

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

Plan de Investigación de fin de carrera titulado:

“Diseño, Construcción y Operación de un secador de lecho fluidizado, destinado para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK”

Realizado por:

CRISTIAN GERMÁN FREIRE ORDÓÑEZ

RONNY PAÚL GARCÍA BURBANO

Director del proyecto:

DIEGO GERMÁN TAPIA AYALA

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL

DECLARACIÓN

Nosotros, CRISTIAN GERMÁN FREIRE ORDÓÑEZ y RONNY PAUL GARCÍA BURBANO estudiantes de la carrera INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL, de la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, declaramos bajo juramento que el trabajo descrito es de nuestra autoría.

Se consultaron varias referencias bibliográficas sobre el tema las cuales se encuentran debidamente citadas en este documento.

A través de la presente cedemos los derechos del equipo construido, al Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK, de acuerdo a lo establecido en el plan de tesis aprobado previamente.



CRISTIAN FREIRE



RONNY GARCÍA



UNIVERSIDAD
INTERNACIONAL
SEK

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

**“Diseño, Construcción y Operación de un secador de lecho fluidizado, destinado para el
Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la
Universidad Internacional SEK”**

Realizado por:

CRISTIAN GERMÁN FREIRE ORDÓÑEZ

como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL

ha sido dirigido por el Profesor

DIEGO GERMÁN TAPIA AYALA

quien considera que constituye un trabajo original de su autor

FIRMA

DIEGO GERMÁN TAPIA AYALA



DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

“Diseño, Construcción y Operación de un secador de lecho fluidizado, destinado para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK”

Realizado por:

RONNY PAÚL GARCÍA BURBANO

como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL

ha sido dirigido por el Profesor

DIEGO GERMÁN TAPIA AYALA

quien considera que constituye un trabajo original de su autor

FIRMA

DIEGO GERMÁN TAPIA AYALA



UNIVERSIDAD
INTERNACIONAL
SEK

DECLARATORIA PROFESORES TRIBUNALES

LOS PROFESORES INFORMANTES

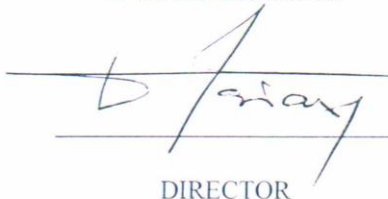
Los Profesores Informantes:

DIRECTOR	MS.c Diego Tapia
TRIBUNAL 1	MS.c Ana Rodriguez
TRIBUNAL 2	MS.c Suly Rodriguez

Después de revisar el trabajo presentado, por el alumno CRISTIAN GERMÁN FREIRE
ORDOÑEZ

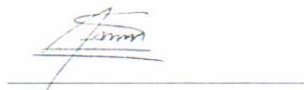
lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador


DIRECTOR



FIRMA TRIBUNAL 1



FIRMA TRIBUNAL 2

Quito, 11 DE SEPTIEMBRE DEL 2014



UNIVERSIDAD
INTERNACIONAL
SEK

DECLARATORIA PROFESORES TRIBUNALES

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

DIRECTOR **MS.c Diego Tapia**

TRIBUNAL 1 **MS.c Ana Rodriguez**

TRIBUNAL 2 **MS.c Suly Rodriguez**

Después de revisar el trabajo presentado, por el alumno **RONNY PAÚL GARCÍA**
BURBANO

lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador

DIRECTOR

FIRMA TRIBUNAL 1

FIRMA TRIBUNAL 2

Quito, 11 DE SEPTIEMBRE DEL 2014

AGRADECIMIENTO

A ti Dios mio y a mi Virgen María por guiarme siempre por el camino correcto, y ser el pilar en los momentos de necesidad.

A mi madre, por su amor, por todo su esfuerzo, sacrificio e incondicional apoyo, por inculcalme valores que han enriquecido mi alma, y han hecho desarrollarme como persona honesta, y que sin su presencia no estaria en el lugar que estoy.

A mi hermano, por siempre ser el reflejo el cual quisiera llegar algún día alcanzar.

A mi abuelita Fanny y a mi tía Sandri, quienes han estado incondicionalmente a mi lado con su amor y cariño.

A mi padrino Jhonny, por hacer las veces de papá, y un amigo con el que siempre puedo contar.

A mis compañeros, amigos y hermanos Ronny García y Daniel Mariño, a quienes agradezco por su verdadera amistad a lo largo de nuestra vida universitaria, y que sin ellos este reto no hubiera podido ser concluido.

A mi tutor MS.c Diego Tapia, por su orientación durante el desarrollo de esta investigación.

A la MS.c Ana Rodríguez y MS.c Suly Rodríguez, por su dedicación, tiempo, amistad y apoyo brindado a lo largo de esta carrera.

A mi novia Estefanía y amigos, por todos los momentos que pasamos juntos, por todos los trabajos y por la confianza que me han dado.

A toda mi familia y personas que contribuyeron durante este proyecto, que gracias a sus buenos deseos, me brindaron fuerza para culminar esta etapa de mi vida.

A ti Scotty, porque con tu amor incondicional alegras mi vida día a día.

Cristian Freire Ordoñez

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, y a la Virgen Dolorosa por haberme cobijado bajo su manto durante todos mis años universitarios, siendo mi soporte fundamental en todo momento y guiándome siempre para ser un hombre de bien.

A mi padre, Audelio García por guiarme con sabiduría para alcanzar todas mis metas y cumplir todos mis sueños con el mayor sentido de honestidad, por estar día a día en mi vida por ser mi modelo a seguir, mi ejemplo y mi amigo.

A mi madre, Mónica Burbano por todo su amor y comprensión, por ser pilar fundamental en mi crecimiento personal y profesional e inspirar los mejores valores alimentando mi corazón de sentimientos puros.

A mis hermanas, Valeria García y Sandy García por ser mi inspiración y fortaleza, por todo el amor que me entregan cada día.

A mis primas María José y Anita por ser mis confidentes y amigas, y a Camilo, Samyr, Mateo y Nico, por generar en mí sentido de responsabilidad en ser un buen ejemplo como persona y como profesional.

A mis amigos incondicionales Cristian, Daniel, Ricardo, María Belén y Francisca, quienes hicieron de mi vida universitaria una aventura llena de buenos momentos y alegrías.

A mi tutor de tesis, maestro y amigo Ing. Diego Tapia, por ser un pilar fundamental en mi formación académica, y ser un ejemplo de éxito profesional, fruto del esfuerzo honesto y preparación constante.

A mis maestras Ana Rodríguez, y Sully Rodríguez por su paciencia al enseñarme algo nuevo cada día y por su seguimiento constante en el desarrollo de mi proyecto de fin de carrera.

Ronny Paúl García Burbano.

DEDICATORIA

A mi papi, por su abnegado esfuerzo e incondicional apoyo y cariño, por ser el pilar fundamental de mi vida y quien ha velado por mi bienestar y educación, depositando su entera confianza en cada reto que se me ha presentado sin dudar un solo momento en mi capacidad.

Su tenacidad y lucha insaciable han hecho de él un gran ejemplo a seguir y destacar, quien me ha inculcado el valor de la honestidad para ser ante todo una persona íntegra, con su espíritu de lucha forjó ejemplo para no rendirme ante ningún obstáculo, por querer siempre mi superación y por ser el mejor papá del mundo.

Cristian Freire Ordoñez

DEDICATORIA

A mis padres Mónica y Audelio, por su esfuerzo dedicación y amor que siempre me han entregado para que yo pueda cumplir mis sueños. Por su perseverancia en formar un hombre responsable con valores y con visión de crecer siempre como ser humano y como profesional. Por toda su confianza depositada en mí y por ser las primeras personas en creer en mí.

A mis hermanas quienes son la inspiración en mi vida para sobrepasar todo obstáculo que se me presente y luchar siempre por alcanzar mis metas.

A todos los jóvenes, con hambre de comerse el mundo, a los soñadores, a los arriesgados a quienes lucharan por cumplir sus sueños día a día sin importar el esfuerzo que eso amerite. Porque seremos quienes construyan el mundo del mañana.

Ronny Paúl García Burbano

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido.....	I
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCION	1
1.1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1.1.1. PRONÓSTICO	3
1.1.1.2. CONTROL DE PRONÓSTICO	3
1.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.1.3. SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.1.4. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.1.5. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	4
1.1.6. JUSTIFICACIONES.....	5
1.2. MARCO TEORICO	5
1.2.1. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL TEMA.....	5
1.2.2. ADOPCION DE UNA PERSPECTIVA TEORICA.....	6
1.2.3. MARCO CONCEPTUAL	7
1.2.3.1. EL SECADO.....	7
1.2.3.1.1. FUNDAMENTOS DEL SECADO.....	7
1.2.3.1.2. LECHO FLUIDIZADO	8

1.2.3.1.2.1.	APLICACIONES DEL LECHO FLUIDIZADO.....	9
1.2.3.1.3.	HUMEDAD.....	9
1.2.3.2.	CINÉTICA DEL SECADO.....	12
1.2.3.2.1.	VELOCIDADES DE SECADO.....	12
1.2.3.2.2.	CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE SECADO	14
1.2.3.2.2.1.	Período anticrítico o de velocidad de secado constante	14
1.2.3.2.2.2.	Período poscrítico o de velocidad decreciente.....	14
1.2.3.2.3.	RELACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD VERSUS LA MATERIA SECA.	15
1.2.3.3.	TIPOS DE SECADORES.....	16
1.2.3.3.1.	Secadores de calentamiento directo.....	16
1.2.3.3.1.1.	Equipos discontinuos	16
1.2.3.3.1.2.	Equipos continuos.....	16
1.2.3.4.	SECADO POR FLUIDIZACIÓN.....	17
1.2.3.4.1.	APLICACIONES INDUSTRIALES DE LOS SECADORES DE LECHO FLUIDIZADO	18
1.2.3.5.	LOS GRANOS.....	20
1.2.3.5.1.	ESTRUCTURA Y MORFOLOGÍA.....	20
1.2.3.5.2.	CARACTERÍSTICA Y PROPIEDADES FÍSICA DE LOS GRANOS.....	21
1.2.3.5.2.1.	Forma y tamaño	21
1.2.3.5.2.2.	Porosidad	21
1.2.3.5.2.3.	Esfericidad o factor de forma.....	22
1.2.3.5.3.	HUMEDAD DE LOS GRANOS.....	22
1.2.3.5.3.1.	Métodos para determinar el contenido de humedad	22
1.2.3.5.3.1.1.	Método de diferencia de peso.....	23
1.2.3.6.	SECADO DE LOS GRANOS	24
1.2.3.6.1.	SECADO NATURAL.....	25
1.2.3.6.2.	SECADO ARTIFICIAL	25
1.2.3.6.3.	GRANO DE MAÍZ.....	25
1.2.3.6.3.1.	COMPOSICIÓN DEL GRANO DE MAÍZ.....	26

.....	26
1.2.3.6.3.2. APLICACIONES DEL GRANO DE MAÍZ	27
1.2.3.6.3.3. SECADO Y ALMACENAMIENTO DEL MAÍZ	28
1.2.3.6.3.4. CONDICIONES DE SECADO	28
1.1.1. HIPÓTESIS	29
1.1.2. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES.....	29
1.1.2.1. Variables dependientes:	29
1.1.2.2. Variables independientes	29
CAPÍTULO II	30
2.1. TIPO DE ESTUDIO.....	30
2.2. MODALIDAD DE INVESTIGACION	30
2.3. MÉTODO	31
2.4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO	31
2.4.1. ANALISIS DE LOS PARAMETROS DEL SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO	31
2.4.2. PROPIEDADES DEL GRANO DE MAIZ	32
2.4.2.1. Volumen del grano sin poros	32
2.4.2.2. Densidad aparente y real	32
2.4.2.3. Porosidad mínima (ϵ_0), porosidad mínima de fluidización (ϵ_{mf}), factor de forma (ϕ)1. 33	
2.4.3. PARÁMETROS AGENTE FLUIDIZANTE.....	34
2.4.3.1. Velocidad mínima de fluidización	35
2.4.3.1.1. Cálculo del número de Reynolds.....	36
2.4.3.1.2. Cálculo velocidad mínima de fluidización	37
2.4.3.2. Velocidad límite del lecho	37
2.4.3.3. Altura del lecho	39
2.4.3.3.1. Altura inicial del lecho	39
2.4.3.3.2. Altura mínima de fluidización del lecho	40
2.4.3.4. Caída de presión en el lecho	41

2.5.1.	Estructura de soporte.....	43
2.5.2.	Sistema de calentamiento de aire.....	45
2.5.2.1.	Ventilador centrífugo	45
2.5.2.2.	Cámara de calentamiento	47
2.5.3.	DISTRIBUIDOR DE AIRE Y CÁMARA DE SECADO	49
2.5.4.	ASPECTOS ADMINISTRATIVOS.....	53
2.5.4.1.	RECURSOS HUMANOS.....	53
2.5.4.2.	RECURSOS MATERIALES Y TECNICOS	53
2.5.4.2.1.	EQUIPOS	53
2.5.4.2.2.	MATERIALES	53
2.5.4.2.3.	REACTIVOS.....	54
2.5.4.3.	LOGISTICA.....	54
2.5.4.4.	RECURSOS FINANCIEROS.....	54
CAPÍTULO III.....		56
3.	PRUEBAS Y RESULTADOS.....	56
3.1.	BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA.....	56
3.1.1.	BALANCE DE MATERIA	56
3.1.2.	BALANCE DE ENERGÍA	58
3.1.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA OPERACIÓN DEL EQUIPO	66
CAPÍTULO IV.....		70
4.	CONCLUSIONES	70
5.	RECOMENDACIONES	71
Bibliografía.....		73
ANEXOS		75
ANEXO A.- MANUAL DE USUARIO SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO		76
ANEXO B.- MANUAL DE MANTENIMIENTO		79
ANEXO C.- PRÁCTICA DE LABORATORIO		79
ANEXO D.- ABREVIATURAS DEL DOCUMENTO.....		89

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Contenido de humedad en base seca.....	10
Ecuación 2. Contenido de humedad en base húmeda.....	10
Ecuación 3. Contenido de humedad en base húmeda.....	15
Ecuación 4. Contenido de humedad en base seca se expresa	15
Ecuación 5. Porcentaje de humedad.....	24
Ecuación 6. Densidad aparente.....	32
Ecuación 7. Densidad real	33
Ecuación 8. Cálculo del número de Reynolds	36
Ecuación 9. Velocidad mínima de fluidización	37
Ecuación 10. Velocidad límite del lecho.....	38
Ecuación 11. Altura inicial del lecho.....	40
Ecuación 12. Altura mínima de fluidización del lecho	40
Ecuación 13. Caída de presión del grano	42
Ecuación 14. Cálculo de Caudal del ventilador	47
Ecuación 15. Cálculo de potencia de las niquelinas	48
Ecuación 16. Cálculo del diámetro interno de la cámara de secado	51
Ecuación 17. Cálculo del área transversal de la cámara de secado	52
Ecuación 18. Balance general de materia	57
Ecuación 19. Balance de materia simplificado.....	57
Ecuación 20. Cálculo de calor transferido.....	59
Ecuación 21. Cálculo de la capacidad calórica del aire	59
Ecuación 22. Cálculo de la humedad absoluta del aire.....	59
Ecuación 23. Cálculo de transferencia de calor por convección	61
Ecuación 24. Balance de energía del equipo.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica humedad vs tiempo	12
Figura 2. Gráfica períodos de secado según el material	13
Figura 3. Secador continuo de lecho fluidizado	18
Figura 4. Partes del grano de maíz	26
Figura 5. Gráfica pérdida de presión vs velocidad de secado	35
Figura 6. Movimiento del lecho fluidizado	38
Figura 7. Gráfica altura del lecho vs Velocidad	39
Figura 8. Gráfica caída de presión del lecho vs Velocidad de fluidización	41
Figura 9. Diagrama del secador de lecho fluidizado	42
Figura 10. Estructura de soporte del equipo	44
Figura 11. Ventilador centrífugo	45
Figura 12. Cámara de Niquelinas	47
Figura 13. Distribuidor y cámara de aire	49
Figura 14. Comparación eficiencia de secado Estufa vs SLF	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del grano de maíz	34
Tabla 2. Parámetros del agente fluidizante	34
Tabla 3. Especificaciones del Ventilador Centrífugo	46
Tabla 4. Medidas del distribuidor de aire	51
Tabla 5. Desglose de gastos incurridos en la construcción del equipo	54
Tabla 6. Datos tomados del secado de maíz haciendo uso de la Estufa	63
Tabla 7. Datos tomados del secado de maíz haciendo uso del Secador de Lecho Fluidizado	64
Tabla 8. Comparación de eficiencias de secado Estufa vs Secador de Lecho Fluidizado	66
Tabla 9. TABLAS AMFE PARA EL SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

El secado es una de las operaciones unitarias más utilizadas a lo largo de la historia. En la antigüedad se convirtió en el principal método de conservación de los alimentos. Con el pasar del tiempo el secado se fue tecnificando, con lo cual se diseñaron varios equipos con diferentes tipos de aplicaciones. Sus orígenes radican en el estudio de la transferencia de calor y masa, razón por la cual tanto científicos como ingenieros en todo el mundo han investigado diferentes métodos para realizar el proceso de secado con mayor eficiencia.

Los objetivos del actual proyecto son diseñar, construir y operar un secador de lecho fluidizado que será destinado al Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Internacional SEK, con la finalidad de asentar los conocimientos teóricos adquiridos por los estudiantes, aplicándolos a la práctica para una adecuada formación profesional.

Para el proyecto se utilizó el acrílico como material para elaborar la cámara de secado por fines didácticos. El sistema de calentamiento está elaborado por acero al carbón.

Los resultados fueron exitosos debido a que el secador de lecho fluidizado tiene una mayor eficiencia que el secado por estufa.

PALABRAS CLAVES

Secador de Lecho Fluidizado, Humedad, Secado, Lecho Fluidizado

ABSTRACT

Drying has been one of the most widely used unit operations throughout history. In ancient times it became the main method of food preservation. With the passage of time, the drying was more technical, thus multiple machines with different types of applications were designed. Its origin lies in the study of heat and mass transfer, which is why both scientists and engineers worldwide have investigated various methods to make the drying process more effectively.

The objectives of the current project are to design, build and operate a fluidized bed dryer that will go to the Laboratory of Unit Operations SEK International University, in order to consolidate the theoretical knowledge acquired by the students, applying them to practice for proper vocational training.

For the project as acrylic material was used to make the drying chamber for informative purposes. The heating system is made by carbon steel.

Successes results were due to the fluid bed dryer has a higher efficiency than oven drying.

KEYWORDS

Fluid Bed Dryer, Humidity, Drying, Fluidized Bed

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

Comprometidos con el objetivo de fortalecer la educación superior en el país, con visión científica y humanista, articulada a los objetivos del Plan Nacional del Buen Vivir, fomentando proyectos y actividades de ciencia y tecnología, con el fin de que se incorpore en las mallas curriculares, contenidos vinculados a la aplicación práctica de los conocimientos teóricos recibidos en las aulas de clase, se ha planteado la construcción de un secador de lecho fluidizado destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad Internacional SEK, que permitirá a los estudiantes de dicho establecimiento educativo, el entendimiento práctico de la operación de secado por fluidización de sólidos, brindando un enfoque industrial a las operaciones unitarias.

Conscientes del problema de desnutrición en el Ecuador, tanto en niños como en adultos, el equipo a construirse se enfocará en el secado de granos de consumo masivo, generando conciencia social en los estudiantes, quienes a través de la práctica desarrollarán conocimientos técnicos aplicables a la solución de muchos de los problemas sociales que atraviesa el país.

El secado por lecho fluidizado, es uno de los principales métodos empleados en la industria alimenticia y química, por su alta eficiencia y cortos tiempos de operación. El método consiste en hacer pasar una corriente de aire por un lecho o producto a secar.

La velocidad del flujo del gas, es tal que empuja el lecho generando un movimiento o fluidización del mismo. Para las evaluaciones que se le realizarán al equipo, se seleccionó al maíz como producto a secar, debido a su gran importancia económica y social, contribuyendo en gran medida a la alimentación humana y aportando activamente en la economía del país al representar el 3% del PIB agrícola anual (Bravo, 2005).

La eficiencia y funcionalidad del equipo, se evaluará en función de la elaboración de una curva de secado, comparando con el método tradicional de secado empleado en los laboratorios, secado en estufa.

1.1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a que el país se encuentra atravesando un proceso de mejoramiento en la educación superior, es interés de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK, el equipar sus laboratorios a fin de que sus estudiantes puedan poner en práctica los conocimientos teóricos recibidos, construyendo bases firmes en su conocimiento.

La Universidad Internacional SEK, se ha caracterizado por formar personas competentes, y profesionales socialmente responsables con el desarrollo sostenible del país, es por esto el afán de implementar los laboratorios con equipos indispensables en la industria para la formación de Ingenieros, ya que a través de la práctica se puede tener una percepción más clara, de cómo se aplican los conocimientos teóricos aprendidos a la vida profesional reforzando lo aprendido específicamente en el campo de las Operaciones Unitarias, las cuales se encuentran presentes en todo proceso industrial. En base a esto es

necesario el diseño y construcción de un secador de lecho fluidizado, destinado al Laboratorio de Operaciones de la Universidad Internacional SEK.

1.1.1.1. PRONÓSTICO

En el caso que La Universidad Internacional SEK, no se equipe adecuadamente de equipos esenciales de laboratorio, los estudiantes no tendrán la oportunidad de realizar prácticas en las cuales puedan aplicar los conocimientos aprendidos con respecto a procesos de transferencia de masa, calor y fluidización de sólidos.

1.1.1.2. CONTROL DE PRONÓSTICO

El diseño, construcción y operación de un Secador de Lecho Fluidizado, destinado al laboratorio de Operaciones Unitarias, permitirá a los estudiantes aplicar los conocimientos teóricos aprendidos en las aulas de clase, teniendo una visión real de la importancia de las operaciones unitarias en la profesión.

1.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es importante que el laboratorio de Operaciones Unitarias cuente con un Secador de Lecho Fluidizado, en la Facultad de Ciencias Ambientales, como mecanismo que permita mejorar las prácticas de laboratorio y suplir las dudas de los estudiantes para formar bases sólidas para ingeniería?

1.1.3. SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo se construirá un secador de lecho fluidizado?

¿Cómo funciona un secador de lecho fluidizado?

¿Por qué la necesidad de que el estudiante afiance sus conocimientos de operaciones unitarias principalmente en secado?

¿Es importante que el Laboratorio de Operaciones Unitarias cuente con un secador de lecho fluidizado?

¿Por qué se eligió la fluidización de sólidos como método de secado?

¿Cuáles son las variables de diseño de un secador de lecho fluidizado?

¿De qué material se debe construir el secador de lecho fluidizado?

1.1.4. OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y operar un secador de lecho fluidizado destinado al laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK.

1.1.5. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar el principio de operación de un secador de lecho fluidizado.
- Identificar las variables dependientes e independientes de diseño del equipo.
- Operar el equipo obteniendo la eficiencia y los resultados esperados
- Elaborar el manual de operación del equipo para su posterior manejo.
- Elaborar el manual de mantenimiento del equipo.
- Elaborar prácticas para los estudiantes de Ingeniería en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

1.1.6. JUSTIFICACIONES

Debido a la falta de equipos indispensables en el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK se ha visto la necesidad de construir un secador de lecho fluidizado, equipo que permitirá entender la operación de secado y los fenómenos de transferencia de masa, transferencia de calor, fluidización de sólidos, balance de masa y energía; a través de prácticas de laboratorio, lo que permitirá a los estudiantes familiarizarse con el método de secado por fluidización, además aplicarán sus conocimientos teóricos, entendiendo así sus aplicaciones industriales.

1.2. MARCO TEORICO

1.2.1. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL TEMA

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

Según los resultados obtenidos del diseño y construcción de un secador de lecho fluidizado en la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo se explica que para realizar el diseño y construcción del equipo se emplean análisis de laboratorio de una muestra a secar seleccionada aleatoriamente con un contenido de humedad inicial de 16% llevando hasta una humedad básica (12-14%) según norma INEN (Gonzáles Sánchez & Paucar Torosina, 2009).

Del diseño y construcción de un secador de granos por fluidización en la Escuela Politécnica Nacional, se entendió que los factores más representativos del agente secante que intervienen en el proceso son: presión, temperatura, viscosidad, densidad; estos parámetros varían de acuerdo al lugar donde se realice el fenómeno de fluidización e influyen en forma directa en el tiempo y calidad del secado de la partícula (Jaramillo & Narváez, 2012).

Gonzalález, A. (2008), citado por Jaramillo, A. (2012), sostiene que cuando el aire fluye en forma ascendente a través del lecho fijo sin ninguna restricción en la superficie, la caída de presión incrementa linealmente con la velocidad del fluido hasta el punto en que el grano empieza a levantarse, es decir que la fuerza del aire equilibra al peso del maíz, la caída de presión a partir de este punto se mantiene constante.

1.2.2. ADOPCION DE UNA PERSPECTIVA TEÓRICA

La bibliografía recopilada acerca del diseño y construcción de secadores por fluidización, permite evidenciar la efectividad de este tipo de equipos en el proceso de deshidratación de sólidos. Tomando en cuenta esta información, el secado de sólidos en el secador de lecho fluidizado se dará por inducción de aire caliente mediante resistencias eléctricas lo que aumentará la eficiencia del proceso, disminuyendo el tiempo de operación del equipo.

Debido a que el objetivo de la construcción de un secador de lecho fluidizado es realizar prácticas a escala en laboratorio, se diseñara y construirá un secador de tipo batch que permitirá operarlo de forma discontinua.

1.2.3. MARCO CONCEPTUAL

1.2.3.1. EL SECADO.

El secado constituye uno de los métodos que permite separar un líquido de un sólido. Puede darse por contacto directo e indirecto, por contacto directo el calor necesario para la vaporización del agua lo suministra el aire, mientras que en el secado indirecto el calor se suministra por una fuente térmica a través de una superficie metálica en contacto con el objeto a secar (McCabe & Smith, 2002).

El secado indirecto puede darse de modo continuo o discontinuo. En el método continuo tanto la alimentación del sólido a secar como el aire entran continuamente en el secador variando a través del mismo las condiciones del aire y del sólido a secar, mientras en el discontinuo, una vez cargado el secador, se hace circular el aire de secado y se supone que sus condiciones permanecen constantes con el tiempo (McCabe & Smith, 2002).

El secado difiere de la evaporación en los aspectos más esenciales, que son los aparatos, los métodos y los productos. En la evaporación, el líquido se elimina por ebullición, mientras que en el secado el líquido es arrastrado por el aire en forma de vapor, a temperatura generalmente inferior a la de ebullición. Las mezclas tratadas a ebullición suelen contener más líquido que sólido, mientras que aquí sucede lo contrario (Vian & Ocón, 1976).

1.2.3.1.1. FUNDAMENTOS DEL SECADO.

El secado de sólidos es una operación unitaria que consiste en reducir la cantidad de humedad de un sólido hasta un valor aceptablemente bajo. En general, entendemos por secado la separación de la humedad de los sólidos) o de los líquidos por evaporación en una

corriente gaseosa; en consecuencia, en cualquier proceso de secado hemos de tener en cuenta los mecanismos de transmisión de calor y transporte de materia (Ocon & Tojo, 1986).

1.2.3.1.2. LECHO FLUIDIZADO

La fluidización es una operación en la que un sólido se pone en contacto con un líquido o un gas, adquiriendo el conjunto unas propiedades similares a las de los fluidos.

Por lo general se hace circular el fluido en forma ascendente a través de un tubo vertical, en su base se asienta el lecho de partículas sólidas, cuando el aire lo atraviesa a baja velocidad pasa a través de los huecos libres que quedan entre granos y no es capaz de moverlos, este estado se conoce como lecho fijo (González, 2008).

Cuando aumenta la velocidad del fluido, incrementa también la caída de presión en el lecho hasta que la fuerza que ejerce el aire equilibre el peso del sólido por cada unidad de superficie, entonces el lecho adquiere las características y propiedades del fluido, este estado se conoce como fluidización incipiente y tiene velocidad mínima de fluidización, a partir de este valor, si aumenta la velocidad del fluido es posible levantar el grano, esta fase se denomina como lecho expandido (González, 2008).

Para el proceso de secado, el lecho se fluidiza mediante un flujo de aire caliente lo que resulta en unas condiciones que son ideales para la aplicación. Existe un contacto íntimo entre el gas y el sólido a una velocidad que provoca coeficientes de transferencia de calor muy altos, con la combinación de la conducción y la convección. Si a esto le aünamos una humedad relativa, obtenemos evaporación casi instantánea a lo que le sigue una importante caída en la temperatura del gas (Nonhebel & Moss, 2002).

El lecho fluidizado se usa en una amplia gama de industrias debido a su posible gran capacidad, su costo bajo de construcción, fácil operación y alta eficiencia térmica. La única limitación es que el sólido pueda ser fluidizado por un gas (Nonhebel & Moss, 2002).

1.2.3.1.2.1.APLICACIONES DEL LECHO FLUIDIZADO

- **Proceso de craqueo catalítico en lecho fluidizado**

El proceso de craqueo catalítico fluidizado (CCF), es uno de los principales procesos que basan su operación en la fluidización de un lecho. Los procesos CCF, emplean un catalizador en forma de partículas muy finas que se comportan como un fluido cuando se airean con vapor. El catalizador fluidizado circula continuamente entra la zona de regeneración y actúa como vehículo para transferir el calor desde el regenerados al aceite alimentado y al reactor. Dos tipos de unidades básicas de CCF se utilizan hoy en día, son las del tipo “lado por lado”, donde el reactor y el separados son vasijas adyacentes una e la otra, y las del tipo Orthoflow o apilado, donde el reactor se monta sobre la parte superior del regenerador. (Nonhebel & Moss, 2002).

1.2.3.1.3. HUMEDAD.

La humedad de un sólido es la cantidad de agua o de vapor de agua que se encuentra impregnada a este. Puede expresarse en base seca o base húmeda. En los cálculos de secado resulta más conveniente referir la humedad a base seca, debido a que esta permanece constante a lo largo del proceso de secado.

Nonhebel & Moss (2002) señalan: “La humedad expresada en una base volumétrica se usa muy raramente. Es importante tener en cuenta cual base se está utilizando en cuestiones de diseño”.

Ecuación 1. Contenido de humedad en base seca

$$XW, \text{seco} = \frac{\text{peso humedad}}{\text{peso total seco}}$$

Ecuación 2. Contenido de humedad en base húmeda

$$XW, \text{humedo} = \frac{\text{peso humedad}}{\text{peso total humedo}}$$

- **Humedad de equilibrio (X^*):**

Cuando un sólido húmedo se pone en contacto, durante un tiempo determinado, con un flujo de aire a ciertas condiciones de humedad y temperatura constantes, se alcanzarán condiciones de equilibrio entre el aire y el sólido. Esta condición se conoce como humedad de equilibrio.

La humedad del aire ejerce una presión de vapor determinada; se alcanzan las condiciones de equilibrio cuando la presión parcial del agua que acompaña al sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua en el aire. Se denomina humedad de equilibrio del sólido a la humedad final que alcanza el sólido en equilibrio con el aire en las condiciones dadas. La humedad de equilibrio, X^* , es el límite al que puede llevarse el contenido de humedad de un sólido por contacto con un flujo de aire de humedad y temperatura determinadas.

- **Cuerpos húmedos y cuerpos higroscópicos:**

Para una temperatura determinada, la presión de vapor del agua contenida en el sólido húmedo aumenta con su humedad para todas las sustancias, hasta alcanzar el valor de la tensión de vapor del agua pura a la temperatura considerada.

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

- **Humedad libre (F):**

Es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio con el aire. Esta es la humedad que puede perder un sólido después de un contacto prolongado con aire en condiciones de temperatura y humedad específicas.

- **Humedad ligada:**

Es la humedad mínima que puede tener un sólido para que deje de comportarse como un cuerpo higroscópico. Se expresa como el valor de la humedad de equilibrio de un sólido en contacto con aire saturado.

- **Humedad desligada:**

Se define como la humedad libre del sólido en contacto con aire saturado. Se representa mediante la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad ligada. Evidentemente si el sólido tiene humedad desligada se comportará como un cuerpo húmedo (Ocon & Tojo, 1986).

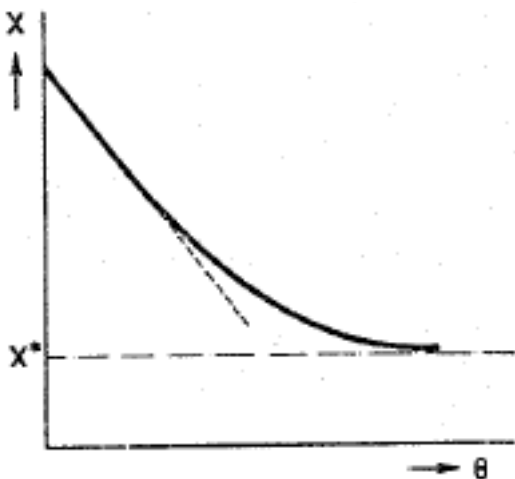
1.2.3.2. CINÉTICA DEL SECADO

Está definido como la velocidad de secado por la humedad que tiene un sólido en cierta unidad de tiempo. Para obtener datos más exactos se multiplica por el cociente diferencial ($-dX/d\theta$) operando en condiciones constantes de secado (temperatura, presión, humedad y velocidad) permanecen constantes con el tiempo (Ocon & Tojo, 1986).

1.2.3.2.1. VELOCIDADES DE SECADO

Durante el secado, al representar la humedad del sólido frente al tiempo, operando en condiciones constantes de secado y circulando el aire sobre el objeto a secar, se obtienen curvas del tipo indicado en la Figura 1, en la que puede observarse que al principio la humedad del sólido disminuye linealmente con el tiempo de secado (porción recta de la representación), o lo que es igual durante este período la velocidad de secado ($-dX/d\theta$) permanece constante. Se efectúa el secado a esta velocidad constante hasta que la humedad del sólido alcanza un valor crítico, a partir del cual la velocidad de secado disminuye, llegando al valor cero cuando la humedad del sólido alcanza el valor de equilibrio con el aire en las condiciones constantes de operación (Ocon & Tojo, 1986).

Figura 1. Gráfica humedad vs tiempo



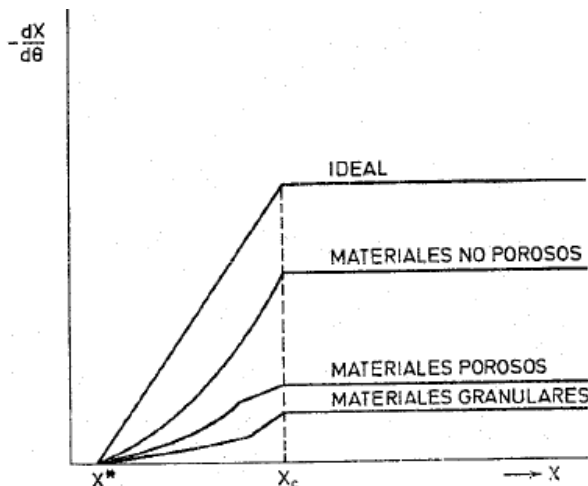
A partir de los datos de secado empleados para la construcción de la Figura 1, se pueden obtener los datos de la velocidad de secado: $\left(-\frac{dX}{d\theta}\right)$ o $\frac{S}{A}\left(-\frac{dX}{d\theta}\right)$ frente a la humedad, tal como se muestra en la Figura 2. para distintos tipos de materiales según el mecanismo de secado. En dicha figura se encuentran dos tramos diferentes: el primero corresponde a un período de velocidad constante y otro a un período de velocidad decreciente.

El período de velocidad constante va desde la humedad inicial X_0 hasta la humedad crítica X_C . El valor de la humedad crítica depende de las condiciones del aire de secado y del espesor del material a secar.

El período de velocidad decreciente se extiende desde la humedad crítica X_C hasta la humedad final del sólido X_p cuyo valor límite es X^* .

Se denomina tiempo crítico de secado al tiempo de secado que se necesita para que la humedad del sólido descienda desde su valor inicial hasta el crítico; en la figura 2 este tiempo corresponde al instante en que la curva de secado se separa del comportamiento lineal (Ocon & Tojo, 1986).

Figura 2. Gráfica períodos de secado según el material



1.2.3.2.2. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE SECADO

1.2.3.2.2.1. Período anticrítico o de velocidad de secado constante

En este período la superficie del sólido está totalmente cubierta por una capa de líquido y la evaporación dependerá solamente de la velocidad de difusión del vapor o de la intensidad de paso de calor a través de la capa límite del aire. Durante este período la superficie mojada se comportara como una superficie de agua libre (el agua en la superficie ejerce una presión igual a la tensión de vapor a la temperatura de la superficie). La resistencia de difusión a través del sólido hasta la superficie de secado es despreciable, de modo que la velocidad de difusión a través del sólido es igual a la velocidad de secado (Ocon & Tojo, 1986).

1.2.3.2.2.2. Período poscrítico o de velocidad decreciente.

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

Durante el primer período poscrítico, la velocidad de secado está regida por la evaporación del agua sobre la fracción de superficie mojada; esta fracción disminuye continuamente hasta que al final de este período la superficie está seca.

Durante el segundo período poscrítico la superficie está totalmente seca y la velocidad de secado ha de evaluarse atendiendo al proceso de transporte de humedad desde el interior del sólido hasta la superficie, que puede realizarse por diversos mecanismos. Si

el mecanismo de transporte se realiza por difusión (caso de los sólidos de estructura continua tales como jabones, maderas, papel, arcillas, etc.) (Ocon & Tojo, 1986).

1.2.3.2.3. RELACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD VERSUS LA MATERIA SECA.

La relación entre el peso de la cantidad de agua presente y el total del grano, se expresa como el contenido de humedad en base húmeda, que es el término usual en la comercialización. En ciertas operaciones se prefiere usar la humedad en base seca, que es la relación entre el peso de la masa de agua y el de la materia seca del grano que permanece constante en todo el proceso.

Ecuación 3. Contenido de humedad en base húmeda

$$CH_{bh}(\%) = \left(\frac{W_a}{W_a + W_{ms}} \right) \cdot 100$$

Dónde:

CH_{bh} Contenido de humedad en base húmeda (%)

W_a Peso de agua (g)

W_{ms} Peso de la materia seca (g)

Ecuación 4. Contenido de humedad en base seca se expresa

$$CH_{bs}(\%) = \left(\frac{W_a}{W_{ms}} \right) \cdot 100$$

Dónde:

CH_{bs} Contenido de humedad en base seca (%)

W_a Peso de agua (g)

W_{ms} Peso de la materia seca (g)

1.2.3.3.TIPOS DE SECADORES

Dependiendo de la clasificación de la operación de secado encontramos los siguientes tipos de secadores:

1.2.3.3.1. Secadores de calentamiento directo.

- Discontinuos
- Continuos

1.2.3.3.1.1.Equipos discontinuos

- Secadores de bandeja con corriente de aire.
- Secadores con circulación a través de lecho sólido.
- Secadores de bandejas a vacío.
- Secadores de bandejas a presión atmosférica.
- Secadores por congelación.
- Secadores de lecho fluidizado.

1.2.3.3.1.2.Equipos continuos

- Secaderos de túnel.
- Secaderos neumáticos.
- Secaderos ciclónicos.
- Secaderos de cama chorreada.
- Secaderos de lecho fluidizado.
- Secaderos sprays.

- Secaderos de tipo turbina.
- Secaderos rotatorios.
- Secaderos de calentamiento indirecto. (Gonzáles Sánchez & Paucar Torosina, 2009).

1.2.3.4. SECADO POR FLUIDIZACIÓN

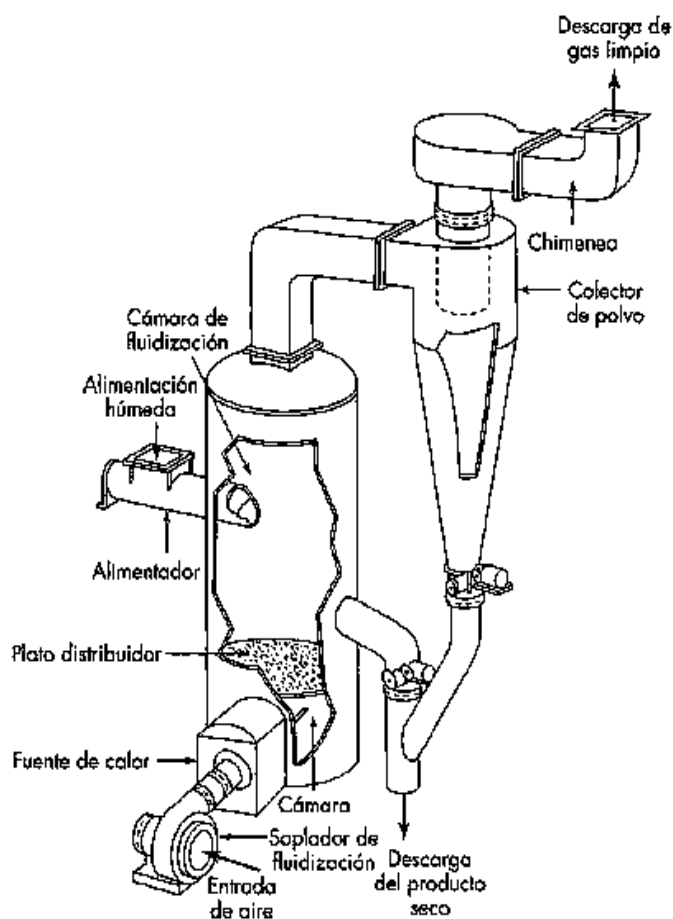
El secado por fluidización es una técnica para eliminar humedad de un sólido mediante el paso de un gas, o de un líquido a través de un lecho por donde pasa el fluido. La velocidad del fluido debe ser tal que los sólidos “floten” en él.

Los secadores en los que los sólidos están fluidizados por el gas de secado se utilizan en diversos problemas de secado. Las partículas se fluidizan con aire o gas en una unidad de lecho hirviente, tal como se muestra en la figura 3. La mezcla y la transferencia de calor son muy rápidas. La alimentación húmeda se introduce por la parte superior del lecho; el producto seco se retira lateralmente cerca del fondo (McCabe & Smith, 2002).

En el secador que se muestra en la figura 3 hay una distribución al azar de los tiempos de residencia, siendo el tiempo medio típico de permanencia de 30 a 120 segundos cuando sólo se vaporiza líquido superficial, y de 15 a 30 min si también hay difusión interna. Las partículas pequeñas se calientan hasta la temperatura de bulbo seco del gas fluidizante a la salida; por consiguiente, los materiales sensibles a calor han de secarse en un medio suspendido relativamente frío. Aun así, el gas a la entrada puede estar caliente, ya que la mezcla es tan rápida que la temperatura es casi uniforme a la temperatura de salida del gas, por todo el lecho. Si hay partículas finas presentes, que ya sea entran con la alimentación, o bien, de la ruptura de partículas del lecho fluidizado, existirá un

considerable transporte de sólidos con el gas que sale y será necesario instalar ciclones y filtros de bolsa para la recuperación de finos (McCabe & Smith, 2002).

Figura 3. Secador continuo de lecho fluidizado



(McCabe & Smith, 2002).

1.2.3.4.1. APLICACIONES INDUSTRIALES DE LOS SECADORES DE LECHO FLUIDIZADO

- INDUSTRIA PETROQUÍMICA

Se han instalado algunas plantas para el secado de PVC y de otros polímeros. A través del lecho se sopla aire en cantidad suficiente para enfriar a este producto termosensible. El equipo ocupa sólo la cuarta parte de la superficie que requería el secador anterior, que consistía en recipientes cilíndricos verticales, a través de los cuales se soplaban el aire suavemente, y su gasto de instalación era tres veces mayor que el del secador de lecho fluidizado (Nonhebel & Moss, 2002).

- INDUSTRIA QUÍMICA

En la escala de las grandes producciones se usan secadores continuos para el secado de arena y carbón. En E.E.U.U. se encuentra una de las plantas de secado de carbón más grandes. Consiste en dos secadores de 4.3 m de diámetro, cada uno de los cuales elimina 35 t/h de agua de una alimentación de 350 t/h de polvo de carbón con un tamaño de partículas comprendido entre 0 y 25 mm. El espesor del lecho es de sólo unos 30 cm. La velocidad del gas caliente es tan alta que alrededor del 50% del carbón es arrastrado al ciclón. Con un tiempo de contacto de sólo 0.1 s la corriente de gas es enfriada desde 750 °C a 65 °C. El rendimiento térmico es del 96%, excluyendo la pérdida por radiación de 5 ½ %.

El lecho fluidizado continuo es utilizable para el enfriamiento de materiales granulares como son los fertilizantes de tipo NPK que salen de los secadores rotatorios. En el secador de lecho fluidizado, el material fluye uniformemente a lo largo de la artesa y descarga en un vertedero en el extremo más alejado del punto de alimentación. En el último tercio de la artesa se instalan tubos por los cuales circula agua de enfriamiento que se usan en verano. El caudal de aire usado es de 1500 m³ y tiene un consumo de energía de 1.5 kWh/t que es inferior al correspondiente a los secadores rotatorios. La planta es mucho más compacta y el gasto de instalación es menor respecto a un secador rotatorio (Nonhebel & Moss, 2002).

1.2.3.5. LOS GRANOS

La producción de alimentos es una de las preocupaciones más apremiantes de los países en desarrollo, y es en estos países en donde la principal fuente de alimentos lo constituyen los granos.

La disponibilidad de granos no solamente se ve afectada por factores que inciden en el campo antes de su cosecha, sino que también se ve frecuentemente amenazada por factores postcosecha de diversa índole. Estos factores pueden ser de origen biótico como los insectos, los hongos y los roedores, otros de tipo físicos, como la alta humedad y la alta temperatura, así como lo relativo a las estructuras de almacenamiento y al nivel técnico de los encargados del manejo y control de calidad de los granos (Martinez, 1988).

1.2.3.5.1. ESTRUCTURA Y MORFOLOGÍA

Los granos o semillas son frutos de varias especies vegetales, como los cereales, las oleaginosas, las leguminosas y otras similares, que se utilizan para la alimentación como materia prima para la industria, los que al completar su período vegetativo pueden ser recolectados y comercializados, algunos pueden consumirse con un alto contenido de humedad o secos, como sucede con el maíz. Los granos se agrupan dependiendo de diferentes factores entre ellos el uso y la taxonomía. Los principales grupos son: cereales, leguminosas, oleaginosas, pastos y bebidas.

Cada especie de granos posee su propia estructura y propiedades físico químicas. Esta estructura debe ser tomada en cuenta para el correcto almacenamiento y transformación de los alimentos ya que algún cambio puede incidir directamente sobre variables tan

importantes para su conservación como la humedad, la temperatura y el tiempo, además de afectar la relación entre los compuestos químicos para el procesamiento, el acondicionamiento y el beneficio y la obtención de productos industriales como harinas, aceites y almidones. Los cereales son los granos más conocidos y básicos para la alimentación; pertenecen a la familia de las gramíneas. El conocimiento de la estructura física, la fisiología y la composición química de cada una de las partes del grano, es fundamental para comprender los cambios que presentan en las diferentes fases del manejo postcosecha y en los procesos industriales (Martinez, 1988).

1.2.3.5.2. CARACTERÍSTICA Y PROPIEDADES FÍSICA DE LOS GRANOS

1.2.3.5.2.1. Forma y tamaño

Es una de las características con mayor variación según cada especie de grano. Existen once órdenes de magnitud de diferencia en tamaño entre las semillas más pequeñas y las más grandes. Las grandes y pesadas producen plántulas fuertes, con un satisfactorio desarrollo de raíces y tallos, por tener una reserva mayor de nutrientes con los que la planta vive en su etapa inicial. El tamaño pequeño es típico de algunas variedades e indica un menor vigor en la planta al tener menos nutrientes, lo que no constituye una gran desventaja (Martinez, 1988).

1.2.3.5.2.2. Porosidad

La porosidad es una propiedad física que depende de la forma y tamaño de la semilla, debido a la naturaleza coloidal y a los espacios intergranulares, el volumen de aire intersticial es del orden del 35% al 40%, esta característica permite al aire entrar y circular

a través de la masa de granos, mientras mayor porosidad haya más fácil es la conservación del producto (Martinez, 1988).

1.2.3.5.2.3. Esfericidad o factor de forma

No todas las semillas son esféricas, la mayoría son irregulares; una manera de medir este parámetro es con el factor de forma ϕ , el cual comprende la relación entre el área de una esfera y la del grano, los dos con el volumen constante (Martinez, 1988).

1.2.3.5.3. HUMEDAD DE LOS GRANOS

Debido a que el principal vehículo de transporte de nutrientes en las plantas es el agua, tiene una participación activa durante la formación y crecimiento de los granos. La calidad de una semilla, en gran medida está dada por la humedad. Un alto contenido de agua, puede ser uno de los factores que causan pérdidas en el producto, su control inadecuado en las operaciones de postcosecha conlleva a un calentamiento de la masa de grano y genera focos de hongos e insectos. En conclusión la vida útil del grano aumentará a medida que la humedad y la temperatura se mantengan bajas (Ospina Machado, 2002).

1.2.3.5.3.1. Métodos para determinar el contenido de humedad

Existen dos métodos para la determinación del contenido de humedad, los métodos directos o primarios y los indirectos o secundarios.

- **Métodos Primarios**

Los métodos primarios para la determinación de la cantidad de humedad, son aquellos que miden de forma directa el contenido de agua del producto por diferencia de

peso, reacción química o absorbancia de luz, los principales son de estufa, destilación, químicos, absorción nuclear y de rayos infrarrojos (Ospina Machado, 2002).

- **Métodos Secundarios**

Los métodos secundarios o indirectos, usan como principio la conductividad eléctrica y las propiedades dieléctricas, las cuales dependen del contenido de humedad del producto (Ospina Machado, 2002).

1.2.3.5.3.1.1. Método de diferencia de peso

Es el principal método de medición de humedad a nivel de laboratorio, y por la disponibilidad de equipos, es el método que se seleccionó para la determinación inicial de humedad del grano. Por lo general los equipos empleados son hornos o estufas. En este método, la muestra de granos se calienta bajo condiciones específicas y la diferencia de pesos entre la muestra seca y la muestra húmeda, varía en función del tipo de equipo a utilizar, de la temperatura y del tiempo (Aguirre, 1992).

El aire es calentado a presión atmosférica y se lo hace circular ya sea por convección natural o por medios mecánicos. Esta técnica es utilizada por varios organismos internacionales para determinar el contenido de agua (Aguirre, 1992).

En general, la temperatura a la cual se realiza la medición de humedad para el secado de granos es de 130 °C, esta temperatura aplica a productos que no tienen cantidades excesivas de sustancias volátiles, para productos que presentan baja cantidad de humedad, la temperatura más óptima es de 100 a 105 °C. Según la norma técnica colombiana (NTC), el contenido de humedad se determina en una o en dos etapas:

En una etapa, se aplica un contenido de humedad menor al 18% con una temperatura de secado de 130 °C (Aguirre, 1992).

En dos etapas, se emplea para productos con un contenido de humedad igual o mayor a 18%, inicialmente se lo realiza a una temperatura de 100 a 105 °C hasta obtener un contenido de agua entre 7% y 17%, luego se lo enfría y se procede como en el caso de una sola etapa (Aguirre, 1992).

En ambos casos para la determinación de la cantidad de agua final, se realiza la diferencia de pesos entre la muestra inicial y la obtenida al finalizar el proceso de secado.

Ecuación 5. Porcentaje de humedad

$$\% \textbf{Humedad} = N \times \frac{100}{M}$$

Dónde:

N: Diferencia entre el peso del grano húmedo, y el peso del grano seco.

M: Peso del grano húmedo.

Sin importar la técnica que se utilice es necesario que el producto pase por un proceso previo de limpieza, selección y clasificación del grano para tener una muestra homogénea y que la extracción de humedad en cada grano se dé en el mismo nivel (Aguirre, 1992).

1.2.3.6. SECADO DE LOS GRANOS

Al momento de cosechar el grano, éste se encuentra en la etapa de madurez, la cual se caracteriza por su alto contenido de agua. Este contenido de agua genera complicaciones durante el almacenamiento del producto debido a la vulnerabilidad ante plagas y en general ante la eventual descomposición del grano.

Con el objetivo de prolongar la vida útil de los granos se procede a secarlos. Este proceso se puede realizar de manera natural o artificial (Aguirre, 1992).

1.2.3.6.1. SECADO NATURAL

Consiste en hacer uso de la energía solar y del flujo de viento para deshidratar las semillas, es conveniente únicamente cuando la humedad en los granos no es muy elevada. Esta práctica requiere de tiempos de secado muy extensos, y genera un alto riesgo al producto de contaminación tanto de polvo como de plagas (Aguirre, 1992).

1.2.3.6.2. SECADO ARTIFICIAL

El secado artificial, consiste en alterar las propiedades físicas del aire, es decir aumentar su velocidad y temperatura, con el objetivo de acondicionarlas para cada grano o semilla. Hay dos maneras de realizarlo, por flujo de aire o por aire caliente.

El método de flujo de aire o ventilación es efectivo cuando la humedad relativa del aire es baja, y consiste en impulsar el gas a través de la semilla.

El método de flujo de aire caliente, consiste en calentar aire antes de impulsarlo a través del grano, de esta manera se reduce más la humedad relativa de las semillas.

En el secado por lecho fluidizado, se combinan ambas maneras de secado al hacer pasar un flujo de aire caliente a través del lecho fluidizando así el producto para aumentar la eficiencia de secado (Aguirre, 1992).

1.2.3.6.3. GRANO DE MAÍZ

El maíz, junto con el arroz y el trigo, constituye uno de los principales alimentos cultivados en el mundo, es una gramínea caracterizada por poseer tallos en forma de caña y por tener una mazorca en la cual se encuentran los granos (DACSA, 2011).

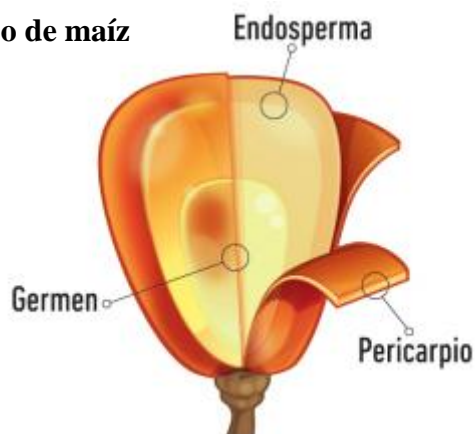
Es un alimento muy completo, que aporta numerosos elementos nutritivos y materiales energéticos. Es una destacada fuente de vitaminas del grupo B y de minerales. Posee un valor nutritivo similar al de los otros cereales, aunque se diferencia de éstos en su elevado contenido en carotenos que ningún otro cereal contiene o provitaminas A, que se transforman en vitaminas A en el organismo y se caracterizan por su alto poder antiinfeccioso y su condición beneficiosa para la vista (DACSA, 2011).

Por todo lo antes mencionado, constituye una de las materias primas básicas para diversas industrias y cada porción del grano es aprovechado para obtener un gran número de productos (DACSA, 2011).

Según el Censo Nacional Agropecuario, realizado en el Ecuador, la producción de este cereal fue de 349 mil hectáreas, convirtiéndose en una de las principales fuentes alimenticias en el país, tanto para el consumo humano como para la producción de derivados (Bravo, 2005).

1.2.3.6.3.1. COMPOSICIÓN DEL GRANO DE MAÍZ

Figura 4. Partes del grano de maíz



- **Pericarpio:** Es la capa externa del grano, dura y altamente fibrosa, cumple la función de cubierta protectora impidiendo el ingreso de hongos y bacterias. Está formada principalmente por fibra en un 87%.
- **Endospermo:** Es la parte principal del grano. Está constituida por almidón, proteínas y gluten y funciona como fuente de energía para la planta durante su período de maduración.
- **Germen:** Se encuentra en la parte interna del grano, ocupa del 9 al 12% del volumen total del grano y posee dos partes destacables, el eje embrionario y el escutelo (DACSA, 2011).

1.2.3.6.3.2.APLICACIONES DEL GRANO DE MAÍZ

- **Alimentos:** El grano se utiliza sea maduro o tierno para elaborar un sin número de productos mediante técnicas de molienda en seco, como la sémola del maíz, harina y harina fina, las cuales a su vez tienen una variedad de aplicaciones en otros alimentos.
- **Forraje:** En países desarrollados, más del 60% de la producción de maíz se emplea para elaborar alimento destinado al consumo de animales como aves de corral, ganado y cerdos, mientras que en países subdesarrollados se utiliza más del 75% de la producción.
- **Industria:** Se emplean subproductos de la molienda en seco como el germen y el denominado “salvado”, con el primero se fabrica aceites comestibles de alta calidad, mientras que el segundo se utiliza como alimento y fuente de fibra dietética. Además el maíz se utiliza en la industria de las bebidas alcohólicas a través de su fermentación.

1.2.3.6.3.3. SECADO Y ALMACENAMIENTO DEL MAÍZ

La importancia del secado del grano de maíz, radica en obtener un mayor beneficio económico, ya que permite realizar cosechas prematuras con un alto grado de humedad, disminuyendo el daño generado al campo y aprovechando de mejor manera el mismo. Otro beneficio del secado del maíz, es que permite tener mayor tiempo de almacenamiento del producto, sin riesgo de deterioro o infestación de plagas (Bravo, 2005).

1.2.3.6.3.4. CONDICIONES DE SECADO

Debido a que el presente proyecto se centra en el secado por el método de lecho fluidizado, se describen las variables predominantes de este método. Al usar aire forzado, se tiene que tomar en cuenta la temperatura de ingreso, con relación a la humedad y al flujo de aire de secado, además se tiene que considerar el contenido de humedad al inicio del proceso y la cantidad de granos a secar.

A continuación, se describen los principios más importantes para el secado del grano de maíz:

- El aire caliente, seco y en movimiento disminuye el tiempo de secado al reducir con mayor velocidad el contenido de agua.
- El flujo de aire que circula a través del grano, junto con la humedad son los factores predominantes en el proceso de secado.
- A medida que el contenido de agua disminuye, la tasa de secado es menor debido a que el líquido restante de evapora con mayor dificultad (Gonzáles Sánchez & Paucar Torosina, 2009).

1.1.1. HIPÓTESIS

Debido a que el proyecto es un estudio exploratorio no requiere formular una hipótesis.

1.1.2. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES

1.1.2.1. Variables dependientes:

- Flujo de aire
- Temperatura del aire
- Altura del lecho
- Peso de la muestra a secar
- Tiempo de secado

1.1.2.2. Variables independientes

- Humedad inicial de la muestra

CAPÍTULO II

2.1. TIPO DE ESTUDIO

El proyecto de investigación, concerniente al diseño, construcción y operacionalización de un secador de lecho fluidizado, se identifica como un estudio exploratorio ya que el desarrollo del proyecto de investigación se llevará a cabo mediante la investigación y consulta de fuentes bibliográficas previamente establecidas con los cuales se identificarán las variables tanto de diseño, como de construcción.

Una vez que se haya diseñado y construido el equipo, se validará dicha teoría mediante la operacionalización del equipo a escala de laboratorio, validando la eficiencia de secado analizando las diferentes variables involucradas tales como humedad inicial y final de los sólidos a deshidratarse y el tiempo de secado.

2.2.MODALIDAD DE INVESTIGACION

El diseño, construcción y operacionalización de un secador de lecho fluidizado se define como un proyecto de desarrollo especial debido a que constituye una solución al problema de falta de equipos de los laboratorios de la Universidad Internacional SEK, consolidándose el conocimiento al combinar la teoría con la práctica.

2.3.MÉTODO

El método a aplicarse en el presente proyecto es el Deductivo, pues el diseño, construcción y operacionalización de un secador de lecho fluidizado se basa en recopilar la información bibliográfica de secadores industriales y escalar todos los datos a un equipo particular para laboratorio.

2.4.DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO

Dentro del sector industrial, existen diversos tipos de equipos o máquinas destinados al secado de alimentos, dividiéndose en una amplia gama, y a su vez calificados debido a sus diversas características, las cuales son directamente proporcionales al precio de cada uno de estos.

Es muy complicado y costoso realizar análisis para cada una de las técnicas propuestas en la industria de alimentos, por lo cual es recomendable y factible realizar las pruebas por medio de un módulo o planta piloto, con el objetivo de conocer el proceso de secado.

Durante este capítulo se estudiará al fenómeno de fluidización, con el fin de obtener ecuaciones resultantes que servirán para el dimensionamiento del secador, y a su vez se detallaran los materiales más idóneos que garanticen el secado del grano de maíz.

2.4.1. ANALISIS DE LOS PARAMETROS DEL SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO

La construcción del secador de lecho fluidizado estará basado en los siguientes parámetros y propiedades:

- Propiedades fisicoquímicas del grano de maíz.

- Características del ventilador centrífugo.
- Ecuaciones resultantes del fenómeno de fluidización como técnica a ser utilizada en el proceso de secado.

2.4.2. PROPIEDADES DEL GRANO DE MAIZ

2.4.2.1. Volumen del grano sin poros

Volumen del sólido de los granos, sin tomar en cuenta huecos o poros se lo puede determinar por medio de experimentación.

$$V_s = 0.001455 [m^3]^1$$

2.4.2.2. Densidad aparente y real

Valores determinados a partir de criterios y ecuaciones preestablecidas. (EC. 6. y EC. 7.).

Ecuación 6. Densidad aparente

$$\delta_{APARENTE} = \frac{\text{Masa del grano kg}}{\text{Volumen del grano con poros}}$$

$$\delta_{APARENTE} = 770 \left[\frac{kg}{m^3} \right]^2$$

¹ Departamento de Ciencias de Alimentos y Biotecnología (DECAB,2012).

² Depósito de documentos de la ingeniería en el desarrollo, manejo y tratamiento de granos pos cosecha (FAO,1998).

Ecuación 7. Densidad real

$$\delta REAL = \frac{Masa\ del\ grano\ kg}{Volumen\ del\ grano\ sin\ poros}$$

$$\delta REAL = \frac{1,5\ [kg]}{0,001455\ [m^3]}$$

$$\delta REAL = 1030,93\ \left[\frac{g}{m^3}\right]$$

2.4.2.3. Porosidad mínima (ϵ_o), porosidad mínima de fluidización (ϵ_{mf}), factor de forma (ϕ)1.

Características de los granos de acuerdo a la forma, tamaño y procedencia del grano de maíz.

$$\epsilon_o = 0,3$$

$$\epsilon_{mf} = 0,476$$

$$\phi = 0,66$$

Tabla 1. Propiedades del grano de maíz

PROPIEDADES GRANO DE MAÍZ			
PARÁMETRO	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Tamaño	D_p	0,008	m
Factor de forma	ϕ	0,66	-
Densidad real	δ real	1030,93	kg/m ³
Densidad aparente	δ aparente	770	kg/m ³
Porosidad mínima	ϵ_o	0,3	-
Porosidad del lecho a mínima fluidización	ϵ_{mf}	0,476	-

Elaborado por Cristian Freire y Ronny García (2014).

2.4.3. PARÁMETROS AGENTE FLUIDIZANTE

Se debe considerar varios parámetros dentro del agente fluidizante, como lo son: ubicación, donde va a ser llevado a cabo el proceso, tiempo y parámetros del aire a condiciones ambiente. Los cuales están resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 2. Parámetros del agente fluidizante

AGENTE FLUIDIZANTE (AIRE)³			
PARAMETRO	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Presión	P	1	Atm
Temperatura	T	20	° C

³ (Jaramillo & Narváez, 2012).

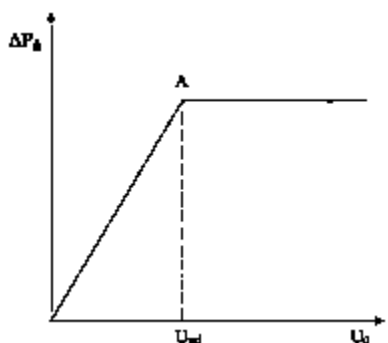
ambiente			
Viscosidad	M	$1,85 \cdot 10^{-5}$	Pa.s^2
Densidad	δ_2	1,18	kg/m^3

Elaborado por Cristian Freire y Ronny García (2014).

2.4.3.1. Velocidad mínima de fluidización

La progresión desde lecho fijo a lecho fluidizado puede seguirse en un gráfico simplificado de pérdida de presión frente a la velocidad como el que recoge la Figura 5. (McCabe & Smith, 2002)

Figura 5. Gráfica pérdida de presión vs velocidad de secado



(McCabe & Smith, 2002).

El punto A en la figura 5, representa el inicio de la fluidización; por tanto, corresponde a la velocidad mínima de fluidización, la cual se podría calcular como el punto de intersección de las líneas de caída de presión en el lecho fijo y en el lecho fluidizado (McCabe & Smith, 2002)

La velocidad mínima de fluidización es el parámetro que determina, el punto específico, en donde el agente fluidizante logra superar el peso del grano de maíz, antes de ponerlo en suspensión, para posteriormente proceder al secado del mismo.

2.4.3.1.1. Cálculo del número de Reynolds

El número de Reynolds es la relación de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido a la fuerza viscosa (Mott, Mecánica de Fluidos, 2006).

Los flujos tienen número de Reynolds grandes debido a una velocidad elevada y/o una viscosidad baja, y tienden a ser turbulentos. Aquellos fluidos con viscosidad alta y/o que se mueven a velocidades bajas, tendrán número de Reynolds bajos y tenderán a comportarse en forma laminar (Mott, Mecánica de Fluidos, 2006)..

Ecuación 8. Cálculo del número de Reynolds

$$Re = \left[33,7^2 + 0,0408 * \frac{Dp^3[m^3] * \delta^2[kg/m^3] * (\delta - 1)[kg/m^3] * g[m/s^2]}{\mu^2[Pa * s^2]} \right]^{1/2} - 33,7$$

$$Re = \left[33,7^2 + 0,0408 * \frac{0.008^3[m^3] * 1.18[kg/m^3] * (1030.93 - 1.18)[kg/m^3] * 9.80665[m/s^2]}{(1.845 * 10^{-5})^2[Pa * s^2]} \right]^{1/2} - 33,7$$

$$Re = 822,101$$

2.4.3.1.2. Cálculo velocidad mínima de fluidización

Se calculará la velocidad mínima de fluidización, a partir de la ecuación que relaciona términos de Re con parámetros ya establecidos, como se muestra a continuación.

Ecuación 9. Velocidad mínima de fluidización

$$NRe = \frac{Dp[m] * Vmf[m/s] * \delta^2[kg/m^3]}{\mu[Pa \cdot s]}$$

Se despeja el término a ser encontrado, en este caso el de velocidad mínima de fluidización (Vmf). Se procede al reemplazo de términos obteniendo el dato de la Vmf .

$$Vmf = \frac{Re * \mu[Pa \cdot s]}{Dp[m] * \delta^2[kg/m^3]}$$

$$Vmf = \frac{822.101 * (1,85 * 10^{-5})[Pa \cdot s]}{0.008[m] * 1.18[kg/m^3]}$$

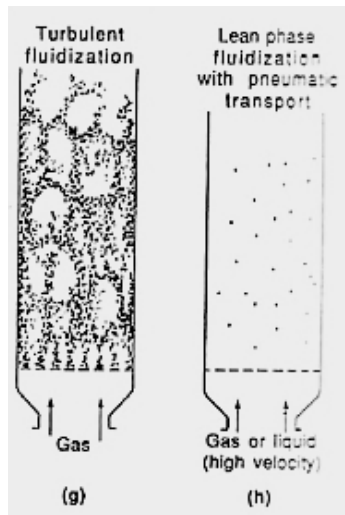
$$Vmf = 1,6111 \frac{m}{s}$$

2.4.3.2. Velocidad límite del lecho

Cuando el lecho se fluidiza a altas velocidades la velocidad terminal de las partículas puede superarse, en este caso la superficie superior del lecho se desdibuja. El gas se lleva material particulado y en lugar de burbujas se observa un movimiento turbulento de paquetes de sólidos y espacios llenos de gas de varias formas y tamaños (Figura 6g). En estas condiciones el lecho se denomina lecho fluidizado turbulento (FLUIDIZACIÓN, 2012).

Si la velocidad se aumenta más aún, los sólidos son arrastrados fuera del lecho, existe un transporte neumático de los sólidos produciendo el fenómeno de elutriación. (Figura 6h) (FLUIDIZACIÓN, 2012).

Figura 6. Movimiento del lecho fluidizado



(McCabe & Smith, 2002).

A continuación se calculará la velocidad límite del lecho, que será, nuestra velocidad de operación dentro del sistema.

Ecuación 10. Velocidad límite del lecho

$$Vl = \frac{2.32 * Vmf [m/s]}{(\epsilon mf)^{3/2}}$$

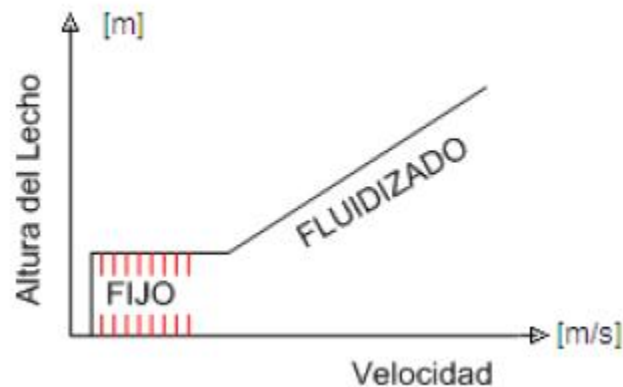
$$Vl = \frac{2.32 * 1.61111 \left[\frac{m}{s} \right]}{(0.476)^{3/2}}$$

$$Vl = 11,3816 \frac{m}{s} \approx 12 \frac{m}{s}$$

2.4.3.3. Altura del lecho

Cuando la velocidad del fluido se aumenta sobre la mínima necesaria para la fluidización, el lecho se expande y aumenta la porosidad. Si el área de la sección transversal del recipiente no varía con la altura, la porosidad es una función directa de la altura le lecho (McCabe & Smith, 2002).

Figura 7. Gráfica altura del lecho vs Velocidad



(McCabe & Smith, 2002).

2.4.3.3.1. Altura inicial del lecho

Es la altura que tiene el lecho cuando no se encuentra en movimiento. Se la calcula haciendo uso de la ecuación EC. 11.

Ecuación 11. Altura inicial del lecho

$$Lo = \frac{Peso\ kg}{densidad\ aparente\ [kg/m^3] * \acute{a}rea\ transversal}$$

$$Lo = \frac{1,5\ kg}{770\ [kg/m^3] * 0,02m^2}$$

$$Lo = 0,09\ m$$

2.4.3.3.2. Altura mínima de fluidización del lecho

Con frecuencia se conoce la porosidad en determinadas condiciones, como por ejemplo, la porosidad mínima de fluidización o la porosidad del lecho estático. Si se conoce también la altura del lecho para estas condiciones, su altura para cualquier nuevo valor de la porosidad puede obtenerse a partir de la expresión (McCabe & Smith, 2002).

Ecuación 12. Altura mínima de fluidización del lecho

$$\frac{Lmf}{Lo} = \frac{(1 - \epsilon_o)}{(1 - \epsilon_{mf})}$$

Se despeja el término deseado, en este caso Lmf

$$Lmf = \frac{(1 - \epsilon_o)}{(1 - \epsilon_{mf})} * Lo$$

$$Lmf = \frac{(1 - 0,3)}{(1 - 0,476)} * 0,09$$

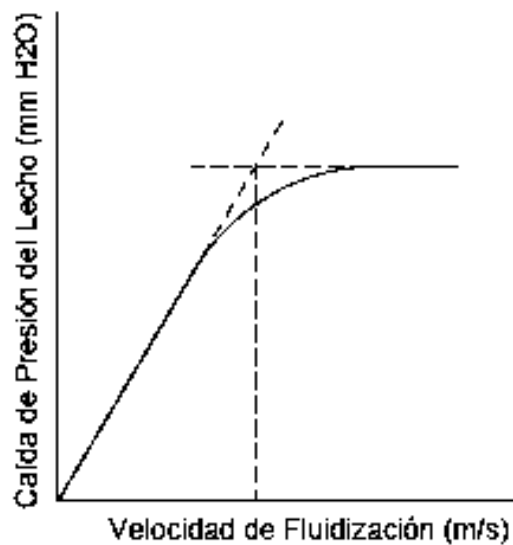
$$Lmf = 0,115m$$

2.4.3.4. Caída de presión en el lecho

Cuando comienza la fluidización, la caída de presión a través del lecho equilibra a la fuerza de gravedad sobre los sólidos (McCabe & Smith, 2002).

A medida que la velocidad del fluido aumenta sobre el valor necesario para iniciar la fluidización, aumenta ligeramente la caída de presión, pero la variación es pequeña, y en general, es satisfactorio considerar como constante la caída de presión. Sin embargo, como el lecho se expansiona disminuye la caída de presión por metro de altura de lecho expandido (McCabe & Smith, 2002).

Figura 8. Gráfica caída de presión del lecho vs Velocidad de fluidización



(McCabe & Smith, 2002).

La ecuación 13 determina la caída de presión del grano, si se produce un aumento muy grande de velocidad, llegaríamos al fenómeno de elutriación.

Ecuación 13. Caída de presión del grano

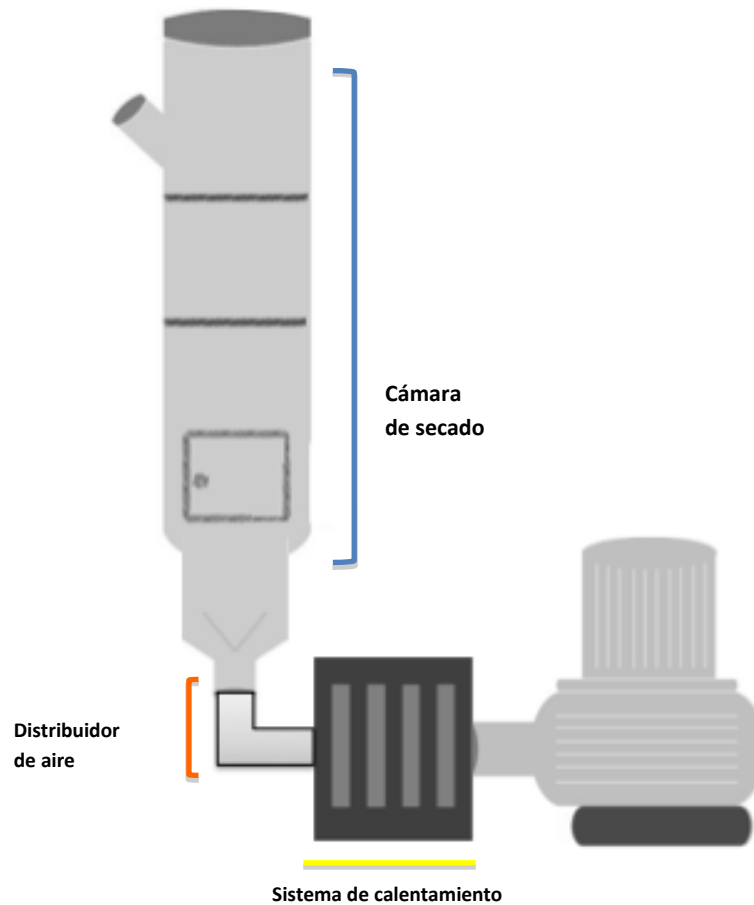
$$\Delta P = Lmf[m] * (1 - \varepsilon mf) * (\delta 1 - \delta 2) * g$$

$$\Delta P = 0,115[m] * (1 - 0,476) * (1030,93 - 1,18) * 9,8$$

$$\Delta P = 0,06 \text{ atm}$$

2.5. CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO

Figura 9. Diagrama del secador de lecho fluidizado



El equipo esquematizado en la figura 9 tiene la capacidad de secar 1.5 [kg] de maíz húmedo. Dicho equipo está compuesto de un ventilador centrífugo (blower), el cual está conectado a una cámara de niquelinas, constituyendo el sistema de calentamiento.

El sistema se encuentra conectado uno a continuación de otro, con el objetivo de disminuir al máximo las pérdidas de calor por fricción en las tuberías.

La cámara de secado está construida en acrílico de 5[mm] de espesor, con el fin de poder visualizar al secado del maíz en la forma más didáctica posible.

El sistema cuenta con una estructura metálica, que tiene como objetivo servir de soporte, a los instrumentos ya mencionados, que conformar el sistema de secado por lecho fluidizado.

Para tener una mejor visión y aprendizaje, se elaboraron un manual de operación, mantenimiento y una práctica de laboratorio respectivamente, los cuales se encuentran en la sección de anexos.

2.5.1. Estructura de soporte

La estructura de soporte se encuentra construida, con el objetivo de soportar la cámara de secado, el distribuidor de aire y el sistema de calentamiento, como se observa en la figura.

Figura 10. Estructura de soporte del equipo



La estructura donde se encuentra asentado el sistema de calentamiento, está conectada a una superficie vertical, que cuenta con dos agarraderas con pernos, que tiene la función de mantener estable, tanto al distribuidor de aire, como a la cámara de secado. Garantizando así que no existan pérdidas de calor por el movimiento de alguno de los componentes del sistema.

2.5.2. Sistema de calentamiento de aire

El sistema de calentamiento de aire se encuentra conformado por el ventilador centrífugo y la cámara de niquelinas, cuyas funciones son de generar y calentar el aire respectivamente.

Para el secado de granos es recomendable trabajar con temperaturas no superiores a los 70°C con el fin de conservar las características del grano para consumo humano. La cámara de niquelinas tiene la capacidad de trabajar con temperaturas de hasta 200 °C.

2.5.2.1. Ventilador centrífugo

El equipo encargado de generar el aire para esta aplicación, es el ventilador centrífugo o blower, el cual se adquirió a través de la empresa Pinturas Lider.

Figura 11. Ventilador centrífugo



El aire entra al centro del rotor, también llamado impulsor, y es lanzado hacia fuera por las aspas giratorias, por lo tanto agrega energía cinética. El gas a alta velocidad se colecta por la voluta que rodea al rotor, donde la energía cinética se convierte en una presión de gas aumentada para entregarse a través de un sistema de ductos para su uso posterior (Mott, Mecánica de Fluidos, 2006).

Determinando mediante un anemómetro se obtuvo al dato de la velocidad máxima del ventilador centrífugo destinado al equipo.

Tabla 3. Especificaciones del Ventilador Centrífugo

ESPECIFICACIONES DEL VENTILADOR CENTRÍFUGO (BLOWER)	
Velocidad	54 m/s
Amperaje	12
RPM	3000-3600
Potencia	1 Hp
Corriente	3.6 A
Eficiencia	70%

Elaborado por Cristian Freire y Ronny García (2014).

El cálculo del caudal máximo de salida de aire del equipo, se determina con la siguiente ecuación.

Ecuación 14. Cálculo de Caudal del ventilador

$$Qs = vs \left[\frac{m}{s} \right] \times \frac{\pi}{4} \times Ds^2 [m^2]$$

$$Qs = 54 \left[\frac{m}{s} \right] \times \frac{\pi}{4} \times 0.0762^2 [m^2]$$

$$Qs = 0,25 \frac{m^3}{s}$$

2.5.2.2. Cámara de calentamiento

El equipo encargado para generar el calor en nuestro sistema, es la cámara de niquelinas, la cual está encargada de garantizar un calentamiento adecuado al aire generado por el ventilador centrífugo.

Figura 12. Cámara de Niquelinas





Las niquelinas, por previas experimentaciones, confirman en ser el sistema de calentamiento óptimo, para aire en movimiento. Su voltaje de alimentación es de 220 [VAC] y tiene una potencia máxima de operación de 7[kW].

La temperatura será controlada, por medio de un regulador de temperatura situado en la consola del sistema de calentamiento, obteniendo una temperatura constante para el secado del grano de maíz.

Para el cálculo de la potencia de las resistencias, necesitamos tomar en cuenta los parámetros de caudal, capacidad calorífica del aire $C_p = 1214 \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right]$, la temperatura de operación $T_f = 70[^\circ C]$ y la temperatura ambiente $T_o = 20^\circ C$. La potencia es calculada a partir de la expresión:

Ecuación 15. Cálculo de potencia de las niquelinas

$$P = Q_s[m^3/s] * C_p \left[\frac{J}{Kg * ^\circ C} \right] * (T_f - T_o)^\circ C$$

$$P = 0,25[m^3/s] * 1214 \left[\frac{J}{Kg * ^\circ C} \right] * (70 - 20)^\circ C$$

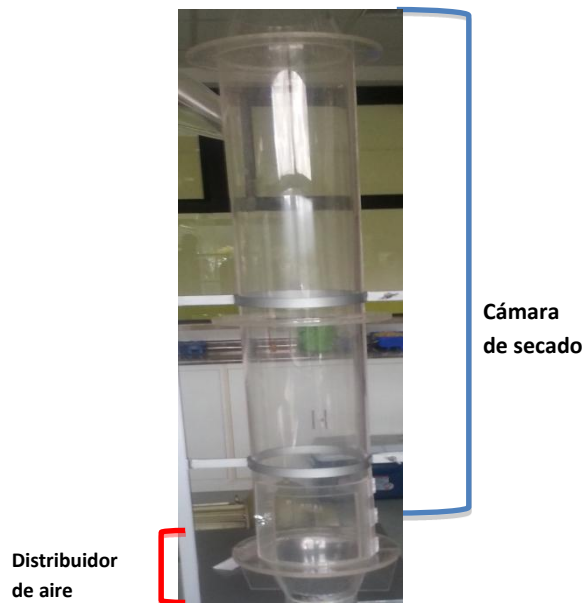
$$P = 14 \approx 15 \text{ KW}$$

Para determinar el valor de potencia, se hace relación a la velocidad de operación del sistema ya establecida ($12 \left[\frac{m}{s} \right]$), por lo cual se van a utilizar dos niquelinas, las cuales proporcionarán la operación del sistema a $70[^\circ C]$, junto con el flujo de aire del ventilador centrífugo.

2.5.3. DISTRIBUIDOR DE AIRE Y CÁMARA DE SECADO

El distribuidor y la cámara de secado se encuentran construidas en acrílico, con el cual se puede visualizar el fenómeno de fluidización. El fin de construir el distribuidor y la cámara de secado en acrílico, es por fines didácticos.

Figura 13. Distribuidor y cámara de aire



La lámina de acrílico es un material termoplástico ampliamente utilizado por su estética y alta claridad, considerado como el mejor de todos los plásticos transparentes destinados a ser usados a la intemperie (ACRILUX, 2014).

No se presentan cambios significativos en el acrílico cuando éste se encuentra expuesto a temperaturas menores a 80° C, o durante largos períodos de tiempo a la intemperie (ACRILUX, 2014).

La duración de la lámina de acrílico depende la aplicación en la cual está siendo sometida, pudiendo ser desde pocos meses hasta muchos años (ACRILUX, 2014).

El acrílico es más resistente que el vidrio, no se astilla y es un excelente aislante eléctrico (ACRILUX, 2014).

El distribuidor tiene la función de direccionar el aire suministrado por el ventilador centrífugo, para lo cual se utilizaron dos conos truncados, para lograr este propósito.

El distribuidor de aire cuenta con dos bridas, una en cada extremo. La brida superior se conectará a la cámara de secado, mientras que la inferior, a la salida del aire de la cámara de niquelinas.

Tabla 4. Medidas del distribuidor de aire

DIMENSIONES DEL DISTRIBUIDOR DE AIRE ³			
	CONO TRUNCADO 1	CONO TRUNCADO 2	CILINDRO
DIAMETRO MENOR	0,0762 m	0,15 m	0,2 m
DIAMETRO MAYOR	0,2 m	0,2 m	
ALTURA	0,188 m	0,061 m	0,05m

(Jaramillo & Narváez, 2012).

El diámetro de la cámara de secado se lo determinará mediante la siguiente expresión.

Ecuación 16. Cálculo del diámetro interno de la cámara de secado

$$Diametro\ interno = \frac{4 * Qs[m^3/s]}{\sqrt{\pi * vl[m/s]}}$$

$$Di = \frac{4 * 0,25[m^3/s]}{\sqrt{\pi * 12[m/s]}}$$

$$Di = 0,17\ m$$

A continuación, se calcula el área transversal a partir de la ecuación 16:

Ecuación 17. Cálculo del área transversal de la cámara de secado

$$At = \pi * \frac{D^2[m^2]}{4}$$

$$At = \pi * \frac{0,17^2[m^2]}{4}$$

$$At = 0,02 \text{ m}^2$$

La altura que alcanza el lecho fijo dentro de la cámara de secado es de 0,17 [m], llegando a una altura en lecho fluidizado de 0,60 [m]. Motivo por el cual se solicitó que la cámara de secado sea de un metro 1[m], para evitar la elutriación. Parámetro que lo adoptamos debido a que las láminas de acrílico de 5 [mm] de espesor vienen en una única presentación de planchas de 1 [m].

La cámara de secado es de 1 [m], cuenta con una brida que se encuentra acoplada en la mitad, con el fin de obtener una mayor estabilidad de la cámara de secado y como referencia para el acople de la estructura metálica. En la parte superior se instauró un cono que generará un efecto ciclón, el cual impedirá que los vapores producidos salgan perpendicularmente de la cámara de la cámara de secado.

La cámara de secado se encuentra conectada al distribuidor de aire por medio de una brida, fabricada en acrílico, el cual a su vez se encuentra conectado con la cámara de niquelinas por medio de un tubo de metal el cual se encuentra completamente revestido para evitar pérdidas de calor y a su vez que el acrílico no llegue a deformarse.

2.5.4. ASPECTOS ADMINISTRATIVOS

2.5.4.1. RECURSOS HUMANOS

- ✓ Investigadores principales
- ✓ Mano de obra construcción y ensamblado

2.5.4.2. RECURSOS MATERIALES Y TECNICOS

2.5.4.2.1. EQUIPOS

- ✓ Balanza digital
- ✓ Venterol
- ✓ Switch de encendido
- ✓ Cámara de niquelinas
- ✓ Soldadora
- ✓ Taladro eléctrico

2.5.4.2.2. MATERIALES

- ✓ Hierro
- ✓ Llave media vuelta
- ✓ Desarmador
- ✓ Luces piloto
- ✓ Plástico de alta resistencia al calor
- ✓ Tornillos de hierro
- ✓ Plancha de acrílico

2.5.4.2.3. REACTIVOS

N/A

2.5.4.3. LOGISTICA

Vehículo particular

2.5.4.4. RECURSOS FINANCIEROS

Tabla 5. Desglose de gastos incurridos en la construcción del equipo

Item	Costo	Financiamiento	
	USD	Propio	Otra fuente
Balanza digital	0		UISEK
Tubos de Hierro	150	X	
Venterol	300	X	
Switch de encendido	400	X	
Distribuidor de flujo	70	X	
Desfogue de salida	20	X	
Cámara de secado (acrílico)	650	X	
Cámara de Niquelinas	500	X	
Luz indicadora de encendido	5	X	
Mano de obra	350	X	
Total	2445,00		

Elaborado por Cristian Freire y Ronny García.

CAPÍTULO III

3. PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo analizaremos, los valores generados por medio de pruebas en el laboratorio de la Universidad Internacional Sek en el secador de lecho fluidizado.

Se realizarán balances de materia y energía en el secador de lecho fluidizado.

Se generarán curvas de secado en una estufa o Estufa y en el secador de lecho fluidizado, con la finalidad de medir eficiencia, y garantizar que el secado por lecho fluidizado es más eficiente que el secado por métodos convencionales.

3.1.BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

Cuando se diseña un nuevo proceso o se analiza uno ya existente, deben tomarse en cuenta ciertas restricciones impuestas por la naturaleza.

La base del balance de materia es la ley de conservación de la materia, que establece que la materia no se crea ni se destruye (Felder & Rousseau, 1999).

3.1.1. BALANCE DE MATERIA

Para poder realizar el balance de materia en el sistema, utilizamos la ecuación general del balance de materia.

Ecuación 18. Balance general de materia

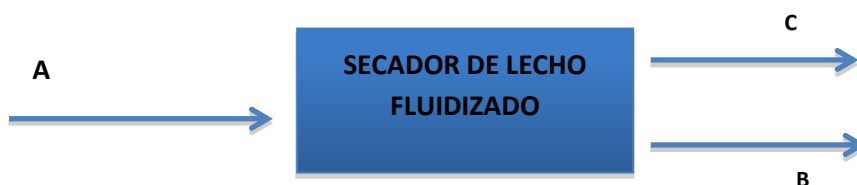
$$\text{Entrada} + \text{Producción} - \text{Salida} - \text{Consumo} = \text{Acumulación}$$

El proceso que se realiza en el secador de lecho fluidizado, es en estado estacionario. Al decir que es un balance de materia en estado estacionario la ecuación 19 se resume a la siguiente expresión:

Ecuación 19. Balance de materia simplificado

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = 0$$

Mediante un diagrama de flujo determinaremos entradas y salidas, y procederemos al cálculo del balance de materia en el secador de lecho fluidizado.



Entrada

A = Granos de maíz húmedos (1,5 [kg])

Salidas

B = Granos de maíz seco

C = Humedad retirada de los granos

Aplicando la ecuación 17 tenemos:

$$A = B + C$$

Por diferencia de peso, determinaremos la cantidad de humedad retirada.

$$C = A - B$$

$$C = 1,5 \text{ [kg]} - 0,8455 \text{ [kg]}$$

$$^4C = 0,6545 \text{ [kg de agua contenido en los granos de maíz]}$$

3.1.2. BALANCE DE ENERGÍA

Para determinar el balance de energía dentro del secador de lecho fluidizado se tomaron dos parámetros previamente establecidos:

- $Q_s = 0,25 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$
- Densidad del aire en Quito = $0,9355 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

⁴ Para realizar el balance de materia se realizó la prueba a 20 min. Parámetro recomendado en la industria de alimentos para obtener un grano óptimo para obtener harina de maíz.

- Orificio de salida del blower = 6 pulgadas de diámetro

Ecuación 20. Cálculo de calor transferido

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

Dónde:

$$M = \text{masa de aire a ser calentada} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

$$C_p = \text{Capacidad calorífica del aire} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} \right]$$

$$\Delta T = \text{Diferencia entre temperatura de entrada y salida del aire} [^\circ\text{C}]$$

Cálculo de la capacidad calorífica del aire a condiciones ambientales de Quito (547 mm Hg, 18.3 °C)

Ecuación 21. Cálculo de la capacidad calórica del aire

$$C_p = 0,24 + 0,46 Y$$

Ecuación 22. Cálculo de la humedad absoluta del aire

$$Y = Y_o + 0,622 * P_w * \left(\frac{1}{P - P_w} - \frac{1}{760 - P_w} \right)$$

Dónde:

$$Y = \text{Humedad absoluta del aire corregido a 547 mmHg} \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

Y_o =humedad del aire leída en la carta psicométrica a las temperaturas de bulbo seco (TBS) y bulbo húmedo (TBH).

$$TBS = 18,3^{\circ} C$$

$$TBH = 15,0^{\circ} C$$

$$Y_o = 0,010 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de aire seco}}$$

P_w = presión del vapor del agua a la temperatura de bulbo húmedo.

$$P_w = 12,8 \text{ mmHg}$$

P = presión a la cual se tomaron las lecturas de bulbo seco y bulbo húmedo.

$$P_w = 547 \text{ mmHg}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 21.

$$Y = 0,010 + 0,622 * 12,8 * \left[\frac{1}{(547 - 12,8)} - \frac{1}{(760 - 12,8)} \right]$$

$$Y = 0,0143 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de aire seco}}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 20.

$$C_p = 0,24 + 0,46 * (0,0143)$$

$$C_p = 0,2465 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg} * ^{\circ}C} \right]$$

Aplicando la ecuación 19.

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

$$m = 0,25 \left[\frac{m^3}{s} \right] * 0,9355 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$m = 0,233875 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$t_{entrada} = 70^{\circ}C$$

$$t_{salida} = 50^{\circ}C$$

Reemplazando los datos en la ecuación 19, se tiene:

$$Q = (0,233875) * (0,2465) * (-20)$$

$$Q_{aire} = -1.15 \left[\frac{kcal}{s} \right]$$

Para la cámara de secado, aplicamos la ley de enfriamiento de Newton debido a que la transferencia de calor se da por convección.

Ecuación 23. Cálculo de transferencia de calor por convección

$$Q = h * A_t * \Delta T$$

$$h^5 = 555 \left[\frac{kcal}{h * m^2 * ^{\circ}C} \right]$$

$$A_t = 0.02 [m^2]$$

$$\Delta T = 60^{\circ}C$$

⁵ CORRELACIÓN de DITUS & BOLTER (González, 2008).

$$Q = 555 \left[\frac{kcal}{h * m^2 * ^\circ C} \right] * 0,02[m^2] * 60^\circ C \times \frac{1 h}{3600 s}$$

$$Q_{\text{cámara de secado}} = 0,185 \left[\frac{kcal}{s} \right]$$

Ecuación 24. Balance de energía del equipo

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{aire}} + Q_{\text{cámara de secado}}$$

$$Q_{\text{total}} = 0,985 \frac{kcal}{s}$$

Tabla 6. Datos tomados del secado de maíz haciendo uso de la Estufa

UTILIZANDO ESTUFA											
Muestra No.	Tiempo (min)	P1 (g) Recipiente	P2 (g) R+grano Seco	P3 (g) Grano Seco	P4 (g) R+Grano Húmedo Inicial	P5 (g) Grano Húmedo inicial	P6 (g) Humedad Inicial	P7 (g) R+Grano Húmedo final	P8 (g) Humedad Final	% Humedad retirada	% Humedad remanente
1	10	43,4991	93,3474	49,8483	143,6012	100,1021	50,2538	143,2139	49,8665	0,77	99,23
2	20	43,0624	97,0174	53,9550	148,2010	105,1386	51,1836	147,1915	50,1741	1,97	98,03
3	30	46,8636	89,1395	42,2759	141,5013	94,6377	52,3618	139,5016	50,3621	3,82	96,18
4	40	47,3281	92,9252	45,5971	147,4085	100,0804	54,4833	142,1215	49,1963	9,70	90,30
5	50	45,2916	95,0244	49,7328	147,0140	101,7224	51,9896	136,1921	41,1677	20,82	79,18
6	60	40,7263	95,2913	54,5650	143,6538	102,9275	48,3625	126,1859	30,8946	36,12	63,88

Tabla 7. Datos tomados del secado de maíz haciendo uso del Secador de Lecho Fluidizado

UTILIZANDO EL SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO											
Muestra No.	Tiempo (min)	P1 (g) Recipiente	P2 (g) R+grano Seco	P3 (g) Grano Seco	P4 (g) R+Grano Húmedo Inicial	P5 (g) Grano Húmedo inicial	P6 (g) Humedad Inicial	P7 (g) R+Grano Húmedo final	P8 (g) Humedad Final	% Humedad retirada	% Humedad remanente
1	10	43,3251	92,4476	49,1225	142,4235	99,0984	49,9759	140,4738	48,0262	3,90	96,10
2	20	46,5770	96,8318	50,2548	145,3825	98,8055	48,5507	139,8435	43,0117	11,41	88,59
3	30	47,4750	88,0245	40,5495	148,5327	101,0577	60,5082	134,4217	46,3972	23,32	76,68
4	40	47,0045	97,7192	50,7147	146,1973	99,1928	48,4781	126,2435	28,5243	41,16	58,84
5	50	40,8761	91,0851	50,2090	141,5264	100,6503	50,4413	110,1259	19,0408	62,25	37,75
6	60	46,7147	95,8756	49,1609	147,3687	100,6540	51,4931	99,7628	3,8872	92,45	7,55

Donde:

Peso 1 (P1) Peso recipiente

Peso 2 (P2) Peso recipiente + muestra seca

Peso 3 (P3) Peso de muestra seca

Peso 4 (P4) Peso recipiente + muestra húmeda inicial

Peso 5 (P5) Peso muestra húmeda inicial

Peso 6 (P6) Peso humedad (agua) inicial

Peso 7 (P7) Peso recipiente + muestra húmeda final

Peso 8 (P8) Peso humedad (agua) final

%Humedad retirada: Porcentaje de humedad en peso que se obtuvo por diferencia de peso, entre muestra humedad y muestra seca.

%Humedad remanente: Porcentaje de humedad en peso que no pudo ser retirada en el grano.

⁶Tabla 8. Comparación de eficiencias de secado Estufa vs Secador de Lecho

Fluidizado

Prueba No.	Tiempo (min)	ESTUFA		SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO		
		Humedad retirada %	Humedad remanente %	Humedad retirada %	Humedad remanente %	Eficiencia de secado
1	10	0,77	99,23	3,90	96,10	80.25%
2	20	1,97	98,03	11,41	88,59	82.73%
3	30	3,82	96,18	23,32	76,68	83.62%
4	40	9,70	90,30	41,16	58,84	76.43%
5	50	20,82	79,18	62,25	37,75	66.55%
6	60	36,12	63,88	92,45	7,55	60.93%

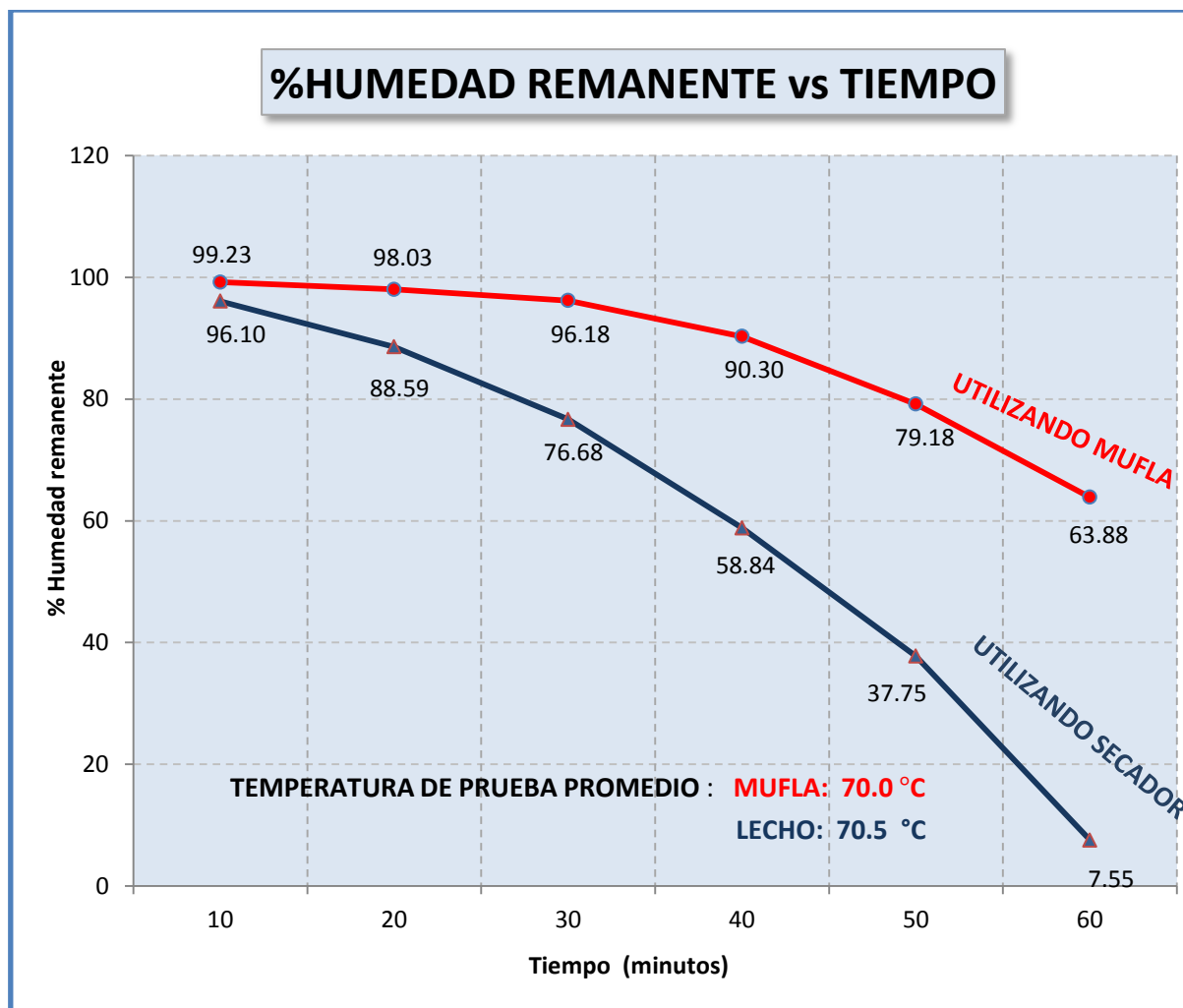
3.1.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA OPERACIÓN DEL EQUIPO

- Para la prueba experimental, que se realizó utilizando inicialmente una Estufa y luego el secador de lecho fluidizado, se utilizó aproximadamente 100gr de muestra húmeda, el peso del grano seco constituye +/- el 50% de ese valor.

⁶ Se realizó un valor promedio de las muestras analizadas, con el fin de obtener una curva de eficiencia comparativa, entre mufla y lecho fluidizado. Con lo cual determinaremos cual es el equipo más eficiente.

- Claramente se puede observar, que la eficiencia de secado es directamente proporcional al tiempo de residencia del sólido húmedo tanto en la Estufa como en el secador de lecho fluidizado.
- Se calculó la humedad extraída de cada muestreo en función del tiempo, utilizando la Estufa los valores obtenidos nos indican que sin circulación de aire durante los primeros 30 minutos se logra retirar menos del 4% de humedad. A partir de ese momento el porcentaje retirado se incrementa llegando a los 60 minutos a retirar sobre el 36% de humedad.
- Con el lecho fluidizado a los 30 minutos se logra separar el 23% de humedad, igualmente a partir de ese momento sube la eficiencia, llegando a superar el 92% a los 60 minutos.

Figura 14. Comparación eficiencia de secado Estufa vs SLF



- La eficiencia se ha determinado en forma gráfica con los datos obtenidos en la experimentación con el secador de lecho fluidizado y el secado por estufa.
- Durante los primeros 10 minutos existe un equilibrio en la humedad tanto en grano humedo y grano seco.
- En la gráfica se puede observar que las pendientes de las curvas de secado se incrementan a partir de los 30 minutos.

- A los 60 minutos de operación el secador de lecho fluidizado es más eficiente que la Estufa al momento de retirar humedad.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos nos demuestran que el equipo construido está diseñado adecuadamente, debido a que el aire suministrado por el blower, al hacerlo pasar por la cámara de niquelinas y a través de la cámara de secado a una temperatura promedio de 60°C, garantiza una reducción significativa de humedad en el grano de maíz.
- Se entendió, que los conocimientos adquiridos en las aulas de clase, se consolidan de mejor manera a través de la aplicación práctica de la teoría, lo cual permite generar un mejor desenvolvimiento de los estudiantes en la vida profesional.
- Se validó por medio de los datos generados, que el secador de lecho fluidizado, tiene la capacidad de secar la muestra de maíz con una eficiencia promedio del 82.5 %, concluyendo de esta manera que dicho equipo supera en eficiencia a los métodos tradicionales de secado empleados en los laboratorios de la Universidad Internacional SEK.
- Se entendió que el secado de lecho fluidizado, es la opción más viable para partículas con no superen los 6 mm de diámetro, pues caso contrario, la potencia requerida por el ventilador para fluidizar el lecho será demasiado alta, disminuyendo la relación costo beneficio del secado.

- Es necesario adicionar un distribuidor de aire a la entrada de la cámara de secado, con el objetivo de lograr una fluidización homogénea de todo el grano, aumentando así la eficiencia de secado del equipo.
- Se entendió que uno de los métodos más utilizados para determinar la humedad de un sólido, es el método por diferencia de pesos, pues permite obtener proporciones porcentuales en base al peso del agua que se retira de la partícula. Este dato permite estimar la eficiencia del equipo.
- Se demostró que es más conveniente colocar la cámara de niquelinas a la salida del ventilador, ya que éste no tiene la capacidad de resistir altas temperaturas en su interior, lo cual incrementa el tiempo de residencia del lecho fluidizado en la cámara de secado.
- Se comprobó que el mejor equipo para suministrar el aire requerido para el proceso de secado por lecho fluidizado, es el ventilador centrífugo, pues genera la cantidad optima de aire requerido. Además su bajo costo comparado con otros equipos similares, lo convierte en el equipo más idóneo para este proyecto.
- Se generaron manuales de operación y mantenimiento, gracias a la experiencia generada durante este proyecto. Los cuales ayudarán a los estudiantes a operar de una manera correcta el secador de lecho fluidizado durante las prácticas de laboratorio.

5. RECOMENDACIONES

- Al momento de diseñar y construir un equipo con requerimientos específicos, tales como conexiones de mayor voltaje, validar la disponibilidad de estos requerimientos para evitar así inconvenientes y reprocesos que pueden resultar en sobre costos.
- Para construir un equipo con fines didácticos, no es necesario buscar componentes hechos a la medida del dimensionamiento, pues resulta muy costoso, es conveniente

adaptar la disponibilidad de piezas y componentes que ofrece el mercado, al dimensionamiento teórico realizado.

- Si se desea disminuir el tiempo de secado, aumentando la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado, es necesario modificar el tipo de material usado en dicha cámara, pues el acrílico es muy útil con fines didácticos pero no tolera temperaturas que sobrepasen los 70 °C.
- Se recomienda el uso de equipos especializados para la medición de humedad, con el objetivo de obtener datos más exactos del sólido a ser secado tanto antes como después del proceso, lo que permitirá evidenciar la eficiencia del proceso de secado por este o cualquier método empleado.
- Es recomendable instalar sistemas de aislamiento a base de fibra de vidrio en equipo generadores de calor, pues caso contrario, las paredes del equipo alcanzarían elevadas temperaturas que pondrían en riesgo a los estudiantes.
- Para futuros proyectos, es viable aplicar sistemas de control automático con el objetivo de aumentar la funcionalidad del equipo, garantizando de esta forma la calidad del producto seco.
- Se recomienda validar la operación del equipo con otros granos diferentes al maíz, para obtener la eficiencia del equipo para diferentes tipos de productos.

Bibliografía

- González Sánchez, J. S., & Paucar Torosina, E. R. (2009). Tesis de grado previa a la obtención del título de Ingeniero Químico. *Diseño y construcción de un secador por fluidización para la deshidratación de trigo (Triticum vulgare)* . Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Pólitécnica de Chimborazo.
- Jaramillo, A., & Narváez, E. (2012). Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Control. *Diseño y construcción de un secador de grano por fluidización e implementación del control de flujo y temperatura* . Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- González, A. (2008). Secado de granos de elote crudo utilizando un lecho fluidizado al vacío empleando aire. . Puebla, México: Universidad de las Américas.
- Luque Rodríguez, S., & Vega Granda, A. (2005). *Simulación y optimización avanzadas en la industria química y de procesos: HYSYS* (Tercera ed.). Oviedo, España.
- Acedo Sánchez, J. (2003). *CONTROL AVANZADO DE PROCESOS*. Madrid, España: Diaz de Santos S.A.
- Jiménez Gutiérrez, A. (2003). *DISEÑO DE PROCESOS EN INGENIERIA QUIMICA*. Celaya, Guanajuato, México: Reverté, S.A.
- Nonhebel, G., & Moss, A. .. (2002). *El Sacado de Sólidos en la Industria Química*. Barcelona, España: Reveré S.A.
- McCabe, W. L., & Smith, J. C. (2002). *OPERACIONES UNITARIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA*. MÉXICO: MCGRAW - HILL.
- Vian, Á., & Ocón, J. (1976). *Elementos de Ingeniería Química (Operaciones básicas)*. Madrid: Aguilar.
- Ocon, J., & Tojo, G. (1986). *OPERACIONES DE INGENIERÍA QUÍMICA OPERACIONES BÁSICAS*. MADRID: EDITORIAL AGUILAR.
- Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (2001). *MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO*. MÉXICO: MCGRAW - HILL.
- Martinez, E. M. (1988). *Manual para la identificación de hongos en granos y sus derivados*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ospina Machado, J. E. (2002). *Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Aguirre, R. (1992). *Manual para el Beneficio de Semillas*. Cali: CIAT.
- Bravo, A. (2005). Experiencias Locales del Cultivo Tradicional de Maíz. *Grupo SEmillas* , 22-23.
- DACSA. (2011). *El grano del maíz*. Recuperado el 08 de 31 de 2014, de www.maiz.dacsa.com
- ACRILUX. (2014). *Recomendaciones de Uso*. Quito.
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos* (Sexta Edición ed.). México: Pearson Educación.

FLUIDIZACIÓN, C. 5. (2012). *CRIBA* . Recuperado el 2014, de CINÉTICA DE SÓLIDOS:
www.criba.edu.ar/cinética/solidos/capitulo5

Felder, R. M., & Rousseau, R. W. (1999). *PRINCIPIOS ELEMENTALES DE LOS PROCESOS QUÍMICOS* (Segunda ed.). Nueva York, USA: Adisson Wesley.

Jaramillo Calle, M. A., & Narváez Quiranza , E. R. (2012). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE GRANO POR FLUIDIZACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DE FLUJO Y TEMPERATURA*. Quito, Pichincha, Ecuador.

McCabe, W. L. (1996). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Madrid, España: Mc Graw Hill.

Mott, R. L. (2006). *MECÁNICA DE FLUÍDOS APLICADA* (4ta edición ed.). México: Prentice-Hall .

Secretaría de ambiente. (15 de 08 de 2014). Informe anual de la calidad del aire. Quito, Pichincha, Ecuador.

ANEXOS

ANEXO A.- MANUAL DE USUARIO SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO

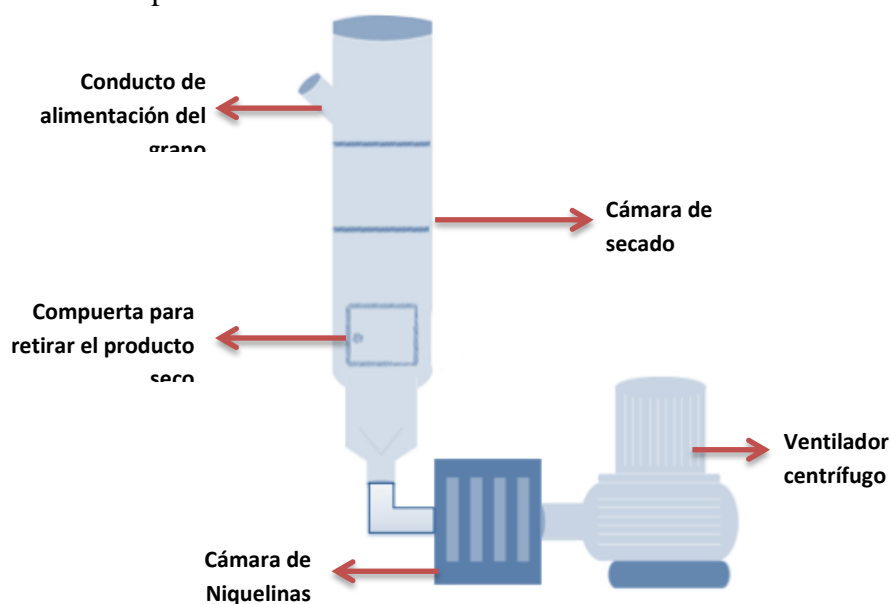
Descripción general del equipo

El equipo está conformado por una cámara de secado hecha de acrílico, por donde fluye aire caliente a través del lecho que se encuentra estático, hasta que el aire alcanza la velocidad mínima de fluidización, momento en el cual el lecho empieza a fluidizarse. El lecho está conformado por sólidos húmedos, los cuales se pretende secar.

El secador de granos por fluidización, tiene la capacidad de secar hasta 2 kg de maíz, pero se recomienda operarlo con 1.5 kg, con lo cual el equipo alcanza su máxima eficiencia de secado.

Partes del secador

Para operar el equipo de manera óptima, se tiene que conocer previamente la funcionalidad de cada parte del equipo.



Cámara de secado

Es una columna de acrílico donde se da el proceso de secado por fluidización. Aquí se ingresa el producto a ser secado por la parte superior, mientras por la parte inferior ingresa el aire caliente, el cual permitirá la deshidratación del producto.

Conducto de alimentación del grano

Es un conducto que se encuentra en la parte superior de la cámara de secado, por donde se alimenta el grano que se desea secar.

Compuerta para retirar el producto seco

Es una compuerta que se encuentra en la zona inferior de la cámara de secado, su material es de acrílico. Esta compuerta permite retirar completamente el producto seco.

Cámara de Niquelinas

La cámara de niquelinas, es una cámara compuesta por niquelinas configuradas de forma paralela, que funcionan a manera de una resistencia eléctrica, que cumple la función de calentar todo flujo de aire que la atraviese transversalmente.

Ventilador centrífugo

El ventilador centrífugo, es el equipo que genera la cantidad de aire suficiente para poder fluidizar el lecho, en la cámara de secado.

Operación del secador de lecho fluidizado.

Previamente al arranque del equipo, hay que tomar en cuenta las conexiones eléctricas que se necesitan. Debido a que la cámara de niquelinas funciona con 220 V, y el ventilador con 110 V, se tienen que conectar ambos enchufes a su respectivo tomacorriente.

La operación del equipo da inicio alimentando la cámara de secado con el grano húmedo previamente pesado.

Una vez que el grano a secarse, se encuentra en la cámara de secado, se procede con el encendido del equipo.

Ya encendido el equipo, se emplea la perilla de color negro, para manipular la temperatura que la cámara de níquelinas cederá al flujo de aire.


Cuando se encuentre en funcionamiento el equipo, se encenderá una luz de color rojo, que indica que se está transfiriendo temperatura desde la cámara de níquelinas al flujo de aire proporcionado por el ventilador.

Una vez que el equipo se encuentre en funcionamiento, se tiene que esperar el tiempo recomendado en el Capítulo III, y posteriormente retirar a través de la compuerta, todo el producto seco.

ANEXO B.- MANUAL DE MANTENIMIENTO

TABLA N° 9: CODIFICACIÓN E INVENTARIO DE EQUIPOS Y PIEZAS			
		UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK CODIFICACIÓN E INVENTARIO DE EQUIPOS Y PIEZAS SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO	
SECCIÓN: CÁMARA DE SECADO		PÁG: 1	
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	MARCA	CANTIDAD DE PIEZAS DE REPUESTO
A-01	Torre de acrílico	Acrylux	0
A-02	Embudo de entrada del grano	Acrylux	0
A-03	Compuerta de salida del grano	Acrylux	0
SECCIÓN: DISTRIBUIDOR DE AIRE			
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	MARCA	CANTIDAD DE PIEZAS DE REPUESTO
B-01	Distribuidor de aire conos truncados	Acrylux	0
SECCIÓN: SISTEMA DE CALENTAMIENTO			
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	MARCA	CANTIDAD DE PIEZAS DE REPUESTO
C-01	Cámara de niquelinas	Artesanal	0
C-02	Ventilador centrífugo (blower)	Century	0
SECCIÓN: COMPONENTES			
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	MARCA	CANTIDAD DE PIEZAS DE REPUESTO
D-01	Estructura de soporte del secador	Artesanal	0
D-02	Conectores y tomacorrientes V220	Artesanal	2
D-03	Conectores y tomacorrientes V110	Artesanal	2
D-04	Termómetro digital.	DIGI-THERMO	2
Realizado por: Cristian Freire Ronny García		Verificado por: MSC. Suly Rodríguez	
Fecha: Septiembre 2014			

TABLA N° 10: PROPUESTA PARA LAS INSTRUCCIONES TÉCNICAS

<div>  <div> UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK </div> </div> <div> UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK INSTRUCCIONES TÉCNICAS SISTEMA DE VACÍO </div>				
MANTENIMIENTO PREVENTIVO			PÁG: 2	
T.M	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	Tipo de personal necesario	Frecuencia
L	A-01	Desmontar la torre de acrílico de la estructura. Limpiar con trapo húmedo y secar.	Estudiante	Antes y después de cada práctica.
L	A-02	Limpieza superficial con trapo húmedo y secar	Estudiante	Antes y después de cada práctica.
L	A-03	Limpieza superficial con trapo húmedo y secar	Estudiante	Antes y después de cada práctica.
L	B-01	Desmontar la torre de acrílico de la estructura. Limpiar con trapo húmedo y secar.	Estudiante	Antes y después de cada práctica.
L	C-01	Limpieza superficial con trapo húmedo y secar	Estudiante	Antes y después de cada práctica.
L	C-02	Limpieza superficial con trapo húmedo y secar	Estudiante	Antes y después de cada práctica.
L	D-01	Limpieza superficial con trapo húmedo y secar	Estudiante	Antes y después de cada práctica.
CE	D-02	Comprobar con un multímetro la tomacorriente v220	Estudiante	Antes de cada práctica.
CE	D-03	Comprobar con un multímetro la tomacorriente v110	Estudiante	Antes de cada práctica.
RG	RG-D-04	Calibración del termómetro.	Encargado de laboratorio	Antes de cada práctica.
RG	RG-FC	Realizar una prueba de control del funcionamiento del equipo	Encargado de laboratorio	Anual

IDENTIFICACIÓN DE SIGLAS: T.M= Tipo de actividad que se ejecuta. L= Limpieza CE= Comprobación de equipo RG= Revisión general	
Realizado por: Cristian Freire Ronny García	Verificado por: MSC. Suly Rodríguez
Fecha: Septiembre 2014	

ANEXO C.- PRÁCTICA DE LABORATORIO



TEMA: DETERMINACION DE EFICIENCIA DE SECADO EN UN SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO VS ESTUFA

1. OBJETIVO

- Estudiar el fenómeno de secado, mediante distintos equipos para comprobar su eficiencia

2. EQUIPO A UTILIZAR

- Balanza digital
- Vidrio reloj
- Termómetro digital
- Pinzas
- Cronómetro
- Estufa
- Secador de lecho fluidizado
- Grano a elegir no superior a un diametro de partícula de 0,008 metros

3. PROCEDIMIENTO

- Previo a realizar la práctica de laboratorio, los estudiantes deberán colocar el grano a elegir en remojo, durante un periodo de tiempo de 24h.
- Preparar debidamente los instrumentos de laboratorio para que no existan datos erróneos al realizar las pruebas de laboratorio.
- Tomar 6 vidrios reloj los cuales deberán estar enumerados para evitar confusiones, se usaran 6 vidrios reloj para las pruebas de laboratorio en la Estufa y 6 vidrios reloj para las pruebas en el secador de lecho fluidizado.
- Los vidrios reloj serán debidamente pesados , dichos datos tendrán que ser anotados, tanto para las muestras para la Estufa como para el secador de lecho fluidizado.
- En cada vidrio reloj se colocará 100gr del grano húmedo a ser elegido.

3.1 Procedimiento para la Estufa

- Colocar las 6 muestras en la Estufa
- Con la ayuda de un cronómetro se irán sacando las muestras en períodos de tiempo de 10 minutos. Es decir la primera muestra a 10 minutos, la segunda muestra a 20 minutos, la tercera muestra a 30 minutos, y así sucesivamente. Con lo cual obtendremos 6 muestras variando el tiempo de secado.
- Cada muestra retirada de la Estufa tendrá que ser pesada con su respectivo vidrio reloj.

- Con lo cual obtendremos un valor por diferencia de peso entre el vidrio reloj con grano húmedo y el vidrio reloj con grano sometido a la Estufa.

3.2 Procedimiento para el secado de lecho fluidizado

- Revisar las conexiones del secador de lecho fluidizado.
- Abrir la compuerta de cámara de secado y colocar la muestra a ser secada.
- A diferencia de la Estufa, las muestras tienen que ser retiradas en su totalidad y colocadas en su respectivo vidrio reloj.
- Repetir el procedimiento de la Estufa para el secador de lecho fluidizado.

4. Cálculo del % de Humedad

El cálculo del porcentaje de humedad se lo va a realizar por el método de diferencia de pesos. Por medio de la siguiente fórmula

$$\%Hr = \frac{H1 - H2}{H1} * 100$$

Donde:

Hr= humedad retirada

H1= humedad inicial contenida en el grano

H2= humedad final contenida en el grano

$$\%Hrm = 100 - \%Hr$$

Donde:

Hrm= Humedad remanente

5. Datos experimentales

A continuación los estudiantes deberán llenar la tabla adjunta con los valores previamente calculados

[illegible]

UTILIZANDO LECHO FLUIDIZADO											
Muestra No.	Tiempo (min)	P1 (g) Recipiente	P2 (g) R+grano Seco	P3 (g) Grano Seco	P4 (g) R+Grano Húmedo Inicial	P5 (g) Grano Húmedo inicial	P6 (g) Humedad Inicial	P7 (g) R+Grano Húmedo final	P8 (g) Humedad Final	% Humedad retirada	% Humedad remanente
1	10										
2	20										
3	30										
4	40										
5	50										
6	60										

Peso 1 P1 Peso recipiente

Peso 2 P2 Peso recipiente + muestra seca

Peso 3 P3 Peso de muestra seca

Peso 4 P4 Peso recipiente + muestra húmeda inicial

Peso 5 P5 Peso muestra húmeda inicial

Peso 6 P6 Peso humedad (agua) inicial

Peso 7 P7 Peso recipiente + muestra húmeda final

Peso 8 P8 Peso humedad (agua) final

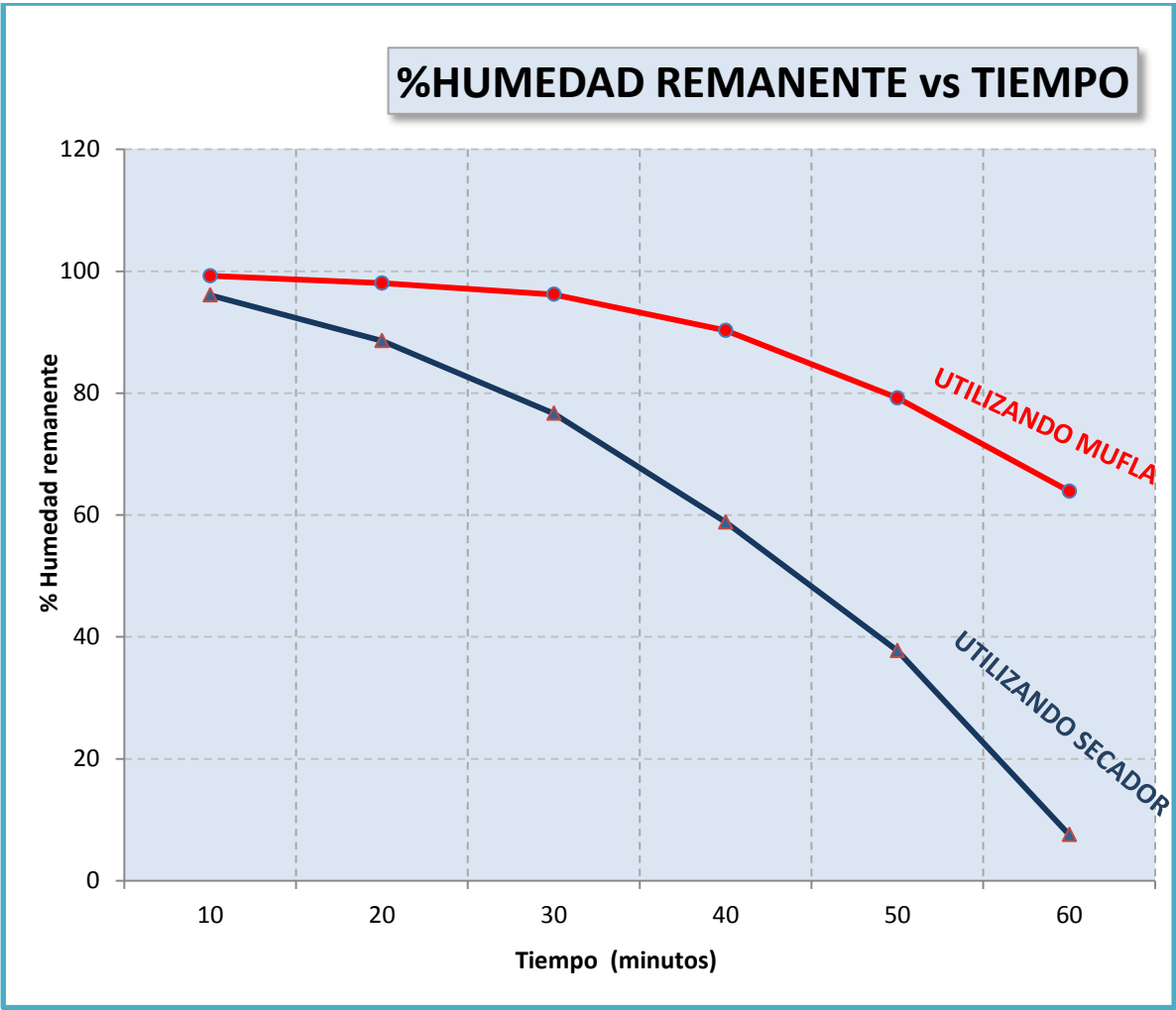
%Humedad retirada: Porcentaje de humedad en peso que se obtuvo por diferencia de peso, entre muestra húmeda y muestra seca.

%Humedad remanente: Porcentaje de humedad en peso que no pudo ser retirada en el grano.

6. Gráfica

Los estudiantes con los datos obtenidos en las tablas provistas, elaborarán una grafica en donde se reflejarán las curvas características de secado en la Estufa y en el secador de lecho fluidizado.

La cual se deberá apreciar en forma similar al gráfico siguiente.



7. Conclusiones

A partir de la gráfica generada los estudiantes deberán establecer una discusión y respectivas conclusiones, que sean acorde con el objetivo principal de la práctica de laboratorio.

ANEXO D.- ABREVIATURAS DEL DOCUMENTO

XW	Contenido de humedad
X*	Humedad de equilibrio
F	Humedad libre
X0	Humedad inicial
XC	Humedad crítica
Xp	Humedad final
Wa	Peso de agua
Wms	Peso de la materia seca
Hr	Humedad retirada
H1	Humedad inicial contenida en el grano
H2	Humedad final contenida en el grano
Hrm	Humedad remanente
Vs	Volumen del grano sin poros
δ	Densidad
ϵ_0	Porosidad mínima
ϵ_{mf}	Porosidad mínima de fluidización
ϕ	Factor de forma
P	Presión
T	Temperatura
μ	Viscosidad
Nre	Número de Reynolds
Vmf	Velocidad mínima de fluidización
Vl	Velocidad límite del lecho
Lo	Altura inicial del lecho
Lmf	Altura mínima de fluidización del lecho

Qs	Caudal de salida
Pt	Potencia
Di	Diametro interno
At	Área transversal
M	Masa de aire a ser calentada
Cp	Capacidad calorífica del aire
ΔT	Diferencia entre temperatura de entrada y salida del aire
Y	Humedad absoluta del aire corregido a 547 mmHg
Yo	Humedad del aire leída en la carta psicométrica
TBS	Temperaturas de bulbo seco
TBH	Temperatura bulbo húmedo
Pw	Presión del vapor del agua a la temperatura de bulbo húmedo.
T.M	Tipo de actividad que se ejecuta.
L	Limpieza
CE	Comprobación de equipo
RG	Revisión general