

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DE LA SECADORA DE GRANOS EN UNA PLANTA PROCESADORA
DE ALIMENTOS BALANCEADOS PARA ANIMALES”**

PRESENTADO POR:

JAHIR ALBERTO PÉREZ RAMÍREZ

Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito parcial para
optar al título de:

INGENIERO QUÍMICO

Puerto la Cruz, julio de 2011

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DE LA SECADORA DE GRANOS EN UNA PLANTA PROCESADORA
DE ALIMENTOS BALANCEADOS PARA ANIMALES”**

ASESORES

Ing. Agr. Francisco Iturbe
Asesor Industrial

Ing. Quím. Petra Martínez (M.Sc)
Asesor Académico

Puerto la Cruz, julio de 2011

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DE LA SECADORA DE GRANOS EN UNA PLANTA PROCESADORA
DE ALIMENTOS BALANCEADOS PARA ANIMALES”**

JURADO

Ing. Quím. Petra Martínez., (M.Sc)
Asesor Académico

Ing. Quím. Fidelina Moncada., (M.Sc)
Jurado Principal

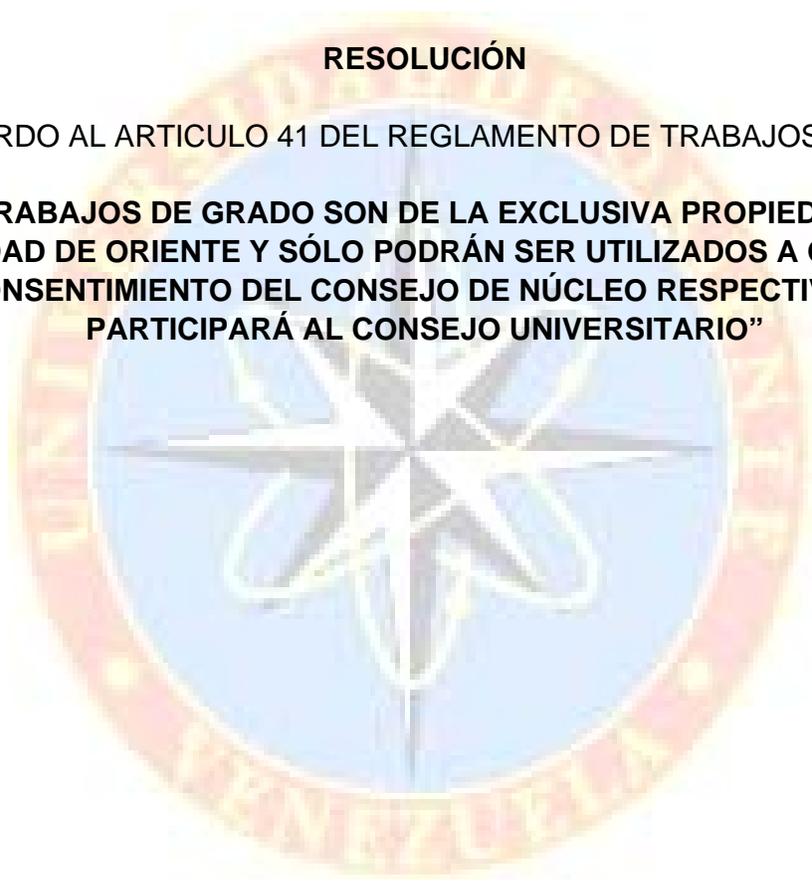
Ing. Quím. Héctor Silva., (M.Sc)
Jurado Principal

Puerto la Cruz, julio de 2011

RESOLUCIÓN

DE ACUERDO AL ARTICULO 41 DEL REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADO

“LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE LA EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE Y SÓLO PODRÁN SER UTILIZADOS A OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIEN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO”



DEDICATORIA

A Dios todopoderoso por guiarme y acompañarme a lo largo del camino que he recorrido hasta aquí y por ser mi principal fuente de sabiduría.

A mi madre Sandra Ramírez, por ser todo para mí y mi gran inspiración para alcanzar esta meta, y todas las que he alcanzado a lo largo de mi vida.

A mi abuela Rosa Ramírez, todo el esfuerzo a través de todos estos años se ve reflejado en este trabajo que sin ti, nunca hubiera sido posible.

A mis hermanos Alexandra Carolina y Jason Guillermo, me siento orgulloso de ser su ejemplo a seguir, y espero que ustedes también logren alcanzar este hermoso sueño.

A todos mis tíos, a ustedes por recibirme con los brazos abiertos en sus hogares y quiero que sepan que este triunfo también es de ustedes.

A mi padre Geovany Pérez, por sentirte orgulloso de la persona en que me convertí.

A mis primos Edras, Gabriela, Richeld, Vladimir, Jose Daniel, Estefani, Miranda y Jorge, por ser esa fuente de alegría y los momentos compartidos a lo largo de mi vida.

A mi sobrino Hendrick y ahijada Fabiola, por traerme mucha felicidad y alegría y que en un futuro logren alcanzar todos sus sueños.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la fuerza para seguir adelante en todo momento y lograr alcanzar esta meta, y las que me faltan por alcanzar, gracias por haberme cuidado durante tantos años alejado de mi hogar y familia.

A mi madre gracias por todo el apoyo, cariño y amor recibido durante este recorrido. Por ser mi ejemplo a seguir y haber hecho todos los sacrificios posibles para que hoy yo pueda ser quien soy, gracias madre Te Amo, no me alcanzará la vida para pagarte todo lo que has hecho por mí.

A la Universidad de Oriente y a todos los profesores que me brindaron sus conocimientos, y de los cuales me fueron de excelente ayuda para hoy convertirme en un profesional, un Ingeniero Químico.

A mis tios, Magaly Márquez, Joe Ramírez, Luz Elena Pérez y Renny Ramírez por ser como unos segundos padres para mí y por todo el apoyo recibido de ustedes en este tiempo, gracias por tratarme como un hijo y ayudarme cuando más lo necesité.

A mi asesora académico Petra Martínez, por toda la ayuda, apoyo y dedicación recibida durante el tiempo que duro la elaboración de este trabajo, y guiarme a culminar mi tesis de grado.

A mis tres mejores amigas Luisana López, Karen Rodríguez y Arlenis Castillo, gracias por haber contado con ustedes cuando más las necesite, y por todo su apoyo brindado, las quiero mucho.

A mis compañeros de estudio y grandes amigos, Danilo Rivera, Marisabel Alfonso, Sergimar Barroso, Antonio Moreno Vilmarys Martinez, María Pérez, Javier Rojas, Jessevely Álvarez, Oswaldo Figuera, Leidy López, Johnsfer Hernández, Héctor Carreño, Rosangeles Marquez, Milie Alafif, Jorge Alcalá, Marycarmen Farfán, Carolina Velásquez y Ma. Gabriela. Salazar gracias por todos los momentos de alegría compartidos.

A Daniela Reyes por estar a mi lado durante esta etapa de mi carrera y haber llenado de alegría y felicidad los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.

A mi mejor amigo Cesar Ibarra, compañero de lucha y esfuerzo durante toda la vida universitaria, que hoy llega a su fin, pero que de seguro continuará en el ámbito profesional.

A la empresa Super, S, gracias a todas las personas que compartieron sus conocimientos conmigo para la realización de esta tesis, en especial al Supervisor de

Control de Calidad Ridel López, siempre dispuesto a ayudar, por sus ideas y recomendaciones respecto a esta investigación, a los analistas del laboratorio Danyela Fuente y Samuel Martínez, por enseñarme nuevas técnicas de análisis, al Sr Marcano operador de la secadora de granos y a Joxiana Hernandez por brindarme la oportunidad de realizar mis pasantías en esa empresa, gracias a todos.

A mi segunda madre Ana Ibarra, por cuidarme como a un hijo y a José Luis gracias a ustedes por la ayuda incondicional que me dieron mientras cursaba mi carrera universitaria, agradecido de por vida por todo lo que hicieron por mí.

A Noris Pérez y Emilio Pérez por haberme dado la oportunidad de convertirme en un profesional, y por ponerme al principio de este camino que hoy llega a su final. Muchas gracias de todo corazón.

A la Sra Milagros Acevedo y el Sr Elías Reyes, a ustedes gracias por la gran ayuda dada en tan poco tiempo que nos conocemos y por los consejos recibidos. Espero que siga siendo así por mucho tiempo.

A las familias Páez Gonzales en el Manteco, y Rojas Brazon en El Tigre por hacer que mi estadía en sus hogares haya sido como estar en casa. Gracias a todos.

Y a todas las personas que de una u otra forma compartieron conmigo y me ayudaron a ser una mejor persona, GRACIAS A TODOS

RESUMEN

En el presente trabajo, se realizó una evaluación de la secadora de granos de la planta de alimentos balanceados para animales, Súper S, C.A ubicada en Barcelona. Para cumplir con el objetivo planteado, fue necesario recopilar las condiciones de funcionamiento y operación. Con la ayuda de un higrómetro se caracterizó el aire que entra a la secadora, obteniéndose que la temperatura del aire frío fue de 31,45°C con una humedad relativa de 62,75%, mientras que el aire caliente a la salida de los quemadores, alcanzó una temperatura de 66,65°C con una humedad relativa de 13,20%, las cuales se encuentran en un valor aceptable de operación. Por otro lado, se utilizó un anemómetro para medir la velocidad del aire, la cual permitió determinar el flujo de aire de alimentación a la secadora, este valor fue de 35,11 kg/s con una desviación de 31,06% del valor teórico recomendado. Estas condiciones de operación permitieron obtener una humedad de 17,5% en base húmeda del grano (maíz), a la entrada de la secadora y 12,5% a la salida. Se construyeron curvas de secado para el maíz, en un secador discontinuo del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de Oriente, a las condiciones de operación de la secadora de granos de la planta, identificándose sólo un periodo de velocidad decreciente, en el cual se observa, que el mecanismo predominante en el secado del grano, es la difusión de la humedad desde su interior. El tiempo teórico, fue calculado a partir de la curva de velocidad de secado, y utilizando las ecuaciones correspondiente. Se determinó que las ecuaciones empleadas para el cálculo del tiempo, no se ajustan a cargas de 150 toneladas de sólido húmedo. Por último, se concluyó que el tiempo de secado disminuye considerablemente, si se aumenta la temperatura del aire caliente.

CONTENIDO

PÁGINA DE TÍTULO	i
PÁGINA DE ASESORES	ii
PÁGINA DE JURADO	iii
RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	viii
CONTENIDO	ix
LISTA DE TABLAS	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Presentación de la empresa.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Antecedentes.....	6
2.2 Principios fundamentales del secado	7
2.2.1 Definición de secado	7
2.2.2 Definición de términos asociados al secado	7
2.2.3 Caracterización de la corriente de aire.....	10
2.2.4 Curvas de secado.....	11
2.2.5 Determinación del tiempo de secado	13
2.3 Secado de granos	14
2.3.1 Secado de distintos granos	14
2.3.2 Características del secado de granos	16
2.3.3 Factores que afectan la velocidad de secado	19
2.3.4 Importancia del secado en la conservación de granos	19
2.4 Clasificación de las secadoras de granos	20

2.4.1 De acuerdo a la forma en que circula el flujo de aire	20
2.4.2 De acuerdo a la temperatura de secado	20
2.4.3 Secadora de caballetes utilizada en Súper S.....	21
2.5 Efecto de la dirección del aire en las secadoras de caballetes.....	22
2.5.1 En contracorriente	23
2.5.2 En paralelo al flujo de granos	23
2.5.3 Perpendicular a la corriente de granos	24
2.6 Descripción del sistema de secado de granos de la planta Súper S	24
CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO.....	27
3.1 Recopilación de las condiciones de diseño y operación	27
3.1.1 Temperatura y humedad relativa del aire a la entrada de la secadora.....	27
3.1.2 Flujo de aire de alimentación a la secadora	28
3.1.3 Carga de granos de la secadora	31
3.2 Obtención de la humedad, en base húmeda, del grano a la entrada y a la salida de la secadora, en un lapso de tiempo representativo.....	31
3.2.1 Medidor de humedad (Moisture tester)	32
3.2.2 Balanza de humedad.....	32
3.3 Reproducción de la curva de secado del grano a la condición de operación de la secadora	33
3.3.1 Acondicionamiento del grano	33
3.3.2 Proceso de secado del grano en el secador discontinuo de bandeja.....	35
3.3.3 Curva de velocidad de secado del maíz	36
3.4 Cálculo del tiempo teórico que tarda el grano en secarse en la secadora..... de granos	44
3.5 Estudio de la influencia de la temperatura del aire, sobre la humedad final del grano y el tiempo de secado.....	47
CAPITULO 4: DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
4.1 Recopilación de las condiciones de diseño y operación de la secadora de granos	49
4.1.1 Temperatura y humedad relativa del aire a la entrada y salida de la secadora.	49
4.1.2 Flujo de aire de alimentación a la secadora	50
4.1.3 Carga de granos de la secadora	51
4.2 Obtención de la humedad, en base húmeda, del grano a la entrada y a la salida de la secadora, en un lapso de tiempo representativo.....	51

4.3 Reproducción de la curva de secado del grano a la condición de operación de la secadora	53
4.4 Cálculo del tiempo teórico que tarda el grano en secarse	56
4.5 Estudio de la influencia de la temperatura del aire, sobre la humedad final del grano y el tiempo de secado.....	57
4.6 Conclusiones	59
4.7 Recomendaciones.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61
ANEXO A	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO B	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO C	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE TABLAS

- Tabla 2.1. Porcentajes máximos de extracción de agua por hora, para cada grano **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 2.2. Temperatura máxima que no debe sobrepasar el grano, para mantener su calidad.**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 2.3 Humedad para almacenaje a 25°C**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 2.4 Contenido de humedad durante la cosecha y almacenamiento seguro. .. **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 2.5 Flujo de aire para diferentes sistemas de secado de grano**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.1 Longitudes de las secciones de la secadora de granos**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.2 Valores de temperatura y humedad relativa del aire a la entrada de la secadora**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.3 Valores de la temperatura del aire caliente por días de funcionamiento de la secadora**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.4 Valores de tiempo y distancia recorrida por el aire en el anemómetro..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.5 Datos de humedad del grano en porcentaje, a la entrada y salida de la secadora de granos**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.6 Valores obtenidos del agua colada y del agua retenida en el papel absorbente.**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.7 Peso del sólido húmedo y humedad inicial**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.8 Variación del peso de la muestra de maíz con respecto al tiempo en un secador discontinuo (primera corrida)**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.9 Variación del peso de la muestra de maíz con respecto al tiempo en un secador discontinuo (segunda corrida)**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.10 Variación del peso de la muestra de maíz con respecto al tiempo en un secador discontinuo (tercera corrida)**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.11 Variación del peso de la muestra de maíz con respecto al tiempo en un secador discontinuo (cuarta corrida)**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.12 Variación del peso de la muestra de maíz con respecto al tiempo en un secador discontinuo (quinta corrida)**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.13 Variación del porcentaje de humedad con respecto al tiempo en la secadora de granos de la planta**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 3.14 Tiempos de secado a diferentes temperatura del aire y humedad final del grano.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.1 Valores de temperaturas y humedad relativa del aire promedios del aire a la entrada y salida de los quemadores de la secadora.....**¡Error! Marcador no definido.**

- Tabla 4.2 Flujo de aire alimentado a la secadora de granos**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.3 Humedad promedio de entrada y salida de la secadora de granos..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla 4.4 Comparación entre los diferentes tiempos de secado.**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla A.1 Tabla de las características del aire frío y caliente a la entrada de la secadora de granos**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla A.2 Valores de la velocidad y flujo de aire a la entrada de la secadora..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla A.3 Valores de las dimensiones de la bandeja del secador, el ducto de succión de la secadora y la secadora de granos.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla A.4 Valores del peso del agua absorbida por el grano, peso del agua inicial y valores de humedad, en base húmeda del grano acondicionado..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla A.5 Valores obtenidos del peso de las muestras totalmente secas..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla A.6 Valores de humedad en base húmeda, humedad en base seca, humedad libre, humedad libre promedio y velocidades de secado. (Primera corrida)**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla A.7 Valores de humedad en base húmeda, humedad en base seca, humedad libre, humedad libre promedio y velocidades de secado. (Segunda corrida)**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla A.8 Valores de humedad en base húmeda, humedad en base seca, humedad libre, humedad libre promedio y velocidades de secado. (Tercera corrida)**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla A.9 Valores de humedad en base húmeda, humedad en base seca, humedad libre, humedad libre promedio y velocidades de secado. (Cuarta corrida)**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla A.10 Valores de humedad en base húmeda, humedad en base seca, humedad libre, humedad libre promedio y velocidades de secado. (Quinta corrida)**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla A.11 Valores de humedad en base húmeda, humedad en base seca, humedad libre, humedad libre promedio y velocidades de secado para la secadora de granos.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Tabla A.12 Valores correspondiente al método de Simpson 5 puntos. ... **¡Error! Marcador no definido.**

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 Relaciones existentes entre los diferentes tipos de humedades ¡Error!
Marcador no definido.
- Figura 2.2 Diagrama psicrométrico¡Error! **Marcador no definido.**
- Figura 2.3 Contenido de humedad en función del tiempo ..¡Error! **Marcador no definido.**
- Figura 2.4 Velocidad de secado en función de la humedad.¡Error! **Marcador no
definido.**
- Figura 2.5 Secadora de caballetes.....¡Error! **Marcador no definido.**
- Figura 2.6 Corte de una cámara de secado.....¡Error! **Marcador no definido.**
- Figura 2.7 Diagrama del sistema de secado de granos de Súper S...¡Error! **Marcador no
definido.**
- Figura 3.1 Humedad libre en función del tiempo para un secador discontinuo ¡Error!
Marcador no definido.
- Figura 3.2 Curvas de velocidad de secado para las diferentes corridas . ¡Error! **Marcador
no definido.**
- Figura 3.3 Humedad en base seca en función del tiempo en una secadora de granos.
.....¡Error! **Marcador no definido.**
- Figura 4.1 Variación del flujo de aire alimentado a la secadora¡Error! **Marcador no
definido.**
- Figura 4.2 Variación de las diferentes humedades del grano, a la entrada de la secadora
.....¡Error! **Marcador no definido.**
- Figura 4.3 Variación de las diferentes humedades del grano a la salida de la secadora
.....¡Error! **Marcador no definido.**

- Figura 4.4 Curva de secado del maíz en un secador de túnel a la condición de operación, de la secadora de granos**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 4.5 Velocidad de secado del maíz en una secadora de granos ... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 4.6 Variación del tiempo de secado con respecto a la temperatura del aire de entrada, para alcanzar la humedad final del grano**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura B.1 Variación de la humedad libre con respecto al tiempo (Primera corrida) **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura B.2 Variación de la humedad libre con respecto al tiempo (Segunda corrida)**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura B.3 Variación de la humedad libre con respecto al tiempo (Tercera corrida) **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura B.4 Variación de la humedad libre con respecto al tiempo (Cuarta corrida).. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura B.5 Variación de la humedad libre con respecto al tiempo (Quinta corrida).. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura B.6 Diagrama psicrométrico**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C.1 Medidor de humedad.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C.2 Medidor de humedad.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C.3 Ducto del aire de entrada a la secadora.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C.4 Vista interior de la secadora de caballetes.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C.5 Caballetes (forma de V invertida)**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C.6 Quemadores de la secadora que calientan el aire de entrada..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C.7 Anemómetro ubicado en la entrada de la secadora.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C.8 Secadora de granos**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C.9 Secador discontinuo de bandeja**¡Error! Marcador no definido.**

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA

Inicialmente Súper S, C.A era una planta que pertenecía a Molinos Nacionales C.A. (MONACA) y estaba encargada de producir alimentos balanceados para animales con el fin de satisfacer la demanda nacional. En 1999, MONACA decide vender las plantas que

conforman la sección ABA (Alimentos Balanceados para Animales) al grupo La Caridad. Actualmente Súper S, C.A planta Barcelona se dedica a la producción y comercio de alimentos balanceados para aves, ganados y cerdos. Esta planta está ubicada en la zona industrial Los Montones, tercera etapa, parcela 42 y 43, parroquia El Carmen, municipio Simón Bolívar, Barcelona, estado Anzoátegui. En esta planta se pueden obtener alimentos nutritivos y de forma controlada, con la formulación de dietas de acuerdo a los requerimientos de cada animal, para así asegurar un rápido crecimiento, lo que no se logra con alimentos no balanceados. Es por ello que se debe contar con un buen control en las etapas del proceso, para así garantizar una buena calidad del producto.

La empresa Súper S, realiza una de las actividades más importantes del sector agroindustrial; la producción y comercialización de alimentos balanceados para animales grandes y pequeños tales como, aves, ganado, cerdos y caballos. Estas actividades permiten obtener alimentos nutritivos de forma controlada, es decir, se formulan dietas de acuerdo a los requerimientos de cada animal, que aseguren un crecimiento rápido el cual no se lograba con alimentos no balanceados; pero el hecho de producir este tipo de alimentos, no indica que éstos sean de buena calidad, para lograrlo es necesario llevar un control muy arduo del sistema de producción, que inicia desde la recepción de materia prima, pasando por controles, mediante análisis fisicoquímicos como humedad, granulometría, dureza, grasa, proteína, calcio, fósforo, entre otros; hasta llegar a obtener el producto terminado.

Los alimentos se fabrican en forma de harina, *pellet* y semigránulos, dependiendo de la especie, edad, peso y necesidades nutricionales de la especie animal a alimentar. El procesamiento del alimento se basa en el tratamiento, combinación y mezcla de las diferentes materias primas, para esto es necesario pasar por una serie de pasos, que son los que conforman las etapas del proceso, los cuales se mencionan a continuación:

- **Recepción y almacenamiento de materia prima:** en esta etapa las harinas (arroz, maíz, trigo y soya) son almacenadas en un silo horizontal, los granos (maíz y sorgo) en silos verticales y las grasas y aceites en el patio de tanques.
- **Secado de cereales:** este proceso ocurre sólo cuando la humedad del grano recibido (maíz y sorgo) es mayor al 12% en base húmeda.
- **Molienda de granos:** en esta etapa se reduce el tamaño a la materia prima en forma de grano como el maíz, sorgo y soya hasta convertirla en harinas.
- **Dosificación de grasas:** dependiendo del alimento que se desee elaborar, se prepara una mezcla de grasas y aceites y un porcentaje de ésta; es

dosificada a la mezcladora, al momento de preparar el alimento. El resto se adiciona durante el proceso de enfriamiento.

- Mezclado: este proceso tiene una duración de 3 minutos una vez que se ha dosificado a la mezcladora, todas las materias primas que se requieren para la preparación del alimento. Estas cantidades son fijadas por el departamento de Control de Calidad.
- Acondicionamiento: consiste en suministrar al alimento, vapor de agua a alta temperatura durante un corto periodo de tiempo, con el fin de gelatinizar los almidones y de aumentar su humedad.
- Pelletizado: una vez acondicionado el alimento éste es llevado a una pelletizadora, y mediante un molde con orificios, convierte al alimento en pequeños cilindros, el cual es conocido como pellet.
- Enfriamiento: el enfriamiento consiste en disminuir la temperatura del pellet por medio de un flujo de aire a temperatura ambiente, para que tome una consistencia dura y no se desmorone.
- Desmoronamiento: en esta etapa se hace pasar el pellet por los rodillos (Crumbler) para obtener semigranulos de alimento.

Si el alimento se desea en forma de polvo el proceso termina en la etapa de mezclado, si por el contrario lo que se quiere es pelletizado la elaboración culmina en el enfriamiento, y si éste se necesita semigranulado, se siguen todas las etapas hasta el desmoronamiento.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Venezuela se tienen dos períodos climáticos, uno de sequía y uno de lluvia. Durante el período de lluvia considerado desde el mes julio hasta diciembre, la cosecha de maíz y sorgo tiene un elevado porcentaje de humedad en el grano. Los granos no pueden conservarse en los silos de almacenamiento si no están secos. La humedad máxima del grano para considerarse “seco” es de 15% en base húmeda, pero este valor es relativo, ya que depende de diversos factores. En un país frío el maíz puede conservarse con un 15% de humedad, pero en un país cálido, el mismo maíz se conserva a una humedad de 12 -13%. Es por ello, que en las plantas de acondicionamiento, el secado de granos es la etapa fundamental del proceso.

Súper S, C.A planta Barcelona cuenta con una secadora de granos (maíz y sorgo) de tipo caballetes, la cual se encarga de secar las cargas de granos proveniente de la cosecha húmeda del país. Estos granos húmedos son almacenados únicamente en tres silos con capacidad de 200 toneladas cada uno, denominados en la planta como temperos.

La función principal de una secadora de granos es reducir el contenido de humedad hasta niveles donde el metabolismo del grano se haga mínimo (poca capacidad para el crecimiento microbiano), permitiendo conservarlo durante cortos y largos períodos de almacenamiento sin afectar su calidad. Mientras más alto sea el contenido de humedad del grano, mayor será su liberación de vapor de agua y calor, el grano por lo tanto incrementará su humedad y su temperatura, acelerando el proceso de deterioro, y a la vez creándose condiciones propicias para el desarrollo de hongos y bacterias perjudiciales al mismo.

En el proceso de secado, los temperos son los encargados de alimentar la secadora de granos, pero sólo se recibe granos de uno de ellos, es decir, durante la operación, uno de los temperos alimenta la secadora mientras que los otros permanecen en reposo. La carga del tempero en operación mientras ocurre el secado, no debe ser alterada, porque no se debe mezclar el grano húmedo con el grano seco, ya que esto puede alterar la humedad del grano a secar y en consecuencia el tiempo de secado. Es por ello, que el tiempo de secado es uno de los factores más importante en la planta, debido a que, cuando los temperos en reposo alcanzan la capacidad máxima de almacenamiento, los proveedores deben esperar hasta que uno de ellos, esté disponible para poder descargar y éste tiempo de espera se puede prolongar hasta un día.

Con base a lo expuesto anteriormente, surge la necesidad de realizar una evaluación en la secadora de granos de la planta Súper S, con el fin de cumplir con los parámetros de calidad establecidos en el acondicionamiento del grano. Para ello, inicialmente se recopilarán las condiciones de diseño y operación del equipo. Posteriormente, se determinará la humedad en base húmeda del grano (maíz), a la entrada y a la salida de la secadora en lapsos de tiempos representativos. Se construirá la curva de secado del maíz a la condición de operación de la secadora, a partir de ésta se calculará el tiempo teórico que tarda el grano en secarse, desde la humedad inicial hasta la humedad final requerida para el almacenamiento, por último se estudiará la influencia de la temperatura del aire sobre la humedad final del grano y el tiempo de secado.

Un buen ajuste de las variables de operación del equipo, proporcionará una excelente condición de trabajo, y con esto se garantizará el acondicionamiento deseado en el proceso, además de cumplir con los parámetros de calidad requerido por el laboratorio de aseguramiento de la calidad. El ajuste en la secadora de granos mejorará el proceso de secado, lo cual conduce a un ahorro energético y al final se traducirá en un ahorro económico para la planta.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la secadora de granos en la planta procesadora de alimentos balanceados para animales Súper S, C.A.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Recopilar las condiciones de diseño y operación de la secadora de granos.
2. Obtener la humedad, en base húmeda, del grano a la entrada y a la salida de la secadora, en un lapso de tiempo representativo.
3. Reproducir la curva de secado del grano a la condición de operación de la secadora.
4. Calcular el tiempo teórico que tarda el grano en secarse.
5. Estudiar la influencia de la temperatura del aire, sobre la humedad final del grano y el tiempo de secado.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Brito y Marín (2010), estudiaron la influencia de la temperatura sobre la cinética de secado del frijol (*Vigna Unguiculata*) utilizando un secador discontinuo de bandeja. Establecieron un valor de humedad inicial y un rango de temperatura para hacer las corridas de secado y obtuvieron curvas de secado a diferentes condiciones de temperatura, esto les permitió calcular el tiempo de secado y observar que al aumentar la temperatura, se redujo considerablemente el tiempo de secado del frijol. Con respecto a la caracterización fisicoquímica y funcional del frijol seco, observaron que no hubo efecto significativo en su calidad, dentro del rango de temperatura estudiado.

González (2008) estudió el secado de granos de maíz crudo utilizando un lecho fluidizado al vacío. Para ello, inicialmente determinó las características de las partículas de maíz fresco, obteniendo de esta forma valores de densidad, volumen y diámetro de partículas, entre otros. Esto permitió que se realizaran prueba fluidinámicas para conocer los valores de velocidad, caída de presión, porosidad del lecho etc. Posterior a ello, realizó pruebas de secado a diferentes temperaturas y velocidades del aire en la columna y comprobó que a mayor temperatura y velocidad de aire la remoción de humedad es mayor para todos los casos. Además con estos datos construyó las curvas de velocidad de secado del maíz para las diferentes condiciones.

Marcano (2003) llevó a cabo un proyecto de investigación en el secador rotatorio donde se realizó un estudio de sensibilidad y una metodología de cálculo aplicado al secador rotatorio, para tal fin, se obtuvo mediante un análisis granulométrico los diferentes tamaños de partícula, se estudió la influencia del tamaño de partícula, inclinación del secador, el flujo de gas y el flujo de sólido, sobre el tiempo de residencia y el retenido del sólido y se realizo una metodología de cálculo que permitió el dimensionamiento y análisis del secador rotatorio.

Villar (2001) estudió las variables que influyen en la operación de secado utilizando un secador rotatorio. Realizó balances de materia y energía para determinar el flujo y la temperatura del gas a la salida del secador, también estudió el efecto de las variables sobre el tiempo de residencia y el retenido del sólido, además calculó el calor total transferido desde la fase gaseosa a la fase sólida. Para ello, realizó pruebas del flujo de aire en el secador rotatorio y encontró que a medida que se redujo el tamaño de partícula, el flujo de aire se incremento, aumentando así el calor total transferido.

En el presente trabajo se reproducirá la curva de secado a la condición de operación de la secadora de grano de manera análoga a como lo hicieron Brito y Marín. Además, se estudiará el secado del maíz en un secador de túnel con bandeja, como lo hizo González en un lecho fluidizado. Por último, se analizará la influencia de la temperatura del aire sobre el tiempo de secado, similar a lo hecho por Villar y Marcano en un secador rotatorio

2.2 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DEL SECADO

2.2.1 Definición de secado

El secado de sólidos consiste en separar, mediante el contacto con un gas caliente, pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo.

El contenido de líquido de una sustancia seca varía de un producto a otro. Ocasionalmente el producto que no contiene líquido recibe el nombre de totalmente seco, pero lo más frecuente es que el producto contenga algo de líquido. El secado significa que hay una reducción del contenido de líquido dentro de un sólido. (McCabe y Colaboradores, 1991)

2.2.2 Definición de términos asociados al secado

2.2.2.1 Contenido de humedad

El contenido de humedad de un material se puede expresar en base seca ó base húmeda. Si un material se expone al aire a una temperatura y humedad dada, dicho material perderá o ganará agua hasta que se establezcan unas condiciones de equilibrio. La humedad correspondiente a dicho equilibrio varía ampliamente con la humedad y la temperatura del aire. (Coulson y Richarson, 1978)

2.2.2.2 Contenido de humedad en base húmeda (W)

Es la relación entre la cantidad de líquido ó agua y la cantidad de sólido húmedo, y es expresado como:

$$W = \frac{mh}{mSh} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

mh: masa de agua (kg)

mSh: masa de sólido húmedo (kg)

2.2.2.3 Contenido de humedad en base seca (X)

Es la relación entre la cantidad de líquido ó agua y la cantidad de sólido completamente seco.

$$X = \frac{mh}{mSs} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

mh = masa de agua (kg)

mSs = masa del sólido seco (kg)
por definición:

$$mSh = mh + mSs \quad (\text{Ec. 2.3})$$

donde:

$$mh = mSh - mSs \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Sustituyendo la ecuación 2.4 en las ecuaciones 2.1 y 2.2, se tiene que:

$$W = \frac{(mSh - mSs)}{mSh} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$X = \frac{(mSh - mSs)}{mSs} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

donde:

$$mSs = (1 - W) \times mSh \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Relacionando la humedad en base humedad y en base seca se tiene que:

$$W = \frac{X}{1+X} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$X = \frac{W}{(1-W)} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Resulta útil expresar el contenido de humedad en base seca, debido a que el denominador de su ecuación es un valor constante en todo el sistema. (Treybal, 2000)

2.2.2.4 Humedad en el equilibrio (x^*)

Es el contenido de humedad de una sustancia que está en el equilibrio con una presión parcial dada del vapor. El contenido de humedad de equilibrio de un sólido es especialmente importante en el secado, porque representa el contenido de humedad limitante, en ciertas condiciones de humedad y temperatura. (Perry, 2001)

2.2.2.5 Humedad retenida

Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura.

2.2.2.6 Humedad no retenida

Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura. (Treybal, 2000)

2.2.2.7 Humedad libre

La humedad libre es la humedad contenida por una sustancia, en exceso de la humedad en el equilibrio. Sólo puede evaporarse la humedad libre; el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor en el gas y se define como:

$$X_{\text{libre}} = X - X^* \quad (\text{Ec. 2.10})$$

donde:

X: contenido de humedad retenida o no retenida, expresada en base seca.

X*: contenido de humedad en el equilibrio.

Todas estas relaciones son mostradas en la figura 2.1

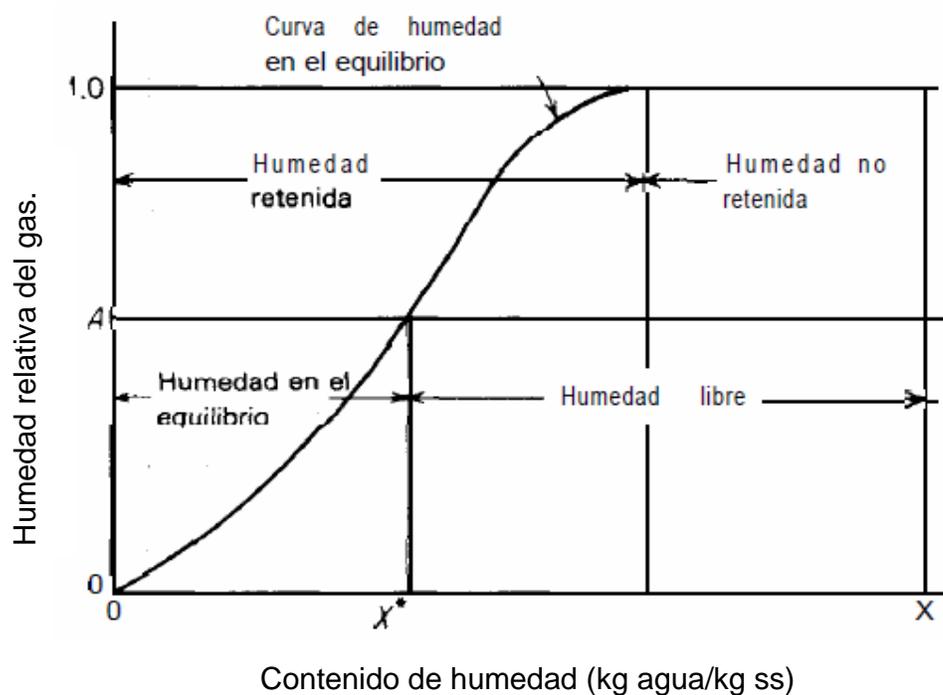


Figura 2.1 Relaciones existentes entre los diferentes tipos de humedades (Treybal, 2000)

2.2.2.8 Términos asociados al aire

•

Humedad absoluta másica

Es la cantidad de vapor de agua presente en el aire por unidad de masa de aire seco.

$$H = \frac{M_A}{M_B} \times \frac{P_a}{(1 - P_a)} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

donde:

H: humedad del aire (kg agua/kg de aire seco)

M_A y M_B : peso moleculares de los componentes A y B respectivamente (g/mol)

P_A : presión parcial del vapor (atm) (McCabe y Colaboradores, 1991)

•

Humedad relativa

La humedad relativa es la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica. Esta es la forma más habitual de expresar la humedad ambiental. Por definición:

$$H_R = 100 \frac{P_A}{P_A^*} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

donde:

H_R : humedad relativa (%)

P_A : presión parcial de vapor de agua en la mezcla de aire.

P_A^* : presión de saturación de vapor de agua a la temperatura en la mezcla de aire. (McCabe y Colaboradores, 1991)

• Volumen húmedo

Es el volumen total de una unidad de masa de gas exento de vapor, más el vapor que le acompaña, a 1 atm y a la temperatura del gas. De acuerdo a la ley de los gases, está relacionado con la humedad y la temperatura por medio de la ecuación:

$$V_H = \frac{0,0224T}{273} \times \left(\frac{1}{M_B} + \frac{H}{M_A} \right) \quad (\text{Ec. 2.13})$$

donde:

V_H : volumen húmedo (m^3/g de aire seco)

T: Temperatura (K)

H: humedad del aire (g agua/g de aire seco) (McCabe y Colaboradores, 1991)

2.2.3 Caracterización de la corriente de aire, utilizando el diagrama psicrométrico

Un diagrama psicrométrico es un gráfico que muestra los parámetros termodinámicos del aire húmedo a una presión constante, a menudo se usa a una presión de 1 atm, o lo es

lo que es lo mismo a la presión correspondiente sobre el nivel del mar. Los parámetros que se muestran en esta gráfica son: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, punto de rocío, humedad relativa, relación de humedad, entalpía específica, volumen específico. En la figura 2.2 se puede observar una carta psicrométrica a 1 atm de presión.

Para el uso de la carta psicrométrica, sólo es necesario conocer dos de las variables antes mencionadas. Estas dos variables, permiten la ubicación en algún punto del diagrama psicrométrico, y a partir de allí, el resto de las variables quedan estrictamente definidas a las dos condiciones fijadas.

Los procesos de calefacción, refrigeración, humidificación y deshumidificación que tienen lugar en el acondicionamiento del aire modifican la condición del aire, desde la representada por el punto de estado inicial en el diagrama hasta una condición diferente, representada por un segundo punto en el diagrama. Hay cinco procesos posibles: procesos de calor sensible constante, procesos de calor latente constante, procesos de entalpía constante o adiabáticos, procesos de humedad relativa constante ó finalmente, una modificación que representa una combinación cualquiera de los anteriores y que no procede a lo largo de ninguna de las líneas de procesos anteriores.

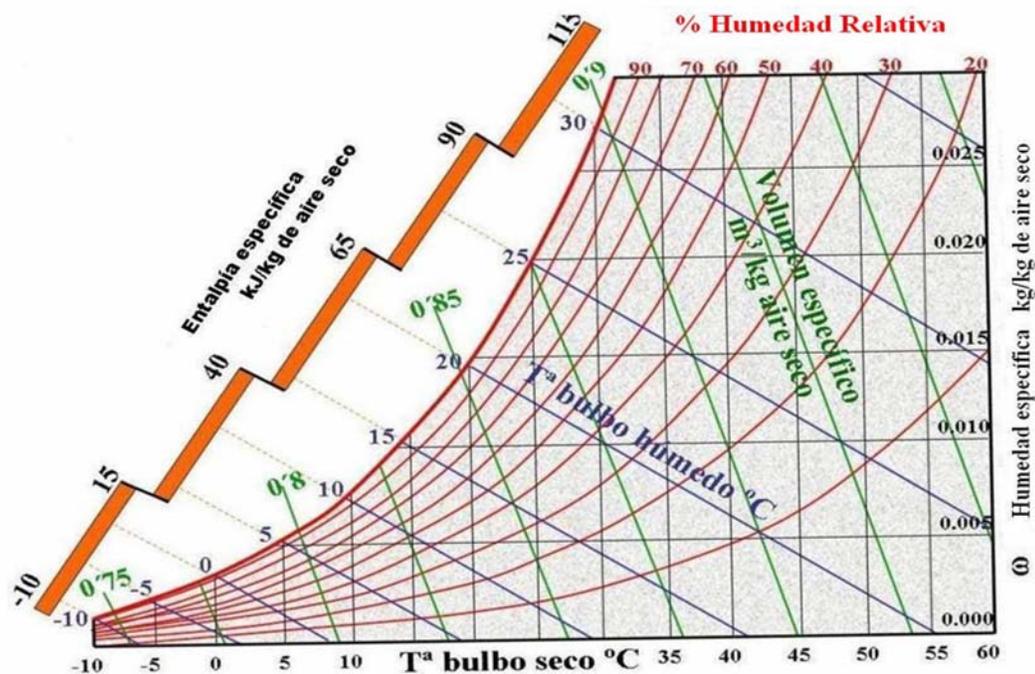


Figura 2.2 Diagrama psicrométrico (Perry, 2001)

2.2.4 Curvas de secado

Cuando un sólido se seca experimentalmente, por lo general se obtienen datos que asocian el contenido de la humedad con el tiempo. En la figura 2.3 se representa el caso en que los sólidos pierden humedad, primero por evaporación desde una superficie saturada del sólido, después sigue un periodo de evaporación de la superficie saturada

que tiene un área que gradualmente va disminuyendo, y por ultimo cuando el agua del interior del solido se evapora.

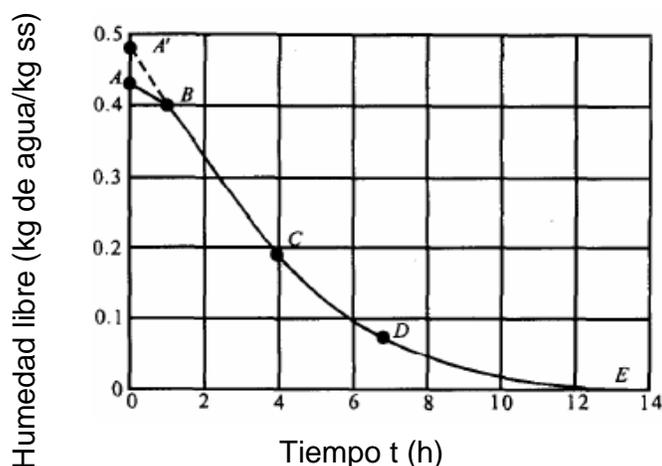


Figura 2.3 Contenido de humedad en función del tiempo
(Geankoplis, 1998)

Esta curva indica que la velocidad de secado varía en función del tiempo o con el contenido de humedad. Esta variación se ilustra con mayor claridad diferenciando gráfica o numéricamente la curva y haciendo una representación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad en base seca, como se muestra en la figura 2.4. Estas curvas de velocidad, demuestran que el secado no es un proceso suave y continuo en el cual existe un solo mecanismo, que ejerza el control a lo largo de toda su duración. (Geankoplis, 1998)

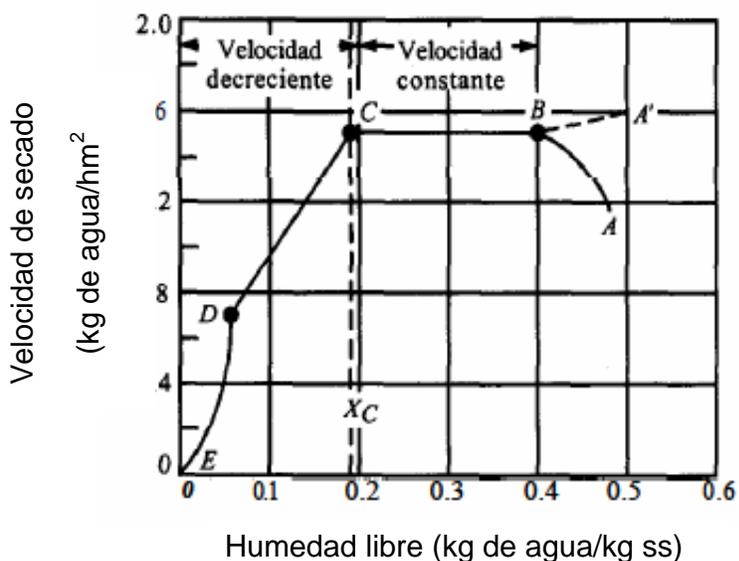


Figura 2.4 Velocidad de secado en función de la humedad.
(Geankoplis, 1998)

2.2.5 Determinación del tiempo de secado

El tiempo que se requiere para secar un material en las condiciones existentes en el secador, es una variable muy importante para el diseño de estos equipos, debido a que determina el tamaño del secador que se necesita para obtener una eficiencia determinada.

2.2.5.1 Tiempo de secado en período de velocidad constante

Para el secado a condiciones constante, el tiempo de secado se puede determinar a partir de la curva de velocidad de secado cuando se puede disponer de la misma. Con frecuencia esta curva se obtiene en un experimento de secado con el material en cuestión y éste conduce directamente al tiempo de secado. Las curvas de velocidad de secado en unas condiciones con frecuencia, pueden modificarse para otras condiciones y, por tanto, resulta útil calcular el tiempo de secado a partir de la curva de velocidad de secado. La velocidad de secado se expresa de la siguiente forma: (Treybal, 2000)

$$N = \frac{-L_s}{A} \left(\frac{dX}{dt} \right) \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Donde:

N: velocidad de secado (kgH₂O evaporada/s.m²)

L_s: masa del sólido seco (kg)

$\left(\frac{dX}{dt} \right)$: variación de la humedad con el tiempo

A: área expuesta al secado (m²)

Para el período de velocidad constante $N = N_c$, el tiempo de secado puede obtenerse integrando la humedad, al iniciarse el período de secado constante (X_1) y al finalizar en la humedad crítica (X_c):

$$\int_0^{t_c} dt = - \frac{L_s}{A \cdot N_c} \int_{X_1}^{X_c} dX \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Resolviendo:

$$t_c = \frac{L_s(X_1 - X_c)}{A \cdot N_c} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Donde:

t_c: tiempo de secado en el período de velocidad constante (s)

N_c: velocidad de secado en el período de secado constante (kg H₂O evaporada/s.m²)

2.2.5.2 Tiempo de secado en el período de descenso

Para el tiempo de velocidad decreciente $N = f(X)$, el tiempo de secado se obtiene integrado entre la humedad al iniciarse este período, que es la humedad crítica (X_c) y la humedad al finalizar éste (X_2):

$$\int_0^{t_c} dt = -\frac{L_s}{A} \int_{X_c}^{X_2} \frac{dX}{N} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Resolviendo:

Si el período de descenso de la velocidad, es una curva

$$t_D = -\frac{L_s}{A} \int_{X_c}^{X_2} \frac{dX}{N} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Donde:

t_D : tiempo de secado en el período de descenso (s)

Si el período de descenso de la velocidad es una línea recta

$$t_D = -\frac{L_s}{A} \cdot \frac{(X_c - X_2)}{(N_c - N_2)} \cdot \ln \frac{N_2}{N_c} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Donde:

X_2 : Humedad al finalizar el período de descenso (kg agua/kg ss)

N_2 : Velocidad de secado al finalizar el período de descenso (kg H₂O evaporada/s.m²)
(Treybal, 2000)

2.3 SECADO DE GRANOS

El objetivo principal del secado es reducir la humedad de cosecha de los granos y semillas a niveles seguros para el almacenamiento.

El secado artificial del grano en la post-cosecha, es el procedimiento que más atención requiere para no afectar la calidad de éstos. De la energía utilizada en el proceso de secado de granos, el secado consume alrededor del 50%. Tomando en cuenta estos dos factores, es decir calidad y consumo energético, se puede apreciar la importancia que adquiere la correcta realización.

2.3.1 Secado de distintos granos

2.3.1.1 Maíz

Casi el 80% del maíz producido en el país, se cosecha con un contenido de humedad superior a la de recepción. Es el grano que más se procesa en el país y en todos los países productores de grano.

El fisurado es el principal efecto de la práctica de secado sobre la calidad de este grano. Las fisuras son microrajaduras que se producen en el endosperma harinoso, pero que no llegan al pericarpio, por lo que el grano permanece entero. Con el posterior movimiento el grano se termina partiendo, lo cual es penalizado por el estándar de comercialización. Es por ello, que la temperatura máxima que puede alcanzar el grano, durante el proceso de secado es 70 °C, si el destino es la molienda de éste para el consumo animal. Generalmente, las plantas productoras de alimento para animales, cuidan muy bien el concepto de calidad del maíz. (Rodríguez, 2006)

2.3.1.2 Sorgo

La mayoría de los sorgos graníferos se caracterizan porque cuando la panoja ya está madura y sus granos casi secos, el resto de la planta (hoja y tallos) se encuentran todavía verde.

El secado del sorgo es algo más dificultoso que el del maíz por el menor tamaño del grano, que ofrece una mayor resistencia al paso del aire; por lo tanto, el rendimiento de las secadoras es menor con el sorgo. Además, siendo el sorgo un cereal de menor precio que el maíz, el costo del secado artificial resulta proporcionalmente más elevado y puede llevarse una buena parte de las ganancias del productor.

Es común, observar en las zonas productoras de este cereal, grandes montones a la intemperie. Esto no significa siempre que falta espacio de almacenamiento, sino que se reserva el espacio para otro grano de mayor valor. En general, se emplean las mismas temperaturas del aire de secado que se aplican al maíz. (Rodríguez, 2006)

2.3.1.3 Trigo

El principal uso del trigo es la panificación, un aspecto importante a tener en cuenta es el efecto del secado sobre la calidad del gluten. Es necesario tener en cuenta que el gluten puede haber sido totalmente dañado por una mala práctica de secado y aun así el porcentaje de proteína de la muestra no sufre variación. El porcentaje de proteína no sirve para evaluar la calidad de secado.

El gluten se comienza a deteriorar cuando el grano supera temperaturas de 60°C, por lo que la temperatura del aire de secado debe ser tal que la máxima temperatura que alcancen los granos en el interior de las secadoras sea inferior a dicha temperatura límite. (Rodríguez, 2006)

2.3.1.4 Maíz pisingallo

Este grano se está tornando poco a poco en una interesante alternativa para los productores de la zona maicera. Se cree que en los próximos años la importancia económica de este cultivo continuará aumentando, y cada vez más personas deberán informarse acerca de las particularidades de su producción y manejo en post-cosecha.

El secado en silo a baja temperatura (aire calentado hasta 6°C sobre la temperatura ambiente) ha sido el principal método artificial de secado utilizado por los productores y procesadores de maíz pisingallo en los EEUU. Este método de secado puede ser fácilmente adaptable a cualquier área geográfica que tenga la humedad relativa

suficientemente baja durante la época de secado. Un mal cálculo al relacionar el contenido de humedad del grano y el poder secante del aire de una determinada región, resultará en cuantiosas pérdidas. (De Dios, 1996)

2.3.1.5 Soja

El grano de soja posee una gran capacidad de intercambiar humedad con el aire. Esta característica, y la de ofrecer menor resistencia al pasaje de aire, hacen que la soja se seque con mayor facilidad que el maíz. Se aconseja no superar temperaturas de secado mayores a 80°C, ya que de lo contrario se puede provocar excesivo desprendimiento de cáscara y soja partida. Los deterioros son más notables cuando el grano se seca a un contenido de humedad inferior al 12%. (Rodríguez, 2006)

2.3.1.6 Girasol

El girasol puede perder humedad fácilmente, tal es así que se lo puede llegar a cosechar con humedades cercanas a la de recepción, aun siendo un cultivo de cosecha otoñal. Esta característica permite que el girasol se pueda secar con aire natural más fácilmente que el resto de los granos.

Si el secado de girasol se realiza a alta temperatura, sobre todo con secadoras de caballetes, es muy recomendable la limpieza del grano al ingresar a la planta para eliminar cuerpos extraños y basura para reducir los riesgos de incendio. La temperatura del aire de secado, y el tiempo de secado no influyen en la calidad industrial de la semilla de girasol, pero para disminuir el peligro de incendio ya mencionado se suelen emplear temperaturas de aire menores a 75°C.

Para el secado de girasol con aire natural, es conveniente que el grano no supere el 17% de humedad para lograr disminuir el contenido de humedad rápidamente. El girasol húmedo es muy propenso a auto-calentarse, produciéndose en ese caso un notable incremento en la acidez del aceite con importantes pérdidas de calidad. (Castillo, 2006)

2.3.2 Características del secado de granos

2.3.2.1 Velocidad de extracción de agua

Cada grano tiene una velocidad de extracción de agua por hora para no sufrir deterioro. Si se sobrepasa ese valor cuando se seca artificialmente, no se puede mantener su calidad. La tabla 2.1 muestra los valores de extracción de agua máxima por hora (en porcentaje) para los distintos granos. (Rodríguez, 2006)

Tabla 2.1. Porcentajes máximos de extracción de agua por hora, para cada grano

Grano	% Extracción por hora
Maíz – Sorgo - Girasol	Menos de 5%

Trigo	Menos de 4%
Soja	Menos de 3%
Arroz	Menos de 1%

2.3.2.2 Temperatura de secado

El secado se puede realizar con aire natural o con aire caliente y generalmente se refiere a la temperatura del aire de secado. Sin embargo, la temperatura que el grano adquiere en los procesos de secado, determinará si el mismo mantiene la calidad inicial que poseía antes de iniciado dicho proceso. (Rodríguez, 2006)

En la tabla 2.2 se muestra las temperaturas máximas que el grano no debería sobrepasar, para mantener la calidad de acuerdo al uso final al que se le destine.

Tabla 2.2. Temperatura máxima que no debe sobrepasar el grano, para mantener su calidad. (Rodríguez, 2006)

Grano	Uso final	T máx. (°C)
Maíz	Molienda seca y semilla	43
	Molienda húmeda	60
	Consumo animal	71
Trigo	Semilla	44
	Molienda de harina	66
Soja	Semilla	38
	Aceite	48
Girasol	Confitería	75
	Aceite	80
Arroz	Molienda	40

2.3.2.3 Contenido de humedad y flujo de aire para almacenaje seguro

Tabla 2.3 Humedad para almacenaje a 25°C (Castillo, 2006)

Productos	Contenido de humedad (a 70% HR)
Maíz	13,5
Trigo	13,5
Sorgo	13,5
Millo Perlado	13,5
Arroz Paddy	13,5
Arroz cargo	15,0

Maní	7,0
Semilla algodón	10,0
Cacao	7,0
Copra	7,0
Granos de palma	5,0

El contenido de humedad para el almacenaje seguro, es estimado generalmente basándose en el contenido de humedad en equilibrio, con una humedad relativa del 70% a una temperatura dada. En la tabla 2.3 se observan los valores correspondientes de humedad, para los diferentes tipos de granos, a una determinada temperatura de referencia. Y en la tabla 2.4 se muestra el contenido de humedad durante la cosecha y almacenamiento seguro.

Tabla 2.4 Contenido de humedad durante la cosecha y almacenamiento seguro.
(Castillo, 2006)

Cereal	Máx. durante cosecha	Cosecha	Req. Para almacenaje seguro	
			1 año	2 años
Cebada	30	10 – 18	13	11
Maíz	35	14 – 30	13	10 – 11
Avena	32	10 – 18	13	11
Arroz	30	16 – 25	12 – 14	10 – 12
Centeno	25	12 – 18	13	11
Sorgo	35	10 – 20	12 – 13	10 – 11
Trigo	38	09 – 17	13 – 14	11 – 12

2.3.2.4 Flujo de aire recomendado para el secado de grano

Cuando una corriente de aire, atraviesa una masa de granos en condición húmeda, durante el recorrido, el aire va cediendo calor y absorbiendo humedad; lo que equivale a una disminución de su capacidad de absorción hasta el punto en que eventualmente pudiera saturarse y dejar de secar e incluso ceder agua al grano ubicado al final de su recorrido, en una operación a contra corriente.

Para prevenir este fenómeno y secar con mayor eficiencia, existen recomendaciones de flujos de aire según el sistema de secado a usar y tipo de grano a procesar. En la tabla 2.5 se presentan los flujos de aire recomendados en diferentes sistemas de secado de granos.

Tabla 2.5 Flujo de aire para diferentes sistemas de secado de grano (Castillo, 2006)

Sistema	Flujo de aire (kg/s)
---------	----------------------

Secado con aireación	0,64
Aire natural sin calentar	3,21
Aire caliente	50,93

2.3.3 Factores que afectan la velocidad de secado

2.3.3.1 Característica del grano

La principal característica del grano que afecta la velocidad de secado es su coeficiente de transferencia de humedad; la cual a su vez depende de varios factores.

Nivel inicial de humedad: mientras mayor sea el nivel de humedad, habrá mayor cantidad de agua libre que se evapora fácilmente y el secado será más rápido.

Composición química del grano. Los granos y semillas están compuestos principalmente por hidratos de carbono, proteína y aceite, siendo variable la proporción de ellos. Puesto que el aceite repele el agua, los granos y semillas oleaginosas, liberan más fácilmente la humedad y se secan más rápido que los granos amiláceos o proteicos amiláceos.

Tamaño del grano: mientras menor sea el tamaño del grano, habrá mayor superficie específica donde condense el vapor de agua. Los espacios inter granos serán más pequeños, limitando el movimiento del agua y haciendo más lento el secado.

Contenido de impurezas: cuando el producto contiene excesiva cantidad de granos partidos; así como piedras, tierra, semillas de maleza, etc., el flujo de aire se ve impedido, por estas impurezas, a retirar el agua contenida en el grano, lo que genera una disminución en la velocidad de secado. (Castillo, 2006)

2.3.3.2 Condiciones del aire de secado

Las condiciones del aire que afectan la velocidad de secado son:

Humedad relativa: mientras menor sea la humedad relativa, el aire tendrá mayor capacidad de absorción de humedad, esto provoca que la velocidad de secado aumente.

Temperatura del aire. La temperatura tiene dos funciones; la primera es disminuir la humedad relativa del aire, a mayor temperatura la presión de vapor es mayor y ésta es inversamente proporcional a la humedad relativa y como segunda función la de proveer calor para la evaporación del agua del grano.

Flujo de aire: debido que el aire es el medio que suministra calor al grano y es el que absorbe la humedad liberada por éste, a mayor flujo de aire se obtendrá un eficiente transporte del vapor de agua generando que aumenta la velocidad de secado. (Castillo, 2006)

2.3.4 Importancia del secado en la conservación de granos

El secado o deshidratación de materiales biológicos en especial los alimentos, se usa también como técnica de preservación. Los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua. Además, muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en alimentos y otros materiales biológicos no pueden funcionar sin agua. Los microorganismos dejan de ser

activos cuando el contenido de agua se reduce por debajo del 10% en peso. Sin embargo, generalmente es necesario reducir este contenido de humedad por debajo del 5% en peso en los alimentos, para preservar su sabor y su valor nutritivo. Los alimentos secos pueden almacenarse durante periodos bastante largos. (Geankoplis, 1998)

2.4 CLASIFICACIÓN DE LAS SECADORAS DE GRANOS

Las secadoras de granos se pueden clasificar de la siguiente forma (De Dios, 1996):

2.4.1 De acuerdo a la forma en que circula el flujo de aire

- | | | |
|---|---|-----------------------------------|
| ✓ | <p>continuo</p> <p>a) Verticales (tipo torre)</p> <ul style="list-style-type: none"> - de flujo mixto (de caballetes) - de flujo cruzado (de columnas) - de persianas - de flujo contracorriente - de flujo concurrente <p>b) De cascadas</p> <p>c) Horizontales</p> <ul style="list-style-type: none"> - de flujo cruzado (de columnas hexagonales) - de flujo mixto - de lecho plano <ul style="list-style-type: none"> • fijo • fluido | <p>Secadoras de flujo</p> |
| ✓ | <p>a) De flujo cruzado</p> <ul style="list-style-type: none"> - con recirculación - estáticas <p>b) De flujo mixto</p> <ul style="list-style-type: none"> - con recirculación - estáticas | <p>Secadoras en tandas</p> |
| ✓ | <p>a) De flujo contracorriente</p> <p>b) De flujo cruzado</p> | <p>Silos secadores</p> |

2.4.2 De acuerdo a la temperatura de secado

2.4.2.1 Secado a baja temperatura

Se realiza con aire natural o a muy baja temperatura (5 a 8°C por encima del aire ambiente). Generalmente son silos secadores con aire natural o con un quemador de bajas calorías. Se debe lograr secar el grano antes que comience a deteriorarse, ya que si las condiciones climáticas no son adecuadas, se requerirán varios días para finalizar el secado dependiendo de la humedad inicial que el grano tenía al ingresar al silo secador. (Rodríguez, 2006)

2.4.2.2 Secado a temperatura media

Se realiza a temperatura por debajo de 43°C para semillas o granos usados para molien-da seca y debajo de 60°C para todos los otros granos (incl. maíz grado 2, ceroso, alto contenido de aceite). Generalmente se puede realizar en silo o secadoras de alta capacidad.

2.4.2.3 Secado a alta temperatura

Se realiza a temperatura por encima de los 60°C. Se debe tener muy en cuenta la temperatura del aire de secado de estos sistemas, ya que la temperatura que alcanzan los granos en la parte inferior de los silo o secadoras es aproximadamente igual a la temperatura del aire de secado, por lo que en algunos casos (maíz) no se debería secar a temperaturas superiores a los 60 -65°C.

2.4.3 Secadora de caballetes utilizada en Súper S

Existe una secadora que se le denomina de flujo mixto con columnas. Tiene las cualidades de una de columnas y a su vez las ventajas de las de contracorriente. Generalmente utilizan menor energía para mover el aire a través de los granos y por lo tanto son más eficientes. Realiza un secado más homogéneo del grano, evitando en gran medida los problemas que poseen las secadoras de columnas y permiten trabajar a temperaturas de secado superiores a las de columnas (figura 2.5). La principal práctica preventiva es una buena limpieza del grano antes de ingresar a al equipo. (De Dios, 1996)

La secadora de granos de Súper S, cuenta con el sistema de seca aireación. La técnica de aireación se basa en utilizar al aire como un fluido que intercambia energía, en forma de calor o de agua con los granos. Si las condiciones del aire en cuanto a temperatura y humedad son adecuadas, se puede utilizar el flujo del aire para enfriar los granos y en algunos casos para extraer humedad, disminuyendo su actividad metabólica (menos pérdidas de materia seca por respiración) y controlando, de manera indirecta a través de la disminución de la temperatura y humedad, el desarrollo de hongos e insectos.

Se puede utilizar la aireación para enfriar y mantener frío el grano seco durante el almacenamiento, almacenar grano húmedo hasta que pueda ser secado o inclusive para secar grano, ya sea con el sistema de seca aireación o en secado con aire natural, pero se debe tener en cuenta que los sistemas son diferentes en cuanto características y requerimientos según cada caso.

Los principales aspectos a tener en cuenta en seca aireación son:

- El rendimiento de los equipos puede aumentar en más de un 50%.
- La calidad de secado es mejor.

- El consumo de combustible es menor.

Se debe contar con equipos de aireación correctamente dimensionados en los silos destinados para el enfriado y secado final. El caudal específico de aire debe ser de 0,4 a 0,8 m³ de aire por minuto por tonelada de grano (comparado con 0,1 para aireación común). (Rodríguez, 2006)

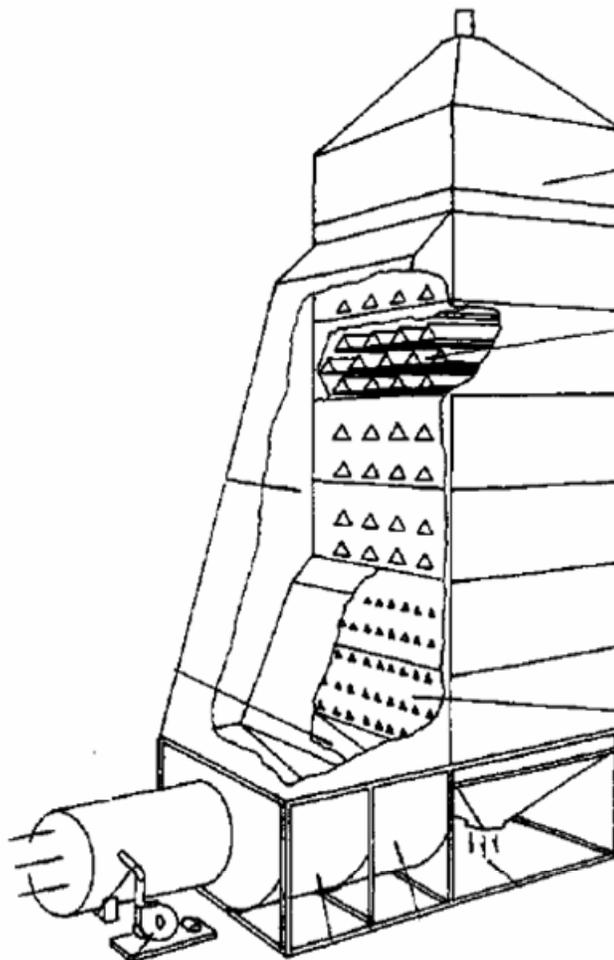


Figura 2.5 Secadora de caballetes.
(De Dios, 1996)

2.5 EFECTO DE LA DIRECCIÓN DEL AIRE EN LAS SECADORAS DE CABALLETES

El aire usado en el secado de granos y semillas cumple con dos funciones

- Suministrar el calor necesario para la evaporación de la humedad del grano.

- Transportar la cantidad de agua proveniente del grano, fuera del equipo (Castillo, 2006)
- El aire de secado, puede ser suministrado en tres formas a la corriente de granos del secador:

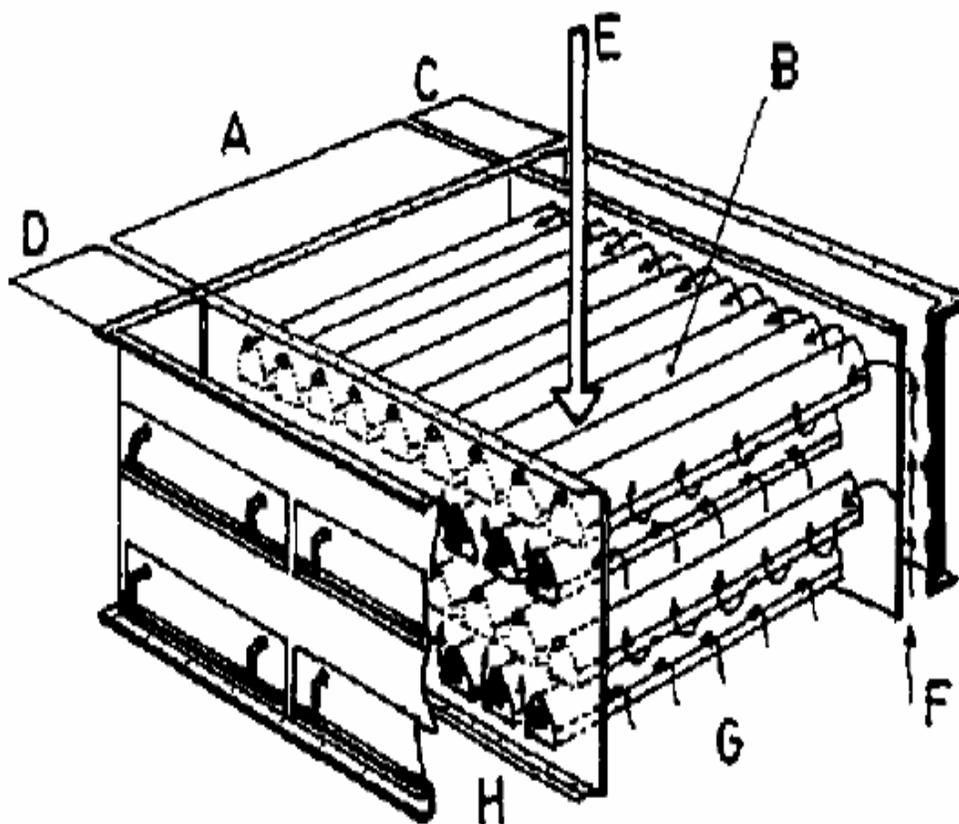


Figura 2.6 Corte de una cámara de secado (De Dios, 1996)

A: cámara de secado; B: cabalotes; C: cámara de aire caliente; D: cámara de aire usado; E: dirección del grano; F: ingreso del aire caliente; G: aire caliente mezclándose con el grano; H: salida del aire usado.

2.5.1 En contracorriente

El aire se moviliza en sentido contrario al flujo de producto, entrando en contacto con el grano en la parte baja de la torre del equipo. En ese punto, el grano se encuentra en su condición más seca; lo cual origina un incremento en su temperatura física que conlleva un aumento en su fragilidad.

2.5.2 En paralelo al flujo de granos

El aire es suministrado en la parte alta de la torre del equipo y se moviliza en sentido paralelo al flujo de material que desciende por gravedad. En ese punto, el aire se pone

en contacto con el grano cuando este posee su mayor contenido de humedad, aprovechando eficientemente el calor suministrado por el aire cuando se encuentra en su máxima capacidad de absorción de humedad.

2.5.3 Perpendicular a la corriente de granos

Como se muestra en la Figura 2.6 la corriente de aire es suministrada en forma perpendicular al flujo de granos. La sección interna de la secadora posee unos baffles o caballetes en forma de V invertida. Los caballetes se colocan en hilera y cada hilera cruzada a 90° con la que está situada inmediatamente encima o debajo. El aire entra en los caballetes a través de las aberturas, atraviesa el lecho de granos de un cierto espesor específico y sale por los caballetes situados arriba a 90° de la entrada de aire. (Castillo, 2006)

2.6 DESCRIPCION DEL SISTEMA DE SECADO DE GRANOS DE LA PLANTA SÚPER S

En la figura 2.7 se muestra el diagrama del sistema de secado de la planta Súper S, desde que se recibe la materia prima (maíz y sorgo) hasta que es almacenada en los silos para su posterior consumo. La materia prima recibida es analizada por el laboratorio de Control de Calidad antes de ser descargada en la tolva de recepción. Dentro de los análisis están incluidos los contenidos de humedad e impurezas, estos resultados serán los que determinarán si el grano va al almacenamiento directo o debe ser llevado a la secadora y pre limpiadora.

- Si el contenido de humedad del grano es menor al 13% en base húmeda, la materia prima descargada en la tolva de recepción, es transportada por los transportadores T1 y T2 hasta el elevador E-51, el cual lleva al grano hasta el distribuidor D-98 para luego ser descargado en el transportador T41, y almacenado en el silo correspondiente. El maíz es almacenado en los silos 128, 129 y 136 y el sorgo en el silo 135.
- Si el contenido de humedad del grano es mayor a 13% en base húmeda, éste debe ser llevado al proceso de secado de granos de la planta antes de ser almacenados en los silos. En este caso se cumple la misma ruta que el caso anterior hasta que es transportado al distribuidor D-98, de allí es llevado hasta el transportador T30 para ser descargado en los temperos 130, 131 y 132 para ser secados en la torre de secado.

El secado de granos comienza cuando al menos uno de los temperos tiene la carga suficiente para ser llevado a la secadora, si por ejemplo el tempero 130 es el que será secado, el grano cae el transportador T31 hasta el elevador E-57 el cual descarga en la secadora de granos, a la salida de la secadora está el transportador T34 el cual lleva el grano hasta el elevador E-58 que posteriormente termina en el distribuidor D-153 y es llevado nuevamente hasta el tempero 130 para que vuelva a pasar por la secadora.

Cuando en la salida de la secadora, la humedad del grano sea de 12% en base húmeda, el distribuidor D-153 descargará el grano en el silo correspondiente.

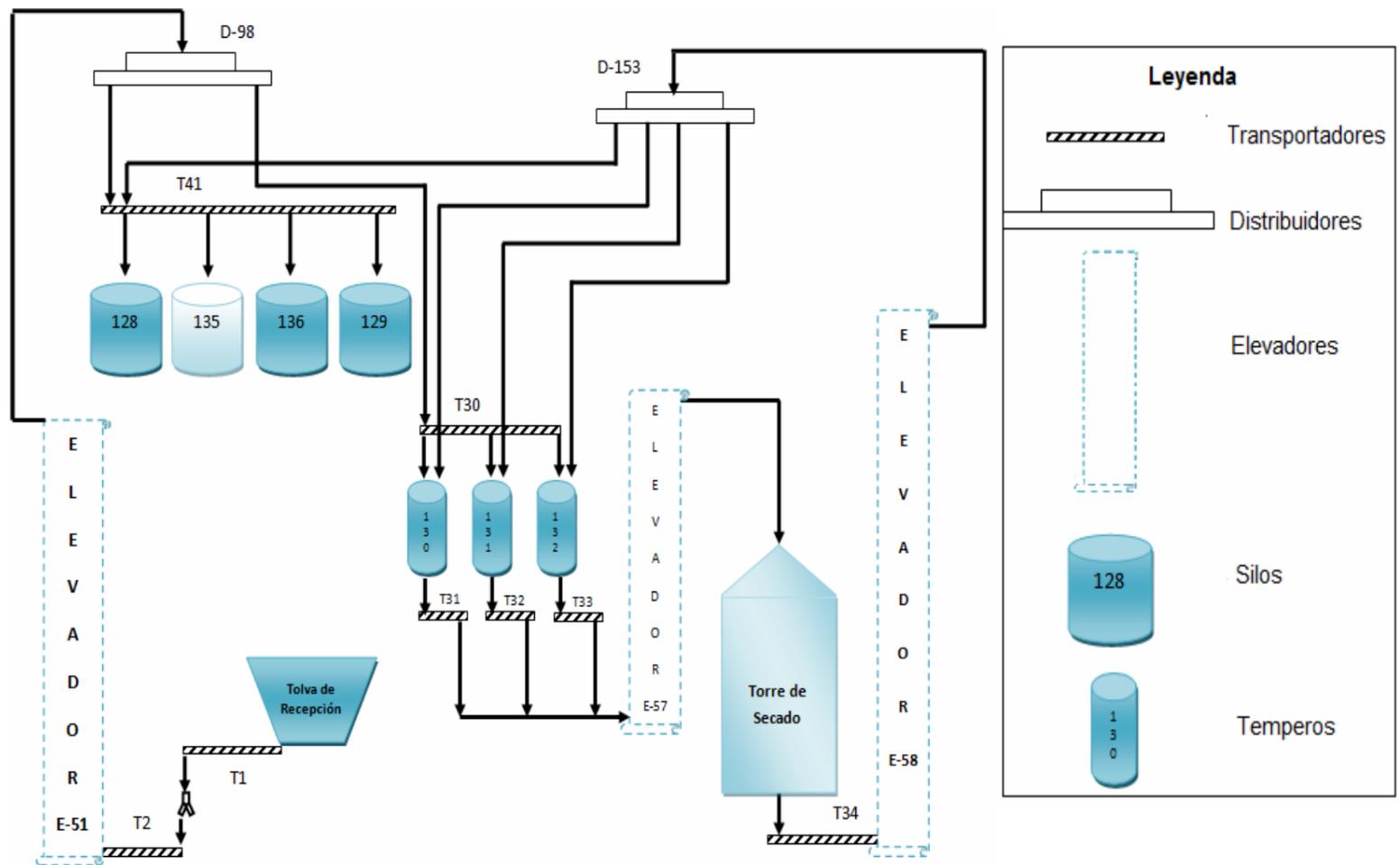


Figura 2.7 Diagrama del sistema de secado de granos de Súper S

CAPÍTULO 3 DESARROLLO DEL PROYECTO

Con el propósito de cumplir a cabalidad los objetivos propuestos en la presente investigación, se siguió la metodología, que a continuación se presenta según cada una de las etapas a desarrollar en este proyecto.

3.1 RECOPIACIÓN DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE LA SECADORA DE GRANOS

El desarrollo de esta etapa se llevó a cabo mediante la recolección de datos en el campo, durante un periodo de 2 meses, en los diferentes puntos de control de las variables de la secadora de granos. Esta información luego fue comparada con la información recopilada en los manuales de diseño y operación del equipo para determinar si las variables estudiadas se encuentran dentro de los parámetros establecidos.

Las longitudes de las secciones de la secadora, que permite dimensionar al equipo se encuentran reportadas en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Longitudes de las secciones de la secadora de granos

	Alto (m)	Ancho (m)	Largo (m)
Cámara de secado	18,70	2,90	2,50
Ducto de entrada del aire a la secadora	18,70	2,88	1,40

3.1.1 Temperatura y humedad relativa del aire a la entrada de la secadora

La medición de la humedad relativa y temperatura del aire a la entrada de la secadora, se obtuvo por medio de un higrómetro digital, el cual fue ubicado en la entrada del ducto de succión de la secadora; esto permitió que se tomaran datos en intervalos de 1 hora. Los datos obtenidos se encuentran reportados en la tabla 3.2.

Luego, los datos fueron promediados, para determinar a partir de estas dos propiedades, las características del aire de entrada, utilizando un diagrama psicrométrico. Estos resultados están reportados en la tabla A.1

Tabla 3.2 Valores de temperatura y humedad relativa del aire a la entrada de la secadora

Tiempo (h)	Temperatura entrada (°C)	Humedad relativa (%)
1	30,70	66,40
2	35,80	58,70
3	29,70	64,00
4	30,80	62,10
5	30,40	63,60
6	29,50	71,40
7	31,50	62,10
8	32,00	55,10
9	34,10	56,70
10	30,00	62,40
11	31,40	67,80

Por otra parte, la temperatura del aire caliente que pasa por los quemadores, fue leída del medidor de temperatura, en el panel de control de la secadora, los valores obtenidos están reportados en la tabla 3.3

Tabla 3.3 Valores de la temperatura del aire caliente por días de funcionamiento de la secadora

Días	Temperatura del aire caliente (°C)
1	63
2	64
3	65
4	65
5	65
6	68
7	68
8	68
9	68
10	69
11	69
12	69
13	69

3.1.2 Flujo de aire de alimentación a la secadora

Para la obtención del flujo de aire de alimentación a la secadora, fue requerido el uso de un anemómetro, el cual permitió conocer la distancia recorrida en un intervalo de tiempo determinado; y así determinar la velocidad del aire. El cálculo de la velocidad se obtuvo con la siguiente expresión:

$$V = \frac{D}{t} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde

V: velocidad del aire (m/s)

D: distancia (m)

t: tiempo (s)

Tabla 3.4 Valores de tiempo y distancia recorrida por el aire en el anemómetro

Corridas	Tiempo (s)	Distancia recorrida (m)
1	900	7010
2	960	7600
3	1080	8050
4	900	7020
5	900	6000
6	900	7300
7	960	8700
8	900	6450
9	900	7240
10	900	6860
11	900	7200
12	900	6930
13	1080	8110
14	720	5630
15	900	6570
16	900	7130
18	900	6360
19	1200	9220
20	900	6830
21	900	6870
22	900	6710
23	900	6900
24	900	7600
25	960	7390
26	1110	7700
27	900	7650
28	900	7830

Con los datos de la tabla 3.4 y la ecuación 3.1 se obtiene que:

$$V = \frac{7010 \text{ m}}{900 \text{ s}}$$

$$V = 7,79 \text{ m/s}$$

Se repitió el cálculo para los demás valores y los resultados están reportados en la tabla A.2. Posteriormente, se procedió a calcular el flujo de aire mediante la siguiente ecuación:

$$F = \frac{V \cdot A}{V_H} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

donde:

F: flujo másico de aire (kg de aire seco/s)

V: velocidad del aire (m/s)

A: área transversal (m²)

V_H: volumen húmedo (m³/kg de aire seco)

El área transversal por donde pasa el aire a la entrada de la secadora fue calculada por la siguiente expresión:

$$A = a \times l \quad (\text{Ec. 3.3})$$

donde:

A: área transversal (m²)

l: largo del ducto (m)

a: ancho del ducto (m)

Sustituyendo en la ecuación 3.3 los datos de las dimensiones del ducto de entrada a la secadora, mostrada en la tabla A.3 se tiene que:

$$A = 1,4 \text{ m} \times 2,88 \text{ m}$$

$$A = 4,032 \text{ m}^2$$

El volumen húmedo fue leído del diagrama psicométrico, a partir de las dos condiciones fijadas en la sección 3.1.1, sustituyendo los valores en la ecuación 3.2 se obtiene que:

$$F = \frac{7,79 \text{ m/s} \times 4,032 \text{ m}^2}{0,89 \text{ m}^3/\text{kg de aire seco}}$$

$F = 35,29 \text{ kg de aire seco/s}$

De igual forma se procedió para el resto de los datos y los resultados se reportan en la tabla A.2.

La desviación de estos valores, con respecto al valor recomendado por (Castillo, 2006) de 50,93 kg/s, fue calculado con la siguiente ecuación:

$$D = \frac{\text{flujo}_T - \text{flujo}_E}{\text{flujo}_T} \times 100\% \quad (\text{Ec. 3.4})$$

donde:

D: porcentaje de desviación (%)

flujo_T: flujo de aire teórico (kg/s)

flujo_E: flujo de aire experimental (kg/s)

Sustituyendo en la ecuación 3.4 los valores de la tabla A.2 y 2.5 se tiene que:

$$D = \frac{50,93 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 35,29 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{50,93 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} \times 100\%$$

$$D = 30,70\%$$

Los resultados de las desviaciones se muestran en la tabla A.2.

3.1.3 Carga de granos de la secadora

El sistema de secado está conformado por tres temperos (121, 122 y 123) con capacidad máxima aproximadamente de 200 toneladas de granos. Se determinó mediante entrevista a los operadores y supervisores de planta que, comúnmente el llenado de los temperos se prepara con una carga de 150 toneladas. La secadora es alimentada a razón de 25 t/h hasta alcanzar la capacidad máxima de ésta. A medida que la secadora va descargando en el transportador T34, es alimentada nuevamente por el elevador E57 y así sucesivamente hasta alcanzar el valor de humedad requerido a la salida de la secadora. Mientras que el valor de humedad a la salida de la secadora estuvo fuera de especificación, la carga fue recirculada al tempero para que ingresara nuevamente a la secadora.

3.2 OBTENCIÓN DE LA HUMEDAD, EN BASE HÚMEDA, DEL GRANO A LA ENTRADA Y A LA SALIDA DE LA SECADORA, EN UN LAPSO DE TIEMPO REPRESENTATIVO

Para el desarrollo de esta etapa, se tomaron 3 muestras de granos a la entrada y salida de la secadora de manera simultánea en intervalos de tiempo de 1 hora. Posterior a esto, se le midió la humedad a las muestras recolectadas, en el laboratorio de control de

calidad de la planta Súper, S. a las muestras se le determinó la humedad en base húmeda, mediante la utilización de dos equipos, con el fin de comparar y verificar el buen funcionamiento del equipo usado en el laboratorio.

3.2.1 Medidor de humedad (Moisture tester)

A continuación se explica el procedimiento utilizado en esta técnica de análisis.

- Se pesó 1000 g de la muestra recolectada en la secadora.
- Se tamizó en el tamiz #12/64 para descartar impurezas.
- Se homogenizó la muestra, mediante agitación, para tener una muestra única representativa.
- Se pesó 250 g de la muestra homogenizadas.
- Se introdujo la muestra en el medidor de humedad.

Los resultados obtenidos fueron reportados en la tabla 3.5

Tabla 3.5 Datos de humedad del grano en porcentaje, a la entrada y salida de la secadora de granos

Muestra	Medidor de Humedad (%)		Balanza de Humedad (%)	
	Salida	Entrada	Salida	Entrada
1	14,1	19,0	14,0	18,0
2	14,1	18,3	13,7	18,6
3	13,5	18,2	13,7	18,3
4	13,0	18,1	13,1	18,3
5	12,9	18,0	12,5	18,1
6	12,8	18,0	12,4	17,9
7	12,6	17,5	12,6	17,6
8	12,5	17,5	12,4	17,4
9	12,5	17,0	12,7	17,3
10	12,1	17,0	12,2	17,2
11	12,0	17,0	11,7	17,2
12	11,3	17,0	11,1	16,8
13	10,9	16,4	11,1	16,1
14	10,7	16,0	10,6	16,1

3.2.2 Balanza de humedad

Esta técnica es poco usada en el laboratorio, sin embargo se desconocía si los valores arrojados de humedad del grano en el medidor de humedad eran en base seca o base húmeda, es por ello que se utilizó la siguiente técnica:

- Se pesó 100 g de la muestra obtenida en la secadora y se molieron en el molino del laboratorio.
- La muestra obtenida fue homogeneizada para obtener una muestra única representativa.
- Se introdujo una muestra de 5 g en la balanza de humedad.
- Se fijó una temperatura de 130 °C, ya que la balanza necesita esta información.

Los resultados obtenidos en este análisis son reportados en la tabla 3.5

Los valores recolectados en los análisis de las muestras fueron graficados para obtener un valor promedio de humedad en base húmeda, tanto para la entrada como a la salida, las gráficas son mostradas en las figuras 4.2 y 4.3

3.3 REPRODUCCIÓN DE LA CURVA DE SECADO DEL GRANO A LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN DE LA SECADORA

Para el desarrollo de esta etapa, se utilizó un secador discontinuo de bandeja del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui. De la planta Súper S, se tomaron 500 g de granos secos de la secadora y luego se le determinó la humedad en la balanza de humedad.

3.3.1 Acondicionamiento del grano

El acondicionamiento de grano consistió en añadir agua a fin de obtener una humedad correspondiente a un 17%, lo que representa el valor de humedad a la entrada de la secadora de granos de la planta, para ello fue necesario:

- Remojar la muestra en 400 ml de agua durante 3 min, similar a lo hecho por Brito y Marín (2010)
- Retirar el agua excedente del grano mediante la ayuda de un colador y papel absorbente.
- El agua colada fue medida en un cilindro graduado de 500 ml \pm 1 ml de apreciación.
- El agua retenida en el papel absorbente fue calculada por diferencia de peso.

El cálculo del agua absorbida por el grano se determinó mediante un balance de agua.

$$\text{Agua}_{añ} = \text{Agua}_{ab} + \text{Agua}_{co} + \text{Agua}_{pa} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

donde:

Agua_{añ}: agua añadida (g)

Agua_{ab}: agua absorbida por el grano (g)

Agua_{co}: agua recolectada por el colador (g)

Agua_{pa}: agua retenida en el papel (g)

Sustituyendo en la ecuación 3.5 los datos de la tabla 3.6 se tiene que para la primera corrida:

$$\text{Agua}_{ab} = 400 \text{ g} - 350 \text{ g} - 9,74 \text{ g}$$

$$\text{Agua}_{ab} = 40,26 \text{ g}$$

De igual forma se repitió el cálculo para el resto de las corridas y los valores están reportados en la tabla A.4.

Tabla 3.6 Valores obtenidos del agua colada y del agua retenida en el papel absorbente.

Corridas	Agua en el colador (g)	Agua en el papel absorbente (g)
1	350	9,74
2	350	9,85
3	355	9,28
4	355	9,73
5	350	9,90

Luego se procedió a calcular la humedad en base húmeda del grano acondicionado:

$$W_{ac} = \frac{\text{Agua}_{ig} + \text{Agua}_{ab}}{\text{Sh}_{ig} + \text{Agua}_{ab}} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

donde:

W_{ac}: humedad acondicionada (kg agua / kg de sólido húmedo)

Agua_{ig}: agua inicial del grano (g)

Sh_{ig}: sólido húmedo inicial del grano (g)

Tabla 3.7 Peso del solido húmedo y humedad inicial

Corridas	Peso del solido húmedo (g)	Humedad inicial (%)
----------	----------------------------	---------------------

1	500,00	12,8
2	500,09	10,4
3	500,00	12,8
4	500,45	12,7
5	500,16	13,1

El cálculo del agua inicial del grano se obtuvo sustituyendo los datos de la tabla 3.7 en la ecuación 2.1

$$mh = 0,128 \frac{\text{g agua}}{\text{g sh}} \times 500 \text{ g sh}$$

$$mh = 64 \text{ g agua}$$

De igual forma se repitió el cálculo para el resto de los datos, y los resultados obtenidos están reportados en la tabla A.4. Por último se procedió a calcular la humedad del sólido acondicionado, sustituyendo los valores de la tabla A.4 en la ecuación 3.6 se obtiene:

$$W_{ac} = \frac{64 \text{ g} + 40,26 \text{ g}}{500 \text{ g} + 40,26 \text{ g}}$$

$$W_{ac} = 0,193 \frac{\text{g agua}}{\text{g sh}}$$

Este cálculo se repitió para las demás corridas y los resultados están reportados en la tabla A.4

3.3.2 Proceso de secado del grano en el secador discontinuo de bandeja

En este proceso de secado se realizaron 5 pruebas experimentales a diferentes humedades iniciales de cada carga. El proceso de secado se explica a continuación:

- Se cubrió toda la superficie expuesta al secado de la bandeja del secador con papel aluminio para evitar el contacto directo entre la bandeja y el grano.
- El grano fue esparcido por toda la bandeja manteniendo un espesor de grano constante a lo largo de toda la bandeja y se introdujo en el secador.
- Se calibró la balanza incorporada del secador y se tomó la lectura inicial del peso de la muestra, se tomaron lecturas de los pesos de las muestras en intervalos de tiempo de 1 min hasta que el valor fuera constante al menos 10 min.

La temperatura del secador fue controlada mediante la manipulación de la válvula de vapor a los intercambiadores de calor para que ésta no excediera los 65.5 °C, según Rodríguez (2006), especifica que el secado de maíz no debe sobrepasar los 71°C de temperatura, cuando el grano es destinado a consumo animal. El flujo de aire fue determinado a partir del voltaje fijado en el reóstato del secador discontinuo del laboratorio de Operaciones Unitarias.

3.3.3 Curva de velocidad de secado del maíz

Los datos obtenidos se expresaron como peso total del sólido húmedo a diferentes intervalos de tiempo y los datos se muestran en la tabla 3.8. El cálculo de la humedad en base húmeda y en base seca, se realizó utilizando la ecuación 2.8 y ecuación 2.9 respectivamente, como se muestra a continuación:

Tabla 3.8 Variación del peso de la muestra de maíz con respecto al tiempo en un secador discontinuo (primera corrida)

Tiempo (min)	Peso (g)
0	540,26
1	531,18
2	526,64
4	522,10
6	517,56
9	513,02
13	508,48
17	503,94
26	499,40
35	494,86
42	490,32

Tabla 3.9 Variación del peso de la muestra de maíz con respecto al tiempo en un secador discontinuo (segunda corrida)

Tiempo (min)	Peso (g)
0	540,26
1	535,72

2	531,18
9	526,64
11	522,10
16	517,56
22	513,02
28	508,48
38	503,94
47	499,40

Tabla 3.10 Variación del peso de la muestra de maíz con respecto al tiempo en un secador discontinuo (tercera corrida)

Tiempo (min)	Peso (g)
0	535,72
1	531,18
8	522,10
11	517,56
13	513,02
16	508,48
25	503,94
35	499,40

Tabla 3.11 Variación del peso de la muestra de maíz con respecto al tiempo en un secador discontinuo (cuarta corrida)

Tiempo (min)	Peso (g)
--------------	----------

0	535,72
5	531,18
6	526,64
7	522,10
14	517,56
18	513,02
27	508,48

Tabla 3.12 Variación del peso de la muestra de maíz con respecto al tiempo en un secador discontinuo (quinta corrida)

Tiempo (min)	Peso (g)
0	540,26
2	535,72
3	531,18
8	526,64
9	522,10
13	517,56
16	513,02
21	508,48
28	503,94

La masa del sólido totalmente seco fue calculada mediante la ecuación 2.7. Sustituyendo en esta expresión los datos de la tabla 3.7 se tiene que:

$$m_{Ss} = 0,500 \text{ kg}(1 - 0,128)$$

$$m_{Ss} = 0,436 \text{ kg}$$

De igual forma se procedió para el resto de los valores y los resultados se reportan en la tabla A.5. Sustituyendo en la ecuación 2.5 para la primera corrida los datos de la tabla 3.8 se tiene que:

$$W = \frac{0,540 \text{ kg} - 0,436 \text{ kg}}{0,540 \text{ kg}}$$

$$W = 0,193 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg Sh}}$$

Ahora, sustituyendo en la ecuación 2.9, se tiene que:

$$X = \frac{0,193}{1 - 0,193}$$

$$X = 0,239 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg ss}}$$

La humedad libre fue calculada mediante la ecuación 2.10 y tomando como humedad de equilibrio el último valor de la humedad en base seca reportado en la tabla A.6:

$$X_{\text{libre}} = 0,239 - 0,125$$

$$X_{\text{libre}} = 0,114$$

Fue tomada como humedad de equilibrio el último valor de humedad en base seca, puesto que se consideró que a esas condiciones no se puede retirar más humedad del grano. Se repitió el cálculo para los demás datos y los resultados están reportados en la tabla A.6. Con estos resultados se construyó la grafica de humedad libre en función del tiempo, mostrada en la figura 3.1

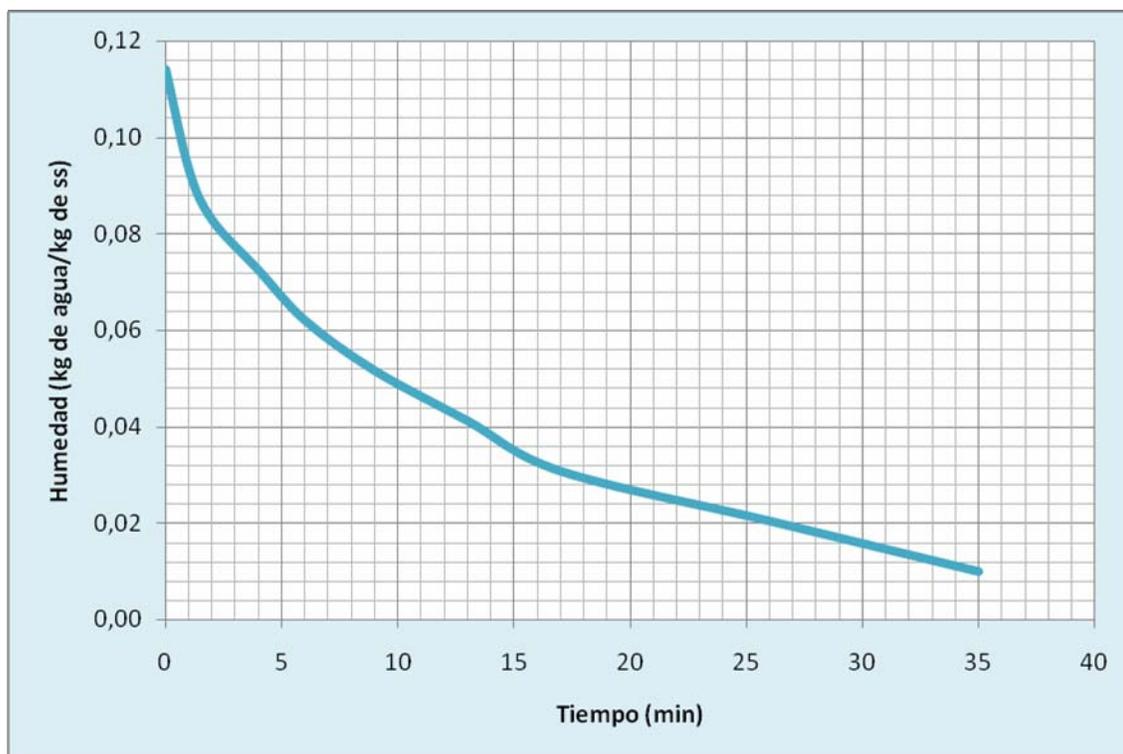


Figura 3.1 Humedad libre en función del tiempo para un secador discontinuo

A partir de la figura 3.1 se calcularon los cambios de humedad con respecto al tiempo, a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X_{libre_2} - X_{libre_1}}{t_2 - t_1} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Sustituyendo en la ecuación 3.7 los valores de la tabla A.6 para un tiempo entre 0 y 1 minuto, se obtiene:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{0,093 - 0,114}{1 - 0}$$

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = -0,021 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg ss} \cdot \text{min}}$$

Este procedimiento se repitió para el resto los valores, y los resultados son reportados en la tabla A.6.

Posteriormente se calculó el área de secado, utilizando la expresión cuando el aire fluye en forma paralela por dos caras de la bandeja, mediante la siguiente expresión:

$$A = 2 \times l \times a \quad (\text{Ec. 3.8})$$

donde:

A: área de secado (m²)

l: largo de la bandeja (m)

a: ancho de la bandeja (m)

Sustituyendo en la ecuación 3.8 los datos de las dimensiones de la bandeja del secador discontinuo, mostrados en la tabla A.3 se tiene que:

$$A = 2 \times 0,467 \text{ m} \times 0,268 \text{ m}$$

$$A = 0,2498 \text{ m}^2$$

Finalmente se calculó la velocidad de secado, sustituyendo los valores en la ecuación 2.14:

$$N = - \frac{0,436 \text{ kg ss}}{0,2498 \text{ m}^2} \times - 0,021 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg ss} \cdot \text{min}}$$

$$N = 0,0366 \frac{\text{kg agua}}{\text{m}^2 \cdot \text{min}} \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{h}}$$

$$N = 2,18094 \frac{\text{kg agua}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

Se repitió el cálculo para el resto de los valores y los resultados están reportados en la tabla A.6. La humedad libre promedio se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\bar{X}_{\text{libre}} = \frac{X_{\text{libre}_1} + X_{\text{libre}_2}}{2} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Sustituyendo en la ecuación 3.9 los valores de la tabla A.6 para un tiempo entre 0 y 1 minuto se tiene:

$$\bar{X}_{\text{libre}} = \frac{0,114 + 0,093}{2}$$

$$\bar{X}_{\text{libre}} = 0,104$$

Se repitió el cálculo para el resto de los valores, y los resultados están reportados en la tabla A.6.

Luego se graficó la velocidad de secado en función de la humedad libre promedio y se construyeron graficas para las diferentes corridas realizadas. Las graficas se representaron en la figura 3.2

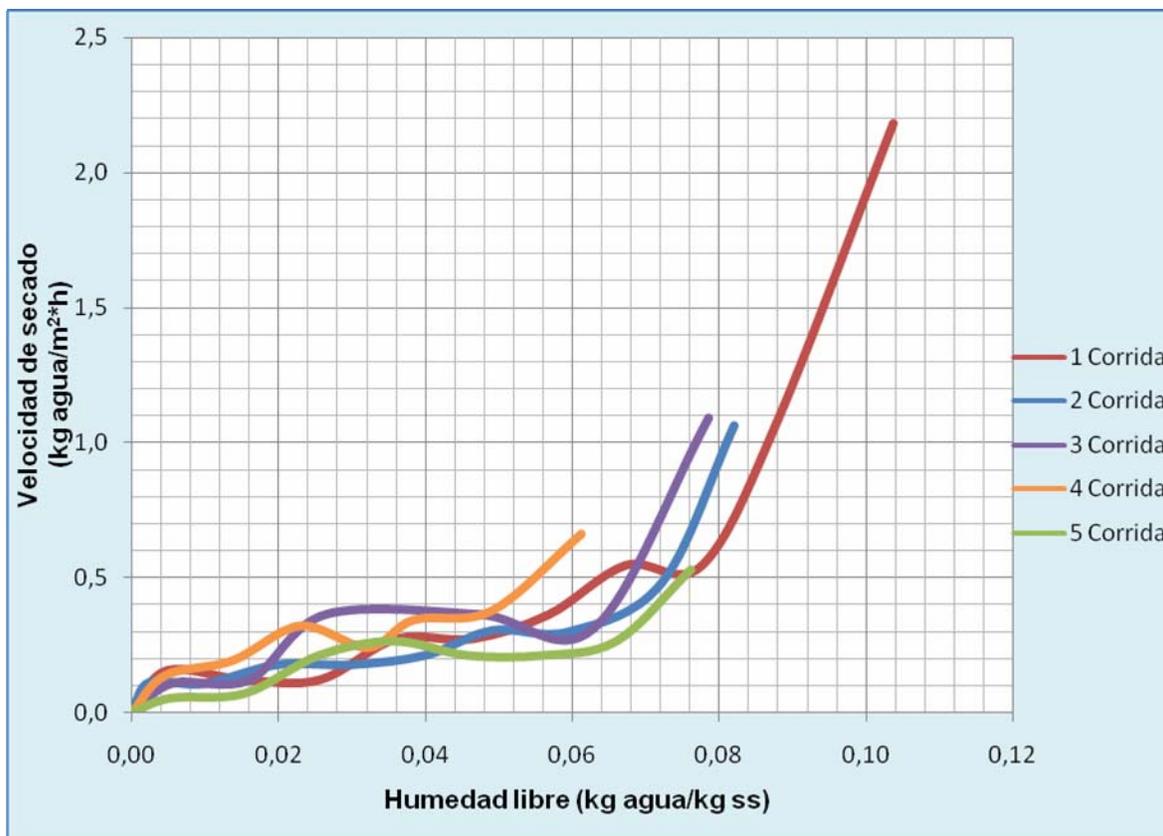


Figura 3.2 Curvas de velocidad de secado para las diferentes corridas

A fin de poder comprobar que la tendencia de las curvas de secado del maíz, obtenidas experimentalmente, en el secador discontinuo del laboratorio de operaciones unitarias eran los correctos, se procedió a tomar muestras en la secadora de granos de la planta Súper S, a la salida de la secadora cada hora y se le determinó el porcentaje de humedad al grano. Estos datos se muestran en la tabla 3.13.

Tabla 3.13 Variación del porcentaje de humedad con respecto al tiempo en la secadora de granos de la planta

Tiempo (h)	Humedad (%)
0	18,0
1	17,4
2	17,2
3	16,8

4	15,7
5	14,5
6	14,3
7	13,9
8	13,8
9	13,5
10	13,1
11	13,0
12	12,9
13	12,7
14	12,6
15	12,2

Seguidamente se transformaron estos datos a base seca, de la siguiente forma: utilizando la ecuación 2.9 y tomando los datos de la tabla 3.13 se obtiene:

$$X = \frac{0,18}{1 - 0,18}$$

$$X = 0,22 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg ss}}$$

De igual forma se repitió el cálculo para el resto de los valores de la tabla 3.13 y los resultados son reportados en la tabla A.11. En la figura 3.3 se observa la variación de la humedad en base seca con respecto al tiempo de la secadora de granos.

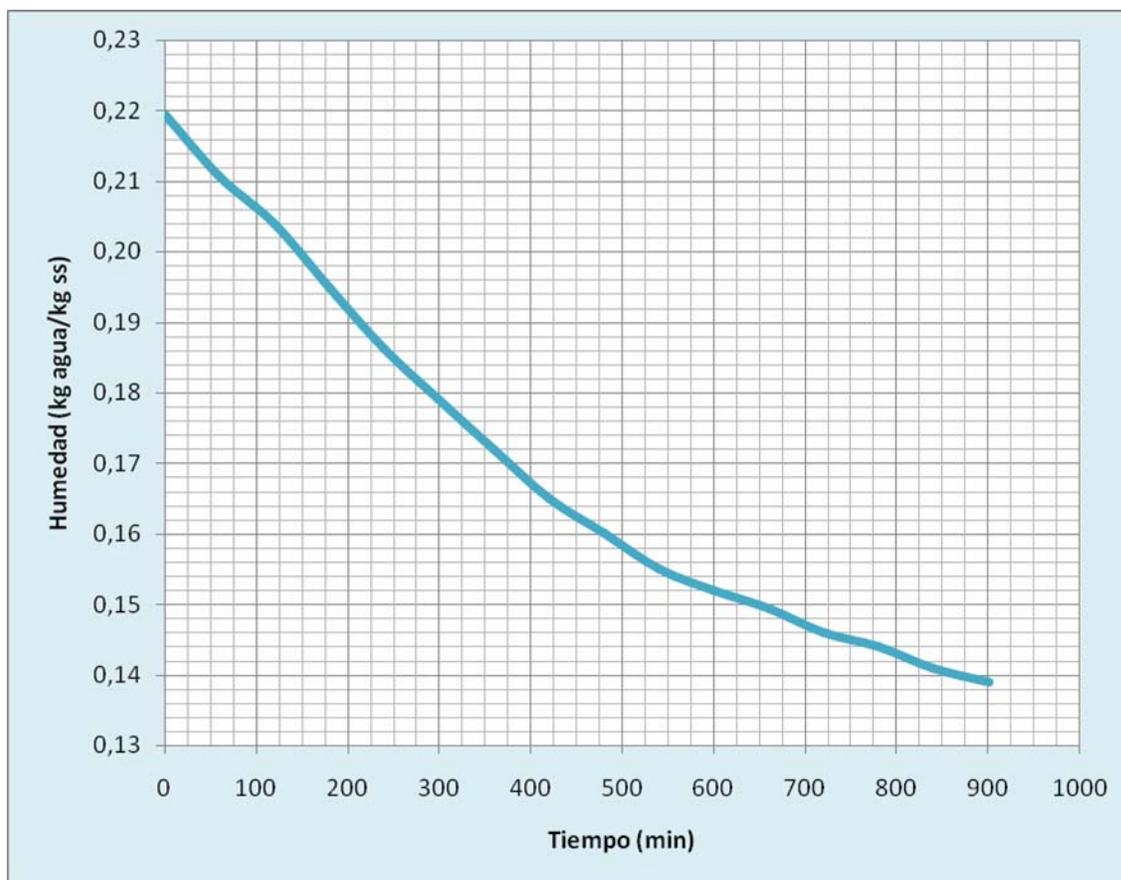


Figura 3.3 Humedad en base seca en función del tiempo en una secadora de granos.

3.4 Cálculo del tiempo teórico que tarda el grano en secarse en la secadora de granos

Con base a la curva de secado construida en la etapa anterior (figura 3.2) se calculó el tiempo teórico que tarda el sólido en secarse, en la secadora de granos. Para ello, se hizo uso de la ecuación 2.18 para el cálculo del tiempo en período de descenso, cuando es una curva y la ecuación 2.19 para el período cuando es una recta. Primeramente se estimó la carga de sólido seco que es alimentada al tempero. En la sección anterior se determinó, tanto los valores de humedad de entrada del grano como los de salida. Sustituyendo en la ecuación 2.7 los datos obtenidos en la sección 3.2 se tiene que:

$$m_{Ss} = 150000 \text{ kg} (1 - 0,175)$$

$$m_{Ss} = 123750 \text{ kg ss}$$

El área de granos expuesta al secado fue calculada mediante la siguiente expresión:

$$A = a \times l \quad (\text{Ec. 3.10})$$

donde

A: área expuesta al secado

a: ancho de la secadora de granos (m)

l: altura del lecho de grano (m)

Sustituyendo en la ecuación 3.10 los datos de la tabla A.3 se tiene que:

$$A = 2,9 \text{ m} \times 18,7 \text{ m}$$

$$A = 54,23 \text{ m}^2$$

Sustituyendo los datos de la tabla A.11 en la ecuación 2.18 se tiene que para el tiempo de descenso cuando es una curva:

$$T_1 = \frac{123750 \text{ kg ss}}{54,23 \text{ m}^2} \int_{0,004}^{0,068} \frac{dX}{N}$$

Los límites de la integral corresponden al tramo curvo de la figura 4.5 hasta el valor de humedad final, leído como humedad libre. La solución a la integral fue un Simpson de 5 puntos, el cual permitió conocer un valor aproximado mediante la interpolación gráfica y fue calculado por la siguiente expresión:

$$F'_{(x)} = \frac{a-b}{12} [F_{x0} + 4xF_{x1} + 2xF_{x2} + 4xF_{x3} + F_{x4}] \quad (\text{Ec. 3.11})$$

donde

$F'_{(x)}$: solución del método

a: límite superior de la integral

b: límite inferior de la integral

La función $F_{(x)}$ está dada por la siguiente expresión:

$$F_x = \frac{1}{N} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Los valores de N fueron leídos de la figura 4.5, para el primer valor, $N= 7.59$, entonces sustituyendo en la ecuación 3.12 se tiene que:

$$F_{x0} = \frac{1}{7,59}$$

$$F_{x0} = 0,1317$$

De igual forma se procedió para el resto de los puntos y los resultados son reportados en la tabla A.12. Sustituyendo estos resultados en la ecuación 3.11 se obtiene que:

$$F'_{(x)} = \frac{0,068 - 0,004}{12} [0,1317 + 4 \times 0,1250 + 2 \times 0,1265 + 4 \times 0,2083 + 0,6250]$$

$$F'_x = 0,0125$$

Sustituyendo este resultado en la expresión 2.18 se obtiene:

$$T_1 = \frac{123750 \text{ kg ss}}{54,23 \text{ m}^2} \times 0,0125$$

$$T_1 = 21,42 \text{ h}$$

El tiempo de descenso cuando el tramo es una línea recta fue calculado por la ecuación 2.19, y se tiene que:

$$T_2 = - \frac{123750 \text{ kg ss}}{54,23 \text{ m}^2} * \frac{(0,073 - 0,068)}{(9 - 7,59) \text{ Kg ss/m}^2 \text{ hr}} * \text{Ln} \frac{7,59}{9}$$

$$T_2 = 1,33 \text{ h}$$

El tiempo analítico de descenso total de secado es la sumatoria entre los dos tramos de la curva, por lo tanto:

$$T = 22,75 \text{ h}$$

Por último, se determinó de forma gráfica, basándose en la figura 3.3, el tiempo teórico que tarda el grano desde una humedad inicial llegar hasta la humedad final requerida. Se tiene que:

$$T = t_2 - t_1 \quad (\text{Ec. 3.13})$$

donde:

T: tiempo de secado (min)

t₁: tiempo a la humedad inicial (min)

t₂: tiempo a la humedad final (min)

Sustituyendo en la ecuación 3.13 se obtiene:

$$T = 800 \text{ min} - 40 \text{ min}$$

$$T = 760 \text{ min} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}}$$

$$T = 12,67 \text{ h}$$

Este resultado es reportado en la tabla 4.4. La desviación del tiempo analítico con respecto al tiempo teórico se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$D = \frac{\text{tiempo}_T - \text{tiempo}_E}{\text{tiempo}_T} \times 100\% \quad (\text{Ec. 3.14})$$

donde:

D: porcentaje de desviación (%)

tiempo_T: tiempo teórico (h)

tiempo_E: tiempo experimental (h)

Sustituyendo en la ecuación 3.14 los valores del tiempo de secado obtenidos se tiene que:

$$D = \frac{12,67 \text{ h} - 22,75 \text{ h}}{12,67 \text{ h}} \times 100\%$$

$$D = 79,55 \%$$

De igual manera, se repitió el cálculo para el tiempo real de secado y los resultados están reportados en la tabla 4.4.

3.5 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE, SOBRE LA HUMEDAD FINAL DEL GRANO Y EL TIEMPO DE SECADO

En el desarrollo de esta etapa, se tomaron lecturas de la temperatura del aire caliente, que entra a la secadora de granos. También se midió el valor de humedad, en base húmeda del grano y el tiempo que tardó en secarse la carga del tempero.

En la tabla 3.14 se encuentran los datos obtenidos de temperatura del aire, humedad del grano y tiempo de secado, además, cabe destacar que éstos valores fueron tomados únicamente cuando el grano alcanzaba la humedad final, es decir, cuando la carga de grano era llevada a almacenamiento. Durante el proceso de secado, fue monitoreada la temperatura del aire caliente, la cual se mantuvo constante por largos periodos de

tiempo, debido a que las condiciones del ambiente en ocasiones cambiaron. Por otro lado, sólo se tomaron en cuenta los valores con la misma carga de grano ya que ésta fue una de las variables que influyó en el tiempo de secado.

Tabla 3.14 Tiempos de secado a diferentes temperatura del aire y humedad final del grano.

Temperatura del aire (°C)	Humedad del grano (%)	Tiempo de secado (hr)
65	12,40	17,0
69	12,50	14,0
65	12,50	17,0
63	12,00	18,0
68	12,10	15,0
68	11,90	14,5
69	11,50	14,5
65	12,00	17,0
69	12,20	14,0
63	11,80	18,0
64	12,30	17,0
68	12,00	15,5
69	12,00	13,5
68	12,10	15,0

Para el estudio del efecto de la temperatura del aire en la humedad final de grano y en el tiempo de secado, se construyó la gráfica mostrada en la figura 4.6 donde se puede observar la variación del tiempo de secado cuando se alcanza la humedad final, con respecto a la variación de temperatura del aire caliente de entrada.

CAPITULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 RECOPIACIÓN DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE LA SECADORA DE GRANOS

En esta etapa del proyecto se buscó la información necesaria para conocer las condiciones principales del funcionamiento de la secadora de granos.

4.1.1 Temperatura y humedad relativa del aire a la entrada y salida de la secadora

La temperatura y humedad relativa del aire frío a la entrada de la secadora de granos, se obtuvieron utilizando un higrómetro. Se tomaron datos en un lapso de tiempo de 11 horas, para observar si hay variaciones apreciables. Los datos fueron registrados en la tabla 3.1 y sus valores se promediaron ya que la variación no fue considerable.

El aire que entra a la secadora, se calienta cuando pasa a través de los quemadores, proporcionando el calor necesario, para que los granos se sequen hasta la humedad requerida. Los valores de temperatura del aire caliente, se obtuvieron en el medidor de temperatura del panel de control de la secadora, diariamente durante 13 días, a fin de verificar si hay variaciones apreciables. Los valores de humedad relativa para el aire caliente se obtuvieron a partir de los datos del aire de entrada con ayuda del diagrama psicrométrico. Los datos de temperatura, se registraron en la tabla 3.2 y sus valores fueron promediados ya que la variación no fue considerable.

Tabla 4.1 Valores de temperaturas y humedad relativa del aire promedios del aire a la entrada y salida de los quemadores de la secadora

Temperatura del aire (°C)	Humedad Relativa (%)	Temperatura del aire (°C)	Humedad Relativa (%)
Entrada		Salida	
31,45	62,75	66,65	13,20

En la tabla 4.1 se muestran los valores promedios de la temperatura y humedad relativa del aire a la entrada y salida de la secadora. Se puede observar, que la temperatura y la humedad relativa del aire a la entrada de la secadora presentan valores característicos de la zona, una temperatura moderada de 31,5°C y una humedad relativa de 63%. El aire caliente dentro de la secadora, conservó un valor de temperatura de aproximadamente 67°C con lo cual se verificó, que no sobrepasó el valor de 71°C, que es el máximo permitido para el secado de maíz, para consumo animal sin que se afecte su calidad (Rodríguez, 2006). La humedad relativa del aire caliente, se redujo a 13,20% con el incremento de la temperatura del aire, esto significa que el aire tendrá mayor

capacidad de absorción de humedad, lo cual conduce que aumente la velocidad de secado.

4.1.2 Flujo de aire de alimentación a la secadora

La secadora de granos cuenta con un sistema de succión, el cual es generado por los alabes de un ventilador que gira a una velocidad constante, lo que genera que el flujo de aire alimentado a la secadora sea también constante. En la figura 4.1 se muestra las variaciones del flujo de aire alimentado a la secadora, obtenido a partir del cálculo de las velocidades del aire.

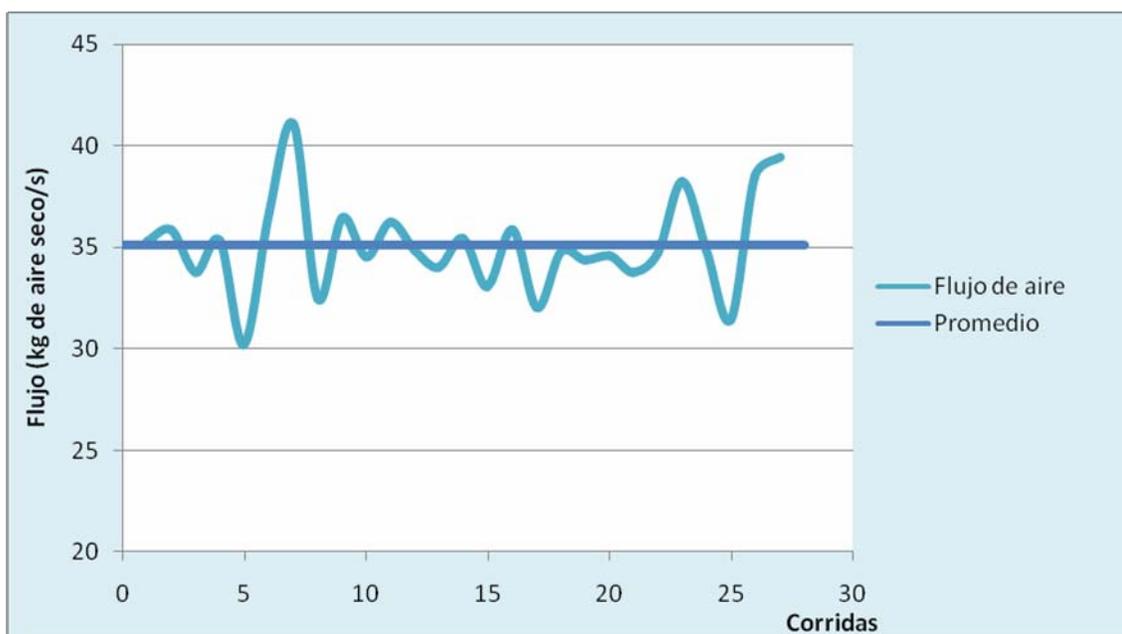


Figura 4.1 Variación del flujo de aire alimentado a la secadora

Se puede observar que las variaciones de las mediciones del flujo de aire no son muy significativas, pudiéndose establecer un valor promedio que se ajuste a los datos y permita establecer una comparación con el valor recomendado de 50,93 kg/s (Castillo, 2006). En la tabla 4.2 se puede observar la desviación que presenta el flujo de aire con respecto al recomendado, obteniéndose un valor de 31,06%

Tabla 4.2 Flujo de aire alimentado a la secadora de granos

Flujo de aire (kg/s)	Flujo de aire teórico (kg/s)	Desviación (%)
35,11	50,93	31,06

Esta desviación se le puede atribuir a la baja velocidad del ventilador que genera succión, ya que no se encuentra en un buen estado de mantenimiento, presentando un elevado índice de ensuciamiento ya que por éste, sale gran parte de los residuos livianos que posee la carga de maíz, sumado a esto, muchas veces la carga de granos no pasa por el proceso de pre limpiado. Esta desviación afecta directamente a otros términos asociados al secado como lo son el tiempo de secado.

4.1.3 Carga de granos de la secadora

El tiempo de llenado de la secadora fue de 3 horas para todas las corridas, con una carga total de 75 toneladas de grano en el llenado, este valor representa la capacidad máxima de la secadora. Adicional, se cuenta con un eficiente control de nivel en el equipo, permitiendo de esta forma mantener una carga constante dentro de ella.

4.2 OBTENCIÓN DE LA HUMEDAD, EN BASE HÚMEDA, DEL GRANO A LA ENTRADA Y A LA SALIDA DE LA SECADORA, EN UN LAPSO DE TIEMPO REPRESENTATIVO

En la figura 4.2 se muestra las variaciones de la humedad del grano, a la entrada de la secadora.

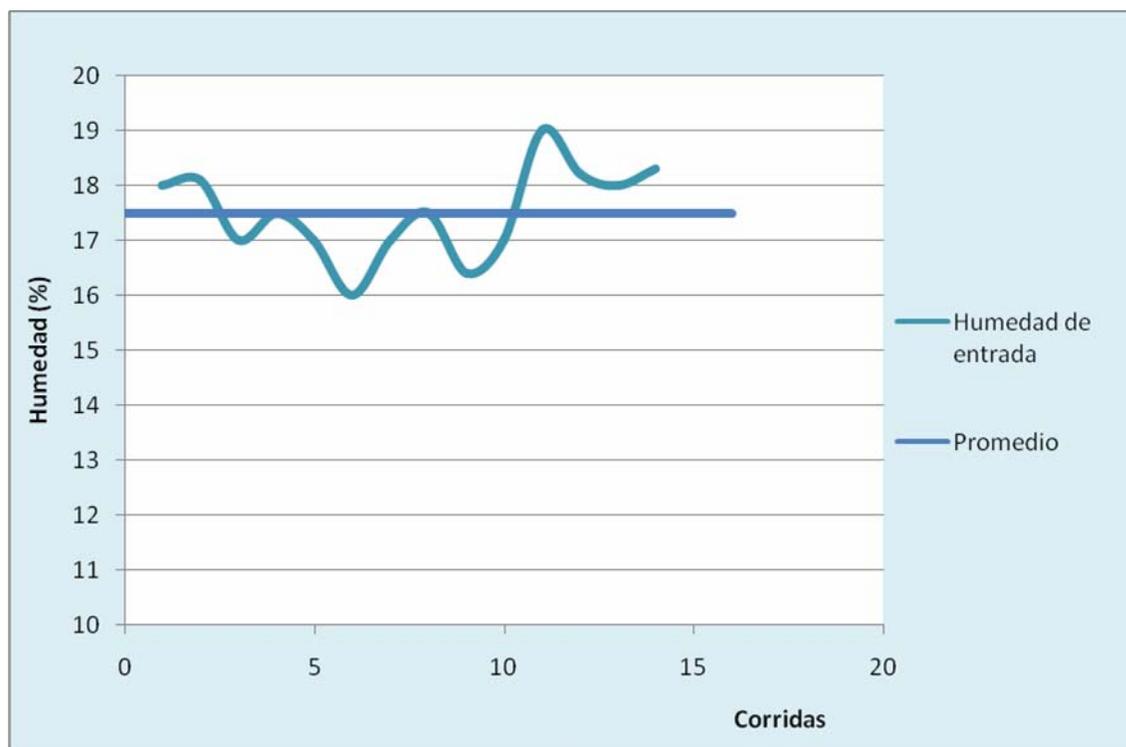


Figura 4.2 Variación de las diferentes humedades del grano, a la entrada de la secadora. Se puede observar que la variación no es considerable, por lo tanto, se puede establecer un valor promedio para la humedad de entrada. El valor fijado fue de 17,5% y esto se

logró a través del análisis de las muestras recolectadas, la cuales fueron sometidas a dos diferentes análisis, el primero de ellos fue el del medidor de humedad, que es el análisis usado en el laboratorio de control de calidad y el segundo, el de la balanza de humedad. Fue necesario aplicar el segundo método ya que en la planta no se contaba con la información necesaria para verificar las unidades del valor reportado por el medidor de humedad. Una vez analizadas las muestra en la balanza de humedad, la cual expresa los resultados en porcentaje de humedad (base humedad) se establecieron las unidades para el primer método.

En la tabla 4.3 se muestran los valores promedios de las humedades, en base humedad, de las muestras de grano a la entrada y salida de la secadora, utilizando el medidor de humedad y la balanza de humedad.

Tabla 4.3 Humedad promedio de entrada y salida de la secadora de granos

	Humedad (%)	
	Entrada	Salida
Medidor de humedad	17,50	12,50
Balanza de humedad	17,49	12,41

Se puede observar que utilizando ambos equipos el resultado no varía apreciablemente, por lo tanto, ambos son reproducibles en la lectura de humedad en base húmeda. En la figura 4.3 se representan los valores obtenidos de la humedad de salida de la secadora de granos.

La humedad del grano a la salida de la secadora es la más importante, ya que ella indica el estado del proceso de secado. El valor promedio fue de 12,5%, un valor muy favorable para la planta, ya que el rango de secado va desde 12% a 13% para el grano utilizado (Castillo, 2006). La diferencia entre la humedad de entrada y la humedad de salida da una referencia de cuantos puntos de humedad deben disminuirse para considerar al grano “seco”. El valor de la humedad de salida es monitoreado por el laboratorio de control de calidad, el cual se asegura que toda la carga de la secadora esté completamente seca, para así poder llevar el grano hasta los silos de almacenaje.

El valor de humedad final tiene una tolerancia de 1%, esto significa que no se puede almacenar granos por encima de 13% ni por debajo de 11%. Mientras que el grano esté fuera de especificación, es recirculado al tempero para que se mezcle con la carga humedad y vuelva a ingresar a la secadora.

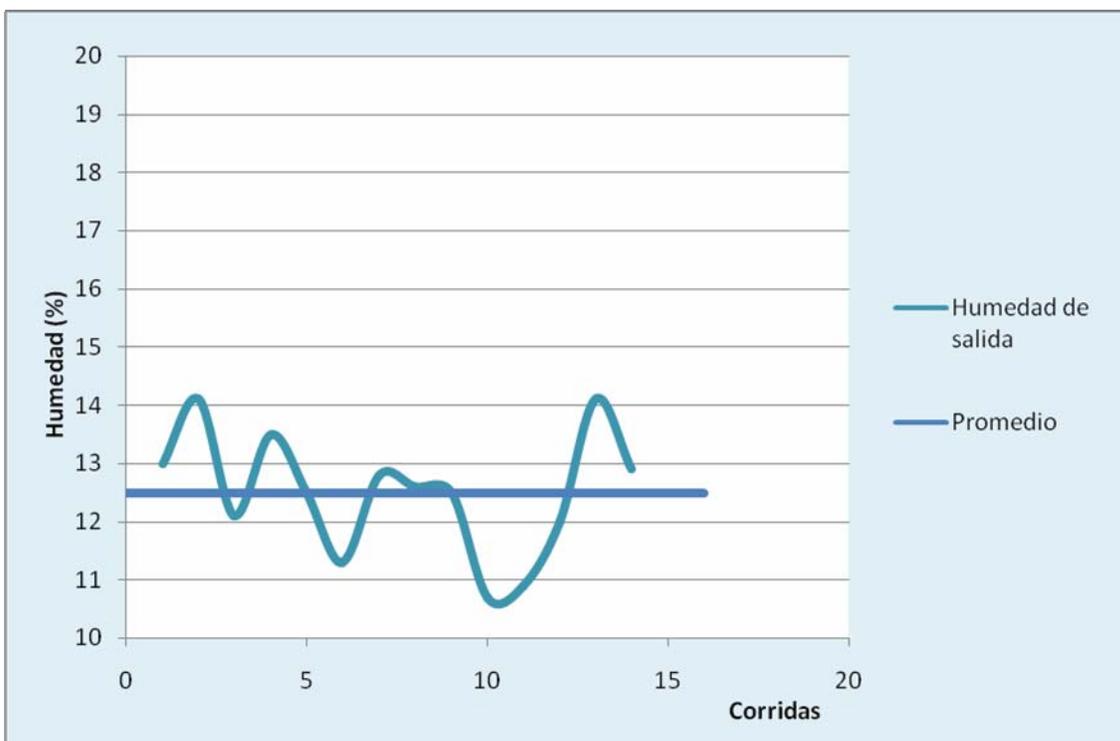


Figura 4.3 Variación de las diferentes humedades del grano a la salida de la secadora

Las consecuencias de tener un grano fuera de especificación es que, si el valor está por debajo, pierde propiedades nutricionales, lo que genera alimentos de baja calidad, y si el valor de humedad está por encima, pueden crearse microorganismos dentro de los silos y dañar el grano almacenado, así como también incrementar la temperatura dentro del silo, debido al vapor de agua contenido en el grano y quemar los granos que se encuentran cercanos a las paredes del silo.

4.3 REPRODUCCIÓN DE LA CURVA DE SECADO DEL GRANO A LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN DE LA SECADORA

Cuando el grano húmedo fue sometido al secado, dos procesos ocurrieron simultáneamente, el primero de ellos fue el de transferencia de energía, manifestado comúnmente como calor de los alrededores para evaporar la humedad de la superficie y el segundo de ellos, el de transferencia de masa donde ocurre la migración de la humedad interna a la superficie del sólido, para luego ser removida por el flujo de aire circulante.

La velocidad a la cual el secado fue realizado, estuvo determinado por la velocidad a la cual ocurren los dos procesos. La transferencia de energía en forma de calor, ocurre como resultado de la convección y conducción dentro del secador, y además influyen las

condiciones externas como la temperatura, humedad y flujo de aire, que eliminan el vapor de agua de la superficie del grano.

Es por ello que al momento de reproducir la curva de secado se controlaron estas condiciones, en especial la temperatura del aire, la cual no excedió de los 70°C, debido a que es la temperatura máxima que alcanza el flujo de aire en la secadora de granos y además garantizó que no se crearan gradientes de humedad muy grandes del interior a la superficie, evitando así el sobre secado en el sólido y posible agrietamiento del grano.

En la figura 4.4 se muestra la curva de secado promedio del maíz, construida a partir de las corridas experimentales realizadas en el laboratorio de Operaciones Unitarias

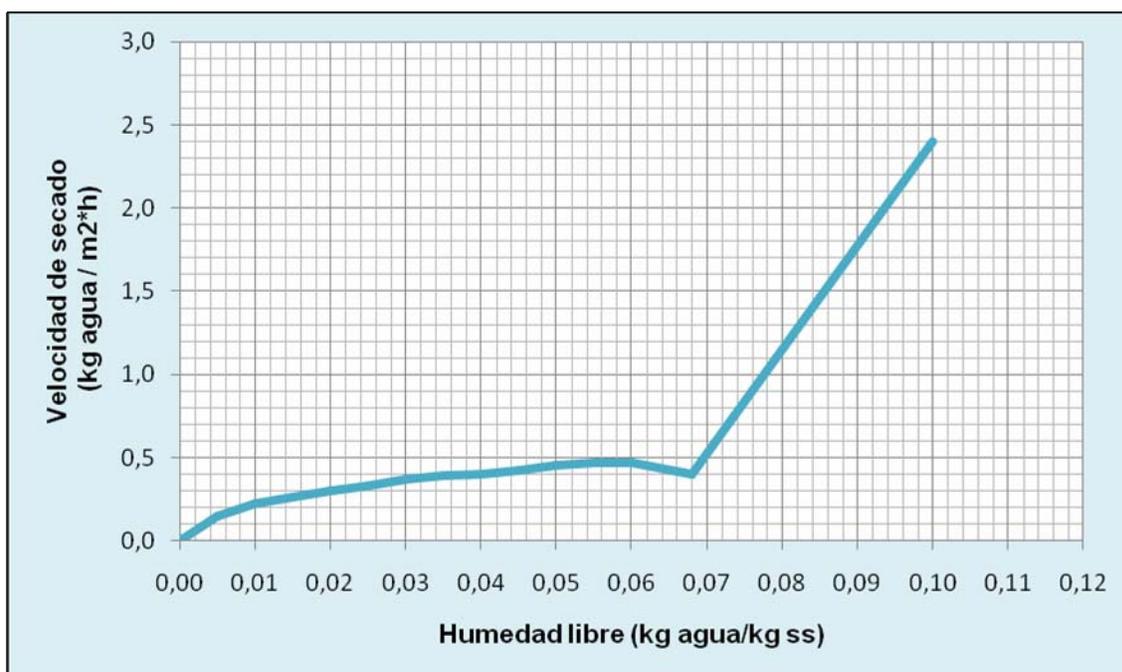


Figura 4.4 Curva de secado del maíz en un secador de túnel a la condición de operación, de la secadora de granos

En la gráfica se puede apreciar, que para estas condiciones sólo existe el periodo de velocidad decreciente para este tipo grano, el cual es controlado por mecanismos de difusión del líquido dentro del sólido, que corresponden al período de velocidad decreciente de secado, el cual se sustenta por lo expresado por Kreyger, (1973), cuando señala, que los granos y semillas en general presentan un periodo de secado a velocidad constante demasiado corto o inexistente, porque en condiciones de operación de secado, la resistencia a la transferencia de masa está esencialmente en su interior, haciendo que la tasa de evaporación superficial sea marcadamente superior a la tasa de sustitución de agua hasta la superficie del producto.

En la figura 4.5 se muestra la curva de velocidad de secado de la secadora de granos.

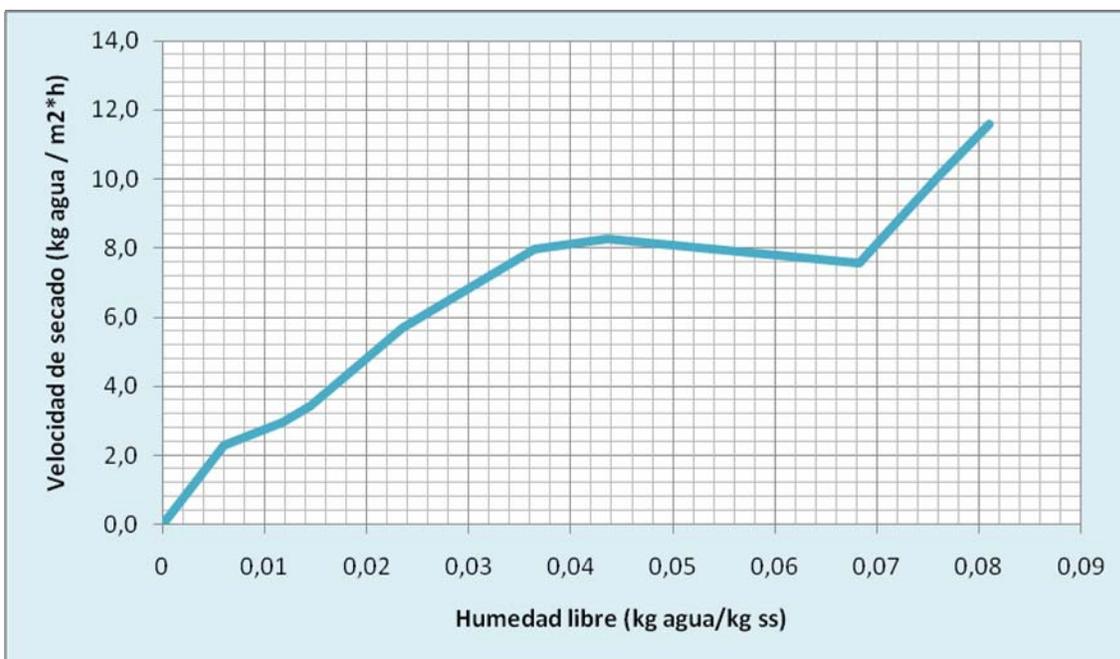


Figura 4.5 Velocidad de secado del maíz en una secadora de granos

Es necesario recalcar que no se consiguió literatura que haga referencia a curvas de velocidad de secado para el maíz, a las condiciones de secado empleadas en esta investigación, sin embargo las curvas obtenidas en las figuras 4.4 y 4.5 permite tener una idea del comportamiento del maíz a estas condiciones, la cual da validez a la curva de secado construida a partir de los datos de la secadora de granos, ya que ésta presenta el mismo comportamiento observado en la curva obtenida utilizando el secador del laboratorio de operaciones unitarias.

En las curvas se observa que para una humedad de 0,068 (kg agua/kg ss) las curvas tienen un punto de inflexión, ya que el tramo recto del inicio del período de secado, que presenta una disminución en la velocidad de secado, comienza a aumentar. Este efecto se observa en la grafica de la figura 4.4 el cual muestra el mismo comportamiento de humedad libre. Se puede decir que a partir de este punto se comprueba que el grano comienza un descenso de difusión del agua en el periodo decreciente.

La presencia del periodo de velocidad decreciente en el maíz, según Ahmed (2001), obedece a que no llega a existir una película de agua en la superficie del sólido debido a la rapidez del secado y por lo tanto el agua se desplaza a la superficie desde el interior de la muestra, evaporándose casi inmediatamente.

De esta forma queda evidenciado que la difusión es el mecanismo predominante en la pérdida de humedad, en el secado del maíz, a las condiciones estudiadas. Esto se debe a que la difusión desde el interior, no puede transferir todo el líquido que se evaporaría en la superficie, es decir, el agua líquida sobre la superficie es insuficiente para mantener una película continua que recubra toda el área de secado; en

consecuencia la velocidad de transferencia de masa de la superficie al medio de arrastre disminuye.

4.4 CÁLCULO DEL TIEMPO TEÓRICO QUE TARDA EL GRANO EN SECARSE

El tiempo de secado de una carga de granos en la secadora de caballetes depende de muchos factores como son: la humedad inicial del grano, las condiciones del aire, el flujo de aire, la dirección del aire, las características del grano, la humedad final, entre otras. Cuando se habla del tiempo de secado se deben indicar todas las condiciones del proceso de secado.

La curva de velocidad de secado es una herramienta muy útil a la hora de calcular el tiempo, ya que existen ecuaciones para tiempo de secado que se adaptan a los diferentes periodos que presenta la curva de éste, basándose principalmente en la velocidad, el área expuesta al secado y la carga de granos seco

Tabla 4.4 Comparación entre los diferentes tiempos de secado.

	Tiempo (h)	Desviación (%)
Tiempo teórico	12,67	-
Tiempo real	15,53	22,57
Tiempo analítico	22,75	79,55

En la tabla 4.4 se muestra el tiempo de secado determinado a partir de estas ecuaciones, que se adaptan a la curva de secado obtenida en la etapa anterior para la secadora de granos.

El tiempo teórico, fue determinado a partir de la figura 3.3, con los parámetros de humedad inicial y final establecido, se obtuvo directamente de la gráfica el tiempo de secado de la secadora de granos. El tiempo real lo representó el tiempo que tarda el grano en secarse en la planta, este tiempo fue mayor ya que el proceso de secado en muchas ocasiones fue interrumpido, dejando de esta forma la carga en la secadora hasta el día siguiente para culminar con el secado.

Esta pausa ocasionaba que durante todo el tiempo que duraba paralizado el proceso, hubiera mermas de agua por gravedad de los granos que estaban arriba, y cuando se ponía en marcha nuevamente la secadora, las primeras muestras tenían altos valores de humedad mientras que la carga que se encontraba de la mitad hacia abajo, tuviera valores muy altos de humedad, lo que generaba que el grano debía ser recirculado. Todo esto se traduce a elevados tiempos de secado, lo que ocasiona que se llenen los temperos y se paralice el proceso de recepción de materia prima. En la tabla 4.4 se puede observar que el valor del tiempo real presenta una desviación del 22,57%

del valor teórico obtenido por la gráfica de humedad. La principal causa de que ocurra esto en la planta, es que sólo se cuenta con un operador diurno capacitado para operar al equipo, y al finalizar su jornada laboral, el proceso es interrumpido. La mejor forma de disminuir el tiempo de secado es contando con un operador nocturno que evite que el proceso se detenga, obteniendo así la disminución del contenido de humedad restante para poder ser almacenado sin que se detenga el proceso.

El tiempo analítico se calculó a partir de las ecuaciones que se ajustan a la curva de velocidad, tanto en el tramo recto como en el tramo de la curva, este valor presentó una desviación del 79,55% con respecto al valor teórico, ya que las expresiones utilizadas parecen estar ajustadas a secadores pequeños, de escala piloto, en los cuales se les introduce una carga baja. Como la carga es de 150 toneladas de granos húmedos y ésta a su vez es directamente proporcional al tiempo de secado, hizo que el tiempo se elevara de manera considerable, es por ello que se tomó como referencia para el tiempo de secado el valor obtenido de manera gráfica en la curva de humedad de la secadora, es decir, se considero este tiempo como el tiempo teórico.

4.5 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE, SOBRE LA HUMEDAD FINAL DEL GRANO Y EL TIEMPO DE SECADO

La influencia de cada parámetro en el secado no se puede establecer de manera aislada, pues el cambio de uno de ellos altera el comportamiento de los demás durante el proceso de secado. Esa interdependencia entre los parámetros hace que el dimensionamiento y la optimización de los secadores de granos se realicen con cautela. A lo largo de esta investigación se ha dado a conocer la importancia que tiene las condiciones del aire, como lo son la humedad relativa y la temperatura, sobre el tiempo de secado. Un flujo de aire con una humedad relativa baja, tiene capacidad para absorber una gran cantidad de vapor de agua, mientras que un flujo de aire con una temperatura alta tiene la energía suficiente como para vaporizar el agua contenida en el grano para que pueda ser removida.

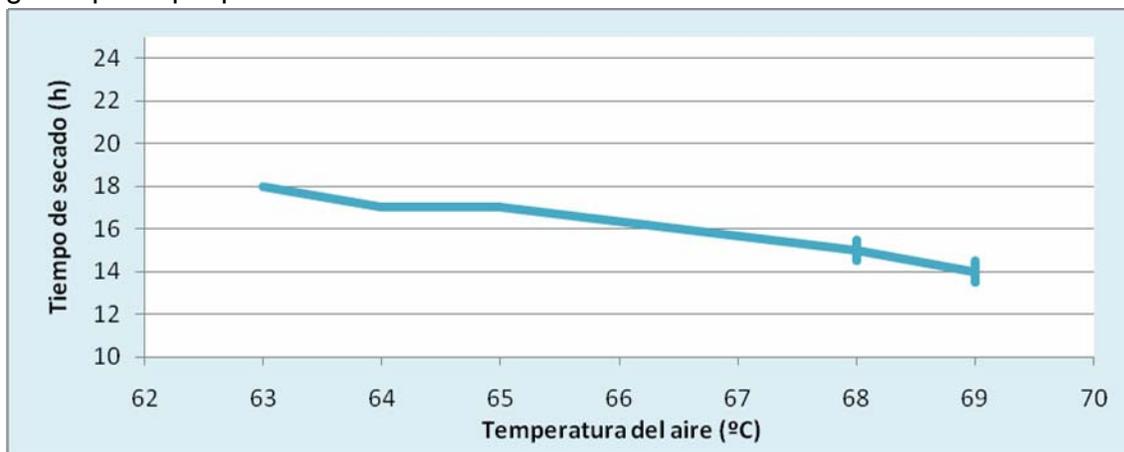


Figura 4.6 Variación del tiempo de secado con respecto a la temperatura del aire de entrada, para alcanzar la humedad final del grano

En la figura 4.6 se muestra la gráfica que representa la variación del tiempo de secado para alcanzar la humedad final con respecto a la temperatura del aire. En general, se observa la disminución del tiempo de secado a medida que la temperatura del aire caliente aumenta, se puede disminuir el tiempo hasta en 4 horas con solo aumentar la temperatura en 5°C y esto es ocasionado como se mencionó anteriormente, por la capacidad que tiene el aire al aumentar su temperatura, de vaporizar mayor cantidad de agua mientras que simultáneamente disminuye la humedad relativa, lo cual provoca que éste logre retirar toda el agua vaporizada, aumentando de esta forma la velocidad de extracción de agua y por ende el tiempo de secado.

La temperatura del aire de secado es el parámetro de mayor flexibilidad en un sistema de secado a altas temperaturas, e influye significativamente en la tasa y la eficiencia de secado y en la calidad del producto final. Un aumento de dicha temperatura significa un menor consumo de energía por unidad de agua evaporada y una mayor tasa de secado. En cambio, las temperaturas de secado más elevadas pueden causar daños térmicos más acentuados en los granos.

Es necesario recalcar que en la planta no se cuenta con un sistema de control de temperatura, ya que los quemadores que suministran calor al aire tienen un flujo constante de combustible, por lo tanto teóricamente suministran la misma energía, es por ello entonces que la variación de la temperatura del aire caliente se produce debido a los cambios que ocurren en el ambiente, por ejemplo, la temperatura ambiente de un día soleado, es mayor a la temperatura de un día nublado o con lluvia el cual presenta un alto valor de humedad relativa, lo que conlleva a que se obtengan diferentes temperaturas del aire caliente en el proceso de secado, generando alteraciones en las variables de estudio.

4.6 CONCLUSIONES

1. La temperatura del aire caliente y la carga de granos en la secadora se encuentran dentro de los parámetros establecidos.
2. La velocidad del ventilador que genera succión en la secadora de granos es constante y el flujo de aire presenta una desviación de 31,06% de su valor teórico.
3. Los valores de humedad del grano a la entrada y salida de la secadora, cumplen con los parámetros establecidos de calidad y operación.
4. La curva de velocidad de secado del maíz presenta sólo un período de descenso, donde básicamente predomina la difusión a partir de una humedad libre de 0,068 kg de agua/kg de ss.
5. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo del tiempo de secado, no se ajustan a cargas de 150 toneladas de solido húmedo.
6. El tiempo que mejor reproduce el secado del maíz, es el calculado gráficamente cuyo valor fue de 12,4 horas.
7. El tiempo de secado disminuye considerablemente si se aumenta la temperatura del aire caliente.

4.7 RECOMENDACIONES

1. Realizar un mantenimiento higiénico y mecánico al ventilador extractor de la secadora, con el fin de que pueda mejorar el flujo de aire de entrada para el proceso de secado.
2. Adquirir los instrumentos necesarios que permita realizar la medición del flujo de aire de alimentación, a la secadora de granos.
3. Cumplir con las normas de recolección de muestras de granos a la salida de la secadora, para evitar el sobre secado y posible fisurado del grano.
4. Crear un toma-muestra que permita analizar la humedad del grano de entrada a la secadora, para tener un mejor control del proceso de secado.
5. Reproducir la curva de secado a diferentes temperaturas y estudiar la variación de la velocidad de secado.
6. Implementar un sistema que permita controlar la temperatura del aire caliente por medio del calor suministrado por los quemadores.

BIBLIOGRAFÍA

Ahmed, J. (2001). *Effect of pretreatment on drying characteristics and color of dehydrated green chilli*. Department of food Science and Technology, India

Brito, H. y Marín K, (2010). *Influencia de la temperatura sobre la cinética de secado de frijol (vigna unguiculata) utilizando un secador discontinuo de bandeja*. Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Venezuela

Castillo, E. (2006). *Tecnología de la industria beneficiadora de granos y semillas*. Segunda edición, Editorial Litostar, Venezuela

Cengel, Y. (1988). *Termodinamica*. Segunda edición, Editorial McGraw-Hill, México.

Coulson, J. y Richarson, J. (1978). *Operaciones unitarias de ingeniería química*. Tercera edición, Editorial Pergamon, Oxford

De Dios, C. (1996). *Secado de granos y secadoras*. México. Disponible en: <http://www.fao.org/inpho/content/documents/vlibrary/X0028S/X0028S00.htm#Contents>

Dorta, A. (2005). *Parámetros de control más adecuados en el proceso de secado de sólido granulares, utilizando un secador rotatorio a escala piloto*. Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Venezuela

Geankoplis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Tercera edición, Editorial Continental, S.A. México

González, A. (2008). *Secado de granos de elote crudo utilizando un lecho fluidizado al vacío, empleando aire*. Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial y Mecánica, Universidad de las Americas, Mexico

Kreyger, J. (1973). *Practical observations on the drying of seed*. Seed Science and Technology, Zürich

López, R. (2010). *Evaluación del sistema de enfriamiento de los productos peletizados, de una empresa productora de alimentos para animales*. Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Venezuela.

Martín, J. y Pérez, J. (2000). *El agua en la atmósfera*. Disponible en: <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0201-04/ed99-0201-04.html>

McCabe, W. Smith, J. y Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Séptima edición, Editorial McGraw-Hill, México

Perry, R. (2001). *Manual del ingeniero químico*. Tomo II. Séptima Edición, Editorial McGraw-Hill, México

Ojeda, F. (2008). *Operaciones básicas/tema 14. Acondicionamiento de aire*. Disponible en: http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema14/pagina_02.htm

Treybal, R. (2000). *Operaciones de transferencia de masa*. Segunda edición, Editorial McGraw-Hill, México

Rodriguez, J. (2006). *Secado de granos*. Argentina. Disponible en: <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/folletos/FolletoSecadoGranos.pdf>

Villar, H. (2001). *Estudio de las variables que influyen en la operación del secado de sólidos utilizando un secador rotatorio*. Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Venezuela

Wikipedia, (2011). *Psicometría*. Disponible en URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Psychrometrics>

ANEXOS

METADATOS

TÍTULO	Evaluación de la secadora de granos en una planta procesadora de alimentos balanceados para animales
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Pérez Ramírez, Jahir Alberto	CVLAC: 18.976.904 E MAIL: jahir.aperez@gmail.com

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Secado de granos

Secadora

Curva de secado

Tiempo de secado

Humedad

Base húmeda

Base seca

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÀREA	SUBÀREA
Ingeniería y ciencias aplicada	
	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

En el presente trabajo, se realizó una evaluación de la secadora de granos de la planta de alimentos balanceados para animales, Súper S, C.A ubicada en Barcelona. Para cumplir con el objetivo planteado, fue necesario recopilar las condiciones de funcionamiento y operación. Con la ayuda de un higrómetro se caracterizó el aire que entra a la secadora, obteniéndose que la temperatura del aire frío fue de 31,45°C con una humedad relativa de 62,75%, mientras que el aire caliente a la salida de los quemadores, alcanzó una temperatura de 66,65°C con una humedad relativa de 13,20%, las cuales se encuentran en un valor aceptable de operación. Por otro lado, se utilizó un anemómetro para medir la velocidad del aire, la cual permitió determinar el flujo de aire de alimentación a la secadora, este valor fue de 35,11 kg/s con una desviación de 31,06% del valor teórico recomendado. Estas condiciones de operación permitieron obtener una humedad de 17,5% en base húmeda del grano (maíz), a la entrada de la secadora y 12,5% a la salida. Se construyeron curvas de secado para el maíz, en un secador discontinuo del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de Oriente, a las condiciones de operación de la secadora de granos de la planta, identificándose sólo un periodo de velocidad decreciente, en el cual se observa, que el mecanismo predominante en el secado del grano, es la difusión de la humedad desde su interior. El tiempo teórico, fue calculado a partir de la curva de velocidad de secado, y utilizando las ecuaciones correspondiente. Se determinó que las ecuaciones empleadas para el cálculo del tiempo, no se ajustan a cargas de 150 toneladas de sólido húmedo. Por último, se concluyó que el tiempo de secado disminuye considerablemente, si se aumenta la temperatura del aire caliente.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
Martinez, Petra	CVLAC:	4.902.046			
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Silva, Héctor	CVLAC:	3.955.146			
	E_MAIL	hectorsu@yahoo.es			
	E_MAIL				
Moncada, Fidelina	CVLAC:	13.366.691			
	E_MAIL	fidelinam@gmail.com			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011	07	06
------	----	----

AÑO	MES	DÍA
-----	-----	-----

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis. Evaluación de la secadora de granos.doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M
 N O P Q R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z . 0 1
 2 3 4 5 6 7 8 9 .

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajo de grado

“Los Trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizadas a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

Pérez, Jahir

AUTOR

Martinez, Petra

TUTOR

Silva, Héctor

JURADO

Moncada, Fidelina

JURADO

Salas, Yraima

POR LA SUBCOMISION DE TESIS