gradualmente la pérdida de presión, de manera que si se representa en papel doble logarítmico la pérdida de presión frente a la velocidad de entrada del gas, se observa una recta de pendiente aproximadamente igual a uno, tramo correspondiente al primer término de la ecuación de Ergun para régimen laminar.

Al seguir aumentando la velocidad del fluido, la pendiente se hace igual a dos, que corresponde al segundo término de la ecuación de Ergun.

Si se sigue aumentando la velocidad se llega a un punto en el que  $\Delta P$  es máxima, correspondiente a la velocidad mínima de fluidización (donde  $\Delta P$  es igual al peso de las partículas,  $W$ , entre la sección transversal del lecho).

Las partículas empiezan a moverse y al aumentar la velocidad del fluido el lecho se expande mientras  $\Delta P$  permanece prácticamente constante; las partículas están en forma de lecho fluido. Si la velocidad del fluido aumenta todavía más, las partículas empiezan a ser arrastradas por éste y acaba por desaparecer del lecho: zona de elutriación.

La aparición de  $\Delta P_{\max}$  se debe a que al iniciar la fluidización, el fluido tendrá que romper las posibles agregaciones de partículas que se vayan formando.



**Fig. 1.2.2 – 1.** Formación de un lecho fluidizado a partir de un lecho fijo de partículas: a) fases del lecho al aumentar la velocidad; b) variación de la pérdida de presión y altura del lecho

El diagrama pérdida de presión frente a velocidad de fluido es muy útil para conocer la calidad de la fluidización, sobre todo cuando no es posible la observación directa del lecho, pues en un lecho bien fluidizado  $\Delta P$  es constante. Sin embargo,  $\Delta P$  se desvía ligeramente del valor predicho por la primera ecuación reseñada en la práctica, debido a la pérdida de energía que representan las colisiones de las partículas entre sí y con las paredes del recipiente que las contiene.”(16)

### 1.3 DISEÑO DEL EQUIPO

#### 1.3.1 PRUEBAS DE ENSAYO DE SECADO

Se realizaron los análisis físicos químicos con la finalidad de obtener los datos necesarios para el dimensionamiento del equipo las cuales permitirán saber con precisión la humedad crítica, humedad de equilibrio así como la velocidad y el tiempo necesario para la operación de secado así también otras variables como son:

- Peso del material
- Humedad Total contenida en el material
- Humedad inicial y final del material en cada etapa
- Duración del secado
- Cantidad de agua evaporada por hora
- Temperatura crítica del producto
- Temperatura máxima al entrar al secador
- Grado de saturación del aire a la salida del secador
- Temperatura y humedad relativa del aire al exterior

#### 1.3.2. ECUACIONES PARA EL DISEÑO DEL SECADOR POR FLUIDIZACION

El contenido de humedad puede expresarse en base seca o base húmeda, para los cálculos de secado resulta más conveniente referir la humedad a base seca debido a que esta permanecen constante durante el proceso de secado.

##### ➤ CÁLCULOS DE LA HUMEDAD; X.

$$X = \frac{\text{Peso solido humedo (Kg s.humedo)} - \text{Peso del solido seco (Kg s.seco)}}{\text{Peso del solido seco (Kg s.seco)}} \quad \text{Ec. 1.3.2-1}$$

##### ➤ DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL TRIGO

###### Determinación de la densidad real; $\rho_p$ .

$$\rho_p = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad \text{Ec. 1.3.2-2}$$



Donde:

$m$  = Masa de trigo a secar.

$V_1$  = Volumen del agua.

$V_2$  = Volumen desplazado del agua por el trigo.

Densidad real de la partícula a tomar en cuenta para los cálculos desarrollados.

### Estimación del diámetro de la partícula; $D_p$ .

$$D_p = 6(\Gamma) / \alpha_s \quad \text{Ec. 1.3.2-3}$$

Superficie de la partícula;  $s_p$ .

$$s_p = 2(\pi/4)d_p^2 + \pi d_p l \quad \text{Ec. 1.3.2-4}$$

Volumen de la partícula;  $v_p$ .

$$v_p = (\pi/4)d_p^2 l \quad \text{Ec. 1.3.2-5}$$

Superficie específica de la partícula;  $\alpha_s$ .

$$\alpha_s = s_p / v_p \quad \text{Ec. 1.3.2-6}$$

A través de la secuencia dada, se estima el diámetro de la partícula de forma cilíndrica ya que no se le puede estimar con una forma ideal, teniendo en cuenta un factor de forma.

### Determinación de la porosidad; $\varepsilon$ .

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_l}{\rho_s} \quad \text{Ec. 1.3.2-7}$$

Donde:

$\rho_l$  = Densidad del líquido

$\rho_s$  = Densidad del sólido

La porosidad representa el espacio entre partículas, alcanzando valores mayores al incrementarse el tamaño de la partícula.

Para determinar la  $\varepsilon$  es necesario conocer la densidad del lecho.

*Determinación del volumen del lecho;  $V_L$ .*

$$V_L = \frac{\pi D^2}{4} \times L \quad \text{Ec. 1.3.2-8}$$

Donde:

$V_L =$  Volumen del lecho

$D =$  Diámetro del lecho

$L =$  Altura del lecho fluidizado

*Determinación de la densidad del lecho;  $\rho_L$*

$$\rho_L = \frac{m_s}{V_L} \quad \text{Ec. 1.3.2-9}$$

Donde:

$V_L =$  Volumen del lecho

$m_s =$  Masa del sólido a secar

### **1.3.2.1. DETERMINACIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN; $\Delta P$ .**

$$\Delta P = L \times (\rho_s - \rho_g) \times (1 - \varepsilon) \times \left( \frac{g}{gc} \right) \quad \text{Ec. 1.3.2-10}$$

Donde:

$L =$  Altura del lecho fluidizado.

$\varepsilon =$  Porosidad del lecho fluidizado.

$\rho_s =$  Densidad del sólido a secar.

$\rho_g =$  Densidad del fluido.

$g =$  Aceleración de la gravedad.

$gc =$  Factor gravitacional.

*Determinación de la densidad del fluido;  $\rho_g$ .*

Así tenemos la densidad de entrada del gas, en este caso el aire, éste es considerado como un gas de comportamiento ideal ( $n = 1$ ; número de moles), así:

$$\rho_g = \frac{P \times M}{R \times T} \quad \text{Ec. 1.3.2-11}$$

Donde:

*P = Presión atmosférica (Riobamba).*

*M = Peso molecular.*

*R = Constante de los gases ideales.*

*T = Temperatura del aire.*

La diferencial de presión depende de la altura del lecho, así como la diferencia entre las densidades del sólido y gas respectivamente.

➤ **CÁLCULO DEL NÚMERO DEL REYNOLDS;  $N_{Re}$ .**

$$N_{Re} = \frac{D_p v \rho}{\mu_{aire}} \quad \text{Ec. 1.3.2-12}$$

Cuando el valor del numero modulo de Reynolds de partícula es menor de 40 el régimen de circulación de considera laminar, mientras que para valores superiores a 40 se considera turbulento.

➤ **CÁLCULO DE LA VELOCIDAD CRÍTICA O MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN;  $v_{mf}$ .**

La velocidad crítica corresponde a la velocidad mínima de fluidización, es decir, la velocidad mínima que debe tener el gas para que la fluidización verdadera se inicie y se calcula por la siguiente expresión:

$$v_{mf} = 0,756 \sqrt{[(\rho_s - \rho_g) / \rho_g] \times g \times \varepsilon_{mf} \times D_p} \quad \text{Ec. 1.3.2-13}$$

➤ **CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA DEL AIRE;  $\theta_g$ .**

$$\theta_g = \frac{\text{Volumen del espacio gaseoso}}{\text{Caudal del gas}} = \frac{L-\varepsilon}{v_f} \quad \text{Ec. 1.3.2-14}$$

Donde:

*L = Altura del lecho fluidizado.*

*Es el tiempo que se toma el fluido en atravesar el medio a secar.*

➤ **CÁLCULO DEL FLUJO MÁSICO REAL DEL AIRE DE SECADO;  $G$ .**

$$G = v_f \rho_g A_T \quad \text{Ec. 1.3.2-15}$$

Se fija a través de las especificaciones del equipo, como es la velocidad de flujo;  $v_f$ , y la densidad del gas;  $\rho_g$  y el área de transferencia  $A_T$ .

➤ **CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE SECADO;  $W_T$ .**

Es la sumatoria de las velocidades constante (Crítica) y la decreciente (Proscrita).

$$W_T = W_C + W_D \quad \text{Ec. 1.3.2-16}$$

Donde:

*$W_C =$  Velocidad para el período constante*

*$W_D =$  Velocidad para el período decreciente*

**Velocidad Período Contante;  $W_C$ .**

Este período va desde la humedad inicial  $X_0$ , hasta la humedad crítica  $X_C$ .

$$W_C = \frac{S}{A} \left[ -\frac{X_i - X_C}{\Delta\theta} \right] \quad \text{Ec. 1.3.2-17}$$

Donde:

$W_C =$  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 poscrítica o decreciente;  $W_D$ .**

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

$$W_D = \frac{S}{A} \left[ -\frac{X_c - X^*}{\Delta\theta} \right] \quad \text{Ec. 1.3.2-18}$$

Donde:

$W_C =$  Velocidad de secado proscritica

$A =$  Superficie expuesta al secado

$S =$  Sólido seco

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

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

➤ **CÁLCULO DEL TIEMPO TOTAL DE SECADO;  $\theta_T$ .**

Es la sumatoria de los tiempos constante (antecrítico) y la decreciente (poscrítico).

$$\theta_T = \theta_C + \theta_D \quad \text{Ec. 1.3.2-19}$$

Donde:

$\theta_C =$  Tiempo para el período constante

$\theta_D =$  Tiempo para el período decreciente

### **Cálculo del tiempo de secado en el período constante; $\theta_a$ .**

Es el tiempo necesario para que la humedad del sólido descienda desde su valor inicial hasta la humedad crítica, por integración y se obtiene a partir de:

$$\theta_a = \frac{S}{A} \left( \frac{X_i + X_c}{W_c} \right) \quad \text{Ec. 1.3.2-20}$$

Donde:

$\theta_a$  = Tiempo anticrítico

$W_c$  = Velocidad de secado constante

$A$  = Superficie expuesta al secado

$S$  = Sólido seco

$X_i$  = Humedad inicial

$X_c$  = Humedad crítica

### **Cálculo del tiempo de secado poscrítico; $\theta_p$ .**

$$\theta_p = \frac{S}{A} \int_{X_f}^{X_i} \frac{dX}{W} \quad \text{Ec. 1.3.2-21}$$

Este se lo realiza por:

a) El método gráfico si no se conoce la relación analítica  $W = f(X)$ , la integración de la ecuación 1.3.2-21 ha de hacerse gráficamente representando  $X$  frente a  $1/W$  este valor será el rea limitada por la curva, el eje de las abscisas y las ordenadas extremas  $X_c$  y  $X_f$ .

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 1.3.2-8 conduce a:

$$\theta_p = \frac{Sx_c - x_f}{AW_c - W_f} \ln \frac{W_c}{W_f} = \frac{Sx_c - x_f}{AW \log} \quad \text{Ec. 1.3.2-22}$$

$$\theta_p = \frac{Sx_c - x^*}{AW_c} \ln \frac{x_c - x_f}{x_c - x^*} \quad \text{Ec. 1.3.2-23}$$

Donde:

$\theta_P =$  *Tiempo poscrítico*

$W_C =$  *Velocidad de secado constante*

$W_f =$  *Velocidad final*

$A =$  *Superficie expuesta al secado*

$S =$  *Sólido seco*

$X_f =$  *Humedad final*

$X_C =$  *Humedad crítica*

$X^* =$  *Humedad en equilibrio*

➤ **SECADOR POR FLUIDIZACION.**

Los sólidos entran con humedad  $X_1$  y temperatura  $T_{s1}$  y sale con humedad  $X_2$  a la temperatura  $T_{s2}$ ; el gas entra con una humedad  $Y_2$  a la temperatura  $T_2$  y sale con humedad  $Y_1$  a la temperatura  $T_1$ , teniendo el siguiente balance.

$$x_1 G_S + Y_2 G = x_2 G_S + Y_1 G \quad \text{Ec. 1.3.2-24}$$

Donde:

$G_S =$  *Caudal del sólido*

$x_1 =$  *Humedad del sólido a la entrada*

$x_2 =$  *Humedad del sólido a la salida*

$Y_2 =$  *Humedad del aire a la entrada a 60C*

$G =$  *Caudal del gas*

$Y_1 =$  *Humedad del aire a la salida*

Calculada la humedad de salida del aire por aplicación de un balance de materia:

*Humedad de salida del aire*

$$Y_1 = Y_2 + \frac{G_S}{G} (X_1 - X_2) \quad \text{Ec. 1.3.2-25}$$

En la mayoría de las operaciones de secado esta reducido al balance entálpico, debido a los efectos energéticos cinéticos, potencial, son despreciables, el balance total de entalpía nos conduce a:

$$H_{S1}G_S + H_{A2}G = H_{S2}G_S + H_{A1}G + q_p \quad \text{Ec. 1.3.2-26}$$

### **Cálculo de las entalpías del solido; $H_S$ .**

Se calcula tanto a la entrada como a la salida

$$H_S = (Cps + xCpl)T_s \quad \text{Ec. 1.3.2-27}$$

Donde:

$$Cpl_{(H_2O)} \approx 1 \text{ Kcal/kg } C$$

$Cps$  = Capacidad calorífica del trigo

$x_1$  = Humedad del sólido a la entrada

$x_2$  = Humedad del sólido a la salida

$T_{s1}$  = Temperatura del sólido a la entrada

$T_{s2}$  = Tempertaura del sólido a la salida

### **Cálculo de las entalpías del aire; $H_A$ .**

Se calcula tanto a la entrada como a la salida, por la formula siguiente que solo es considerada para el aire.

$$H_A = (0,24 + 0,46Y)T + 597,2Y \quad \text{Ec. 1.3.2-28}$$

Donde:

$T_2$  = Temperatura del aire a la entrada

$T_1$  = Temperatura del aire a la salida

$Y_1$  = Humedad del aire a la salida

$Y_2$  = Humedad del aire a la entrada a 60C



➤ **CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE CALOR PERDIDO;  $q_p$ .**

Las pérdidas de calor hacia el exterior se estiman en un 10% de la entalpia total del aire.

$$H_{S1}G_s + H_{A2}G = H_{S2}G_s + H_{A1}G + 0,10 q_p \quad \text{Ec. 1.3.2-29}$$

➤ **DETERMINACIÓN EN LAS ZONAS DE SECADO.**

De acuerdo al Gráfico 3.1.3.3-1, se calcula la temperatura de salida del aire de las zona III,  $T_B$  y la temperatura del sólido en la zona II, que es la temperatura humedad del aire en esta zona, por aplicación de un balance de energía a la zona III del que se deduce que:

*Temperatura de salida del aire de las diferentes zonas del secadero*

$$T_B = T_{A2} - \frac{C_{PSH} \times G_S}{C_{PAH} \times G} (T_{S2} - T_W) \quad \text{Ec. 1.3.2-30}$$

Este cálculo ha de efectuarse por iteración, para lo cual se supone un valor de  $T_w$ . Se calcula  $T_B$  para el valor supuesto de  $T_w$  y con este valor de  $T_B$  e  $Y_2$  se determina  $T_w$  en el diagrama psicrométrico que ha de coincidir con el valor supuesto.

Se calcula la temperatura de salida del aire de la zona II,  $T_A$  por un balance de energía de acuerdo con la ecuación:

$$T_A = T_{A1} + \frac{C_{PSH} \times G_S}{C_{PAH} \times G} (T_W - T_{S1}) \quad \text{Ec. 1.3.2-31}$$

Donde,  $C_{PSH}$  y  $C_{PAH}$  viene dado por las expresiones siguientes:

$$C_{PSH} = C_p + X C_p \quad \text{Ec. 1.3.2-32}$$

$$C_{PAH} = 0,24 + 0,46Y \quad \text{Ec. 1.3.2-33}$$

Se calcula separadamente el número de elementos de transmisión de cada una de estas zonas, de acuerdo a la ecuación general Ec.1.3.2-34.

*Número de elementos de transmisión de cada una de las zonas*

$$N_{OT} = \frac{\Delta t'}{(\Delta t)_{\log}} \quad \text{Ec. 1.3.2-34}$$

Se calcula la longitud de la unidad de transmisión de acuerdo con la ecuación:

*Longitud de la unidad de transmisión*

$$H_{OT} = \frac{Z_s}{N_{OT}} \quad \text{Ec. 1.3.2-35}$$

*Longitud total del secador de por fluidización.*

$$Z = H_{OT} \times N_{OT} \quad \text{Ec. 1.3.2-36}$$

### ➤ **CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE EL CALOR; $U_{\partial}$ .**

El coeficiente de transmisión de calor desde la fuente de calor hacia el sólido, involucra al flujo del fluido y la longitud de la unidad de transmisión.

$$U_{\partial} = \frac{G \times C_{PAH}}{H_{OT}} \quad \text{Ec. 1.3.2-37}$$

### ➤ **CÁLCULO DEL CALOR NECESARIO PARA CALENTAR EL SOLIDO**

Este tipo de calor representa el calor sensible del proceso

$$q = G_S \times C_{PS} \times \Delta T \quad \text{Ec. 1.3.2-38}$$

### ➤ **CÁLCULO DEL CALOR NECESARIO PARA EVAPORAR EL AGUA DEL SOLIDO.**

Este tipo de calor representa el calor latente de vaporización del proceso, es decir el calor necesario para evaporar el agua del sólido.

$$q = H_2O_{EVAP} \times \lambda \quad \text{Ec. 1.3.2-39}$$

➤ **CÁLCULO DE DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN;  $h_g$ .**

Para sistemas de Sólido-Gas según Katherine llegando a tener la ecuación siguiente:

$$Nu'' = \frac{h_g \times D_p}{k} = 0,0135 Re^{1.3} = 0,0135 \left( \frac{D_p G}{\mu} \right)^{1.3} \quad \text{Ec. 1.3.2-40}$$

En donde  $h_g$  se refiere a la transferencia de calor del fluido Gas-Sólido.

# CAPÍTULO II

## PARTE EXPERIMENTAL

## **2. PARTE EXPERIMENTAL.**

En el estudio se realizó los respectivos análisis de laboratorio físico-químicos, bromatológicos y microbiológicos con el objetivo de encontrar las variables y controladores adecuados de proceso, para así establecer las condiciones óptimas y necesarias, para la realización del dimensionamiento del equipo (secador por fluidización) el mismo que presente características apropiadas de operación obteniendo un secado eficiente sin alteración en el producto según normas establecidas para el trigo.

### **2.1. MUESTREO.**

Se realizó un muestreo sistemático aleatorio simple, el cual se tomaron varias muestras representativas al azar en la provincia de Chimborazo en los distintos mercados de la ciudad de Riobamba a fin de evaluar sus características físicas-químicas antes y durante el proceso de secado, de acuerdo a parámetros establecidos por normas, las que nos indicaron un rango de 12-14 % de humedad para su almacenamiento, en base a estudios y técnicas existentes.

### **2.2. METODOLOGIA.**

#### **2.2.1 METODOS.**

##### **2.2.1.1. DEDUCTIVO.**

Involucra aquellos procedimientos que van de lo simple a lo complejo, en el secado por fluidización determinando así las variables de operación y el tipo de secador batche, que permite determinar el funcionamiento a una temperatura adecuada, en un determinado tiempo con un porcentaje de humedad necesario para su almacenamiento y conservación, guardando su valor nutritivo, para llegar a operar de una manera más eficiente.

##### **2.2.1.2. INDUCTIVO.**

Se tabularon y determinaron las mejores condiciones para el diseño en base a las operaciones unitarias y las variables indicadoras; humedad, tiempo de secado, así también se adoptan datos de temperatura para el proceso que involucre una buena transferencia de masa y de energía, siendo estos la base para el diseño y construcción del secador por fluidización.

### **2.2.1.3. EXPERIMENTAL.**

Los métodos utilizados dentro de esta investigación son:

Determinación de la temperatura, diámetro de partícula, densidad, volumen, porosidad de la partícula.

Análisis proximal (Humedad, proteína, fibra, grasa, ceniza, extracto libre de nitrógeno).

Análisis microbiológico (Hongos y levaduras).

De manera que todos estos datos son obtenidos a nivel de laboratorio, para evaluación y construcción del equipo.

### **2.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.**

En el proceso de secado se realizaron pruebas de laboratorio a fin de garantizar una buena conservación y almacenamiento, dicho secado se ve favorecido también por pruebas que determinaron el buen estado del producto a secar las cuales están basada en técnicas de calidad y normalización.

La muestra de secado se realizó con trigo (*triticum vulgare*), producto que se obtuvo después del secado con características y propiedades estables, que no degraden al producto, durante su almacenamiento.

#### **2.4.1. ANÁLISIS ORGANOLÉPTICOS DEL TRIGO.**

- De color castaño claro
- Textura ligeramente crujiente y seca, de olor y sabor característico.

### **2.5. TÉCNICAS.**

Las técnicas utilizadas para la determinación de los diferentes parámetros bromatológicos y variables de proceso a utilizar están basadas en Normas INEN, técnicas del INIAP, ensayos de la AACC.

## 2.6.1. TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DE GRANOS.

### 2.6.1.1. DETERMINACIÓN DE HUMEDAD (Norma INEN 1462).

Tabla 2.4.1.1-1

#### Determinación de Humedad

PRINCIPIO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CALCULOS
<p>La determinación de la humedad por medio de la elevación de la temperatura, eventualmente con utilización completamente de vacío, es el método más antiguo para obtener el contenido de humedad y de sólidos totales de un alimento.</p> <p>La humedad libre de la muestra previamente preparada (desmuestra) se expulsa por medio de aire caliente en circulación. La temperatura se regula para efectuar un máximo de secado y un mínimo de pérdidas de sustancias volátiles.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Estufa desecadora de aire caliente</li> <li>➤ Balanza analítica</li> <li>➤ Cápsulas de porcelana</li> <li>➤ Desecador</li> <li>➤ Pinza de cápsula</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Se pesa la cápsula vacía</li> <li>➤ Se pesan exactamente 5 g de muestra en la cápsula de porcelana</li> <li>➤ Se ingresa la cápsula con la muestra a la estufa a 103±2C durante 2 horas</li> <li>➤ Luego de 2 horas se deja enfriar en un desecador</li> <li>➤ Se pesa la cápsula enfriada y se determina la pérdida por desecación</li> </ul>	$\%H = (W_3 - W_1) / (W_2 - W_1)$ <p><i>Donde</i></p> <p>W<sub>3</sub> = Peso muestra seca + cápsula</p> <p>W<sub>2</sub> = Peso muestras seca + cápsula</p> <p>W<sub>1</sub> = Peso cápsula vacía.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <b>Valores de referencia</b></li> </ul> <p>Tipos argentinos: 13.1-13.8%</p> <p>Tipos canadienses: 12.0-12.4%</p>

**2.6.1.2. DETERMINACIÓN DE PROTEÍNA (Método 2.057 A.O.A.C. adaptado en el departamento de nutrición y calidad del INIAP).**

**Tabla 2.4.1.2-1  
Determinación de Proteína**

PRINCIPIO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CALCULOS
<p>El nitrógeno de las proteínas y otros compuestos se transforman en sulfato de amonio al ser dirigidas en ácido sulfúrico en ebullición. El residuo se enfría, se diluye con agua y se le agrega hidróxido de sodio. El amonio presente se desprende y a la vez se destila y se recibe una solución de ácido bórico que luego se titula con ácido sulfúrico estandarizado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Balanza analítica</li> <li>➤ Aparato de digestión y destilación microkjeldhal</li> <li>➤ Balones Kjeldhal de 50 ml</li> <li>➤ Erlenmeyer de 250 ml</li> <li>➤ Bureta</li> </ul> <p><b>a. Reactivos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ácido sulfúrico</li> <li>➤ Ácido clorhídrico 0.02 N estandarizado</li> <li>➤ Hidróxido de sodio al 40%</li> <li>➤ Ácido bórico al 2%</li> <li>➤ Indicador mixto: Rojo de metilo al 0.1% y verde de bromocresol al 0.2% en alcohol de 95%</li> <li>➤ Mezcla catalizadora: 800 g de sulfato de potasio o sodio, 50 g de sulfato cúprico pentahidratado y 50 g de dióxido de selenio</li> <li>➤ Agua desmineralizada.</li> </ul>	<p><b>Digestión</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Pesar 0.04 g de muestra seca e introducirla en el balón de digestión Kjeldhal.</li> <li>➤ Añadir: 1.5 g de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> o Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 40 mg de SeO y 1 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. procurando no manchar las paredes del mismo.</li> <li>➤ Colocar el balón en el digestor y calentar (500C) hasta obtener un líquido transparente.</li> <li>➤ Enfriar el balón y a su contenido adicionar 4 ml de agua destilada para disolver el contenido que al enfriarse se solidifica.</li> </ul> <p><b>Destilación</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Verter lo anterior en el balón de destilación del equipo adicionando 4 ml de agua destilada para enjuagar el balón</li> <li>➤ Cerrar la llave y añadir de 8 a 10 ml de NaOH al 40%: NaS<sub>2</sub>O<sub>3</sub> al 5% (4:1), dejando pasar lentamente al balón de destilación.</li> <li>➤ Recibir el destilado en un balón conteniendo 5 ml de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> al 2% al que se le añade 1 o 2 gotas de indicador rojo de metilo azul de bromocresol. El tubo de salida del destilador debe estar sumergido en el vaso que contiene los reactivos.</li> <li>➤ Destilar hasta obtener unos 15 ml del destilado.</li> </ul> <p><b>Titulación</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Al destilado se le agrega 2 gotas de indicador mixto.</li> <li>➤ Titular el destilado con HCl, hasta que la solución cambien de color.</li> <li>➤ La determinación debe hacerse por duplicado.</li> </ul>	$\%P = (1.40)(F)[(V_1N_1 - N_1N_2)/m]$ <p><i>Donde:</i></p> <p>F = factor para transformar el % de N en proteína y que es específico para cada alimento.</p> <p>V<sub>1</sub> = Volumen de HCl N/10, empleado para titular la muestra en ml.</p> <p>N<sub>1</sub> = Normalidad del HCl.</p> <p>V<sub>2</sub> = Volumen de HCl N/10 empleado para titular el blanco en ml.</p> <p>m = Peso de la muestra en gramos.</p>



**2.6.1.3. DETERMINACIÓN DE CENIZAS (AACC Ensayo de la Asociación Americana de Químicos Cerealistas).**

**Tabla 2.4.1.3-1**

**Determinación de Ceniza.**

PRINCIPIO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CALCULOS
<p>La materia orgánica se quema a la temperatura más baja posible y la materia inorgánica remanente se enfría y pesa.</p> <p>El calentamiento se realiza en etapas, primero para eliminar el agua, a continuación para carbonizar el producto totalmente (esto se realiza en una sorbona) y, finalmente, para incinerar en horno de mufla a 650C.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Balanza analítica</li> <li>➤ Mufla eléctrica con temperatura regulable</li> <li>➤ Crisoles de porcelana</li> <li>➤ Desecador</li> <li>➤ Pinzas</li> <li>➤ Espátula</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Tarar los crisoles y pesarlos</li> <li>➤ Pesar 2 g de muestra (trigo)</li> <li>➤ Carbonizar el mechero en una sorbona, hasta que no se produzca hinchazón o producción de humos</li> <li>➤ Introducir los crisoles a la mufla (650C) hasta peso constante</li> <li>➤ Retirar los crisoles de la mufla, colocar en el desecador hasta que alcance temperatura ambiental (30min.).</li> <li>➤ Pesar</li> <li>➤ Se recomienda realizar el análisis al menos por duplicado.</li> </ul>	<p>Se expresan en porcentajes, y se deduce según la fórmula siguiente:</p> $\%C = \{(m_2 - m_1)/p\} * 100$ <p><i>Donde:</i></p> <p>m<sub>1</sub> = Masa en gramos del crisol</p> <p>m<sub>2</sub> = Masa en gramos del crisol con la muestra incinerada</p> <p>p = Peso de la muestra en gramos</p>

**2.6.1.4. DETERMINACIÓN DE GRASA (AACC Ensayo de la Asociación Americana de Químicos Cerealistas).**

**Tabla 2.4.1.4-1  
Determinación de Grasa**

PRINCIPIO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CALCULOS
<p>La grasa se extrae con éter de petróleo a partir de residuo desecado en la obtención del contenido de humedad. El solvente se elimina por evaporación y se pesa el residuo de grasa.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Equipo SOXHLET</li> <li>➤ Reverbero</li> <li>➤ Hexano</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Pesar 2 g de muestra, colocar en un papel filtro cerrado.</li> <li>➤ El papel filtro más la muestra colocar en un dedal de papel filtro y en el interior del equipo SOXHLET, embonar en el equipo y en el balón añadir un volumen de hexano.</li> <li>➤ Someter a calentamiento por 8 horas.</li> <li>➤ Luego de este tiempo sacar el cono de papel filtro, colocar seguido el balón que contiene el solvente graso, para recuperar el solvente, y obtener solo la grasa.</li> <li>➤ Secar la grasa en la estufa y pesar.</li> <li>➤ Determinar el porcentaje de grasa.</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>%EE = {(m<sub>2</sub> - m<sub>1</sub>)/p}*100</b></p> <p><i>Donde:</i></p> <p>m<sub>1</sub> = Masa en gramos del balón vacío</p> <p>m<sub>2</sub> = Masa en gramos del balón con la muestra tras el desecado</p> <p>m = Peso de la muestra en gramos</p>

**2.6.1.5. DETERMINACIÓN DEL FIBRA (AACC Ensayo de la Asociación Americana de Químicos Cerealistas).**

**Tabla 2.4.1.5-1**

**Determinación de Fibra**

PRINCIPIO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CALCULOS
<p>La muestra molida y desecada se hierve a flujo durante 2 horas con bromuro de cetiltrimetilamonio en ácido sulfúrico 1 N. El residuo filtrado y desecado se considera como fibra detergente ácida.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Estufa</li> <li>➤ Erlenmeyer de 50ml.</li> <li>➤ Condensador de dedo frio</li> <li>➤ Crisoles</li> <li>➤ Bromuro de cetiltrimetilamonio</li> <li>➤ Dekalina antiespumante</li> <li>➤ Acetona</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Moler todas las muestras con molino de martillos hasta pasar un tamiz de 1mm.</li> <li>➤ Tomar una sobremuestra y desecarla durante la noche en estufa a 95C</li> <li>➤ Enfriar la muestra en desecador</li> <li>➤ Pesar por duplicado, hasta el mg más próximo, 1g de muestra molida y desecada a un Erlenmeyer de 500ml</li> <li>➤ Añadir 100 ml de solución detergente ácida enfriada y 2 ml de Dekalina antiespuma</li> <li>➤ Hacer que entre en ebullición rápidamente (3-5min) y proseguir hirviendo ligera y uniformemente bajo reflujo durante 2 horas</li> <li>➤ Filtrar el contenido de matraz (por gravedad) a través de crisol filtrante previamente tarado</li> <li>➤ Lavar el matraz con agua destilada caliente añadiendo el líquido de los lados al crisol</li> <li>➤ Utilizando ligera succión lavar perfectamente el contenido del crisol con agua caliente (utilizar aproximadamente 300ml de agua caliente en total)</li> <li>➤ Lavar el residuo con acetona y succionarlo hasta dejarlo seco</li> <li>➤ Colocar el crisol con su contenido en estufa a 95C desecar durante la noche</li> <li>➤ Enfriar en desecador y pesar.</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>%F = (W<sub>2</sub>/W<sub>1</sub>)*100</b></p> <p><i>Donde:</i></p> <p>W<sub>1</sub> = Peso en gramos de la muestra</p> <p>W<sub>2</sub> = Peso en gramos del residuo.</p>

**2.6.1.6. DETERMINACIÓN DE VITAMINA E (Ensayo de vitaminas en preparación farmacéutica de John Wiley).**

**Tabla 2.4.1.6-1**

**Determinación de Vitamina E**

PRINCIPIO	MATERIALES Y REACTIVOS	PROCEDIMIENTO	CALCULOS
<p>Se basa en una titulación de oxido reducción con sulfato cérico, ya que el tocoferol es fácilmente oxidado por el sulfato cérico a tocoferol quinona. La solución que contenga vitamina E se titulará con el estándar de sulfato cérico usando difenilamina como indicador.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Probeta</li> <li>➤ Erlenmeyer</li> <li>➤ Vasos de precipitación</li> <li>➤ Refrigerante</li> <li>➤ Balón de destilación</li> <li>➤ Microbureta</li> <li>➤ Pipetas</li> <li>➤ Reverbero</li> <li>➤ Pinza de bureta</li> <li>➤ Pinzas universales</li> <li>➤ Probetas</li> </ul> <p><b>Reactivos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Sulfato cérico 0.1 N(A 0.1 N de solución se diluye 10 ml de sulfato cérico a 100 ml de ácido sulfúrico 1N)</li> <li>➤ Solución de sulfato de difenilamina (un gramo de difenilamina es disuelto en 10 ml de ácido sulfúrico)</li> <li>➤ Ácido sulfúrico</li> <li>➤ Etanol absoluto</li> <li>➤ Ácido sulfúrico etanólico (seis ml de ácido sulfúrico es mezclado con 44 ml de etanol).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Pesar 100 mg de muestra y disolver en 30 ml de alcohol absoluto.</li> <li>➤ Añadir a la muestra 20 ml de ácido sulfúrico etanólico y hervir en reflujo por 2 horas.</li> <li>➤ Enfriar la muestra y aforar en un frasco volumétrico con el solvente (etanol absoluto) hasta 100 ml.</li> <li>➤ Tomar una alícuota de 10 ml de la solución y añadir una gota de difenilamina y titular con sulfato cérico 0.01N.</li> </ul>	<p>Para cada ml gastado de sulfato cérico 0.01 N corresponde a 2.154 mg de DL-<math>\alpha</math>-tocoferol.</p>

### 2.6.1.7. DETERMINACIÓN DEL EXTRACTO LIBRE DE NITRÓGENO.

Tabla 2.4.1.7-1

Determinación del Extracto Libre de Nitrógeno

CÁLCULOS
<p><i>Se determina por el siguiente cálculo:</i></p> $\text{ELN} = 100 - (\% \text{Humedad} + \% \text{Proteína} + \% \text{Grasa} + \% \text{Cenizas} + \% \text{Fibra})$

## 2.7. DATOS EXPERIMENTALES.

### 2.7.1. ANÁLISIS PROXIMAL.

**Tabla 2.5.1-1**

**Análisis proximal del trigo a temperatura de secado 110C**

<b>PARÁMETROS</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>RESULTADOS</b>
Proteína	%	13,81
Grasas	%	2,89
Cenizas	%	1,67
Fibra	%	1,23
Extracto Libre de Nitrógeno	%	80,40

Fuente: Lab. Cestta (29-05-14)

### 2.7.2. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO.

**Tabla 2.5.2-1**

**Análisis microbiológico del trigo a temperatura de 22C**

<b>CONDICIONES</b>	<b>RECuento AEROBIOS MESOFILOS</b>	<b>COLIFORMES TOTALES</b>	<b>MOHOS Y LEVADURAS</b>
	<b>UFC/G</b>	<b>UFC/G</b>	<b>UFC/G</b>
T = 22 C H = 16%	35000	12	200000

Fuente: Lab. Bromatológico de F.C. Pecuarias (21-05-09)

**Tabla 2.5.2-2**

**Análisis microbiológico del trigo a temperatura de 60C.**

<b>CONDICIONES</b>	<b>RECuento AEROBIOS MESOFILOS</b>	<b>COLIFORMES TOTALES</b>	<b>MOHOS Y LEVADURAS</b>
	<b>UFC/G</b>	<b>UFC/G</b>	<b>UFC/G</b>
T = 60 C H = 8%	1080	3	1875

Fuente: Lab. Bromatológico de F.C. Pecuarias (21-05-09)

### 2.7.3. ANÁLISIS DE HUMEDAD.

**Tabla 2.5.3-1**

**Humedad luego de secado a 60 C**

PARAMETROS	UNIDADES	RESULTADOS
HUMEDAD	%	8,1
MATERIA SECA	%	92,9

Fuente: Lab. Bromatológico de F.C. Pecuarias (06-07-09)

**Tabla 2.5.3.-2**

**Humedad luego de secado a 110 C**

PARAMETROS	UNIDADES	RESULTADOS
HUMEDAD	%	16,0
MATERIA SECA	%	84,0

Fuente: Lab. Bromatológico de F.C. Pecuarias (06-07-09)

### 2.7.4. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL SECADOR DE BANDEJAS.

**Tabla 2.5.4 - 1**

**Datos para el secado de trigo en el secador de bandejas**

PARÁMETRO	VALOR
Caudal del sólido húmedo; Gs	1,00Kg /1,00h = 1,00 Kg/h
Peso del sólido seco; s	0,858Kg
Humedad del sólido a la entrada; $x_1$	0,164Kg H <sub>2</sub> O/Kg sólido seco
Humedad del sólido a la salida; $x_2$	0,127 Kg H <sub>2</sub> O/Kg sólido seco
Humedad del aire a la entrada; $Y_1$	0,011 Kg H <sub>2</sub> O/Kg aire seco
Temperatura del sólido a la entrada; $T_{S1}$	22 C
Temperatura del sólido a la salida; $T_{S2}$	47 C
Temperatura del aire a la entrada; $T_2$	22 C
Temperatura del aire a la salida; $T_1$	45 C
Humedad del aire a la entrada a T de 22C; $Y_2$	0,011 Kg H <sub>2</sub> O/Kg aire seco( $X_{RELATIVA}$ 65%)
Área de transferencia; $A_T$	0,369m <sup>2</sup>
Largo de la bandeja	48,5cm.
Ancho de la bandeja	38,0 cm.
Espesor de la bandeja	0,1 cm
Humedad inicial; $X_i$	0, 164Kg H <sub>2</sub> O/Kg s. seco
Humedad crítica; $X_c$	0,142 Kg H <sub>2</sub> O/Kg s. seco
Humedad final; $X_f$	0, 078Kg H <sub>2</sub> O/Kg s. seco
Humedad de equilibrio; $X^*$	0,040g H <sub>2</sub> O/Kg s. seco

Fuente: González J, Paucar E.

## 2.7.5. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL SECADO DE TRIGO EN EL SECADOR POR FLUIDIZACIÓN.

**Tabla 2.5.5 - 1**

**Datos para determinación de la densidad real de la partícula en una probeta**

PARÁMETRO	VALOR
Masa de trigo a secar; m	30,0g
Volumen del agua; $V_1$	50,0 ml
Volumen desplazado del agua por el trigo; $V_2$	74,0ml

Fuente: González J, Paucar E.

**Tabla 2.5.5 - 2**

**Datos de longitud;  $l$  y diámetro;  $d_p$ , para la partícula de trigo**

N de ensayo	$l$ (mm)	$d_p$ (mm)
1	5,50	3,80
2	5,20	3,30
3	5,30	3,80
4	5,20	3,60
5	5,70	3,30
6	5,70	3,50
7	5,30	3,30
8	5,90	3,80
9	5,70	3,20
10	5,90	3,23
<b>Media</b>	<b>5,54</b>	<b>3,48</b>
<b>Desviación</b>	<b>0,28</b>	<b>0,25</b>

Fuente: González J, Paucar E.

**Tabla 2.5.5 - 3**

**Tiempo, peso húmedo y seco para las curvas de secado a 1 Kg y 2Kg**

$\theta$ (h)	Ps húmedo	Ps seco(2Kg)	Ps seco(1Kg)
0,000	0,040	0,0343	0,0343
0,083	0,040	0,0359	0,0355
0,167	0,040	0,0368	0,0363
0,250	0,040	0,0372	0,0369
0,333	0,040	0,0376	0,0372
0,417	0,040	0,0378	0,0373

Fuente: González J, Paucar E.



**Tabla 2.5.5 - 5**

**Datos experimentales y asumidos para el dimensionamiento del fluidizador**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
Diámetro del lecho; D	0,193m.
Altura del lecho fluidizado, con 1Kg de m; L	0,120m.
Temperatura del aire de operación; T	60C = 333K
Caudal del sólido húmedo; Gs	1,00Kg /0,1h = 10,00 Kg/h
Peso del sólido seco; s	0,859Kg
Humedad del sólido a la entrada; $x_1$	0,166Kg H <sub>2</sub> O/Kg sólido seco
Humedad del sólido a la salida; $x_2$	0,127Kg H <sub>2</sub> O/Kg sólido seco
Humedad del aire a la entrada; $Y_1$	0,011 Kg H <sub>2</sub> O/Kg aire seco
Temperatura del sólido a la entrada; $T_{S1}$	22 C
Temperatura del sólido a la salida; $T_{S2}$	55 C
Temperatura del aire a la entrada; $T_2$	60 C
Temperatura del aire a la salida; $T_1$	57C
Capacidad calorífica del trigo; Cps	0,436Kcal/Kg C
Capacidad calorífica del agua; Cpl	1,0Kcal/Kg C
Humedad del aire a la entrada a T de 22C; $Y_2$	0,011 Kg H <sub>2</sub> O/Kg aire seco( $X_{Relativa}$ 65%)
Humedad del aire a la entrada; $Y_2$	0,011 Kg H <sub>2</sub> O/Kg aire seco
Área de transferencia; $A_T$	0,131m <sup>2</sup>

Fuente: González J, Paucar E.

**2.8. DATOS ADICIONALES**

**Tabla 2.6 - 1**

**Datos adicionales para el diseño del secador por fluidización**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
Presión atmosférica (Riobamba); P	545mm Hg = 0,72 at.
Temperatura ambiente; $T_{amb}$	22C
Constante de los gases ideales; R	0,082 at.m <sup>3</sup> /Kmol.K.
Peso molecular del aire; M	29Kg/Kmol
Aceleración de la gravedad; g	9,8 m/s <sup>2</sup> .
Factor gravitacional; $g_c$	9,8 Kgm.m/s <sup>2</sup> .Kgf
Capacidad calorífica del trigo; Cps	0,436Kcal/Kg C
Capacidad calorífica del agua; Cpl	1,0Kcal/Kg C
Viscosidad del aire a 60C; $\mu_{aire}$	1,97*10 <sup>-5</sup> Kg/m.s = 0,071 Kg/mh
Conductividad térmica; K	0,021 Kcal/m.h.C

Fuente: González J, Paucar E.

# **CAPÍTULO III**

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN**

### **3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR POR FLUIDIZACION PARA LA DESHIDRATAACION DE TRIGO.**

#### **3.1. DISEÑO DEL EQUIPO DE SECADO.**

##### **3.1.4. PRUEBAS DE ENSAYO.**

Tanto las pruebas de secado como las pruebas de ensayo y determinación de las propiedades físico-químicas, bromatológicas y microbiológicas previa a la operación de secado, se realizaron en el laboratorio de físico-química de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH. Datos que fueron tabulados y evaluados para el soporte básico del dimensionamiento del equipo a construir, como es la determinación de la humedad, tiempo y velocidad de secado, así, también bromatológicos como análisis proximal y también el análisis microbiológico realizado en un secador de bandejas y otros que fueron realizados en el laboratorio de la Facultad de Ciencias Pecuarias y en el CESTTA.

##### **3.1.5. VARIABLES DE PROCESO.**

###### **3.1.5.1. CÁLCULOS DE LA HUMEDAD; X.**

De la Tabla 2.5.4-1, con datos de peso trigo húmedo y seco, empleando la Ec. 1.3.2-1 se tiene la humedad de inicial de proceso.

$$X = \frac{\text{Peso solido humedo (Kg s. humedo)} - \text{Peso del solido seco (Kg s. seco)}}{\text{Peso del solido seco (Kg s. seco)}}$$

$$X = \frac{(1,00 \text{ Kg.s.húmedo} - 0,8578 \text{ Kg.s.seco})}{0,8578 \text{ Kg.s.seco}}$$

$$X = 0,1658 \text{ Kg.H}_2\text{O} / \text{Kg.s.seco}$$

###### **3.1.5.2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL TRIGO.**

###### **3.1.5.2.1. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL; $\rho_p$ .**

De la Tabla 2.5.5-1 se tiene la diferencia del volumen desplazado en la probeta ocasionado por la muestra, según el principio de Arquímedes en la Ec. 1.3.2-2, se tiene:

$$\rho_p = \frac{m}{V_2 - V_1}$$

$$\rho_p = \frac{30g}{(74 - 50)ml}$$

$$\rho_p = 1,25 \frac{g}{ml} = 1250 \frac{Kg}{m^3}$$

### 3.1.5.2.2. ESTIMACIÓN DEL DIÁMETRO DE LA PARTÍCULA; $D_p$ .

Asumiendo que el grano que se aproxima a la forma cilíndrica estimamos el diámetro de la partícula, usando datos promedios de longitud y diámetro de la Tabla 2.5.5-2 y de las ecuaciones para la estimación del diámetro de la partícula, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Superficie de la partícula: } s_p &= 2(\pi/4)d_p^2 + \pi d_p l = 2(\pi/4)(0,0035)^2 + \pi * 0,0035 * 0,0056. \\ &= 7,96 * 10^{-5} m^2. \end{aligned}$$

$$\text{Volumen de la partícula: } v_p = (\pi/4)d_p^2 l = (\pi/4)(0,0035)^2 * 0,0056 = 5,20 * 10^{-8} m^3.$$

$$\text{Superficie específica: } \alpha_s = s_p/v_p = 7,96 * 10^{-5} / 5,20 * 10^{-8} = 1530,77 m^{-1}.$$

A partir de estos resultados anteriores es posible calcular el diámetro de la partícula empleando la Ec. 1.3.2-3, para un factor de forma;  $\Gamma = 0,85$  (Valor teórico) se tiene:

$$D_p = 6(\Gamma) / \alpha_s = 6(0,85) / 1530,77 m^{-1} = 0,0033m;$$

### 3.1.5.2.3. DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD DE FLUIDIZACIÓN; $\epsilon$ .

Determinación del volumen del lecho de la Ec. 1.3.2-8 teniendo en cuenta valores de diámetro del lecho y altura (longitud) alcanzada por las partículas a ser fluidizadas dados en la Tabla 2.6-1; reemplazando en la; se tiene:

$$V_L = \frac{\pi D^2}{4} \times L$$

$$V_L = \frac{\pi(0,193)^2}{4} \times 0,12$$

$$V_L = 3,51 \times 10^{-3} m^3$$

Determinación de la densidad del lecho dada de la Ec. 1.3.2-9 con un  $m_s = 1$  Kg de muestra húmeda se tiene:

$$\rho_L = \frac{m_s}{V_L}$$

$$\rho_L = \frac{1 \text{ Kg}}{3,51 \times 10^{-3} \text{ m}^3}$$

$$\rho_L = 284,85 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Para la porosidad del lecho fluidizado utilizando la Ec. 1.3.2-7, en la que se tiene:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_L}{\rho_p}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{284,85}{1250}$$

$$\varepsilon = 0,77$$

### 3.1.5.3. DETERMINACIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN; $\Delta P$ .

Se determina la densidad del fluido, en este caso el aire se comporta como un gas ideal ( $n = 1$ ; número de moles) a 333K (60C) y con valores constantes de gas ideal de la Tabla 2.6-1, empleando la Ec. 1.3.2-11 para la densidad del fluido, se tiene:

$$\rho_g = \frac{P \times M}{R \times T}$$

$$\rho_g = \frac{0,72 \times 29}{0,082 \times 333}$$

$$\rho_g = 0,77 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_g = 0,76 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Reemplazando en la Ec. 1.3.2-10, de la caída de presión, obtenemos la diferencia de presión formada dentro de la cámara de secado, producida por el fluido suministrado:

$$\Delta P = L \times (\rho_s - \rho_g) \times (1 - \varepsilon) \times \left( \frac{g}{gc} \right)$$

$$\Delta P = 0,12 \times (1250 - 0,765) \times (1 - 0,77) \times \left( \frac{9,8}{9,8} \right)$$

$$\Delta P = 34,48 \frac{Kgf}{m^2} * \frac{1N}{0,102Kgf} = 338,03 \frac{N}{m^2} * \frac{1at}{1,01 * 10^5 N / m^2} = 0,0033at$$

### 3.1.5.4. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD CRÍTICA; $v_{mf}$ .

#### 3.1.5.4.1. POROSIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN; $\epsilon_{mf}$ .

Con valores de diámetro del secador para una altura estática alcanzado por las partículas de trigo viene de la Ec. 1.3.2-8 donde;  $L = 0,05$  m, en 1Kg de muestra, por datos de la Tabla 2.5.5-5 de datos experimentales y se tiene:

$$V_L = \frac{\pi(0,193)^2}{4} * 0,05$$

$$V_L = 1,46 \times 10^{-3} m^3$$

Determinación de la densidad del lecho de la Ec. 1.3.2-9 para una altura estática  $m_s = 1$  Kg de muestra húmeda, reemplazando valores en ; se tiene:

$$\rho_L = \frac{m_s}{V_L}$$

$$\rho_L = \frac{1Kg}{1,46 * 10^{-3} m^3}$$

$$\rho_L = 683,64 \frac{Kg}{m^3}$$

Para la porosidad del lecho estático, haciendo uso de Ec. 1.3.2-7, se tiene:

$$\epsilon_{mf} = 1 - \frac{\rho_L}{\rho_p}$$

$$\epsilon_{mf} = 1 - \frac{683,64}{1250}$$

$$\epsilon_{mf} = 0,45$$

#### 3.1.5.4.2. CÁLCULO DEL NÚMERO DEL REYNOLDS; $N_{Re}$ .

Se determina un  $N_{Re}$  de la Ec. 1.3.2-12 que nos permite identificar el tipo de flujo y la ecuación de velocidad crítica y de fluidización. Con valores de diámetro de partícula y propiedades del aire a las condiciones de proceso en la Tabla 2.6-1, reemplazando, se tiene:

$$N_{Re} = \frac{D_p v \rho}{\mu_{aire}}$$

Para la velocidad mínima  $v_{mf} = 3,70$  m/s

$$N_{Re} = \frac{0,00333 \times 3,70 \times 0,765}{1,97 \times 10^{-5}}$$

$$N_{Re} = 478,46 \text{ (Régimen turbulento)}$$

Para la velocidad del fluido de operación dado por el venterol;  $v_f = 5,5$  m/s, se tiene:

$$N_{Re} = 711,22 \text{ (Régimen turbulento)}$$

La velocidad crítica de la Ec. 1.3.2-13 o mínima de fluidización, se obtiene:

$$v_{mf} = 0,75 \sqrt{[(\rho_s - \rho_g)/\rho_g] \times g \times \varepsilon_{mf} \times D_p}$$

$$v_{mf} = 0,75 \sqrt{[(1250 - 0,76)/0,76] \times 9,8 \times 0,45 \times 0,003}$$

$$v_{mf} = 3,70 \frac{m}{s}$$

### 3.1.5.5. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA DEL AIRE; $\theta_g$ .

El tiempo del fluido en contacto con las partículas, viene dado en la Ec. 1.3.2-14 de residencia del aire, con una altura de 12cm de lecho fluidizado, en la que se tiene:

$$\theta_g = \frac{L - \varepsilon}{v_f}$$

$$\theta_g = \frac{12 - 0,77}{550}$$

$$\theta_g = 0,0204 \text{ s}$$

### 3.1.5.6. CÁLCULO DE LA FLUJO MÁSICO REAL DEL AIRE DE SECADO; $G$ .

Flujo real de proceso suministrado por el venterol para un área de transferencia (área alcanzada del lecho en fluidización) de  $0,1313\text{m}^2$ , se tiene en la Ec. 1.3.2-15, así:

$$G = v_f \rho_g A_T$$

$$G = 5,5 \times 0,765 \times 0,1313$$

$$G = 0,55 \frac{Kg}{s} = 1988,80 \frac{Kg \text{ aire}}{h}$$

### 3.1.5.7. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE SECADO EN EL SECADOR POR LECHO FLUIDIZADO; $W_T$ .

Los siguientes datos se obtienen tabulando las curvas de secado obteniendo los valores de humedades respectivas por medio de los Gráficos 3.2.3-2 de la velocidad en función de la humedad y 3.2.3-3 de la inversa de la velocidad en función de la humedad media.

➤ **Período antecrítico;  $W_C$ .**

De la Ec. 1.3.2-17, se tiene:

$$W_C = \frac{S}{A} \left( -\frac{X_i - X_c}{\Delta\theta} \right)$$
$$W_C = \frac{0,8588}{0,1313} \left( \frac{0,166 - 0,127}{0,08 - 0,0} \right)$$
$$W_C = 3,18 \frac{Kg}{m^2h}$$

➤ **Período poscrítico;  $W_D$ .**

De la Ec. 1.3.2-18, se tiene:

$$W_D = \frac{S}{A} \left( \frac{X_c - X^*}{\Delta\theta} \right)$$
$$W_D = \frac{0,8588}{0,1313} \left( \frac{0,127 - 0,06}{0,42 - 0,08} \right)$$
$$W_D = 1,29 \frac{Kg}{m^2h}$$

Por sumatoria de las velocidades de los diferentes períodos, se tiene la velocidad total de la Ec. 1.3.2-16, así:

$$W_T = W_C + W_D$$
$$W_T = (3,19 + 1,29) \frac{Kg}{hm^2}$$
$$W_T = 4,48 \frac{Kg}{hm^2}$$



### 3.1.5.8. CÁLCULO DE TIEMPO DE SECADO; $\theta_T$ .

#### ➤ Período anticrítico; $\theta_a$ .

De la Ec. 1.3.2-20, se tiene:

$$\theta_a = \frac{S}{A} \left( \frac{X_i + X_c}{W_c} \right)$$

$$\theta_a = \frac{0,8588}{0,1313} \left( \frac{0,166 - 0,127}{3,189} \right)$$

$$\theta_a = 0,08h = 4,8min.$$

#### ➤ Período poscrítico; $\theta_p$ .

Por integración de la Ec. 1.3.2-21 y determinando por el método gráfico el área bajo la curva de la inversa de la velocidad en función de la humedad media Grafico 3.1.3-3 para 1 Kg, se tiene el valor de la integral y posteriormente el reemplazo.

$$\int_{X_f}^{X_c} \frac{dX}{W} = \Sigma A_i = 0,00275 + 0,0106 + 0,00497 + 0,00948 + 0,00212 + 0,011 + 0,00043 + 0,0056$$
$$= 0,047$$

$$\theta_p = \frac{0,8588}{0,1313} (0,047)$$

$$\theta_p = 0,31h$$

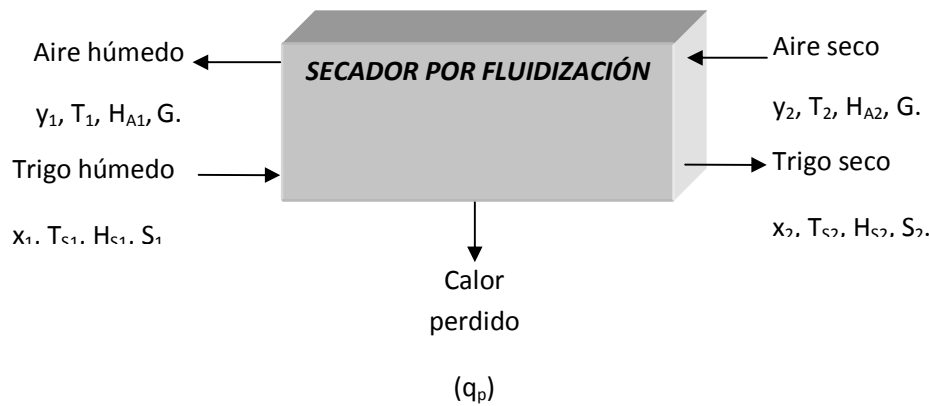
De la Ec. 1.3.2-19, por sumatoria de los tiempos para los diferentes periodos, se tiene:

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

$$\theta_T = 0,08 + 0,31$$

$$\theta_T = 0,39h = 23,22min.$$

### 3.1.6. BANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA EL SECADOR POR LECHO FLUIDIZADO.



#### 3.1.6.1. BALANCE DE MASA.

$$x_1 G_S + Y_2 G = x_2 G_S + Y_1 G$$

El secado en un secador por lecho fluidizado en diferentes casos es hasta unas 10 veces más rápida que en otros secadores. Considerando que en nuestro proceso se dé este caso, se toma en cuenta un tiempo de 1 hora que se demora el secador de bandejas hasta llegar a una humedad de 0,127 bs (Humedad requerida = 12-14% bs), reduciendo el tiempo a la décima parte;  $60\text{min}/10 = 6\text{min}$  (0,1h). De manera que se prevé para 1 Kg un tiempo de secado de 0,1h, y también un flujo másico de  $1/0,1 = 10 \text{ Kg/h}$  ( $G_S$ ).

De acuerdo a la carta la carta psicométrica (Anexo I), a 545 mm.Hg la humedad relativa de 65%, considerando que el aire se encuentra a 22 C antes de entrar a la cámara de secado a 60C y con datos humedad y flujos másicos de la Tabla 2.5.5-3. De los datos experimentales se tiene:

$$Y_2 = \text{Humedad del aire a la entrada a } 22\text{C} = 0,011 \text{ Kg } H_2O/\text{Kg aire seco}$$

Remplazando valores:

$$(0,1662)(10,00) + (0,011)G = (0,127)(10,00) + Y_1 G$$

$$1,662 + (0,011)G = 1,27 + Y_1 G$$

$$Y_1 G = 0,392 + (0,011)G$$

### 3.1.6.2. BALANCE DE ENERGIA.

$$H_{S1}G_S + H_{A2}G = H_{S2}G_S + H_{A1}G + q_p$$

#### 3.1.6.2.1. CÁLCULO DE LAS ENTALPÍAS DEL SÓLIDO (Trigo); $H_S$ .

Para calcular las entalpías del sólido se obtiene de la Ec. 1.3.2-27, con datos de capacidad calorífica para el sólido y del líquido (1,0Kcal/Kg C), humedad y temperatura de la Tabla 2.5.5-3 de datos experimentales y Tabla 2.6-1 de datos adicionales, se tiene:

➤ *Entrada:*

$$H_{S1} = (Cps + x_1)T_{s1}$$

$$H_{S1} = (0,436 + 0,1662)22 \frac{Kcal}{Kg C} \cdot C$$

$$H_{S1} = 13,25 \frac{Kcal}{Kg}$$

➤ *Salida:*

$$H_{S2} = (Cps + x_2)T_{s2}$$

$$H_{S2} = (0,436 + 0,127)55 \frac{Kcal}{Kg C} \cdot C$$

$$H_{S2} = 30,67 \frac{Kcal}{Kg}$$

#### 3.1.6.2.2. CÁLCULO DE LAS ENTALPÍAS DEL AIRE; $H_{A2}$ .

Para calcular la entalpía de aire con la Ec. 1.3.2-28, con datos experimentales de humedad y temperatura de la Tabla 2.5.5-3, se obtiene:

➤ *Entrada*

$$H_{A2} = (0,24 + 0,46Y_2)T_2 + 597,2Y_2$$

$$H_{A2} = (0,24 + (0,46 \times 0,011)) 60 + (597,2 \times 0,011)$$

$$H_{A2} = 21,27 \frac{Kcal}{Kg}$$

➤ *Salida*

$$H_{A1} = (0,24 + 0,46Y_1)T_1 + 597,20Y_1$$

$$H_{A1} = (0,24 + 0,46Y_1)57 + 597,20Y_1$$

$$H_{A1} = 13,68 + 623,42Y_1$$

El cálculo de la cantidad necesaria de aire y su humedad de salida se efectuaron por aplicación de un balance simultáneo de materia y energía, para determinar el balance consideramos un sistema adiabático,  $q_p = 0$ , solo para el cálculo del sistema de ecuaciones, ya que por teoría y en la práctica se considera un 10% de pérdidas del calor total suministrado al sistema obteniendo:

$$H_{S1}G_s + H_{A2}G = H_{S2}G_s + H_{A1}G + q_p$$

$$(13,25)(10,0) + 21,27 G = (30,67)(10,0) + (13,68 + 623,42Y_1)G$$

$$132,5 + (21,27)G = 306,7 + (13,68)G + (623,42)Y_1G$$

$$(7,59)G = 174,2 + (623,42)Y_1G$$

$$(623,42)Y_1G = (7,59)G - 174,2$$

*Remplazando del balance de masa:*

$$Y_1G = 0,392 + (0,011)G$$

*Tenemos:*

$$(623,42)(0,329 + (0,011)G) = (7,59)G - 174,2$$

$$205,10 + (6,86)G = (7,59)G - 174,2$$

$$G = 519,59 \frac{Kg \text{ aire seco}}{h}$$

### **3.1.6.2.3. CÁLCULO DE LA HUMEDAD DE SALIDA DEL AIRE; $Y_1$ .**

A partir de la cantidad de aire a suministrar se obtiene la humedad teórica a la salida del fluidizador.

$$Y_1G = 0,392 + (0,011)G$$

$$Y_1(519,59) = 0,392 + (0,011)(519,59)$$

$$Y_1 = 0,01175Kg \text{ H}_2\text{O}/Kg \text{ aire seco}$$

### 3.1.6.2.4. CÁLCULO DE LA ENTALPÍA DEL AIRE A LA SALIDA; $H_{A1}$ .

$$H_{A1} = 13,68 + 623,42Y_1$$

$$H_{A1} = 13,68 + 623,42 \times 0,01175$$

$$H_{A1} = 21,01 \frac{Kcal}{Kg}$$

### 3.1.6.2.5. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE CALOR PERDIDO; $q_p$ .

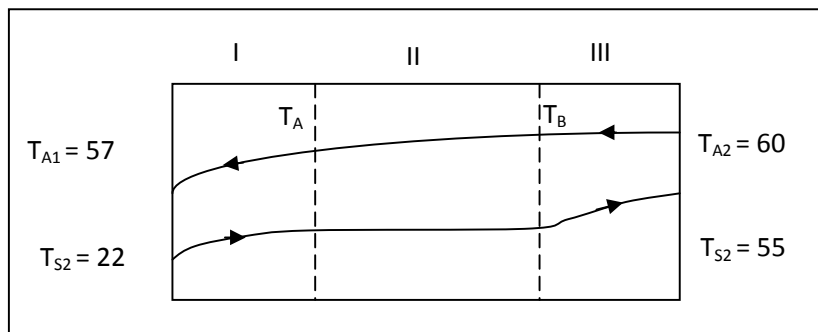
Las pérdidas de calor teórico hacia el exterior para secadores de este tipo se estiman en un 10% (Ocon, J y Tojo, G) del balance general de energía de la Ec. 1.3.2-29, se tiene:

$$H_{S1}G_s + H_{A2}G = H_{S2}G_s + H_{A1}G + 0,10 q_p$$

$$0,10 q_p = 11184,10 - 11220,78$$

$$q_p = -366,80 \frac{Kcal}{Kg}$$

### 3.1.6.3. CÁLCULOS DEL NÚMERO DE ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN; $N_{OT}$ .



**Graf. 3.1.3.3-1.** Representación esquemática de las zonas de secado.

Se determina  $T_B$ , por aplicación de un balance de energía a la zona III y partiendo de los valores de las capacidades caloríficas para el aire y sólido húmedo respectivamente, de la Tabla 2.5.5-3 y Tabla 2.6-1, de la Ec. 1.3.2-3, para temperatura de salida del aire, se tiene:

Determinación del  $C_{PSH}$  de la Ec. 1.3.2-32, las cuales cambian al variar el contenido de humedad, así:

$$C_{PSH} = C_P + X_2 C_{P1}$$

$$C_{PSH} = 0,436 + 0,127 \times 1$$

$$C_{PSH} = 0,563 \frac{Kcal}{Kg.C}$$

De igual forma para  $C_{pSH}$  de la Ec. 1.3.2-33, así:

$$C_{PAH} = 0,24 + 0,46Y_2$$

$$C_{PAH} = 0,24 + 0,46(0,011)$$

$$C_{PAH} = 0,245 \frac{K_{cal}}{K_g.C}$$

Remplazando tenemos:

$$T_B = T_{A2} - \frac{C_{PSH} \times G_S}{C_{PAH} \times G} (T_{S2} - T_W)$$

$$T_B = 60 - \frac{0,563 \times 10}{0,245 \times 519,59} (55 - T_W)$$

Para determinar  $T_B$ , se asume  $T_W$  (28C) y luego por iteración se convergen al valor real, es decir, debe ser similar a los valores interpolados en la carta psicométrica, así se tiene:

$$T_B = 58,81C$$

$$Y_2 = 0,011$$

Por un balance de energía para la zona II se tiene  $T_A$ ; dado de la Ec. 1.3.2-31. De igual modo obtenemos las capacidades caloríficas húmedas:

Para el sólido:

$$C_{PSH} = C_{ps} + X_1 C_{p1}$$

$$C_{PSH} = 0,436 + 0,1662 \times 1$$

$$C_{PSH} = 0,602 \frac{K_{cal}}{K_g.C}$$

Y para el fluido:

$$C_{PAH} = 0,24 + 0,46Y_1$$

$$C_{PAH} = 0,24 + 0,46(0,01175)$$

$$C_{PAH} = 0,245 \frac{K_{cal}}{K_g.C}$$

Remplazando tenemos:

$$T_A = T_{A1} + \frac{C_{PSH} \times G_S}{C_{PAH} \times G} (T_W - T_{s1})$$

$$T_A = 57 + \frac{0,602 \times 10}{0,245 \times 519,59} (T_W - 22)$$

$$T_A = 57,28 C$$

De la Ec. 1.3.2-34 general, se calcula el  $N_{OT}$  para cada zona, así:

*Zona III:*

$$(N_{OT})_{III} = \frac{T_{A2} - T_B}{(T_B - T_W) - (T_{A2} - T_{S2})} \ln \frac{(T_B - T_W)}{(T_{A2} - T_{S2})}$$

$$(N_{OT})_{III} = \frac{60 - 58,81}{(58,81 - 28) - (60 - 22)} \ln \frac{(58,81 - 28)}{(60 - 55)}$$

$$(N_{OT})_{III} = 0,27$$

*Zona II:*

$$(N_{OT})_{II} = \ln \frac{T_B - T_W}{T_A - T_W}$$

$$(N_{OT})_{II} = \ln \frac{58,81 - 28}{57,28 - 28} = 58,16 C$$

$$(N_{OT})_{II} = 0,051$$

*Zona I:*

$$(N_{OT})_I = \frac{T_A - T_{A1}}{(T_{A1} - T_{S1}) - (T_A - T_W)} \ln \frac{(T_{A1} - T_{S1})}{(T_A - T_W)}$$

$$(N_{OT})_I = \frac{57,28 - 57}{(57 - 22) - (57,28 - 28)} \ln \frac{(57 - 22)}{(57,28 - 28)}$$

$$(N_{OT})_I = 0,0088$$

*Tenemos:*

$$(N_{OT})_T = 0,331$$

#### **3.1.6.4. CÁLCULO DE LA LONGITUD DE LA UNIDAD DE TRANSMISIÓN; $H_{OT}$ .**

De la Ec. 1.3.2-35, se obtiene  $H_{OT}$ , considerando una altura estática ( $Z_s$ ) de 0,05 m que viene a ser la altura de 1 Kg de sólido en condiciones estáticas y un diámetro de cámara de secado de 0,0392 m, así:

$$H_{OT} = \frac{Z_s}{N_{OT}}$$

$$H_{OT} = \frac{0,05}{0,331}$$

$$H_{OT} = 0,151$$

### 3.1.6.5. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR; $U_{\theta}$ .

El coeficiente de transmisión de calor desde la fuente de calor hacia el fluido en la Ec. 1.3.2-37, así se tiene:

$$U_{\theta} = \frac{G \times C_{PAH}}{H_{OT}}$$

$$U_{\theta} = \frac{519,59 \times 0,245}{0,151}$$

$$U_{\theta} = 843,04 \frac{K_{cal}}{h \cdot C}$$

### 3.1.6.6. CÁLCULO DEL CALOR NECESARIO PARA CALENTAR EL SOLIDO (22 C a 55C).

Para obtener el calor sensible, se parte de la Ec. 1.3.2-38, reemplazando se tiene:

$$q = G_S \times C_{PS} \times \Delta T$$

$$q = 10 \times 0,436 \times (55 - 22)$$

$$q = 143,88 \frac{K_{cal}}{h}$$

### 3.1.6.7. CÁLCULO DEL CALOR NECESARIO PARA EVAPORAR EL AGUA DEL SOLIDO.

Para obtener el calor latente de vaporización, consideramos la temperatura del sólido en la superficie expresado en la Ec. 1.3.2-39.

Determinamos primero la cantidad de agua evaporada.

$$X_1 \times G_S = 0,166 \times 10 = 1,66 \frac{Kg}{h}$$

$$X_2 \times G_S = 0,127 \times 10 = 1,27 \frac{Kg}{h}$$

$$\text{Agua evaporada} = X_1 \times G_S - X_2 \times G_S$$

$$\text{Agua evaporada} = 1,662 - 1,27$$

$$\text{Agua evaporada} = 0,392 \frac{Kg}{h}$$



Del Anexo II tenemos:  $\lambda = 566,05 \text{Kcal/Kg}$  a 55 C, reemplazando:

$$q = 0,392 \times \lambda = 221,22 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

### 3.1.6.8. CÁLCULO DE DEL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN; $h_g$ .

Para el coeficiente de convección referido a la Ec. 1.3.2-40 en la transferencia de calor del gas-sólido a una temperatura de 60C, del fluido para las condiciones de operación de la Tabla 2.6-1 por la, tenemos.

$$Nu'' = \frac{h_g \times D_p}{k} = 0,0135 Re^{1,3} = 0,0135 \left( \frac{D_p G}{\mu} \right)^{1,3}$$

$$h_g = 0,0135 \left( \frac{0,0033 \times 519,59}{0,071} \right)^{1,3} \times \left( \frac{0,0214}{0,0033} \right)$$

$$h_g = 5,51 \frac{\text{Kcal}}{\text{h. m}^2 \text{C}}$$

### 3.2. RESULTADOS.

Tabla 3.2-1

Valores calculados para el dimensionamiento del equipo

PARAMETROS	RESULTADO
Densidad real de la partícula; $\rho_p$ .	$1250 \frac{Kg}{m^3}$
Estimación del Diámetro de la Partícula; $D_p$ .	0,003 m
Densidad del lecho fluidizado; $\rho_L$ .	$284,85 \frac{Kg}{m^3}$
Porosidad de fluidización; $\epsilon$ .	0,77
Porosidad mínima de fluidización; $\epsilon_{mf}$ .	0,45
Densidad del gas a 60C; $\rho_g$ .	$0,76 \frac{Kg}{m^3}$
Caída de presión; $\Delta P$ .	0,003 at
Velocidad crítica de fluidización; $v_{mf}$ .	$3,70 \frac{m}{s}$
Velocidad real de fluidización; $v_f$ .	$5,50 \frac{m}{s}$
Tiempo de residencia del aire; $\theta_g$ .	0,020 s
Flujo másica real del aire de secado; $G$ .	$1988,80 \frac{Kg \text{ aire}}{h}$

Fuente: González J, Paucar E

Tabla 3.2-2

Valores caudal másico, velocidad y tiempo de secado para el secador de bandejas y fluidización

SECADOR DE BANDEJAS.		SECADOR POR LECHO FLUIDIZADO.	
$G_S = 1,00 \frac{\text{Kg solido}}{\text{h}}$		$G_S = 10,00 \frac{\text{Kg solido}}{\text{h}}$	
VELOCIDAD DE SECADO.		VELOCIDAD DE SECADO.	
Crítica	Poscrítico	Crítica	Poscrítico
$W_C = 0,104 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2\text{h}}$	$W_D = 0,119 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2\text{h}}$	$W_C = 3,189 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2\text{h}}$	$W_D = 1,289 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2\text{h}}$
$W_T = 0,223 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2\text{h}}$		$W_T = 4,478 \frac{\text{Kg}}{\text{hm}^2}$	
TIEMPO DE SECADO.		TIEMPO DE SECADO.	
Crítico	Poscrítico	Crítico	Poscrítico
$\theta_a = 0,50h = 30 \text{ min}$	$\theta_P = 1,13h = 67,8 \text{ min}$	$\theta_a = 0,08h = 4,8 \text{ min.}$	$\theta_P = 0,307h = 18,42 \text{ min}$
$\theta_T = 1,63h = 97,80 \text{ min}$		$\theta_T = 0,387h = 23,22 \text{ min}$	

Fuente: González J, Paucar E

**Tabla 3.2-3**

**Valores de flujo másico aire, humedad y calor perdido para el secador de bandejas y fluidización**

<b>SECADOR DE BANDEJAS.</b>		<b>SECADOR POR LECHO FLUIDIZADO.</b>	
<b>CANTIDAD NECESARIA DE AIRE CAUDAL; G.</b>		<b>CANTIDAD NECESARIA DE AIRE CAUDAL; G.</b>	
$G = 18,05 \frac{\text{Kg aire seco}}{\text{h}}$		$G = 519,59 \frac{\text{Kg aire seco}}{\text{h}}$	
<b>HUMEDAD DEL AIRE; Y.</b>		<b>HUMEDAD DEL AIRE; Y.</b>	
<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
$Y_2 = 0,011 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg aire seco}$	$Y_1 = 0,0157 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg aire seco}$	$Y_2 = 0,011 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg aire seco}$	$Y_1 = 0,0118 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg aire seco}$
<b>CANTIDAD DE CALOR PERDIDO; <math>q_P</math></b>		<b>CANTIDAD DE CALOR PERDIDO; <math>q_P</math></b>	
$q_P = - 38,39 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$		$q_P = - 366,80 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$	

**Fuente:** González J, Paucar E

Tabla 3.2-4

Valores calculado para la zona de secado fluidización

PARÁMETROS	VALORES
NÚMERO DE ELEMENTOS DE TRASMISIÓN; $N_{OT}$	0,331
ALTURA DEL ELEMENTO DE TRASMISIÓN; $H_{OT}$ .	0,151
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE EL CALOR; $U_{\theta}$	$843,04 \frac{Kcal}{h \cdot C}$
CALOR NECESARIO PARA CALENTAR EL SOLIDO (22 C a 55C).	$143,88 \frac{Kcal}{h}$
CALOR NECESARIO PARA EVAPORAR EL AGUA DEL SOLIDO.	$221,22 \frac{Kcal}{h}$
COEFICIENTE DE CONVECIÓN; $h_g$ .	$5,51 \frac{Kcal}{h \cdot m^2 C}$

Fuente: González J, Paucar E

### 3.3. CURVAS DE SECADO.

#### 3.3.1. CURVAS DE VARIACIÓN DE HUMEDAD PARA TRIGO EN EL SECADOR DE BANDEJAS.

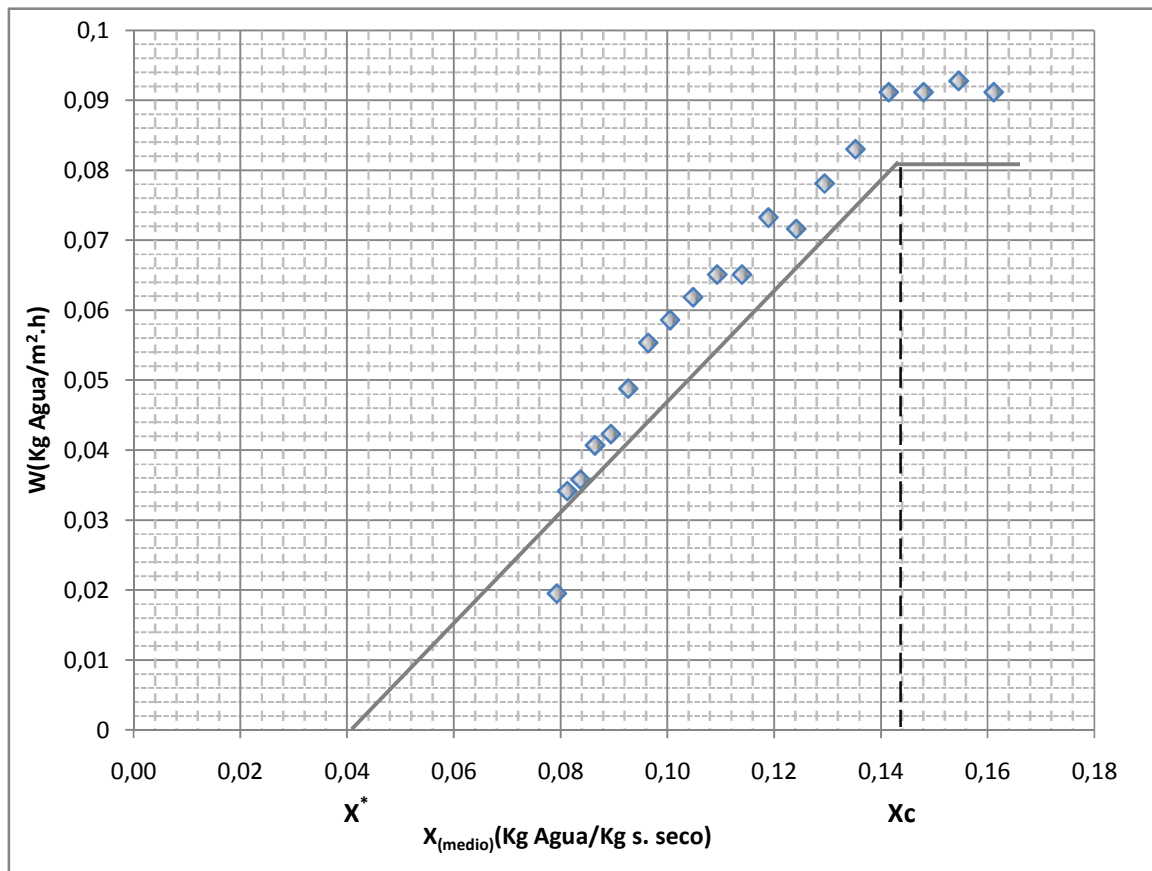
A fin de determinar el comportamiento de la humedad a diferentes temperaturas se realiza curvas que determinan dicho análisis. Datos que son utilizados para cálculos de velocidades y tiempos de secado estableciendo su óptimo funcionamiento.

**Tabla 3.3.1 - 1**

**Datos experimentales de para las curva de secado a T = 60 C**

$\theta$ (h)	X (Kg. H <sub>2</sub> O/Kg. s.seco)	X (medio) (Kg. H <sub>2</sub> O/Kg. s.seco)	W (Kg. H <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> .h)	1/W (Kg. H <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> .h)
0,00	0,1644			
0,17	0,1579	0,1612	0,0912	10,97
0,33	0,1513	0,1546	0,0928	10,78
0,50	0,1447	0,1480	0,0912	10,97
0,67	0,1382	0,1415	0,0912	10,97
0,83	0,1323	0,1352	0,0830	12,05
1,00	0,1267	0,1295	0,0781	12,80
1,17	0,1216	0,1241	0,0716	13,96
1,33	0,1163	0,1189	0,0733	13,65
1,50	0,1117	0,1140	0,0651	15,36
1,67	0,1070	0,1093	0,0651	15,36
1,83	0,1026	0,1048	0,0619	16,17
2,00	0,0984	0,1005	0,0586	17,06
2,17	0,0944	0,0964	0,0553	18,07
2,33	0,0909	0,0927	0,0488	20,48
2,50	0,0879	0,0894	0,0423	23,63
2,67	0,0850	0,0865	0,0407	24,57
2,83	0,0824	0,0837	0,0358	27,92
3,00	0,0800	0,0812	0,0342	29,25
3,17	0,0786	0,0793	0,0195	51,19

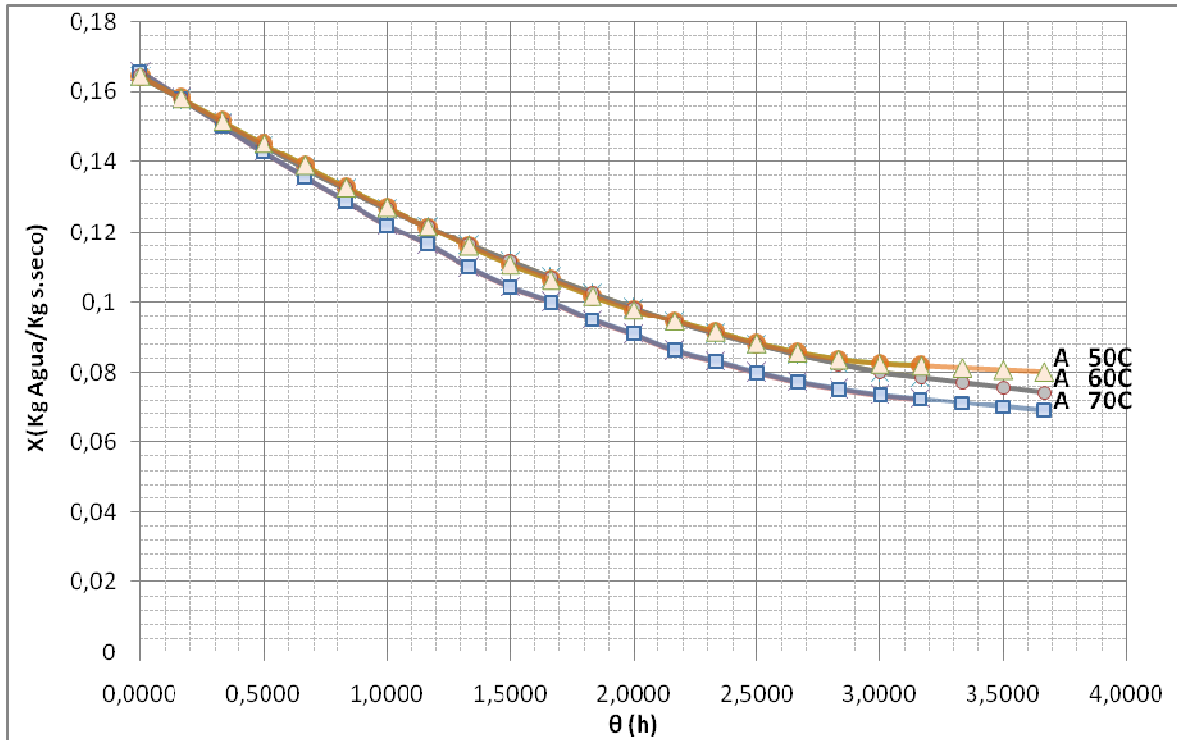
**Fuente:** González J, Paucar E.



Fuente: González J, Paucar E

**Graf. 3.3 – 1.** Velocidad en función de la humedad media para el secador de bandejas

A través de esta curva se determinan las humedades de equilibrio y crítica así también se verifica el transcurso de secado dado por la velocidad.

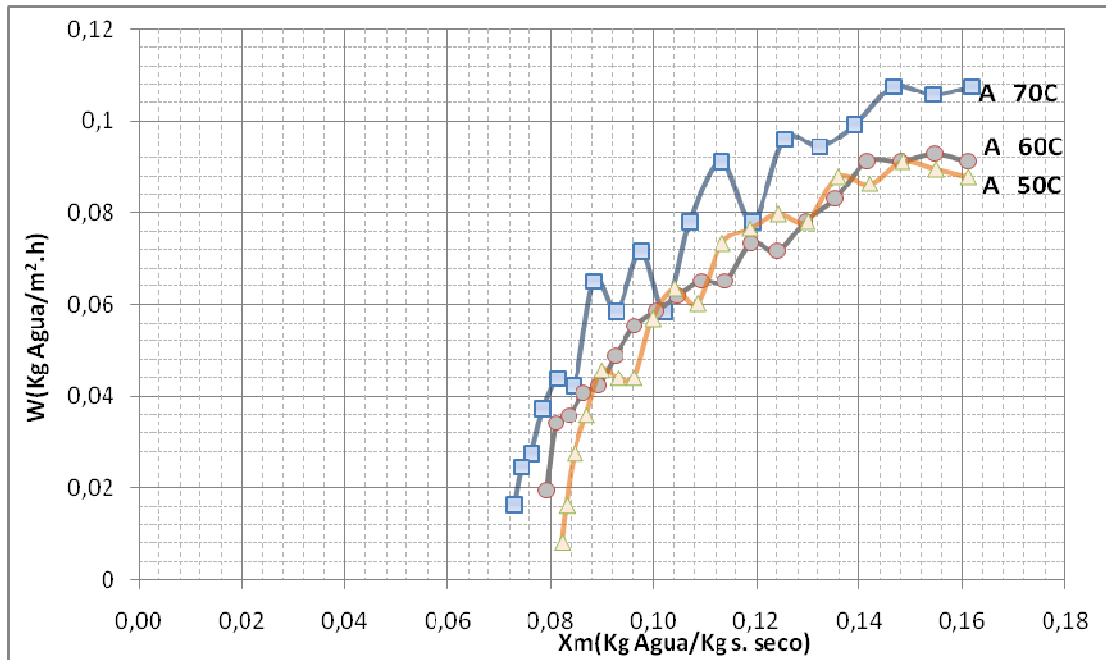


Fuente: González J, Paucar E

**Graf. 3.3 -2.** Curva de humedad en función del tiempo a diferentes temperaturas

Mientras aumenta la temperatura disminuye el tiempo de secado, así, a 70C se tendrá un tiempo inferior que para 60C y 50C respectivamente, obteniendo como temperatura óptima estimada para el proceso de 60C ya que si se aumenta, empieza la degradación del valor nutritivo del trigo como es el caso de la vitamina E y si se disminuye el proceso de secado será muy extenso.





Fuente: González J, Paucar E

**Graf. 3.3 – 3.** Curvas de velocidad en función de la humedad media a diferentes temperaturas

La velocidad de secado se incrementa proporcionalmente al variar la temperatura, teniendo una velocidad factible considerable para el proceso de secado a 60C.

**3.3.2. CURVAS DE VARIACIÓN DE HUMEDAD PARA TRIGO EN EL SECADOR POR FLUIDIZACION.**

**Tabla 3.3.2 - 1**

**Datos para las curvas de secado a 1 Kg**

<b><math>\theta</math> (h)</b>	<b>X(Kg/Kg)</b>	<b>X(Media)</b>	<b>W(Kg/m<sup>2</sup>.h)</b>	<b>1/W</b>
0,00	0,166			
0,08	0,126	0,1465	3,0948	0,3231
0,17	0,101	0,1143	1,9495	0,5130
0,25	0,084	0,0930	1,4066	0,7109
0,33	0,075	0,0796	0,6863	1,4571
0,42	0,074	0,0738	0,2263	4,4186
0,50	0,069	0,0710	0,2251	4,4424

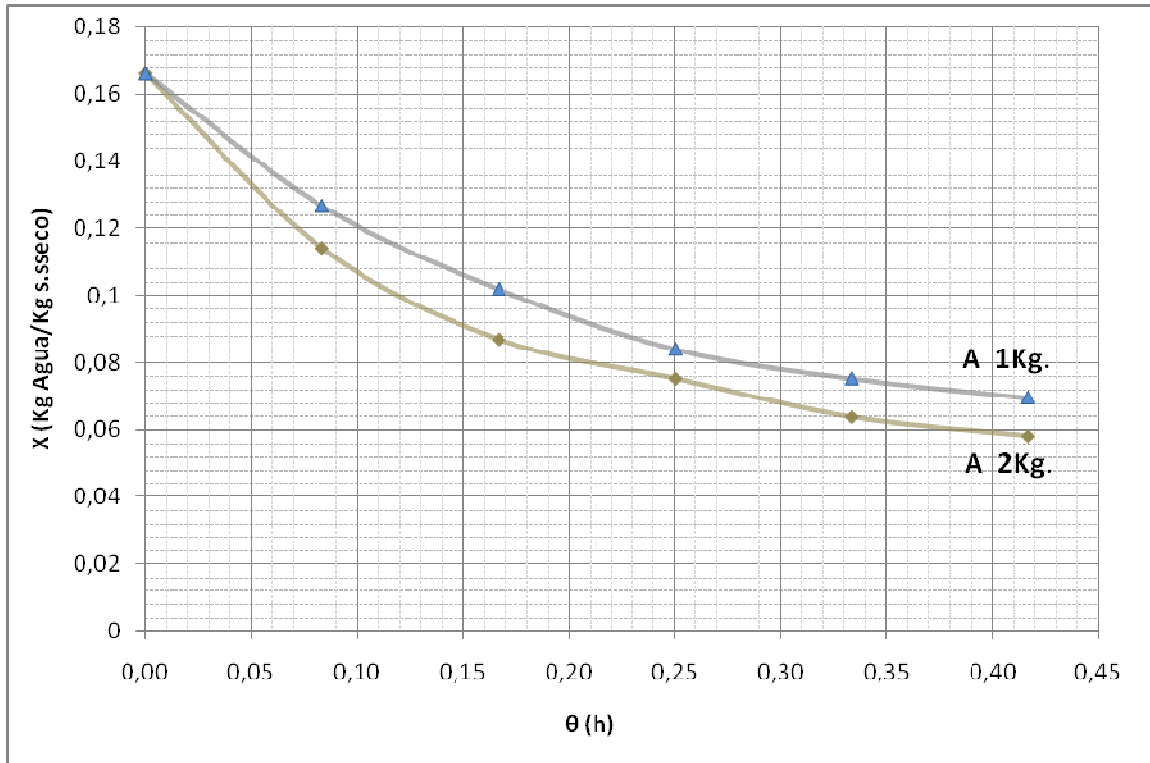
Fuente: González J, Paucar E

**Tabla 3.3.2 - 2**

**Datos para las curvas de secado a 2 Kg**

<b><math>\theta</math> (h)</b>	<b>X(Kg/Kg)</b>	<b>X(Media)</b>	<b>W(Kg/m<sup>2</sup>.h)</b>	<b>1/W</b>
0,00	0,166			
0,08	0,114	0,1402	4,0804	0,2451
0,17	0,087	0,1006	2,1393	0,4674
0,25	0,075	0,0811	0,9176	1,0898
0,33	0,063	0,0695	0,8980	1,1135
0,42	0,058	0,0610	0,4419	2,2630

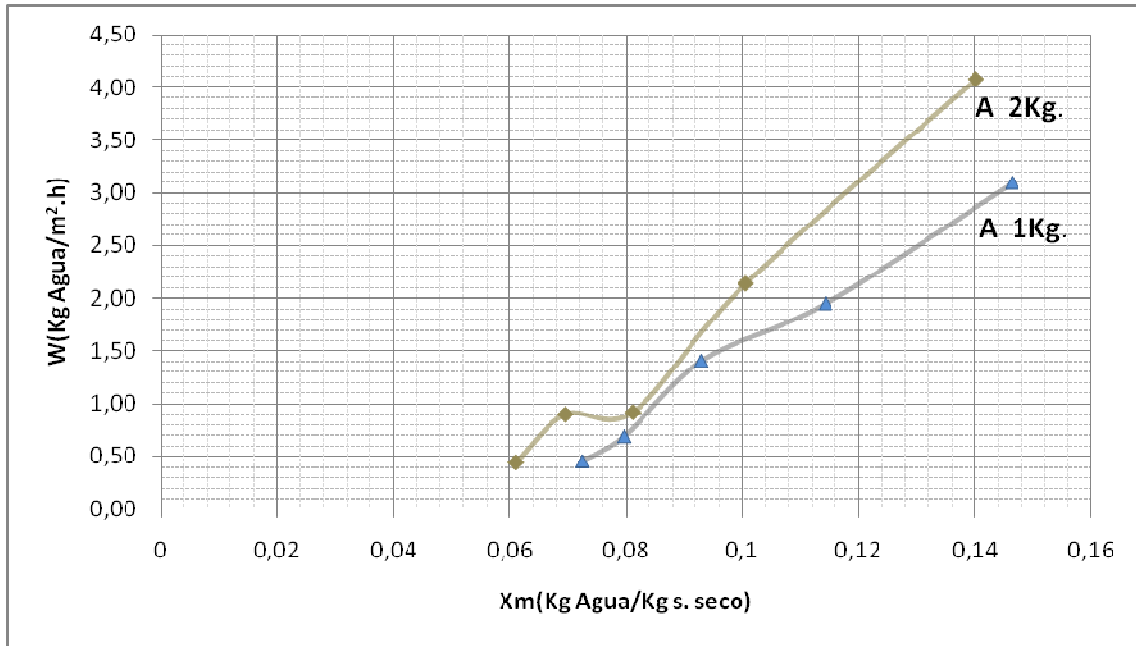
Fuente: González J, Paucar E



Fuente: González J, Paucar E

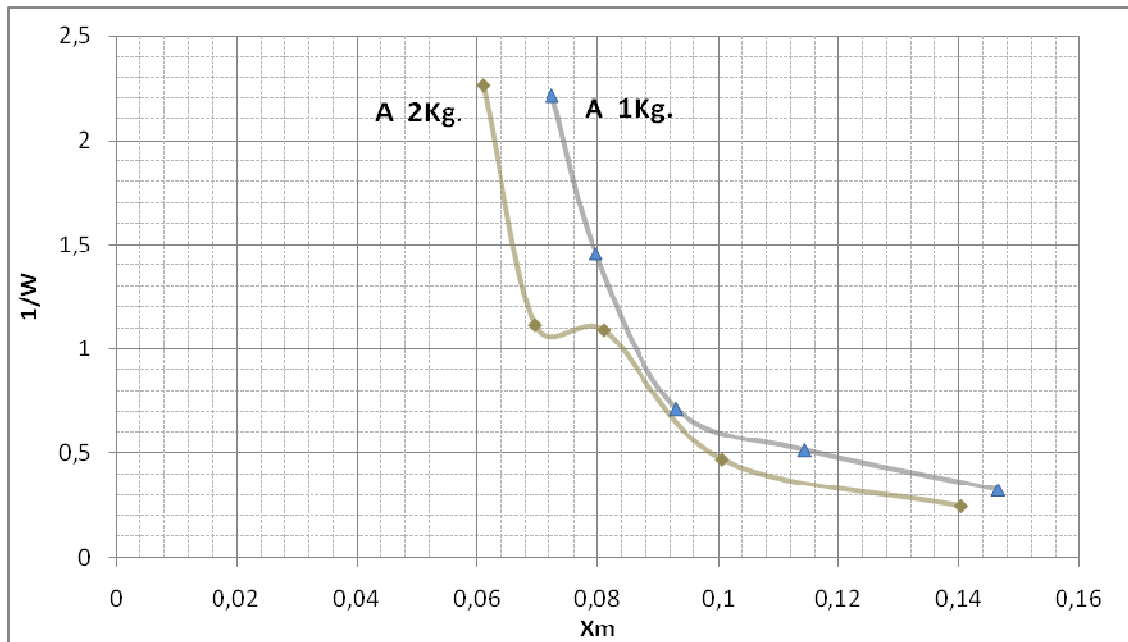
**Graf. 3.3.2-1.** Curvas de la humedad en función del tiempo

Las curvas indican el comportamiento que tiene el producto durante el proceso de secado en el fluidizador a una temperatura adecuada de 60 C a dos cantidades diferentes de producto húmedo (1 Kg y 2 Kg).



Fuente: González J, Paucar E

**Graf. 3.3.2-2.** Curvas de la velocidad en función humedad media



Fuente: González J, Paucar E

**Graf. 3.2.3-3.** Curvas de la inversa de la velocidad en función de la humedad media

### 3.3.3. VALIDACIÓN DEL SECADOR POR FLUIDIZACIÓN.

Comparación de los datos teóricos con los reales en base a la siguiente tabla:

**Tabla 3.3.3-1**

#### Validación de datos teóricos y prácticos de diseño

VARIABLES	DATOS TEÓRICOS	DATOS PRÁCTICOS
Flujo de aire; $G$ .	$519,59 \frac{Kg \text{ aire}}{h}$	$1988,80 \frac{Kg \text{ aire}}{h}$
Flujo del sólido húmedo; $G_s$ .	$10,0 \frac{Kg \text{ sólido}}{h}$	$10,0 \frac{Kg \text{ sólido}}{h}$
Temperatura de entrada del sólido; $T_{S1}$ .	22 C	22 C
Temperatura de salida del sólido; $T_{S2}$ .	55 C	57 C
Temperatura de entrada del aire; $T_{A2}$ .	60 C	60 C
Temperatura de salida del aire; $T_{A1}$ .	57 C	58 C
Tiempo de secado; $\theta_s$	6 min	$\leq 5$ min
Longitud de la unidad de transmisión; $H_{OT}$ .	0,151 m	0,12 m
Calor necesario para calentar el sólido	$143,88 \frac{Kcal}{h}$	$152,60 \frac{Kcal}{h}$
Calor necesario para evaporar el agua del sólido	$221,22 \frac{Kcal}{h}$	$221,44 \frac{Kcal}{h}$

Fuente: González J, Paucar E

### **3.4. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.**

El trigo fresco mantiene una humedad inicial de 16 %, llevándolo a una temperatura 60 C, para un tiempo de 5min y una velocidad  $4,478 \frac{Kg}{m^2h}$ , con flujo másico de trigo de  $10,0 \frac{Kg\ solido}{h}$  y densidad de  $1250 \frac{Kg}{m^3}$  para alcanzar una humedad de 12,67% en el sólido, necesaria para su almacenamiento.

El flujo másico de aire óptimo para secar 10 Kg/h de trigo es de  $519,59 \frac{Kg\ aire}{h}$ , operando con un flujo de  $1988,80 \frac{Kg\ aire}{h}$ , esto indica un exceso de flujo de aire que no puede ser controlado debido a las características del venterol, el cual no repercute en el rendimiento y economía del equipo, debido a las características y condiciones del aire ambiental.

El valor estimado (teórico), y el valor operacional (práctico), en la valoración de diseño, al calentar el sólido desde la temperatura ambiental hasta la de proceso, es de  $143,88 \frac{Kcal}{h}$  en donde operacionalmente se tiene  $152,60 \frac{Kcal}{h}$ , de igual manera al evaporar el agua del sólido  $221,22 \frac{Kcal}{h}$  y  $221,44 \frac{Kcal}{h}$  respectivamente, siendo mayor para el cambio de fase liquido-vapor (evaporación), y una transferencia de calor por convección gas-sólido de  $5,51 \frac{Kcal}{h.m^2C}$  requerida para el proceso, estos cambios de valores se debe a que en el diseño se considera y se estiman algunos valores como las temperaturas, flujos y perdidas de calor, mientras que en el operacional se considera los valores reales.

Las curvas de secado también ayudan a valorar el equipo de secado, se tiene también a 1Kg y 2 Kg de muestra a las mismas condiciones, aprovechando de mejor manera el calor por el fluido a 2 Kg de producto al haber mejor retención de calor y menor turbulencia.

### **3.5. COMPONENTES DEL EQUIPO.**

Los componentes principales para el secador por fluidización están determinados en el Anexo III.

#### **3.5.1. CAMARA DE SECADO.**

Esta constituye por una cámara cilíndrica en el que se efectuara el proceso de deshidratación de secado, el cual debe estar acorde a las necesidades y requerimientos teniendo como base tanto las pruebas de secado realizadas al producto (trigo) en el laboratorio y las bromatológicas.

Para la construcción de la cámara de secado se tendrá en cuenta varios aspectos como:

- Cantidades de producto y su tipo.
- Dimensiones del secador.
- Longitud y diámetro del distribuidor de flujo.
- Ubicación de la fragua.
- Ubicación de la fuente de calor (Quemadores múltiples)

### **3.5.2. FUENTE DE CALOR.**

Esta fuente de calor para el secado por fluidización son quemadores múltiples por GLP, los cuales generan una determinada cantidad de calor para el sistema.

### **3.5.3. LLAVES DE PASO.**

Este dispositivo se destinara para la entrada de gas a las líneas de quemadores según la cantidad de temperatura que se desee.

### **3.5.4. VENTILADORES.**

Se define como ventilador a un aparato destinado a mover aire o gases, por medio de un rodete como unidad impulsora. Un ventilador tiene al menos un orificio de aspiración y un orificio de impulsión, dichos orificios pueden o no tener elementos para su conexión al ducto de equipo. El que va accionado por medio de un motor eléctrico y la transmisión puede ser directo.

### **3.5.5. MATERIALES AUXILIARES.**

**Acero Inoxidable:** Por ser un producto alimenticio, el material que se utilice en la construcción deberá ser resistente a la corrosión, a la humedad y temperatura con que se esté operando. Siendo el acero inoxidable el material ideal para la construcción del secador.

### **3.5.5.1. CONTROLADOR DE TEMPERATURA.**

El controlador de temperatura es un dispositivo que se encarga de regular y mantener constante una temperatura de entrada, fijada como consigna, actuando sobre una resistencia, permitiendo al diseñador dotar de una maquina de capacidad de autocorrección.

**Control PID:** Estos controladores han mostrado ser robustos y extremadamente beneficiosos en el control de muchas aplicaciones de importancia en la industria. PID (Proporcional Integral Derivativo).

**Sensor de temperaturas:** La medida de la temperatura constituye una de las más importantes que se efectúan en este tipo de sistemas, las limitaciones del sistema de medida quedan definidas en cada tipo de aplicación por la precisión, por la velocidad de captación de la temperatura, por la distancia ante el elemento y el aparato receptor y por el tipo de instrumento indicador, registrador o controlador necesario y el tipo adecuado como es el termostato.

**Termocupla:** Censor de temperatura que es colocada a la entrada de la cámara de secado

**Gas licuado de petróleo GLP** Utilizada como fuente de combustible para la producción de calor por sus características:

- Fácil transporte.
- Mayor poder calorífico.
- Mayor eficiencia térmica de los equipos.
- Mayor Confort.
- Economía.



### 3.6. ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES PARA SECADOR.

Tabla 3.6 - 1

**Especificación de los materiales utilizados**

<i>MATERIA</i>	<i>TIPO</i>	<i>ESPECIFICACIONES</i>
Acero Inoxidable	AISI 430	En 1,5 mm de espesor.
Acero Inoxidable	AISI 304	
Tubos de Hierro Dulce	10,5 cm	
FRAGUA	Tamaño 4"Ciclos 60 Volt 110V Fase 1 Amp 5 <sup>a</sup> rpm 3000/3600	Fragua con salida de 4" con 3000 a 3600 revoluciones por minuto
Electro valvula	Mopd 300 R23 B; Tipo RS314	Abre y cierra el paso del gas para encendido del quemador
Microcomputadora Interruptor horario.	Tipo KG316T , Voltaje AC110V 50/60Hz, Capacidad ≤ 6,000 W, Temperatura C -25/60	Enciende el sistema de electro válvula y activa el tiempo.
Contactador	a) Para circuitos con tensión nominal de 660V AC, 50Hz b) Corriente nominal: 95 A.	Nos permite realizar el cableado de las instalaciones eléctricas.
Llave media vuelta	De cierre rápido 64mm 2 1/2, válvulas de media vuelta 64mm 2 1/2, para cortador.	Nos permite el paso del gas para el encendido del piloto ubicado en el quemador.
Distribuidor de flujo	Lámina de acero inoxidable mate de 2.0mm.	Realizado en indistintamente con inclinaciones a distintos grados
Desfogue de salida	Alambre templado y forrado con lámina de aluminio y aislado con tela de asbesto	Desfogue para las impurezas.
Funda reconfortada	Tela filtro	Elaborada para la recolección de impurezas
Termostato para control de temperatura	Sonda 90°, Sonda de Diam.6 mm y largo 65 mm.	Controla la temperatura (punto de control).
Luz piloto roja y de control	Luz pilotos de 16 mm plástica	Encendido y apagado de los quemadores
Luz piloto verde y de control	Luz pilotos de 30 mm plástica	Alimentación de energía al sistema.
Quemadores múltiples con piloto	Sistema a gas GPL	Aislamiento de lámina de hierro dulce y cubierta en acero inoxidable
Tablero de control	Lámina de hierro dulce	
Vidrio	Incoloros y transparentes	Es utilizado como visor de dimensiones
Sensor Digital	PID 0-200 C	Proporcional, Integral, Derivativo

Fuente: González J, Paucar E

### 3.7. COSTOS.

#### 3.7.1. RECURSOS HUMANOS.

**Tabla 3.7.1-1**  
**Recursos Humanos**

<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>COSTO (Dólares)</b>
Mano de obra construcción y ensamblado	800,00
Mano de obra en conexión del sistema.	150,00
<b>TOTAL</b>	<b>950,00</b>

Fuente: González J, Paucar E

#### 3.7.2. RECURSOS MATERIALES.

**Tabla 3.7.2-1**  
**Recursos Materiales**

<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>COSTO (Dólares)</b>
Materiales y Suministros de Oficina	90,00
Análisis Proximal del Trigo	100,00
Materiales para construcción del Equipo	1108,00
Varios	500,00
<b>TOTAL</b>	<b>1798,00</b>

Fuente: González J, Paucar E

#### 3.7.3. RECURSOS TOTALES.

**Tabla 3.7.3-1**  
**Recursos Totales**

<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>COSTO (Dólares)</b>
Recursos Humanos	950,00
Recursos Materiales	1798,00
<b>Subtotal</b>	<b>2748,00</b>
Imprevistos 10%	275,00
<b>TOTAL</b>	<b>3023,00</b>

Fuente: González J, Paucar E

### 3.7.4. MATERIALES UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.

Tabla 3.7.4-1

#### Materiales utilizados para la construcción del secador por fluidización

<i>MATERIA</i>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>PRECIO TOTAL</b>
<b>Acero Inoxidable</b>	1	65,00	65,00
<b>Acero Inoxidable</b>	1	130,00	130,00
<b>Tubos de Hierro Dulce</b>	1	20,00	20,00
<b>Venterol</b>	1	300,00	300,00
<b>Electro válvula</b>	1	80,00	80,00
<b>Microcomputadora Interruptor horario (sassin) Switch de encendido</b>	1	100,00	100,00
<b>Contactora</b>	1	80,00	80,00
<b>Funda reconfortada</b>		10,00	10,00
<b>Llave media vuelta</b>	1	3,00	3,00
<b>Distribuidor de flujo</b>	1	10,00	10,00
<b>Desfogue de salida</b>	1	20,00	20,00
<b>Termostato de control de temperatura</b>	1	110,00	110,00
<b>Luz piloto roja y de control</b>	1	15,00	10,00
<b>Luz pilota verde y de control</b>	1	15,00	10,00
<b>Quemadores múltiples con piloto</b>	1	100,00	100,00
<b>Tablero de control</b>	1	50,00	50,00
<b>Vidrio</b>	1	2,00	2,00
<b>Plancha de acero</b>	1	30,00	30,00
<b>Sensor Digital</b>	1	70,00	70,00
<b>TOTAL</b>			<b>1108,00</b>

Fuente: González J, Paucar E

### **3.8. TECNICA DE CONSTRUCCION Y FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO.**

#### **3.8.1. TECNICA DE CONSTRUCCION.**

- Trazado de corte: Trazado y corte de las láminas de acero, además del rolado y doblado.
- Maquinado: En esta sección está el torno, taladro, pedestal, corte y roscado de tuberías.
- Saldado: Comprende los ensamblajes por soldadura de arco.
- Acabado: Corresponde al montaje de los accesorios y pintura.
- Control de calidad: Fiscalizar o supervisar todos los trabajos paso a paso que se realizan en el taller.
- Mantenimiento: Trabajo de mantenimiento y reparaciones mecánicas y eléctricas.

#### **3.8.2. FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO.**

- Encender el venterol y fijar el caudal de flujo constante
- Seleccionar la temperatura de secado de 60 C manipulando el controlador de temperatura y esperar unos minutos hasta alcanzar una temperatura homogénea para el proceso.
- Pesar 1 Kg de trigo húmedo.
- Determinar la humedad del trigo.
- Realización de la alimentación por la entrada del equipo a la cámara de secado.
- Tomar lecturas de la variación de tiempos determinados en el controlados digital mediante sus indicadores, hasta obtener la humedad requerida dada en un tiempo de 5 min para un producto del 16% llegando a una humedad de norma entre 12 a 14%.
- Apagar el generador de calor dejando encendido el venterol hasta su completa descarga.
- Revisar que todos los dispositivos se encuentren apagados.

# **CAPITULO V**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 4.1. CONCLUSIONES.

- El tiempo de secado para un flujo másico de trigo de 10Kg/h es de 5 minutos a una temperatura de 60C y velocidad de  $4,478 \frac{Kg}{hm^2}$ , para una humedad inicial de 16% hasta una final de 12,7%.
- Los valores óptimos de diseño obtenidos y considerados para el proceso están dados por una longitud de 70 cm alto, 19,3 cm de diámetro, un venterol con velocidad de flujo de 5,5m/s, un regulador de temperatura y tiempo también por las condiciones ambientales como la humedad absoluta de 0,0011 Kg vapor/Kg de aire seco y características del producto a una densidad de partícula de  $1250Kg/m^3$ , porosidad de operación de 0,77.
- Al incrementar la temperatura del aire de 22C a 60C, se neutraliza gran cantidad de levaduras y mohos del trigo por contacto con dicho aire, de UFC/G 200000 hasta UFC/G 1875, al igual que los coliformes totales de UFC/G 12,0 hasta UFC/G 3,0 luego del secado siendo beneficio para el almacenamiento y conservación.
- En base al tiempo de secado el equipo opera 10 veces más rápido respecto al secador de bandejas.
- El costo total de fabricación del equipo de secado por fluidización es de 3023,0 dólares, con un costo de operación de 0,18 ctv. de dólar/Kg de trigo seco.

## 4.2. RECOMENDACIONES.

- Es recomendable que el equipo de fluidización se encuentre operando en un lugar con ventilación para evitar la recirculación de aire caliente y arrastres de humedad.
- No es recomendable sobrepasar los parámetros de diseño y funcionamiento durante el proceso de secado como son temperatura 60C, tiempo  $\leq 5$ , cantidad (1Kg) y tipo de producto (trigo), ya que puede ocasionar el deterioro en las propiedades del producto y el funcionamiento del equipo.
- Es necesario seguir el manual de funcionamiento, con un mantenimiento pertinente para evitar problemas de deterioro y mal funcionamiento del equipo.

# BIBLIOGRAFÍA



## **CITAS BIBLIOGRÁFICAS**

### **1. Secado de Trigo.**

<http://www.aacue.go.cr/comercio/sectoriales/documentos/20%20Trigo%20y%20harina%20de%20trigo%2031-07-07.pdf>

**(07/01/2009)**

### **2. Secado de Granos.**

<http://agro.uncor.edu/ceryol/documentos/postcosecha/calidadalmacenamiento>.

**(07/02/2009)**

### **3. Características del Trigo.**

<http://www.fao.org/docrep/X5028S/X5028S0E.HTM>

**(22/01/2009)**

### **4. Todo acerca del Trigo, Estructura del Grano.**

[http://www.molinovillafane.com/todo\\_acerca\\_del\\_trigo.html](http://www.molinovillafane.com/todo_acerca_del_trigo.html)

**(07/02/2009)**

### **5. Estructura del trigo.**

<http://agrarias.tripod.com/cereales.htm>.

**(22/01/2009)**

### **6. Vitamina E**

[http://www.Vitamina E/Wikipedia\\_la\\_encyclopedia\\_libre.htm](http://www.Vitamina E/Wikipedia_la_encyclopedia_libre.htm).

**(17/03/2009)**

### **7. Conservación de cereales.**

<http://www.alimentacion-sana.com.ar/informaciones/novedades/conservacion6.htm>.

**(22/01/2009)**

**8. Secado de Alimentos.**

<http://www.rincondelvago.com./secado/de/alimentos.htm>.

(05/02/2009)

**9. Fundamentos de Secado.**

<http://www.elprisma.com/apuntes/agronomia/manejodegranosbasicos/default.as>.

(17/02/2009)

**10. OCON P. /TOJO J.,** Problemas de Ingeniería Química, México: Editorial Aguilar, 1980, Pp. 241-242

**11. TREYBAL, R.E.,** Operaciones de Transferencia de Masa. México: Editorial McGraw-Hill, Pp. 247

**12. OCON P. /TOJO J.,** Problemas de Ingeniería Química, México: Editorial Aguilar, 1980, Pp. 282-290

**13. Tipo se secadores.**

<http://www.monografias.com/trabajos15/operacion-secado/operacion-secado.shtml>.

(17/02/2009)

**14. Secado por Fluidización.**

<http://www.secado/mon3.pdf>.

(05/02/2009)

**15. Lecho Fluidizante.**

<http://www.vibrasec.com/pag/tecseclecho1.htm>.

(17/02/2009)

**16. W. L. MCCABE, J. C. SMITH, P. HARRIOT.,** Operaciones Básicas de Ingeniería Química. España: McGraw-Hill, 4a. ed, 1991. Pp. 171-184.

## **ESPECÍFICA**

17. **OCON, J. y TOJO, G.,** Problemas de Ingeniería Química. Santiago de Chile: Editorial Aguilar, 2a ed, Tomo II, 1967.
18. **MC CABE, S.,** Operaciones Básicas de Ingeniería Química. Barcelona España: Editorial Reverte, 1962.
19. **PERRY, J.,** Manual del Ingeniero Químico, México: Editorial Mc Graw Hill, 3a ed, Tomo II, 1974.
20. **BRITO, H.,** Texto Básico de Operaciones Unitarias. Riobamba Ecuador: 2a ed. 2001.
21. **Sánchez, P.,** Secado de Pimienta (Piper Nigrum) en un Secador de Lecho Fluidizado. UCE. Ing. Química, Física y Matemática, Quito-Ecuador, 2002.
22. **Casa, W.,** Secado de Arroz en Lecho Fluidizado, Quito Ecuador: UCE. Facultad de Ciencias, Escuela Ing Química, 1991.
23. **Ribas, I.** Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos. Editorial Mundi Empresa

## **WEB**

### ➤ **Secado de Trigo.**

<http://www.aacue.go.cr/comercio/sectoriales/documentos/20%20Trigo%20y%20harina%20de%20trigo%2031-07-07.pdf>

**(12/11/08)**

### ➤ **Secado de Granos.**

<http://agro.uncor.edu/~ceryol/documentos/postcosecha/calidadalmacenamiento.pdf>

**(12/11/08)**

➤ **Características del Trigo**

<http://www.fao.org/docrep/X5028S/X5028S0E.HTM>.

(12/11/08)

➤ **Fundamentos de Secado.**

<http://www.elprisma.com/apuntes/agronomia/manejodegranosbasicos/default.as>.

(12/11/08)

➤ **Operación de secado.**

<http://www.monografias.com/trabajos15/operacion-secado/operacion-secado.shtml>.

(14/11/08)

➤ **Etapas de secado.**

[http://docencia.udea.edu.co/qf/farmacotecnia/06/06\\_equipos.html](http://docencia.udea.edu.co/qf/farmacotecnia/06/06_equipos.html).

(14/11/08)

➤ **Velocidad de secado.**

<http://www.secado/SECADOOO/capitulo4secado.pdf>

(16/11/08)

➤ **Secado por Fluidización.**

<http://www.secado/mon3.pdf>

(16/11/08)

➤ **Lecho Fluidizante.**

<http://www.vibrasec.com/pag/tecseclecho1.htm>.

(16/11/08)

➤ **Fluidización secado.**

<http://www.monografias.com/trabajos27/lecho-fijo/lecho-fijo.shtml#nomenc>.

(01/12/08)

➤ **Tipos de trigo.**

<http://agrarias.tripod.com/cereales.htm>.

**(01/12/08)**

➤ **Factores de Secado.**

<http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/283/cap1.html>

**(01/12/08)**

➤ **Lecho Fluidizante.**

<http://www.vibrasec.com/pag/tecseclecho1.htm>

**(01/12/08)**

➤ **Tipos de lecho fluidizado.**

<http://www.monografias.com/trabajos27/lecho-fijo/lecho-fijo.shtml#nomenc>

**(01/12/08)**

➤ **Esfericidad de las partículas.**

<http://secado/fluidizacion/cap3-2.pdf>

**(01/12/08)**

➤ **Fluidización secado.**

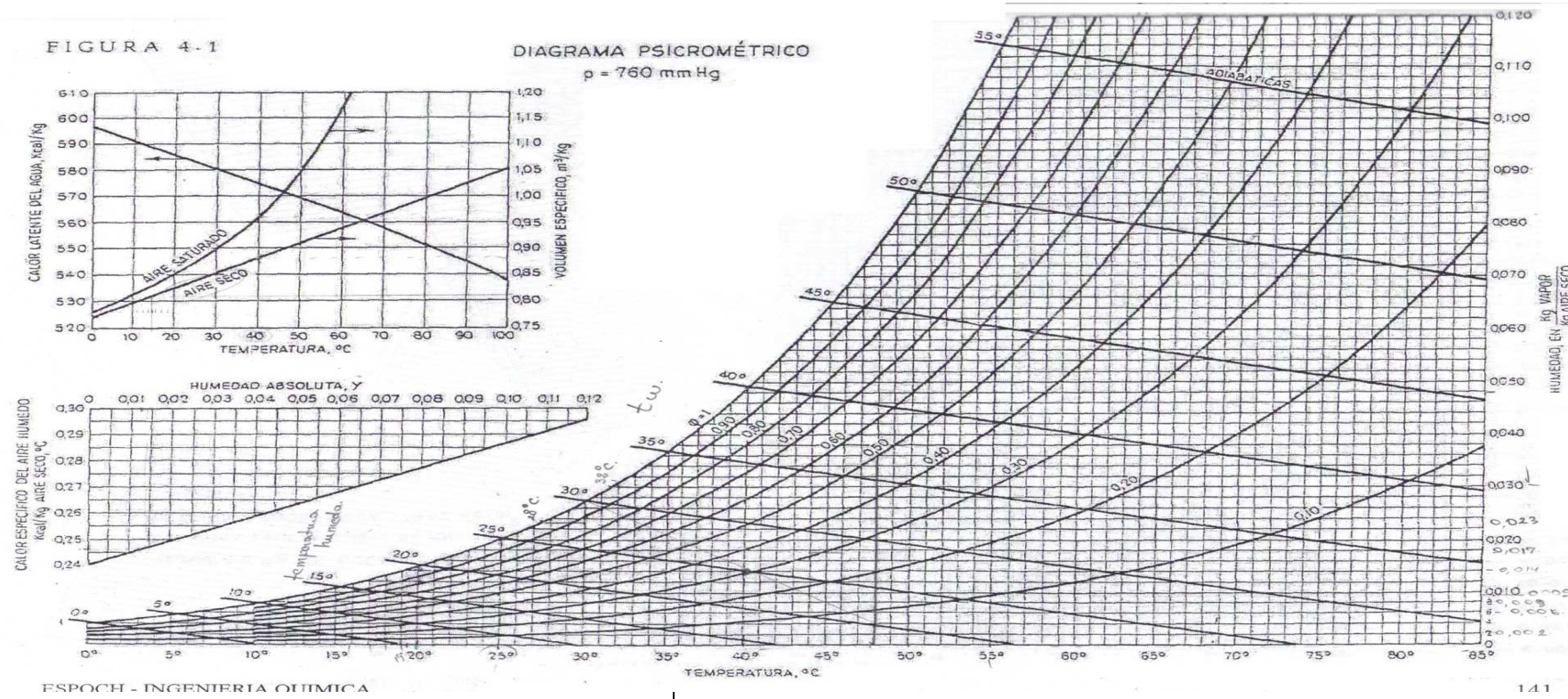
<http://www.monografias.com/trabajos27>

**(01/12/08)**

# ANEXOS

FIGURA 4.1

DIAGRAMA PSICROMÉTRICO  
 $p = 760 \text{ mm Hg}$



METRICO

ESPOCH - INGENIERIA QUIMICA

141

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH		
Diagrama Psicométrico	<input type="checkbox"/> Certificado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Construcción <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Información	FACULTAD DE CIENCIAS	Secador por Lecho Fluidizado	
		ESCUELA DE ING QUIMICA		
		Por: González S. Jairo		
		Paucar T. Edgar		
			Esc:	Fecha: 24/09/2009

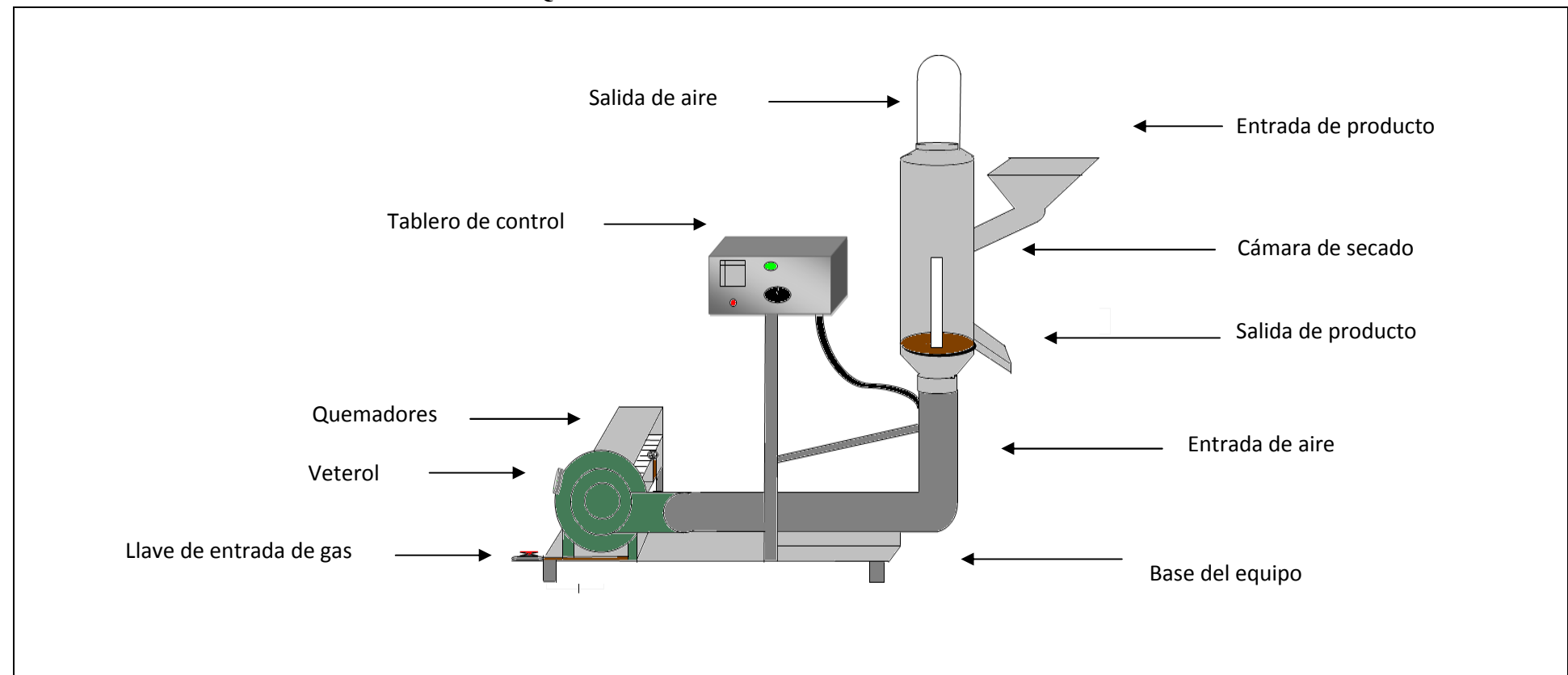
**ANEXO II**  
**PROPIEDADES FISICAS DEL AIRE, AGUA Y VAPOR DE AGUA A 1 at**

(a) Propiedades físicas del aire										(b) Propiedades físicas del agua										
$t, ^\circ\text{C}$	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	$\mu$ 10 <sup>-5</sup> Kg/ m·seg	$C_p$ Kcal/ Kg·°C	$k$ Kcal/ mh·°C	$\beta$ 10 <sup>-3</sup> °C <sup>-1</sup>	$\nu$ 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /seg	$a$ 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /seg	$\nu$ $Pr = \frac{\nu}{a}$	$\frac{g}{av}$ 10 <sup>9</sup> m <sup>-3</sup>	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	$\mu$ 10 <sup>-3</sup> Kg/ m·seg	$C_p$ Kcal/ Kg·°C	$k$ Kcal/ mh·°C	$\beta$ 10 <sup>-4</sup> °C <sup>-1</sup>	$\lambda$ Kcal/Kg	$\nu$ 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /seg	$a$ 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /seg	$\nu$ $Pr = \frac{\nu}{a}$	$\frac{g}{av}$ 10 <sup>12</sup> m <sup>-3</sup>
0	1,293	1,709	0,238	0,0208	3,66	1,32	1,88	0,702	39,5	0	999,8	1,794	1,008	0,491	—	596,4	1,794	1,35	12,2	40,4
50	1,093	1,951	—	0,0240	3,10	1,78	2,57	0,695	21,4	10	999,7	1,310	1,002	0,504	0,88	590,9	1,310	1,40	9,4	53,5
100	0,946	2,175	0,237	0,0272	2,68	2,30	3,37	0,681	12,65	20	998,2	1,009	0,9995	0,517	2,07	585,5	1,011	1,44	7,02	67,4
150	0,834	2,385	—	0,0304	2,36	2,86	4,28	0,668	8,02	30	995,7	0,800	0,9986	0,530	3,04	580,0	0,803	1,48	5,43	82,4
200	0,746	2,582	0,236	0,0336	2,11	3,46	5,30	0,652	5,35	40	992,2	0,654	0,9987	0,543	3,85	574,5	0,659	1,52	4,33	97,7
250	0,675	2,770	—	0,0366	1,91	4,10	6,40	0,640	3,74	50	988,1	0,549	0,9982	0,555	4,60	568,9	0,556	1,56	3,56	113,0
300	0,616	2,946	0,235	0,0394	1,74	4,78	7,57	0,632	2,71	60	983,2	0,470	1,000	0,567	5,21	563,2	0,478	1,60	2,98	228,1
										70	977,8	0,407	1,001	0,580	5,86	557,3	0,416	1,65	2,53	143,2
										80	971,8	0,357	1,003	0,592	6,41	551,3	0,367	1,69	2,18	158,2
										90	965,3	0,317	1,005	0,604	7,00	545,3	0,328	1,73	1,90	172,6
										100	958,4	0,284	1,008	0,616	7,48	539,0	0,296	1,77	1,67	186,9
										110	951,0	0,256	1,011	0,628	7,9	532,6	0,269	1,81	1,48	201
										120	943,4	0,232	1,014	0,640	8,4	525,9	0,246	1,86	1,32	215
										130	935,2	0,212	1,017	0,652	9,0	519,0	0,227	1,90	1,19	227
										140	926,4	0,196	1,020	0,664	9,7	511,9	0,212	1,95	1,08	236
										150	917,3	0,184	1,024	0,676	10,4	504,5	0,201	2,00	1,00	245
										160	907,5	0,174	1,027	0,688	11,0	496,9	0,192	2,05	0,935	250

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH	Secador por Lecho Fluidizado
(a) = Propiedades físicas del aire (b) = Propiedades físicas del agua	<input type="checkbox"/> Certificado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Construcción <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Información	FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING QUIMICA  Por: González S. Jairo Paucar T. Edgar	
			Esc:                      Fecha: 24/09/2009

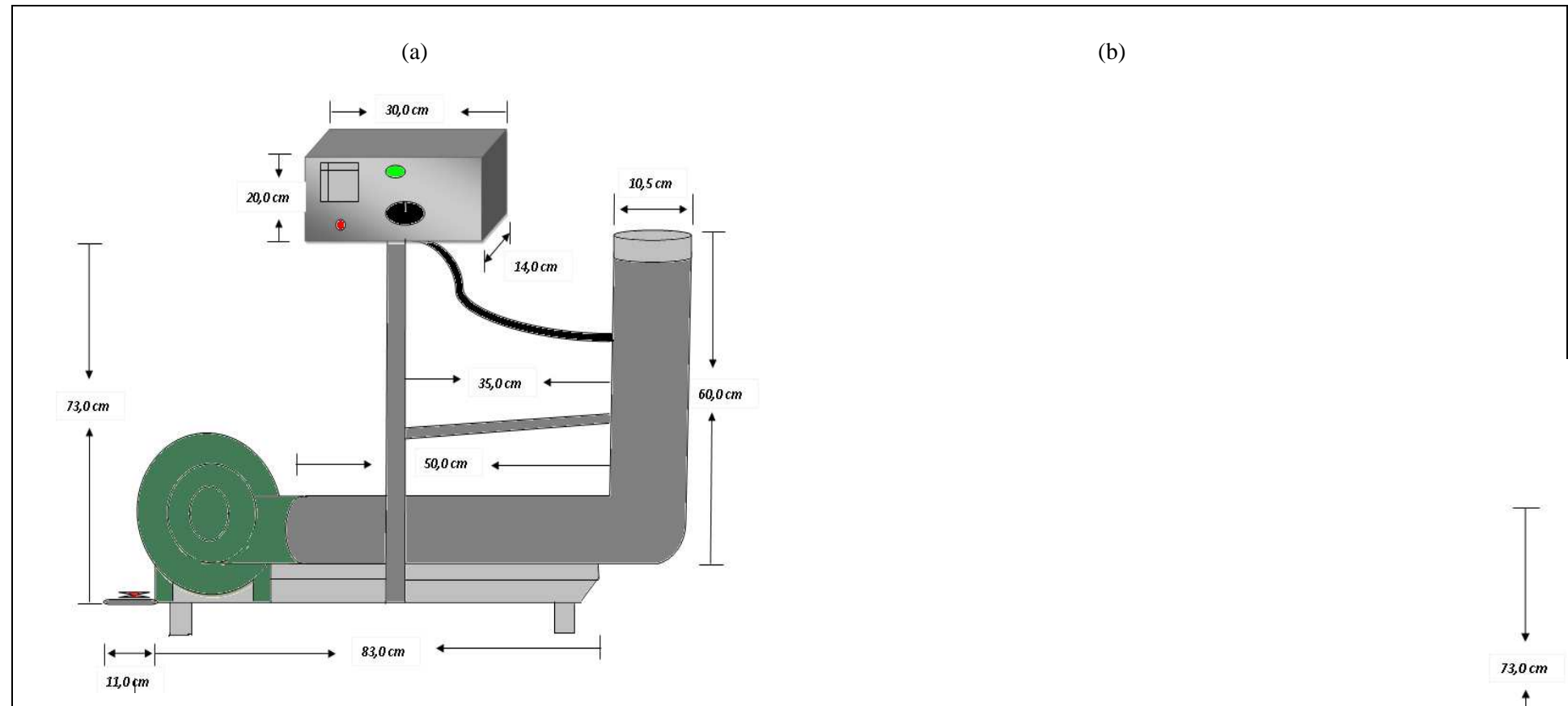


**ANEXO III  
EQUIPO DE SECADO POR LECHO FLUIDIZADO**



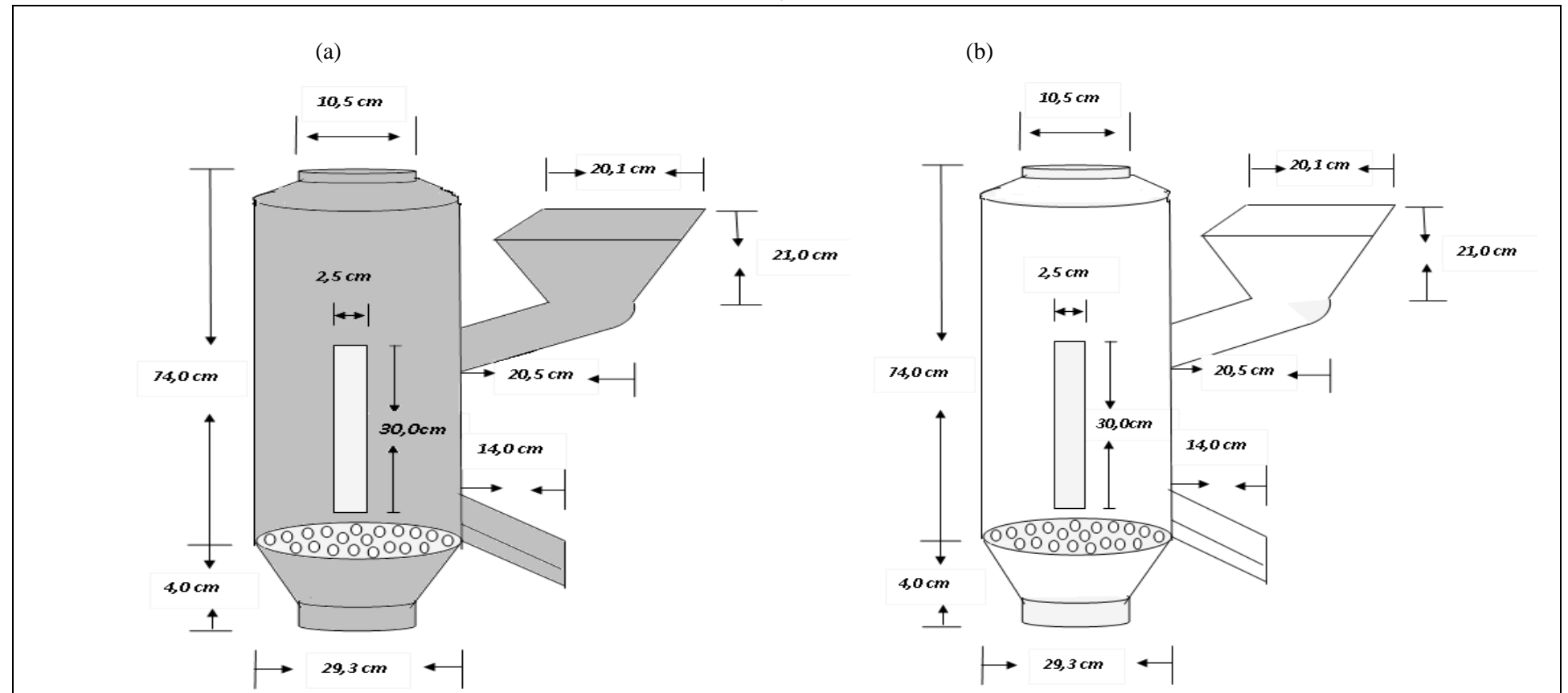
<b>NOTAS</b>	<b>CATEGORIA DEL DIAGRAMA</b>	<b>ESPOCH</b>		
(c) = Parte Externa	<input type="checkbox"/> Certificado	FACULTAD DE CIENCIAS	Secador por Lecho Fluidizado	
(d) = Parte Interna	<input type="checkbox"/> Construcción	ESCUELA DE ING QUIMICA		
	<input type="checkbox"/> Preliminar	Por: González S. Jairo Paucar T. Edgar		
	<input checked="" type="checkbox"/> Aprobado		Esc:	Fecha: 24/09/2009
	<input type="checkbox"/> Por aprobar			
	<input type="checkbox"/> Información			

**ANEXO IV  
BASE DEL CONDUCTO DE AIRE CALIENTE**



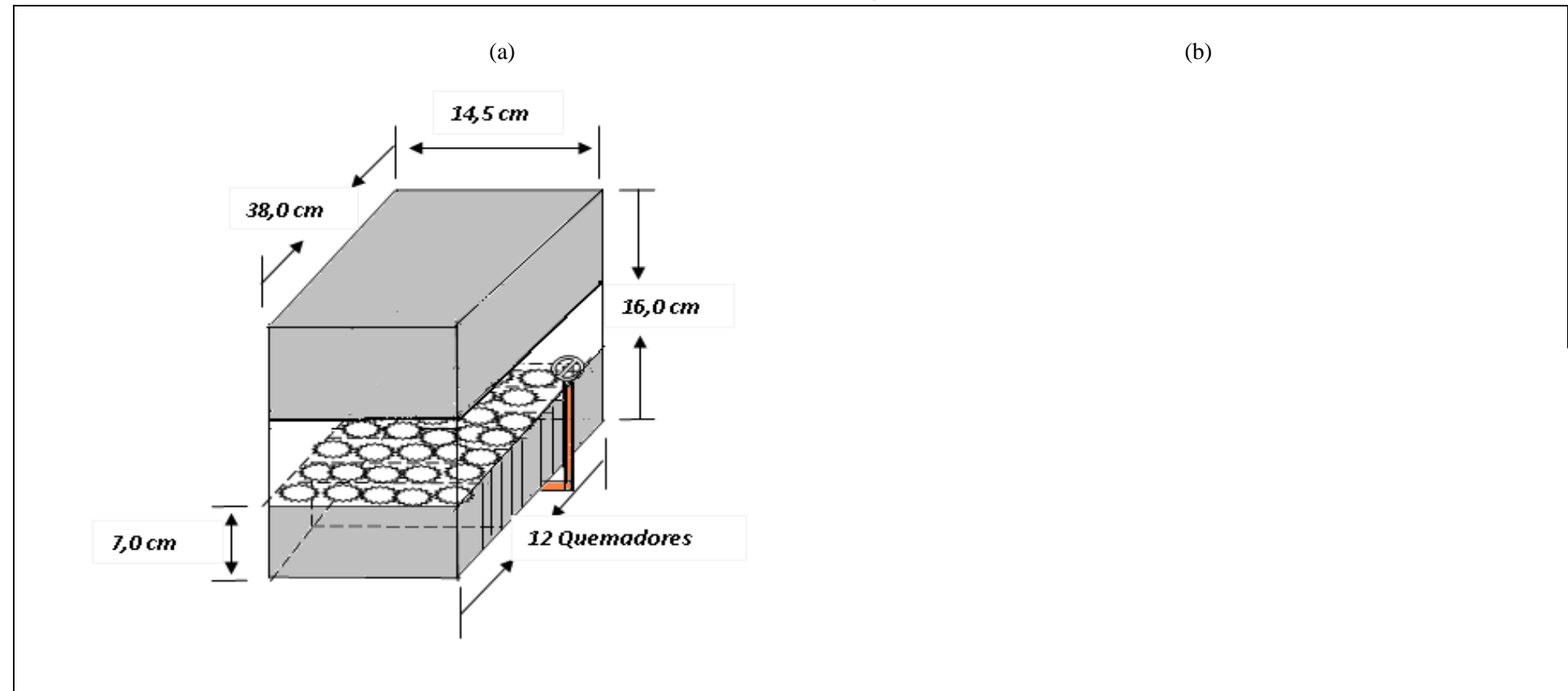
<b>NOTAS</b>	<b>CATEGORIA DEL DIAGRAMA</b>	<b>ESPOCH</b>		
(a) = Parte Externa	<input type="checkbox"/> Certificado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado	FACULTAD DE CIENCIAS	Base del Conducto de Aire Cal	
(b) = Parte Interna	<input type="checkbox"/> Construcción <input type="checkbox"/> Por aprobar	ESCUELA DE ING QUIMICA		
	<input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Información	Por: González S. Jairo Paucar T. Edgar		
		Esc:	Fecha: 24/09/2009	

**ANEXO V  
CAMARA DEL EQUIPO DE SECADO**



<b>NOTAS</b>	<b>CATEGORIA DEL DIAGRAMA</b>	<b>ESPOCH</b>		
(a) = Vista Externa	<input type="checkbox"/> Certificado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado	FACULTAD DE CIENCIAS	Cámara de Secado	
(b) = Vista Interna	<input type="checkbox"/> Construcción <input type="checkbox"/> Por aprobar	ESCUELA DE ING QUIMICA		
	<input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Información	Por: González S. Jairo		
		Paucar T. Edgar		
			Esc:	Fecha: 24/09/2009

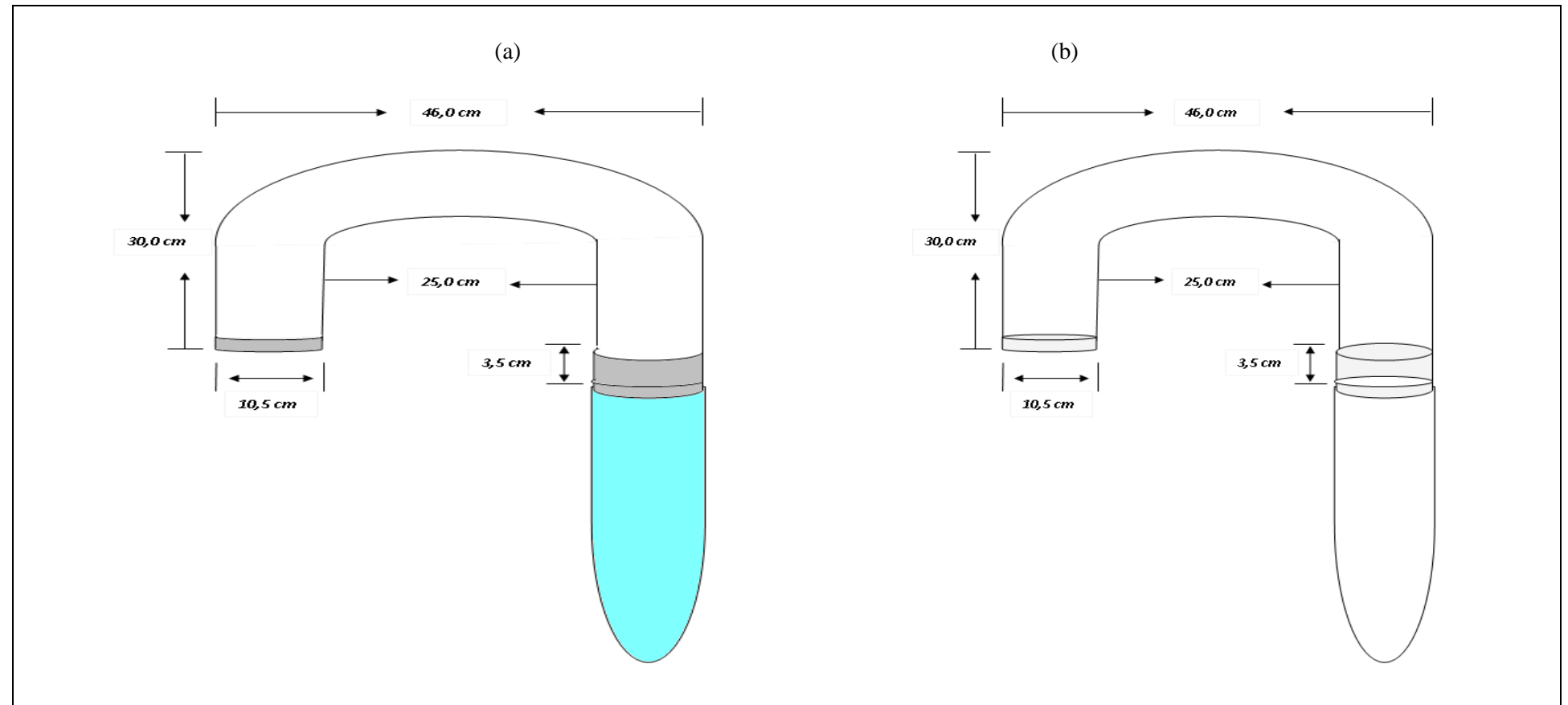
**ANEXO VI  
GENERADOR DE CALOR DEL EQUIPO DE SECADO**



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH		
(a) = Parte Externa	<input type="checkbox"/> Certificado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado	FACULTAD DE CIENCIAS	Quemadores a Gas	
(b) = Parte Interna	<input type="checkbox"/> Construcción <input type="checkbox"/> Por aprobar	ESCUELA DE ING QUIMICA		
	<input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Información	Por: González S. Jairo	Esc:                      Fecha: 24/09/2009	
		Paucar T. Edgar		

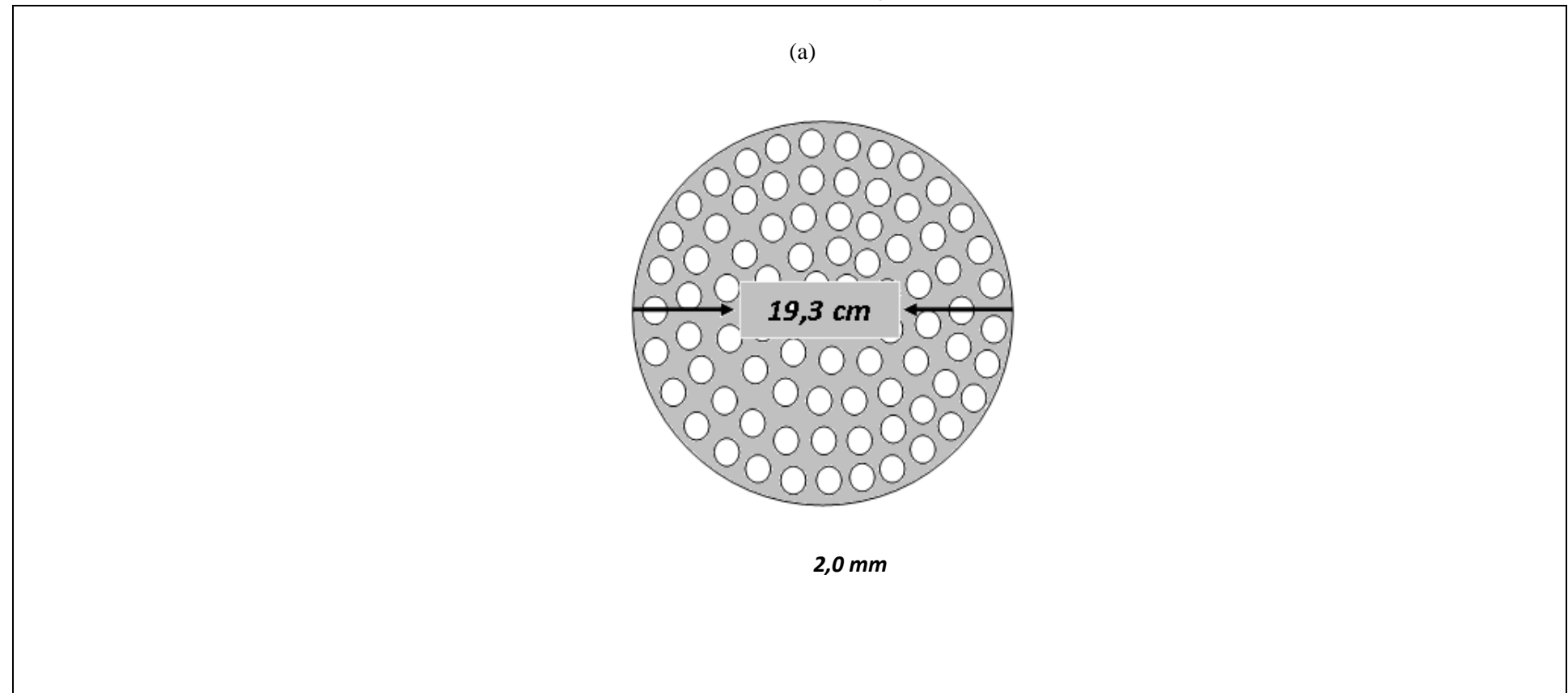
7,0 cm


**ANEXO VII  
CONDUCTO DE SALIDA DE AIRE HUMEDO**



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH		
(a) = Parte Externa	<input type="checkbox"/> Certificado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado	FACULTAD DE CIENCIAS	Conducto de Salida de Aire Húmedo	
(b) = Parte Interna	<input type="checkbox"/> Construcción <input type="checkbox"/> Por aprobar	ESCUELA DE ING QUIMICA		
	<input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Información	Por: González S. Jairo		
		Paucar T. Edgar		
			Esc:	Fecha: 24/09/2009

**ANEXO VIII  
DISTRIBUIDOR DE FLUJO DEL EQUIPO DE SECADO**



<b>NOTAS</b>	<b>CATEGORIA DEL DIAGRAMA</b>	<b>ESPOCH</b>		
(a) = Parte Frontal	<input type="checkbox"/> Certificado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Construcción <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Información	FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING QUIMICA  Por: González S. Jairo Paucar T. Edgar	Distribuidor de Flujo de Aire 	
Esc:			Fecha: 24/09/2009	

**ANEXO IX  
SECADOR CONSTRUIDO POR LECHO FLUIDIZADO**

(a)



(b)



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESPOCH		
(a) = Parte Frontal	<input type="checkbox"/> Certificado	FACULTAD DE CIENCIAS	Secador por Lecho Fluidizado	
(b) = Parte Lateral	<input type="checkbox"/> Construcción	ESCUELA DE ING QUIMICA		
	<input type="checkbox"/> Preliminar	Por: González S. Jairo Paucar T. Edgar		
	<input checked="" type="checkbox"/> Aprobado		Esc:	Fecha: 24/09/2009
	<input type="checkbox"/> Por aprobar			
	<input type="checkbox"/> Información			



LABORATORIO DE ANÁLISIS  
AMBIENTAL E INSPECCIÓN  
LAB-CESTTA

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA  
DE CHIMBORAZO

CENTRO DE SERVICIOS TÉCNICOS  
Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA  
AMBIENTAL

FACULTAD DE CIENCIAS  
Panamericana Sur Km. 1 ½  
Teléfono: (03) 2 998232  
RIOBAMBA - ECUADOR



ENSAYOS  
No. OAE LE 2C 06-008

INFORME DE ENSAYO No:  
ST:

0490  
09 - 0054 ANÁLISIS DE ALIMENTOS

Nombre Peticionario:

Atn.  
Dirección:

-  
Sr. Jairo Gonzáles y/o Sr. Edgar Paucar  
Princesa Toa y la 44

FECHA:

19 de Mayo de 2009

NUMERO DE MUESTRAS:

1

FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:

2009 / 05 / 14 - 12:17

FECHA DE MUESTREO:

2009 / 05 / 01 - 11:00

FECHA DE ANÁLISIS:

2009 / 05 / 14- 2009 / 05 / 19

TIPO DE MUESTRA:

Trigo

CÓDIGO LAB-CESTTA:

LAB-Alm 194-09

CÓDIGO DE LA EMPRESA:

TG-A<sub>1</sub> Temperatura Ambiente

PUNTO DE MUESTREO:

NA

ANÁLISIS SOLICITADO

Proteína, Grasa, Fibra, Extracto libre no Nitrogenado

PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA:

Sr. Jairo Gonzáles y/o Sr. Edgar Paucar

CONDICIONES AMBIENTALES:

T máx.: 25.0 °C. T mín.: 21.0 °C

#### RESULTADOS ANALÍTICOS:

PARÁMETRO	MÉTODO /NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LIMITE PERMISIBLE	INCERTIDUMBRE (k=2)
*Proteína	PEE /LAB-CESTTA/104 AOAC/ Volumétrico	%	13,89	-	-
*Grasa	PEE /LAB-CESTTA/102 AOAC/ Gravimétrico	%	2,75	-	-
*Cenizas	PEE /LAB-CESTTA/101 AOAC/ Gravimétrico	%	1,83	-	-
*Fibra	PEE /LAB-CESTTA/103 AOAC/ Gravimétrico	%	1,30	--	--
*Extracto Libre no Nitrogenado	PEE /LAB-CESTTA/141	%	80,23	--	--

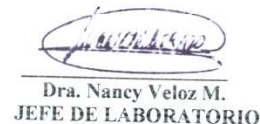
#### OBSERVACIONES:

- Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE
- Parámetros expresados en base seca
- Muestra receptada en laboratorio

#### RESPONSABLES DEL INFORME:

  
Dr. Fabián Arias  
RESPONSABLE TÉCNICO

LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL  
E INSPECCIÓN  
LAB-CESTTA  
ESPOCH

  
Dra. Nancy Veloz M.  
JEFE DE LABORATORIO





LABORATORIO DE ANÁLISIS  
AMBIENTAL E INSPECCIÓN  
LAB-CESTTA

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA  
DE CHIMBORAZO

CENTRO DE SERVICIOS TÉCNICOS  
Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA  
AMBIENTAL

FACULTAD DE CIENCIAS  
Panamericana Sur Km. 1 ½  
Teléfono: (03) 2 998232  
RIOBAMBA - ECUADOR



ENSAYOS  
No. OAE LE 2C 06-008

INFORME DE ENSAYO No:  
ST:

0490  
09 - 0054 ANÁLISIS DE ALIMENTOS

Nombre Peticionario:  
Atn.  
Dirección:

-  
Sr. Jairo Gonzáles y/o Sr. Edgar Paucar  
Princesa Toa y la 44

FECHA:  
NUMERO DE MUESTRAS:  
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:  
FECHA DE MUESTREO:  
FECHA DE ANÁLISIS:  
TIPO DE MUESTRA:  
CÓDIGO LAB-CESTTA:  
CÓDIGO DE LA EMPRESA:  
PUNTO DE MUESTREO:  
ANÁLISIS SOLICITADO  
PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA:  
CONDICIONES AMBIENTALES:

19 de Mayo de 2009  
1  
2009 / 05 / 14 - 12:17  
2009 / 05 / 01 - 11:00  
2009 / 05 / 14- 2009 / 05 / 19  
Trigo  
LAB-Alm 193-09  
TG-A<sub>1</sub> 60 °C  
NA  
Proteína, Grasa, Fibra, Extracto libre no Nitrogenado  
Sr. Jairo Gonzáles y/o Sr. Edgar Paucar  
T máx.:25.0 °C. T mín.: 21.0°C

#### RESULTADOS ANALÍTICOS:

PARÁMETRO	MÉTODO /NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LIMITE PERMISIBLE	INCERTIDUMBRE (k=2)
*Proteína	PEE /LAB-CESTTA/104 AOAC/ Volumétrico	%	13,81	-	-
*Grasa	PEE /LAB-CESTTA/102 AOAC/ Gravimétrico	%	2,89	-	-
*Cenizas	PEE /LAB-CESTTA/101 AOAC/ Gravimétrico	%	1,67	-	-
*Fibra	PEE /LAB-CESTTA/103 AOAC/ Gravimétrico	%	1,23	--	--
*Extracto Libre no Nitrogenado	PEE /LAB-CESTTA/141	%	80,40	--	--


#### OBSERVACIONES:

- Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE
- Parámetros expresados en base seca
- Muestra receptada en laboratorio

#### RESPONSABLES DEL INFORME:

  
Dr. Fabián Arias  
RESPONSABLE TÉCNICO

LABORATORIO DE ANALISIS AMBIENTAL  
E INSPECCIÓN  
LAB

  
Dra. Nancy Veloz M.  
JEFE DE LABORATORIO



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS PECUARIAS**

**LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA**

Dirección : Km. 1 Panamericana Sur Telefax: (03) 2947548 Email:

### REPORTE DE ANALISIS

**PROPIETARIO:** Sr. Edgar Paucar, Jairo González  
**FECHA DE LLEGADA:** 14/05/09  
**FECHA DE ENTREGA:** 21/05/09  
**CLASE DE MUESTRA:** trigo  
**ORIGEN DE LA MUESTRA:** Riobamba  
**EMPRESA:**  
**VARIEDAD:** **CODIGO:**  
Trigo grano Rch - 06869  
Trigo grano 60 °C Rch - 06870

### ANALISIS FISICO

CODIGO	OLOR	COLOR	ASPECTO
06869	característico	característico	Normal sin presencia de partículas extrañas
06870	característico	característico	Normal sin presencia de partículas extrañas

### ANALISIS MICROBIOLÓGICO

CODIGO	Recuento Aerobios Mesofilos UFC/G	Coliformes Totales UFC/G	Mohos y levaduras UFC/G
06869	35000	12	200000
06870	1080	3	1875

Ing. Patricio Guevara  
**JEFE LABORATORIO  
Y BROMATOLOGÍA - FCP - ESPOCH**





**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS PECUARIAS**

**LABORATORIO DE NUTRICION ANIMAL**

Dirección : Km. 1 Panamericana Sur Telefax: (03) 2998231

**REPORTE DE ANALISIS**

**PROPIETARIO:** Sr. Jairo González, Edgar Paucar  
**FECHA DE LLEGADA:** 02/07/09  
**FECHA DE ENTREGA:** 06/07/09  
**CLASE DE MUESTRA:** Materia Prima Desconocida  
**ORIGEN DE LA MUESTRA:** Desconocido  
**EMPRESA:**  
**VARIEDAD:** Trigo  
**CODIGO:** Rch - 6817

COMPONENTE	Rch-06817
Secado a 60 °C	TCO
<b>HUMEDAD</b>	8,1%
<b>MATERIA SECA</b>	92,90%
T 110 °C	TCO
<b>HUMEDAD</b>	16%
<b>MATERIA SECA</b>	84%



Ing. Patricio Guevara  
**JEFE LABORATORIO DE NUTRICION ANIMAL  
Y BROMATOLOGÍA – FCP – ESPOCH**