

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales



“Diseño, construcción e instalación en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química, de un secador rotativo piloto tipo batch para granos.”

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presentado por:

Mario Enrique Gallardo Flores

Elías Moisés García Echeverría

GUAYAQUIL – ECUADOR

2016

Agradecimiento

En primer lugar, agradecemos a Dios por darnos salud y permitirnos estar presente este día cumpliendo un objetivo más de nuestras vidas. A nuestros padres, hermanos y demás familiares que están siempre brindándonos su apoyo en todo momento. A nuestro Tutor del presente trabajo, Ph.d Carlos Balladares por su excelente guía y dirección del proyecto, y a todos los demás profesores que aportaron con sus conocimientos, los cuales nos ayudan hacer mejores profesionales. A nuestros amigos, quienes nos brindaron su apoyo en toda nuestra vida universitaria.

Dedicatoria

Agradezco en primer lugar a Dios, por darme vida y permitirme haber culminado este trabajo, a pesar de tanta adversidad.

Agradezco también a toda mi familia, principal motor y motivación de mi vida. A Papá y Mamá, por confiar siempre en mí, y haberme enseñado – quizás no muchas cosas nuevas – pero si de la manera más representativa y trascendental en mi vida. A mis abuelos y hermanos, este logro también es gracias a ustedes.

A mis amistades, pocas pero reales. Con quienes ya he compartido tanto, y aún tenemos mucho más por conocer y vivir.

A la empresa donde trabajo, que me brindó siempre el apoyo incondicional para continuar con mis estudios.

Y por último, pero no menos importante, a todos los profesores que intervinieron durante mi formación universitaria, promoviendo en cada clase mi amor por la Ingeniería Química.

Mario Gallardo

A DIOS por darme la vida, salud y su amor incondicional. Por permitirme cumplir este objetivo de mi vida junto a mis seres queridos.

A mi madre Julia y mi padre Elías por estar presentes cada momento de mi vida, brindándome siempre su amor incondicional, apoyándome en cada situación y sus consejos -que poco a poco los voy poniendo en práctica-. A mi hermano Erick, por acompañarme y ayudarme en todo momento de mi vida Universitaria y demostrar que con esfuerzo y dedicación cada día se puede ser alguien mejor.

A mis profesores por enseñarme lo grande y maravillosa que es la carrera de ingeniería química, P.h D. Carlos Balladares por su acertada dirección.

A mis amigos, por apoyarme en esas tardes de estudios; los cuales el día de hoy obtienen su fruto; también por los momentos divertidos que quedaran guardados en mi memoria.

Elías García

Tribunal de graduación

MBA. Pablo Vicente Tejada Hinojosa

Ph.D. Carlos Alejandro Balladares Grazzo

MSc. Oswaldo Manuel Valle Sanchez

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Mario Enrique Gallardo Flores

Elías Moisés García Echeverría

Resumen

El presente trabajo consiste en el diseño, construcción e instalación, en el laboratorio de operaciones unitarias de ingeniería química, de un secador didáctico; con tambor rotatorio para el secado y deshidratación de materia húmeda del Laboratorio de Operaciones Unitarios del Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales - Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). El material seleccionado para el secado es el café cereza debido a su alta importancia económica a nivel mundial (segundo “commodity” más cotizado en el mundo luego del petróleo), su destacable trascendencia y potencial desarrollo económico en el campo de la agricultura e industria ecuatoriana y por sus numerosas propiedades funcionales que otorga al usuario que ingiere su bebida.

Previo a la construcción del sistema se realizó un estudio del proceso de secado y de toda la ingeniería involucrada en el diseño, construcción y puesta en marcha del equipo. Paralelamente se realizó una evaluación y diagnóstico de los recursos disponibles en las instalaciones del laboratorio. Una vez revisados los puntos antes mencionados, se procede con la selección de los elementos del equipo y finalmente con su construcción e instalación en el laboratorio. El equipo cuenta con 3 secciones principales, las cuales se mencionan a continuación:

- Calentador: Intercambiador de calor en el cual interactúan de manera indirecta el vapor (proveniente de la Caldera del laboratorio) y el aire ambiental (el cual será calentado y utilizado posteriormente como medio de calentamiento para la etapa de secado). Cuenta con su sistema de tuberías para el ingreso de vapor y salida de condensado del intercambiador de calor.
- Ventilador centrífugo con medidor de temperatura del aire a inyectar en el tambor (cilindro).
- Tambor rotativo (cámara de secado): Cilindro hueco que gira sobre su propio eje. En su interior posee aletas mezcladoras dispuestas en el sentido longitudinal del cilindro para promover el correcto arrastre y volteo del material a secar y su íntimo contacto con el aire caliente. Cuenta con un ducto para salida del aire “frío”.

Para regular la temperatura del interior del tambor se combina el uso de una válvula mariposa que regula la convergencia de aire ambiente con el proveniente del calentador y mediante un regulador tipo dámper se controla el flujo de aire del ventilador que ingresa al tambor.

Se caracterizó además el aire de entrada al ventilador, teniendo este una humedad y temperatura promedio de “calidad seca” y 64°C respectivamente, mientras que el aire de salida descendió a una temperatura de 48°C

aproximadamente. El flujo de aire alimentado al tambor (mediante el ventilador) fue fijado en 0,15 kgs/s (velocidad de 4 m/s aproximadamente en el interior del tambor), de acuerdo a directrices planteadas por la literatura del Secado y experiencias recibidas de Agricultores del país. Estas condiciones de operación permitieron reducir el contenido de agua en base seca del grano de café cereza, de 150 a 14,5% aproximadamente, durante un periodo de operación de 10,5 horas. De esta manera se logra emular el proceso de secado mecánica a nivel agro-industrial. Se construyó la curva de secado a partir de varias pruebas de operación, hasta lograr un funcionamiento estable y óptimo del equipo.

Para fines didácticos de la carrera de Ingeniería Química, se realizó también pruebas de secado “parcial”, definiendo así condiciones de operación que permitan reducir considerablemente el contenido de humedad de una carga inicial de 10 kg de café cereza (122% a 51% en base seca), en un periodo de operación no mayor a 3 horas. Se calculó también los costos de producción relacionados a la operación del equipo (costo eléctrico y de consumo de combustible) y al costo del material húmedo a procesar, permitiendo realizar una comparación con la ganancia bruta estimada de comercializar el producto obtenido.

Adicionalmente declara también la funcionabilidad del equipo para procesar una amplia variedad de productos agrícolas (granulares) tales como: Cacao, Nueces, macadamia, semillas de ajonjolí, lentejas, entre otros.

Finalmente se emite un manual de operación del equipo para permitir un cómoda, sencilla y práctica revisión & compresión por parte de los estudiantes al momento de su utilización.

Índice General

Introducción	xviii
Capítulo 1	20
El café	20
*Historia - Origen	20
*Características generales del café	20
*Producción/Cultivo café	22
Cultivo	22
Cosecha	23
Café cereza	23
*Proceso	34
*Café en el Ecuador	38
*Producción - cosecha	38
*Producción – Comercialización (local e internacional)	39
Capítulo 2	45
Secado de granos	45
*Principio teórico de la Operación unitaria de secado	45
Transferencia de masa y calor	46
Propiedades del aire ambiental	50
*Contenido de Humedad	51
Contenido de Humedad en Base Humedad	51
Contenido de Humedad en Base Seca	52
Humedad de equilibrio	52
Humedad libre	52
Humedad Absoluta del aire	53
Humedad Relativa	54
Difusión del coeficiente de masa	54

*Transferencia de masa y energía (calor) en el secado de granos	56
Ecuaciones para la transferencia de calor.....	56
Ecuaciones para la transferencia de masa.....	62
Comportamiento del agua en el interior del material durante el secado.	63
Capítulo 3	64
Secadores.....	64
*Secado tradicional (natural)	65
Secador solar	65
*Secado forzado (artificial).....	65
Secador de bandejas	65
Secador de lecho fluidizado	66
Secador rotatorio.....	66
Capítulo 4	68
Diseño del Secador rotativo.....	68
*Metodología de diseño de secadores rotativos	68
*Selección del material húmedo a secar.....	70
*Diseño Secador mediante correlaciones disponibles.....	71
*Estudio de secadores rotativos	74
*Intercambiador de calor.....	76
Tipos de intercambiador de calor	77
Según su construcción	77
Placas.....	77
Según su operación.....	78
Flujo paralelo.....	78
Contra flujo	78
Flujo Cruzado	78
Aplicaciones del intercambiador de calor	79
Dimensionamiento de la sección del secador (tambor)	79
Capítulo 5	87

Construcción y pruebas en el equipo.....	87
Secuencia de construcción del equipo	87
*Instalación	88
*Detalle de costos.....	90
Costo de construcción	90
Velocidad y Tiempo de secado.....	93
Velocidad de secado	93
Velocidad de secado constante.....	93
Velocidad de secado decreciente.....	94
Tiempo de secado	95
Capítulo 6	96
Pruebas experimentales	96
Caracterización del material húmedo a secar (café cereza).....	96
Resultados Obtenidos	98
Análisis Psicrométrico - Prueba de secado parcial (22/09/2016)	98
Tiempo de secado	103
Prueba de secado completo (t=60°C).....	103
Tiempo de secado experimental.	103
Tiempo de secado Teórico	104
Costos totales	107
Costo de producción.....	108
Costos por materiales.....	110
Capítulo 7	112
Conclusiones y Recomendaciones	112
Conclusiones	112
Recomendaciones.....	115
Bibliografía.....	117

Índice de figuras

Figura N.- 1 Granos de café	21
Figura N.- 2 Exportación de café por variedad (Equivalente en sacos de 60 kilos) periodo 2010 - 2016	41
Figura N.- 3 Exportación de café en millones de US\$, periodo 2010 - 2016	42
Figura N.- 4 Exportaciones de Café del Ecuador: Verde vs Industrializado .	42
Figura N.- 5 Transferencia de masa	48
Figura N.- 6 Temperatura media del aire del año 2012	50
Figura N.- 7 Humedad relativa del aire durante el año 2012	51
Figura N.- 8 Tipos de humedades.....	53
Figura N.- 9 Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica	60
Figura N.- 10 Diseño primario de las diferentes secciones de un secador rotatorio por lotes (tipo Batch).....	69
Figura N.- 11 Disposición de las aletas Internas.....	70
Figura N.- 12 Humedad en Función del tiempo	73
Figura N.- 13 Velocidad de secado en función a la Humedad	73
Figura N.- 14 Área seleccionada para la instalación del equipo	89
Figura N.- 15 Instalación del secador rotatorio	90
Figura N.- 16 Contenido de Humedad bs vs Tiempo	104
Figura N.- 17 Curva $(1/N)/x$	105
Figura N.- 18 Diseño primario de las diferentes secciones de un secador rotatorio tipo Batch.....	120

Figura N.- 19 Modelado del tambor a diferentes ángulos	123
Figura N.- 20 Secador rotativo vista posterior.....	130
Figura N.- 21 Secador rotativo vista derecha.....	130
Figura N.- 22 Secador Rotativo vista Frontal	131
Figura N.- 23 Diseño del secador rotativo vista izquierda.....	131
Figura N.- 24 Coeficiente Global de transferencia de calor de acuerdo a los fluidos	134

Índice de tablas

Tabla 1 Caracterización del café pergamino.....	34
Tabla 2 Cifras de actividad caficultura en el Ecuador 2012	39
Tabla 3 Información del Anuario Meteorológico.....	50
Tabla 4 Especificaciones técnicas de la caldera.....	80
Tabla 5 Listado de materiales para la construcción del equipo	91
Tabla 6 Análisis de la caracterización de la muestra café cereza del año 2016	96
Tabla 7 Propiedades del aire la entrada del radiador	98
Tabla 8 Propiedades del aire a la salida del radiador	98
Tabla 9 Propiedades del aire a la salida del secador.....	98
Tabla 10 Áreas de las secciones del secador.....	99
Tabla 11 Datos de la cantidad de agua removida.....	100
Tabla 12 Datos adicionales del secador y solido a secar	103
Tabla 13 Resultados de humedad retenida durante tiempo de secado	103
Tabla 14 Cálculos de velocidad de evaporación, velocidad de secado	104
Tabla 15 Total de caballos fuerza producido durante el secado.....	108
Tabla 16 Costo total del proceso de secado.....	110
Tabla 17 Propiedades del aire al inicio del intercambiador de calor	132
Tabla 18 Propiedades del aire a la salida del intercambiador de calor	132
Tabla 19 Dimensiones de la tubería	134

Introducción

El secador rotatorio es uno de los equipos más utilizados para el secado a nivel industrial, existiendo una variedad con lo que respecta a formas (diseño) y materiales; y con bajo costo unitario cuando se trata de grandes cantidades. El flujo de aire caliente empleado en el secador puede ser paralelo o en contracorriente, están diseñados para trabajar por intervalos de tiempo y con gran capacidad de secado que pueden alcanzar las t/h.

En la industria química, el uso más frecuente del equipo es en el secado de sales fertilizantes, como el sulfato nitrato y fosfato de amonio, sales potásicas y fertilizantes. [1] (Warren, 1991)

Posee buenas características de flujo con tiempos de secado moderados empleados para productos granulares. Mediante adaptaciones de dispositivos que disgreguen las costras sólidas formadas, el secador puede trabajar con materiales de naturaleza semi pegajosa. La acción de volcado consiste en romper la corteza semipermeable que se forma en la superficie de las partículas que se secan esto resulta beneficioso dentro de ciertos parámetros, ya que facilita la salida de la humedad desde el interior de las partículas. No se recomienda el uso en: secado de barras, suspensiones, materiales muy pegajosos y materiales que requieran más de una hora para el secado. Además, presentan limitaciones en el secado de materiales polvorientos o livianos, los cuales son arrastrados fácilmente por la corriente.

Para nuestro caso particular nos hemos enfocado en los beneficios funcionales que ofrece este tipo de equipo para el procesamiento de granos como el café (cereza) y cacao. La rotación constante promueve un secado homogéneo de los granos (adecuada aireación y volteo), permitiendo obtener un producto conforme a los requerimientos específicos de la industria para su correcto almacenamiento previo a su utilización (procesamiento), particularmente el contenido de humedad para evitar degradación y contaminación en el grano. (Agricultura, 2012)

Capítulo 1

El café

***Historia - Origen**

No es posible esclarecer con certeza la verdad sobre el origen del café y su extensión por todo el mundo, pues no se cuenta con detalles o evidencia que sustenten las diversas historias que existen. Sin embargo, prácticamente todas ellas coinciden en que el grano fue primeramente identificado en Etiopía, para luego ser propagado a Egipto, Yemen (una vez descubiertos los beneficios energizantes de la planta) y posteriormente al Medio Oriente, África del norte y Turquía, países en los cuáles la preparación ya era similar al proceso actual (granos eran tostados y molidos). Finalmente la propagación alcanzó a países de la actual zona Europea, Sudeste Asiático y América.

***Características generales del café**

La planta productora de café (“cafeto”) pertenece a la familia de las rubiáceas, constituida por árboles, arbustos y bejucos. El grano o semilla de café corresponde específicamente al contenido del fruto de la planta de café, cuya coloración se torna rojiza al alcanzar la madurez y se denomina cereza (identificado así por su similitud en apariencia). (Colombia, 2010)

Figura N.- 1 Granos de café



La cereza alberga en su interior al grano de café verde (semilla), recubierto a su vez por varias cortezas.

Con respecto a los tipos de plantas de café, existen más de 100 variedades, siendo 2 las más comunes y de mayor interés agrónomo y comercial:

- *Coffea Arabica*: Café Arábica.
- *Coffea Canephora*: Ordinariamente conocida como café Robusta.

En términos de sabor, el café robusta es reconocido por tener “cuerpo” y notas amargas, relacionados con su mayor contenido de cafeína por grano (2,7% promedio vs 1,5% en el Arábica). El Arábica en cambio, es un grano que presenta notas aromáticas y ácidas placenteras, además de un mayor contenido de lípidos en su composición.

A pesar de que su contenido de cafeína es menor que en el grano tipo Robusta, su rendimiento de producción por planta y por hectárea también es menor, y es más vulnerable a plagas y cambios climáticos, el café Arábica domina la producción mundial representando más del 75% del total cultivado. Esto se evidencia claramente en que es café por excelencia seleccionado y utilizado para la producción y comercialización de café tostado y molido (de “pasar”). A diferencia del Robusta, que es principalmente utilizado en la industria del producto soluble instantáneo.

El café es, detrás del petróleo y por delante del gas natural, metales como el oro, cobre y plata y productos agrícolas como el azúcar, maíz y trigo, entre otros, es la materia prima “commodity” más negociado en el mundo.

***Producción/Cultivo café**

Cultivo

El café es una planta que dependiendo de su naturaleza debe ser cultivada en zonas que cumplan condiciones específicas. Para el café Robusta se requiere de zonas tropicales o subtropicales bajas (hasta 700 metros sobre el nivel), con temperaturas promedio entre 24 a 30°C. Para el caso del tipo Arábica, es preciso contar con temperaturas promedio menos elevadas (entre 19 y 24°C) y zonas elevadas (Arriba de los 1000 metros sobre el nivel del mar).

Cosecha

La cosecha corresponde al proceso de recolección del fruto de café. Esta práctica se realiza de forma manual una vez que ha alcanzado el grado de madurez respectivo, durante etapas definidas del año (según el tipo de café cultivado y estaciones climáticas de la región).

Café cereza

Características físicas

Los parámetros que caracterizan al café cereza son los siguientes:

- Forma (y uniformidad) / Tamaño / Color / Humedad

La forma normal-regular del café cereza es elipsoidal alargada, con ligera tendencia a forma esféricas en estado de madurez, y blanda cuando ya es cosechada. El exterior del fruto (“café cereza”) corresponde a la pulpa (Exo/epicarpio), que es blanda y húmeda, cuya coloración varía de verde a rojo y depende del grado de maduración y tipo de café. El tamaño varía entre cada fruto presentando de manera general granos con longitud entre 5 a 14 milímetros de longitud, y entre 3 a 12 milímetros de ancho y alto. (Colombia, 2010)

En su interior alberga al grano o semilla (2 semillas por cereza), revestido en primera instancia por una película adherida al grano (albumen), luego por una segunda capa fina, dura pero frágil denominada pergamino (endocarpio) y finalmente con una cubierta tipo esponjosa rica en contenido de azúcares llamado mucílago (mesocarpio). El grano verde (semilla) es redondeado, con una cara plana y lisa dividida por una hendidura, y con su otra cara de forma convexa. Es este componente del fruto que una vez limpio y tostado es utilizado para la producción de la bebida de café. (Internacional, 2011)

La uniformidad hace referencia a la homogeneidad en apariencia, forma y tamaño de cada grano, lo cual promueve un correcto desenvolvimiento del producto en las siguientes etapas de producción.

El contenido de humedad en la cereza es de aproximadamente 60%.

- Rendimiento

El rendimiento hace referencia al ratio de conversión entre diferentes presentaciones del café.

Conversiones

Con base en análisis y prácticas de alcance internacional, la Organización Internacional del Café (OIC) presenta equivalencias de conversión representadas en sacos de café verde (60 kg netos = 132.276 libras).

EGV: Equivalencia en grano verde (“green bean equivalent – **GBE**” en inglés). Declaran además que “café verde” representa todo café toda semilla de café seca sin tostar (INEN, 2006).

“**La Organización Internacional del Café** (ver OIC – sección 01.05) ha determinado los siguientes factores de conversión para convertir diferentes tipos de café a EGV*:

- Cereza seca a grano verde: peso neto de la cereza por 0.5;
- Pergamino a grano verde: peso neto del pergamino por 0.8;
- Grano Verde Descafeinado a grano verde: peso neto por 1.05;
- Café tostado a grano verde*: peso neto del café tostado por 1.19;
- Café soluble a grano verde*: peso neto del café soluble por 2.6;
- Café líquido a grano verde: peso neto de los sólidos secos del café contenidos en el café líquido por 2.6.

La densidad variará entre cada fruto y dependiendo del tipo de grano (Robusta o Arábica), presentando valores promedio de 400 a 700 gramos por litro.” (Jose Garcia, 2004)

Tratamiento - Beneficio

El “beneficio” corresponde básicamente al proceso de transformación del fruto de la planta (café cereza) a café pergamino seco. Es importante recalcar la importancia y alto grado de influencia determinante en el perfil y

calidad de taza de producto final (perfil organoléptico) que conlleva un correcto beneficio del café.

Existen dos métodos de beneficio utilizados actualmente: vía húmeda y vía seca.

Una vez culminado el beneficio del fruto de la planta de café, se suele denominar al producto (sin tostar) “café verde”.

Beneficio húmedo

El beneficio por vía húmeda es el procedimiento para obtener café verde a partir de cereza húmeda, luego de secar un grano despulpado mecánicamente. Este método presenta mayor complejidad por la intervención de tanques de fermentación y grandes cantidades de agua. Previo al secado, la cereza húmeda debe ser despulpada, y es aquí donde radica la principal diferencia con el beneficio por vía seca, en el cual la cereza es deshidratada previa a la remoción de la pulpa. Posteriormente es sometida a fermentación, lavada y secada para obtener el grano de café verde.

Las propiedades físicas y sensoriales del café que se beneficia por esta vía son mejor conservadas y el porcentaje de defectos es menor, por lo cual el producto de este tratamiento es de mejor calidad y a su vez de mayor costo que un café beneficiado por vía seca.

Despulpado

La eliminación de la pulpa (capa externa / exocarpio) es ejecutada mediante máquinas despulpadoras correctamente calibradas, para minimizar la generación de defectos físicos en el producto. Este procedimiento debe ser llevado a cabo no más de 24 horas luego de la cosecha, para evitar una degradación por sobre-calentamiento de la cereza durante las siguientes etapas.

Fermentación

Durante la fermentación se remueve el mucílago (mesocarpio) adherido al pergamino (endocarpio) para obtener café pergamino húmedo.

El grano despulpado es sometido a una limpieza para eliminar cualquier resto de la cereza, previo al inicio de la fermentación. Posteriormente son colocados en tanques de fermentación (de madera o concreto) y el mucílago es desprendido por acción de enzimas naturales, proceso que puede tardar entre 24 a 36 horas aproximadamente, dependiendo de las condiciones de operación (del sistema, climáticas y del producto procesado).

La culminación de la fermentación es constatada por revisión visual y física, cuando se aprecia que la textura y comportamiento del grano deja de ser pegajosa y “elástica”.

Una sobre fermentación resulta en marcadas notas a vinagre y sabor degradado en la taza final. Una fermentación incompleta significa que parte del mucílago quedará adherido al pergamino, ocasionando inconvenientes durante el secado y posterior trillado y tostado del grano.

Lavado

El lavado se realiza aplicando agua (las veces que sea necesaria) para eliminar el mucílago, inmediatamente después de haber culminado la fermentación. Se realizan varios enjuagues, en el mismo tanque donde se realizó la fermentación o en un tanque adicional, hasta asegurar que el pergamino se encuentre totalmente limpio.

El resultado es un café pergamino lavado, con un contenido de agua en base húmeda de 57% aproximadamente.

Secado

El proceso de secado puede realizarse de manera natural, artificial o combinando los 2 métodos mencionados.

- El **secado** es **natural** cuando se utiliza la energía solar para promover la deshidratación de los granos, ya sea de manera directa o indirecta,

colocando el producto sobre superficies lisas de cemento o ladrillo, o en mallas finas de alambre, colocando capas de 2-10 cm de altura y volteado periódicamente el producto para promover un secado un homogéneo. El tiempo de secado puede variar de 8 a 10 días aproximadamente, dependiendo de las condiciones climáticas disponibles.

- El **secado** es **artificial** (o forzado) cuando se utiliza maquinaria para promover una deshidratación acelerada mediante la aplicación directa de aire caliente, ya sea partiendo de la cereza húmeda o de una cereza previamente tratada por medio natural. De esta manera se minimiza el riesgo de degradación del grano por extensa exposición al ambiente. Los equipos de deshidratación suelen ser utilizados cuando es necesario acelerar el secado debido a condiciones climáticas no favorables o exceso de producto para ser tratado por la vía natural. Es importante indicar que este proceso debe ser controlado minuciosamente para asegurar un secado satisfactorio y económicamente manejable, claro está sin que degrade la calidad del producto.

El secado se realiza hasta alcanzar un valor máximo de contenido de humedad de 12,5% en base húmeda. (B., 1980)

Beneficio seco

Se trata del método más antiguo, y sencillo y debido a su posible ejecución sin la necesidad de maquinarias. Consiste básicamente en deshidratar el fruto (cereza) entero ya sea por medio natural o artificial para obtener posteriormente, por medio de eliminación física, el grano de café verde. La ejecución del proceso presentará variaciones dependiendo del tamaño de volumen a procesar, recursos disponibles, condiciones climáticas, etc.

Convección: La transferencia de calor por convección se da con el movimiento de las partículas de un fluido

Limpieza

Se inicia el proceso realizando una inspección, clasificación y limpieza de las cerezas recolectadas, separando las que no estén en condiciones adecuadas para su procesamiento (poco o muy maduras, dañadas, etc) y paralelamente retirando suciedad y materias extrañas, tales como piedras, ramas, hojas, insectos, entre otras. Para este proceso se utilizan cribas con varios niveles, que facilitan la selección de la materia a separar.

Secado

Nuevamente, el proceso de secado puede realizarse de manera natural, artificial o combinando los 2 métodos mencionados.

- El **secado** es **natural** cuando se utiliza la energía solar para promover la deshidratación de la cereza, ya sea de manera directa o indirecta, colocando el producto sobre tendales de cemento o ladrillo, extendiendo capas de 8-10 cm de altura y moviendo periódicamente el producto para promover un secado homogéneo. El tiempo de secado puede llegar a alcanzar varias semanas, dependiendo de las condiciones climáticas disponibles.
- El **secado** es **artificial** (o forzado) cuando se utiliza maquinaria para promover una deshidratación acelerada, ya sea partiendo de la cereza húmeda o de una cereza previamente tratada en tendales. De esta manera se minimiza el riesgo de degradación del grano por extensa exposición al ambiente. Los equipos de des-hidratación utilizados suelen ser de cama fija o tambores rotatorios, que utilizan quemadores de combustible gaseoso o líquido, o vapor de caldera para calentar el aire que entrará en contacto con la cereza húmeda. (R.J. & R., 1987)
El secado se realiza hasta alcanzar un valor máximo de contenido de humedad de 12,5% en base húmeda (partiendo de un valor promedio de 55-65%). Una cereza “muy seca” presentará problemas durante la etapa de despulpado, pues será muy frágil y producirá excesos de “quebrados” durante el cribado (lo cual se considera un defecto en el café). Por otro lado, una cereza muy húmeda será vulnerable a un rápido deterioro fúngico y bacteriano.

Es imperativo evitar a toda costa el re-humedecimiento de la cereza durante y después del secado, ya sea por contacto directo con agua (lluvias) y/o exposición al rocío.

En términos generales el beneficio por vía seca requiere mayor tiempo, por lo cual la cereza es propensa a mayor degradación de sus propiedades físico-químicas lo cual tendrá un impacto directo en la taza final.

La cereza seca es almacenada en sacos de yute o trasladada directamente para su despulpado. (R.J. & R., 1987)

Despulpado-pilado

Las cerezas secas son sometidas a procesos mecánicos (máquina piladora, criba) para remover de manera simultánea toda capa externa hasta obtener el grano de café verde. (M. & Desrosier, 1979)

Paper: Directrices para prevenir la formación de moho en el café

<http://www.ico.org/documents/ed1988c.pdf>

Almacenamiento

Una vez alcanzadas las condiciones de almacenamiento óptimas el grano de café verde - pergamino es almacenado en sacos de yute, de 40-60 kilos

netos. El almacenamiento de los sacos debe realizarse en lugares frescos, correctamente aireados, con temperatura y humedad relativa conocida y controlada. Debido a las propiedades higroscópicas del café verde, el contenido de humedad y características/propiedades tanto físicas como sensoriales deberán ser evaluadas con frecuencia en caso de que el almacenamiento vaya a ser prolongado, para asegurar la preservación de la calidad del café.

Curado

Corresponde a una etapa adicional realizada para el café verde que será exportado. El grano es sometido a procesos que comprenden la limpieza, trillado, pulido, tamizado, selección y clasificación.

Café pergamino

Se presenta a continuación la denominación asignada al café pergamino según el beneficio utilizado.

Tabla 1 Caracterización del café pergamino

Café beneficiado por vía seca		
	Antes de descascarar	Café verde
Inglés	Dry cherry	Unwashed coffee Natural coffee
Español	Cereza seca	Café no-lavado Café natural
Café beneficiado por vía húmeda		
	Despulpado	Café verde
Inglés	Parchment coffee	Washed coffee
Español	Café en pergamino	Café lavado

***Proceso**

Tostado y molido (de “pasar”)

El café verde limpio (cuidadosamente tratado y seleccionado) es sometido a un proceso de tosti3n. El grano es sometido a elevadas temperaturas durante un periodo de tiempo determinado, durante el cual sufre modificaciones tanto f3sicas (incremento de tama3o, cambio en color, reducci3n de contenido de humedad, etc) como qu3micas (pir3lisis).

El grano tostado puede ser envasado directamente para su comercialización o sometido a un proceso de molienda. En esta reduce el tamaño del grano de acuerdo a estándares pre-definidos para el tipo de producto a elaborar (café tipo Espresso, Americano, entre otros).

El producto final (ya sea tostado o tostado & molido) es muy delicado y propenso a rápida degradación en contacto con el ambiente (luz solar, humedad y temperatura del aire, etc). Usualmente, es ingresado a ambientes de atmósfera controlada para promover una rápida eliminación del dióxido de carbono generado por el producto previo a su empaqueo final, el cual es realizado en empaques trilaminados con válvulas de alivio para asegurar una correcta conservación de las propiedades del producto.

El producto podrá clasificarse como fresco – de manera general - hasta un mes cuando está molido y hasta 2 meses cuando es empacado en grano. Claro está, que esto dependerá de las condiciones en las que se almacene y sea consumido. (Lavazza, 2016)

Soluble instantáneo

La industria busca poder aumentar la eficiencia de conversión de café verde/ café soluble logrando de igual manera la obtención de un producto soluble que logre emular las características de un café tostado y molido (o de “pasar”

como suele conocerse al producto), razón por la cual se plantea la tecnología de tostar, moler y extraer a gran escala los sólidos solubles del café, para posteriormente ser secados (también por distintas tecnologías) y poder obtener así el producto soluble instantáneo.

El proceso comprende básicamente los siguientes pasos (partiendo del café verde seco):

- Tratamiento mecánico al café verde, para asegurar la eliminación de cualquier materia extraña (piedra, palos, restos de cereza, etc).
- Tostión: El café verde es sometido a un delicado (por la importancia en controlar los distintos parámetros) para agresivo a la vez (por las condiciones de operación) que originan que el grano cambie sus propiedades físicas y químicas, liberando en este punto su aroma característico.
- Molienda: El café tostado es sometido a un proceso de molienda para favorecer a la etapa de extracción sólido – líquido).
- Extracción: Grandes cantidades de agua y recurso de vapor son utilizadas para lograr extraer de manera sistemática los sólidos solubles del café tostado y molido que ha sido colocado en baterías de extracción (Porcentaje bastante mayor en comparación a una filtración regular/normal realizada durante la preparación cotidiana).

- Centrifugación: Proceso que busca eliminar materia insoluble remanente en el extracto.
- Evaporación / Concentración: Consiste en retirar el “exceso” de agua presente en el extracto, previo a su etapa de secado.
- Secado: El extracto limpio y concentrado, es sometido a un proceso de secado (por atomización o liofilización) para reducir ahora su contenido de agua a porcentajes por debajo de 4 en base húmeda. La forma, técnica y periodo de aplicación de calor inferirá notablemente en el producto final, debido a que el café soluble es un producto bastante sensible al calor.
- Empaque – Almacenamiento: El empaque al granel suele ser en fundas de polietileno que a su vez se empacan en cajas de cartón corrugado, confiriendo al producto (de acuerdo a la tecnología utilizado en el secado y las características específicas del producto) una vida útil de hasta 36 meses, en caso de que las condiciones de sellado y almacenaje no se vean comprometidas. Para el negocio del canal “retail”, el café soluble es empacado en una diversidad de presentaciones que van desde sobres/sachets de material laminado hasta frascos de vidrio o PET.

***Café en el Ecuador**

El café ecuatoriano es reconocido a nivel mundial, ya sea en su presentación “verde”, semi-procesada (tostado y molido) o soluble (instantáneo), debido a su alta calidad y destacadas características organolépticas.

***Producción - cosecha**

El Ecuador es uno de los pocos países que produce, procesa y exporta todas las variedades de café comerciales: Arábica lavado, Arábica natura y Robusta. Gracias a su ubicación geográfica.

Las principales zonas de producción en el país son en las provincias de Manabí, Loja, Sucumbíos, Orellana (todas por excelencia en términos de volumen y calidad), seguidas de El Oro, Pichincha, Zamora, Guayas.

Los periodos de producción para el tipo arábica van desde marzo hasta octubre, y de febrero hasta noviembre para el robusta. (inversiones)

El Consejo Cafetalero Nacional (COFENAC) presenta las siguientes cifras de actividad caficultura en el Ecuador para el periodo del 2012.

Tabla 2 Cifras de actividad caficultura en el Ecuador 2012

Superficie Total	199,215 hectáreas
Área de café arábigo	136,385 hectáreas
Área de café robusta	62,830 hectáreas
Área cosechada	149,411 hectáreas
Unidades de producción cafetalera	105,000 UPA's
Producción nacional	650.000 sacos de 60 kilos
Producción de café arábigo (%)	62%
Producción de café robusta (%)	38%

***Tratamiento post-cosecha**

Como fue indicado anteriormente, en el Ecuador se emplean los 2 beneficios al café producido, conforme lo permitan las condiciones climáticas y físicas (volumen de producción) y según el uso final destinado para el producto.

***Producción – Comercialización (local e internacional)**

El Ecuador produce las siguientes presentaciones de café:

- Café verde (sin tostar)
- Café tostado (en grano o molido)
- Café soluble instantáneo (Atomizado, Aglomerado y Liofilizado).

La industria del producto soluble es manejada por 2 compañías privadas, que durante más de 35 años han provisto al Ecuador, y países vecinos como Colombia y Perú de sus distintas presentaciones de producto empacado (frascos de vidrio, sobres), y a países de todo del mundo de producto empacado al granel.

Se presenta a continuación datos de las exportaciones del Ecuador (en toneladas y facturación FOB, US\$) café en sus distintas presentaciones: verde (Variedad Robusta, arábica) e industrializado. (Intelectual, 2014)

Figura N.- 2 Exportación de café por variedad (Equivalente en sacos de 60 kilos) periodo 2010 - 2016

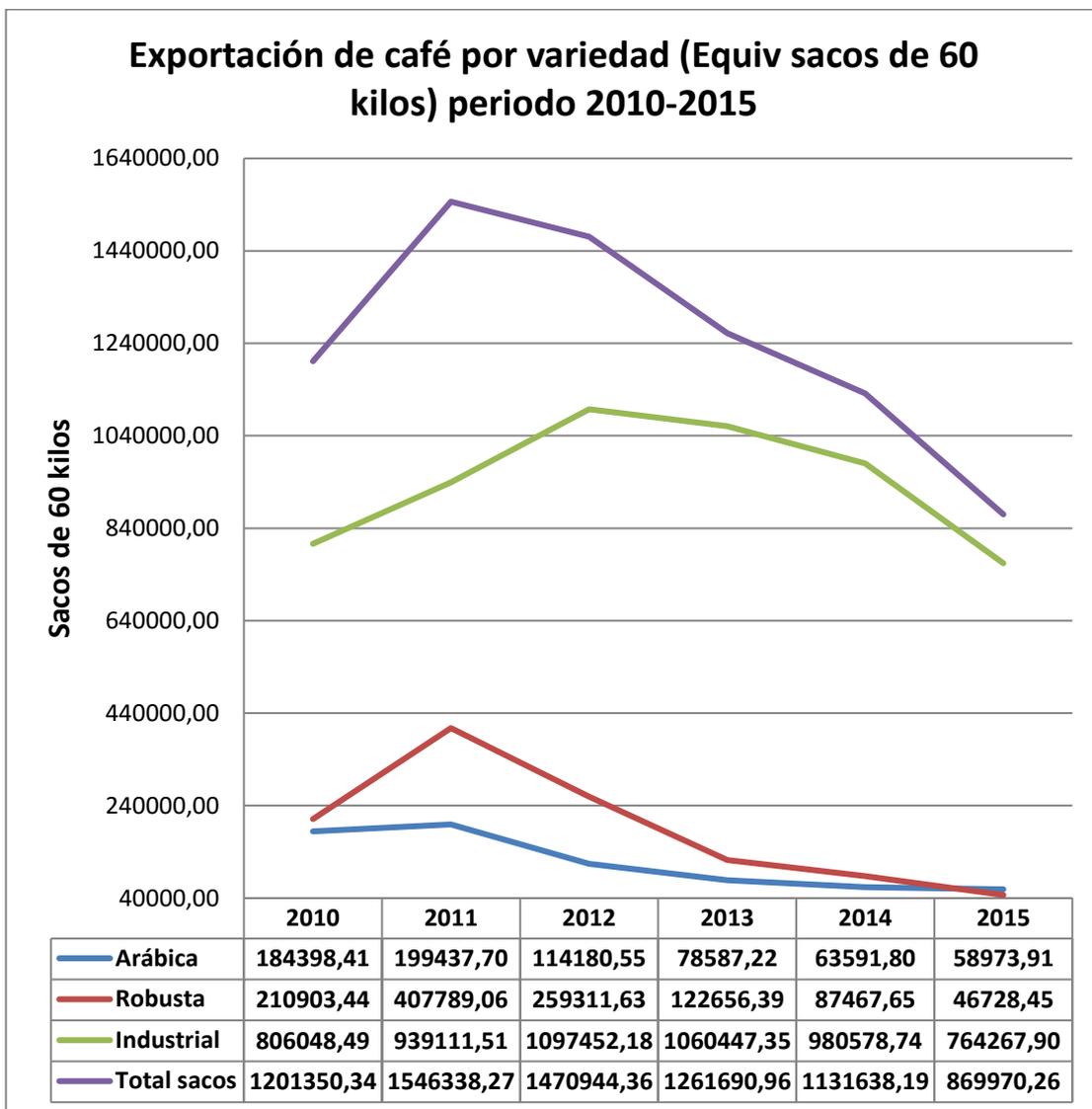


Figura N.- 3 Exportación de café en millones de US\$, periodo 2010 - 2016

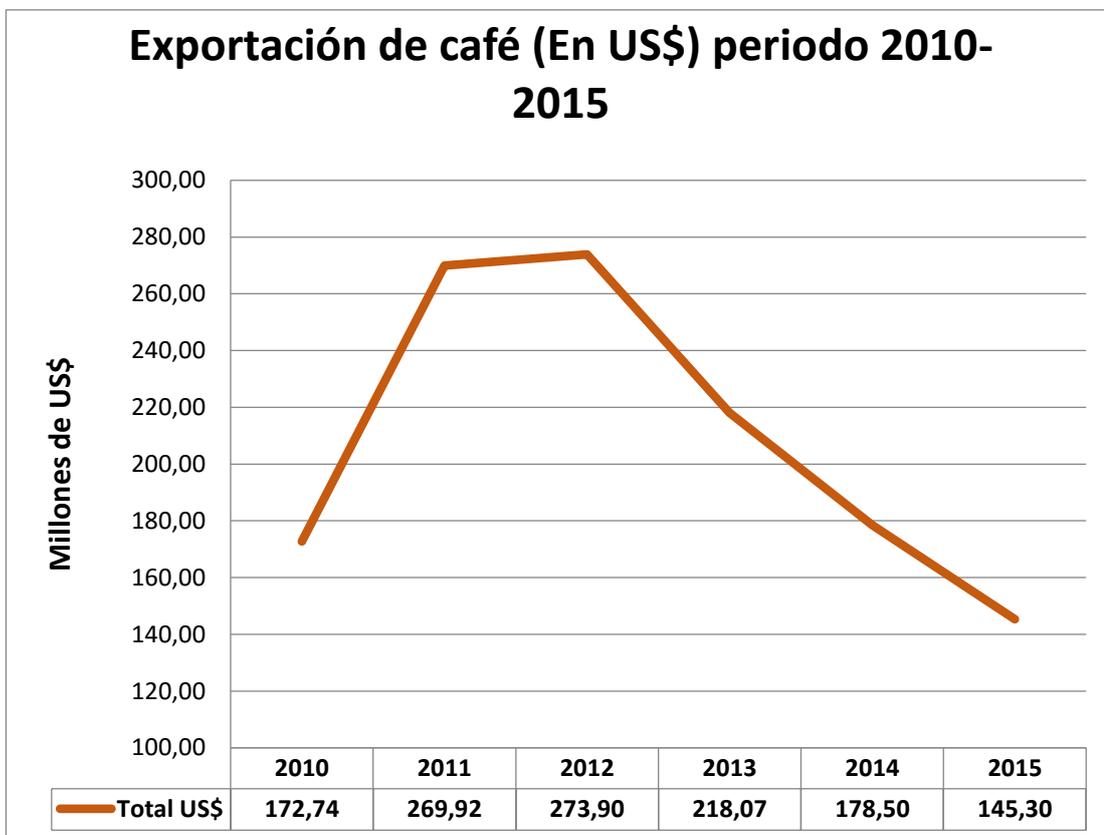
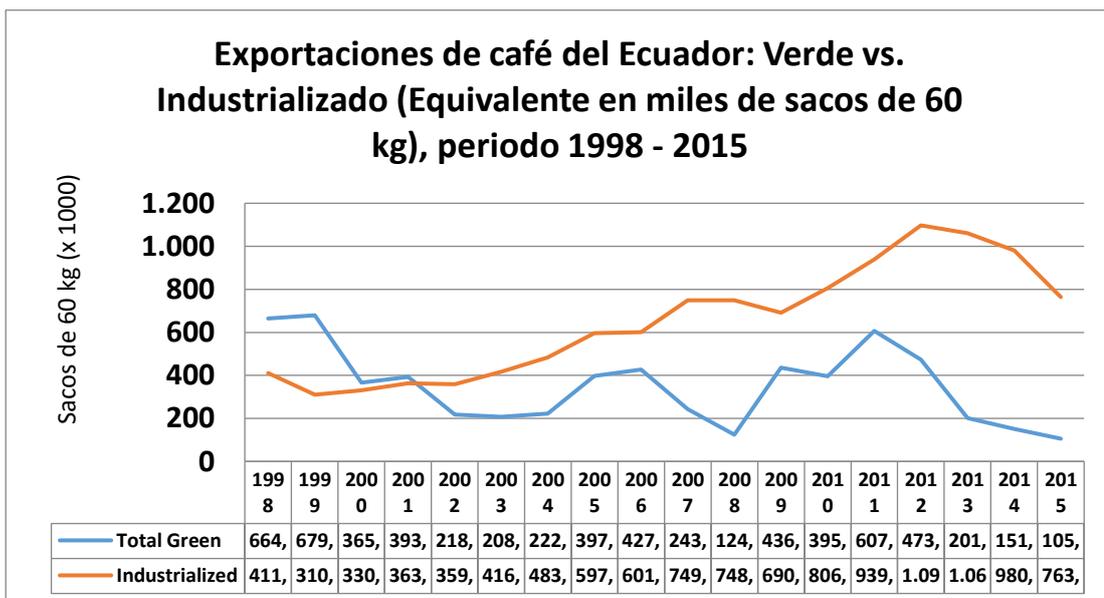


Figura N.- 4 Exportaciones de Café del Ecuador: Verde vs Industrializado



Para el caso de la partida arancelaria 090111 (café verde), se evidencia la caída de su exportación, producto de la crisis generada por diversos factores como como la sobre-oferta mundial de este producto, el crecimiento considerable de productores Asiáticos en comparación con productores de América, baja eficiencia de producción local (QQ / hectárea) y los altos costos locales para los productores, entre otros. Como resultado el poco volumen producido en las principales zonas cafetaleras del Ecuador era/es consumido por la Industria local (Tostadores y productores de soluble, de marcas locales reconocidas principalmente) dejando libre apenas un reducido volumen disponible para la exportación. La industria de soluble se vio forzada a trabajar bajo un esquema de importación de café verde de distintos orígenes, en condición de régimen especial a depósito industrial sin aranceles, permitiendo así abastecer su necesidad. En resumen, si bien la producción y exportación de café verde ha decaído considerablemente durante los últimos años, esto no ha afectado su demanda en distintos países de Europa y Asia principalmente ni impedido, desde el 2008, el crecimiento y posicionamiento del Ecuador como el principal proveedor de café instantáneo de Europa y uno de los principales de Rusia.

Afortunadamente el Gobierno nacional reacciona frente a esta situación, reconociendo la importancia y alto potencial del café en la economía agrícola y en el ámbito social y ecológico del Ecuador, e inicia, a través del Ministerio de Agricultura Ganadería Acuacultura y Pesca (MAGAP) el “Proyecto de Reactivación de la Caficultura Ecuatoriana”. (café, 2013)

Capítulo 2

Secado de granos

***Principio teórico de la Operación unitaria de secado**

En los diferentes campos industriales como: química, alimento, farmacéutico y petroquímica, una de las operaciones unitarias que se usa con frecuencia es la de secado, esta operación consiste en separar un líquido de un sólido mediante la evaporación del líquido manteniendo la misma fase, existiendo diferentes medios como: térmicos, mecánicos (prensas, centrifugas, etc) siendo este el más económico entre los dos. (Faust, 2006)

Cuando se seca un sólido húmedo con un gas al que se le mantiene una temperatura y humedad estable, empieza a tener un modelo general de comportamiento, el porcentaje que se desea remover deberá estar entre un 65 al 70 %.

En la operación de secado la mayoría de veces se somete corrientes de aire caliente o seco, ayudando a evaporar el líquido del producto, pero a la vez conservando sus propiedades organolépticas.

Las industrias que emplean el secado de materiales lo hacen por las siguientes razones:

- Disminuye el consumo de energía y aumenta la capacidad en algunas operaciones posterior.
- Permite utilizar el producto final de manera ventajosa.
- Ayuda a la conservación del producto por mucho más tiempo durante su almacenamiento

En el secado de un sólido se puede apreciar dos procesos principalmente: Transferencia de calor, utilizada para calcular la energía necesaria para la evaporación del líquido y la transferencia de masa, la cual nos indica la que cantidad de líquido se puede extraer del sólido. (Aguiar, 2015)

Transferencia de masa y calor

El modelo de secado de solido será de enfriamiento evaporativo. Solamente se considerará la transferencia de calor por convección, ignorado la perdida de radiación por ser mínima. Una vez que se escogió y estableció el modelo matemático se procede a realizar el intercambio de masa y calor, suponiendo los siguientes puntos:

- El calor que se transfiere desde el secador hacia el ambiente es despreciado, debido a que no tiene ningún efecto sobre el proceso de secado.

- El calor de radiación es ignorado al ser mínimo.
- Durante la caída de los sólidos en el secador ocurre ambos fenómenos de transferencia.

La transferencia de calor por convección que se produce desde el aire hacia los sólidos durante el movimiento produce que el aire ceda calor hacia el sólido, provocando que el agua que se encuentra en el interior cambie de fase y se libere.

Los secadores rotativos rara vez son aislados en la parte exterior del cilindro, debido a que tener el tambor descubierto ayuda a que la temperatura de la manija mecánica no aumente demasiado su temperatura, también evitando el sobrecalentamiento no deseado del producto. El aislamiento es necesario en hornos rotativos, los cuales buscan el sobrecalentamiento de los sólidos.

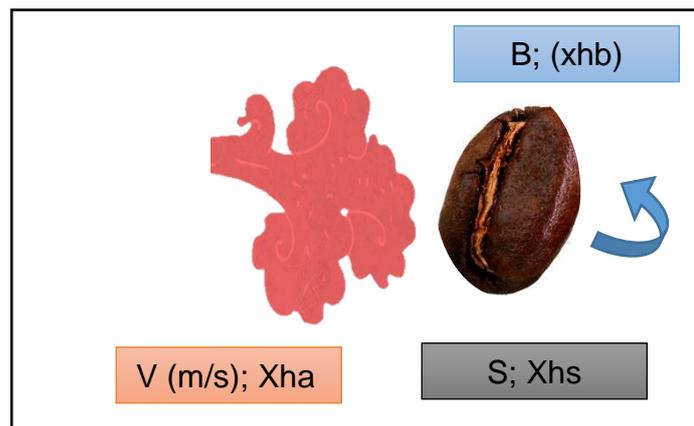
La temperatura de secado con la que trabajan la mayoría de secadores rotativos no debe exceder más de los 800 K. Los granos aparte de ganar calor mediante el contacto con la corriente de aire, sino también mientras reposan al fondo del tambor.

Transferencia de Masa

La convección es el método principal por la cual se puede realizar la transferencia de masa en los secadores rotatorios. A continuación, en la Figura N.-5 se puede apreciar como un sólido está siendo expuesta a una corriente de aire caliente que se mueve con una velocidad V (m/s) y tiene

una concentración (X_{ha}), la cual está relacionada directamente con la humedad absoluta del aire.

Figura N.- 5 Transferencia de masa



Fuente: Propia

Para conocer la cantidad de masa de entrada en el secador, se la puede obtener mediante la ecuación:

$$m_g = \frac{\rho_g * v_g}{1 - x}; \text{Ecuación 2.0}$$

Donde

ρ_g = densidad del grano (Kg/m^3)

v_g = Volumen del grano (m^3)

X = Humedad Inicial

Para calcular el coeficiente de transferencia de masa existen dos maneras: la primera es mediante el uso de la correlación Whitaker, este método es factible siempre cuando se tenga tablas de los parámetros que se requieren; la segunda forma es por la analogía de transferencia de calor y masa.

Transferencia de calor

La transferencia de calor se relaciona con el intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos los cuales también son conocidos como fuente y receptor. Al vaporizar un kilo de agua o condensar un kilo de vapor, el cambio de energía en ambos procesos es similar. La velocidad a la que estos procesos puede hacerse progresar, con una fuente o receptor independiente es muy diferente. Por lo general, la vaporización es un fenómeno mucho más rápido que la condensación. (D.R., 1999)

Existen tres formas en las que el calor puede transferirse de la fuente al receptor. Estas son:

Conducción: transmisión de energía calorífica en forma progresiva desde la masa de un cuerpo al entorno que lo rodea.

Convección: movimiento que se genera en el seno de una masa líquida o gaseosa, permitiendo la transmisión del calor.

Radiación: transmisión de calor en forma de ondas electromagnéticas a otros cuerpos que están a su alrededor.

Propiedades del aire ambiental

Las siguientes tablas y figuras muestran el anuario meteorológico correspondiente al año 2012, realizada por Radio Sonda-Universidad de Guayaquil. Toda esta información se la obtienen en el instituto nacional de meteorología e Hidrología.

Tabla 3 Información del Anuario Meteorológico

Latitud	2° 12' 0" S
Longitud	79° 53' 0" W
Altitud	6 (m)
Temperatura media del aire	26,5 C°
Humedad relativa del aire	77 (%)

Figura N.- 6 Temperatura media del aire del año 2012

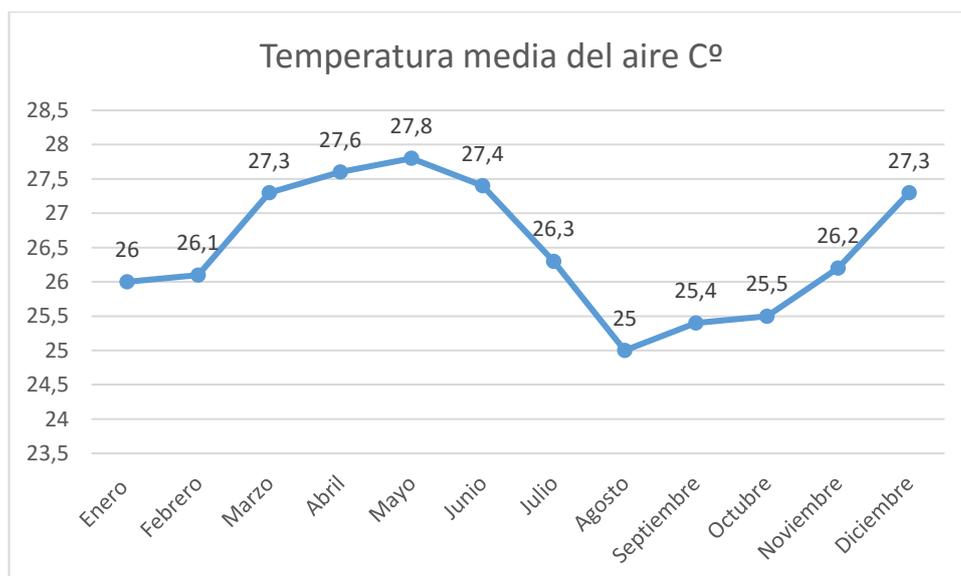
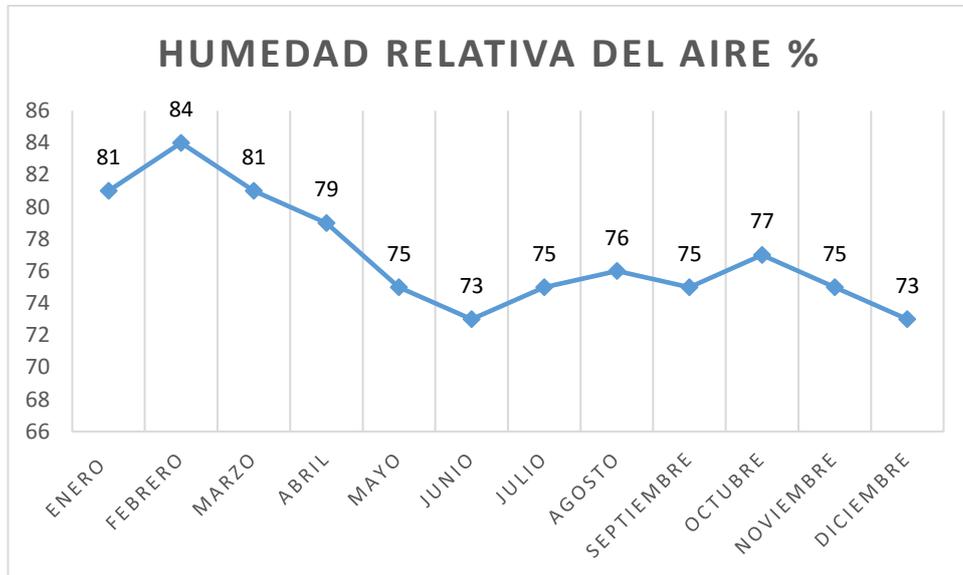


Figura N.- 7 Humedad relativa del aire durante el año 2012



Fuente: Propia

*Contenido de Humedad

Contenido de Humedad en Base Humedad

Comúnmente el contenido de humedad de un sólido se lo puede representar con la relación entre el porcentaje en peso de humedad y el porcentaje en peso del sólido húmedo.

$$\frac{\text{kg humedad}}{\text{kg sólido húmedo}} 100 = \frac{\text{kg humedad}}{(\text{kg sólido seco} + \text{kg humedad})} 100 \text{ (Ecuación 2.1)}$$

Contenido de Humedad en Base Seca

Se lo representa con la relación entre el porcentaje en peso de humedad y el porcentaje en peso del sólido seco.

$$\frac{\text{kg humedad}}{\text{kg sólido seco}} \cdot 100 \text{ (Ecuación 2.2)}$$

Humedad de equilibrio

Es el porcentaje de agua retenida en una sustancia y se da cuando la presión parcial dada por el vapor y el contenido de humedad de la sustancia se encuentra en equilibrio. Este valor establece cual es la capacidad que tiene un material de ser secado (Perry, 1980) , una vez llegado hasta la humedad de equilibrio la transferencia de masa a finalizado.

Humedad libre

Es la cantidad de agua contenida en un material en exceso con relación a la humedad de equilibrio, indicando la máxima cantidad de humedad que se puede extraerse, cumpliendo las condiciones predeterminadas del aire (Perry, 1980). Puede calcularse de la siguiente manera:

$$X_L = X - X_e \quad (3)$$

Donde:

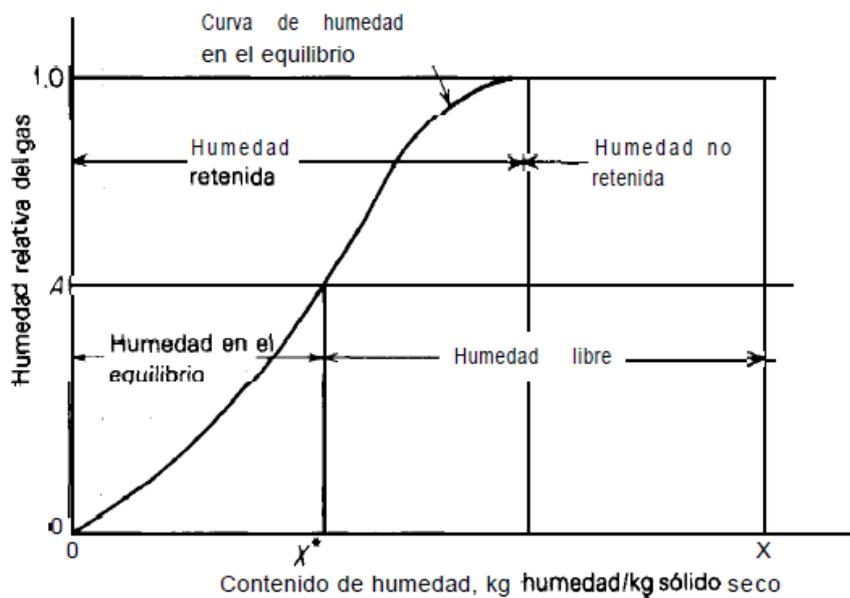
X_L = Humedad libre

X = contenido de humedad

X_e = humedad de equilibrio

En la siguiente grafica se puede observar los diferentes tipos de Humedades:

Figura N.- 8 Tipos de humedades



Humedad Absoluta del aire

Es la cantidad de humedad que se encuentra en una mezcla agua-aire, también es la relación entre la masa de agua sobre la masa de aire seco, se puede obtenerla mediante la siguiente formula:

$$HA = \frac{18.02 pA}{28.97 (p - pA)} \text{ (Ecuación 2.3)}$$

Donde:

P= presión total del aire

PA= presión parcial del agua en el aire

Humedad Relativa

Es la relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y la cantidad máxima que puede contener en esas condiciones (Aguiar, 2015) .

Se lo representa mediante la siguiente ecuación:

$$Hr = \frac{pA}{pAs} * 100 \text{ (Ecuacion 2.4)}$$

La humedad relativa es inversamente proporcional con la temperatura, esto quiere decir que a medida que la temperatura aumente, la cantidad de agua que se encuentra presente en el aire disminuye, por ende, su Humedad relativa también.

Difusión del coeficiente de masa

El coeficiente de transferencia de masa con respecto a la teoría de difusión se calcula mediante la ley de Fick's las cuales están modificadas para diferentes geometrías, se las representan en las siguientes ecuaciones:

Esférica

$$\frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{6}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-n^2 D_{ef} t}{r^2}\right)$$

Donde:

x=contenido de humedad en el tiempo

X_0 = contenido de humedad inicial

X^* = contenido de humedad de equilibrio

r= radio de la esfera

Lámina

$$\frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{hn^2} \exp\left(\frac{-hn^2 \pi^2 D_{ef} t}{4l^2}\right)$$

Donde:

x=contenido de humedad en el tiempo

X_0 = contenido de humedad inicial

X^* = contenido de humedad de equilibrio

L= radio del espesor de la lamina

Cilindro

$$\frac{X - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{4}{r_a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta n^2} \exp(-\beta n^2 D_{ef} t)$$

Donde:

x=contenido de humedad en el tiempo

X_0 = contenido de humedad inicial

X^* = contenido de humedad de equilibrio

r_a = radio del cilindro

βn = raíces de primera clase y de orden 0

El coeficiente difusional efectivo (D_{ef}) es diferente para cada ecuación y se

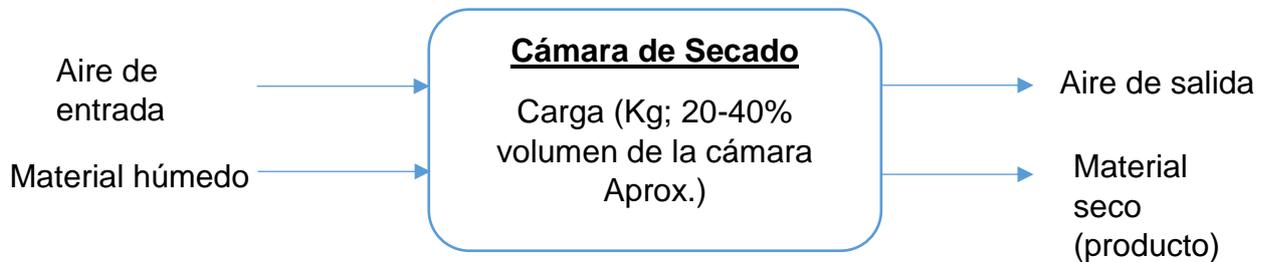
la calcula mediante el $\ln\left(\frac{X - X^*}{X_0 - X^*}\right)$.

*Transferencia de masa y energía (calor) en el secado de granos

Ecuaciones para la transferencia de calor

Balace de Energía

Sección de entrada (1)



Ecuación de balance de energía

$$(c) + S (t_2 - t_1) + S (4,179) (t'_3 - t_1) + [(1,8887) * (t_4 - t'_3)] + SX^2(4,179) * (t_2 - t_1) + qr = qt \text{ (Ecuación 2.5)}$$

E: velocidad de vaporización, kg/s.

C: Calor latente del agua a T_{ent} , °C.

t_2 : Temperatura del producto de salida, °C.

t_1 : Temperatura de entrada del producto, °C.

t'_3 : Temperatura de bulbo húmedo del gas de entrada, °C.

t_3 : Temperatura de entrada del gas, °C.

t_4 : Temperatura de salida del gas, °C.

S: Flujo másico de producto seco, kg/s.

X1: Contenido de humedad del producto húmedo, lb agua/lb sólidos secos.

X2: Contenido de humedad del producto seco, lb agua/ lb sólidos secos.

CP: Calor específico de producto seco, (KJ/kg°C)

qr: Pérdida de calor por radiación desde el secador hacia los alrededores, Kw

qt: Calor total que pierde el aire dentro del secador, Kw

Calor de evaporación:

Velocidad de evaporación E.

$$E = (H_{bs1} - H_{bs2})$$

Dónde:

E: Velocidad de evaporación, kg/s

S: Flujo másico del producto seco.

Hbs= humedad base seca

Ahora la velocidad de evaporación puede ser calculada como:

$$q_e = E\lambda \text{ (Ecuación 2.6)}$$

Calor al producto seco

Es el calor que recibe el producto seco y se lo calcula mediante la ecuación

$$q_s = S c_p(t_2 - t_1) \text{ (Ecuación 2.7)}$$

Cp del café= 2.14 Kj/kg K

Cálculo del calor al líquido

$$q_l = S (4,179)(t_3 - t_2) \text{ (Ecuación 2.8)}$$

Cálculo del calor al vapor de agua

$$q_v = (1,8887)(T_4 - T_3) \text{ (Ecuación 2.9)}$$

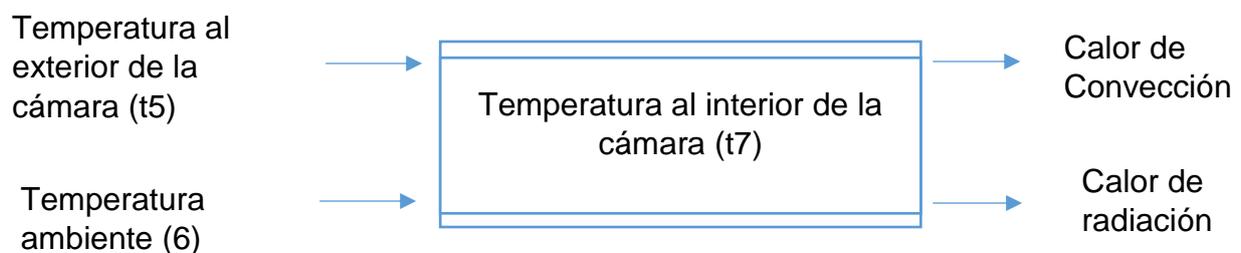
CÁLCULO DEL CALOR DE LA HUMEDAD RESIDUAL

$$q_{hr} = (4,179)(t_2 - t_1) \text{ (Ecuación 3.0)}$$

CÁLCULO DEL CALOR POR RADIACIÓN

ESPESOR DE AISLAMIENTO.

COEFICIENTE DE CONVECCIÓN LIBRE DE PARED PLANA VERTICAL



$$Ra_L = g\beta (T_5 - T_6) L^3/\alpha \nu \text{ (Ecuación 3.1)}$$

Para los valores de la Ecuación 3.1 se utilizan los datos de la Figura N.-9

Figura N.- 9 Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Aire							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688

Fuente:

http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/5421/SOTO_MAYOR_DENIS_SIMULACION_NUMERICA_INTERCAMBIADOR_CALOR_FLUJO_TRANSVERSAL_ALETEADO_ANEXOS.pdf?sequence=2

Correlación adecuada dada por Churchill y Chu:

$$Nu_l = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_l^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{0,707} \right)^{\frac{9}{16}} \right]} \right\}^2 \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Coefficiente por convección

$$h = \frac{Nu_l * K}{L} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Espesor de la lana de vidrio

Conductividad de la lana de vidrio= 0.065 w/m*k

$$Q_{cond} = Q_{conv} + Q_{rad}$$

$$\frac{k}{e} (t_7 - t_5) A = h(T_5 - T_6) A + e\sigma(T_5^4 - T_6^4) A$$

$$e = \frac{k(t_7 - t_5)}{h(T_5 - T_6) A + e\sigma(T_5^4 - T_6^4) A} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

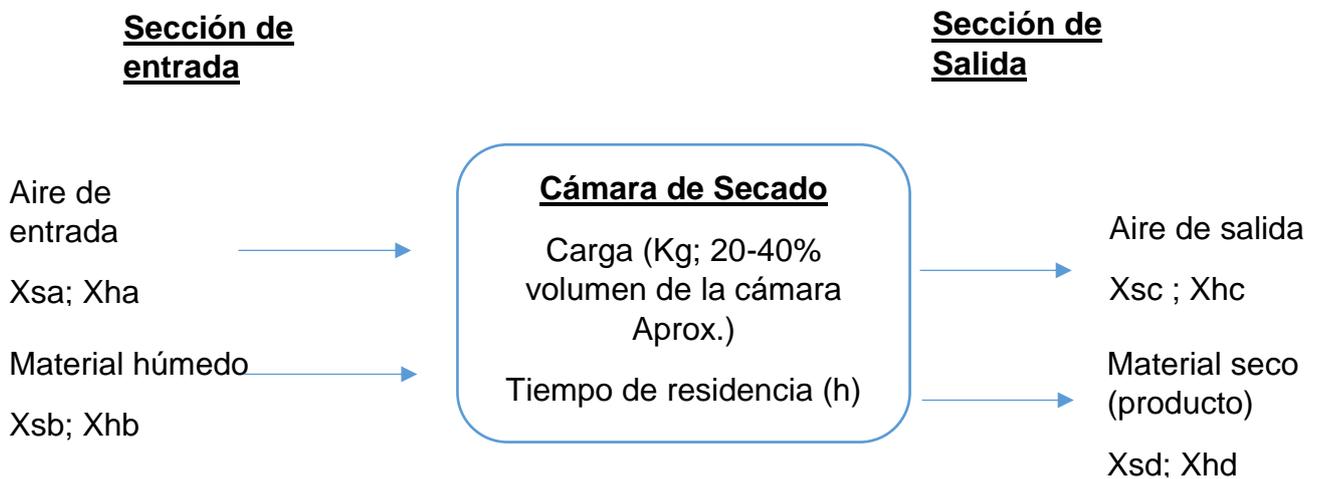
Cálculo de pérdida total

$$Q_{cond} = Q_r = \frac{k}{e} (T_7 - T_5) A \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Calor total

$Q_t = q_e + q_s$ (calor del producto seco) + q_l (calor del líquido) + q_v (calor de vapor de agua) + q_{hr} (calor de la humedad residual) + q_r (calor de pérdidas totales)

Ecuaciones para la transferencia de masa



Balance Global

$$(A) + (B) = (C) + (D)$$

A = Aire de entrada

B = Material húmedo de entrada

C = Material seco de salida

D = Aire de salida

Balance de sólido

$$A * X_{sa} = C * X_{sc}$$

Balance de agua

$$B * X_{hb} = C * X_{hc} + D * X_{hd}$$

Comportamiento del agua en el interior del material durante el secado

Un concepto bastante interesante y de alta importancia en la operación de secado es el fenómeno de difusión del agua del interior del material húmedo. Una vez ocurrida la evaporización en la superficie del material húmedo, deberá haber un movimiento (recorrido) del agua del interior del material hacia la superficie. La difusión del líquido ocurre debido a la alta concentración y baja superficie de secciones específicas del sólido.

Capítulo 3

Secadores

Los requerimientos y exigencias de la industria han promovido el diseño de distintos métodos de secado, buscando maximizar la eficiencia de la transferencia de calor y de masa referente a la evaporación y eliminación del agua en el material a procesar. Por esta razón un factor substancial a considerar es precisamente el tipo de material húmedo que se desee secar (por las diversas características y propiedades físicas que puedan presentar).

A continuación, se presenta una breve pero clara clasificación de las principales prácticas de secado utilizadas actualmente y los diferentes equipos que intervienen en cada una.

- Se clasifican principalmente de acuerdo al tipo de operación de secado (forma en transferir el calor): en tipo directo o indirecto, con sub-clasificación en tipo continuo o por lotes ("Batch") y de manera general en secadores de tipo tradicional (natural) o mecánica/forzado (artificial).

- Adicionalmente, de manera global, existe una clasificación a considerar de acuerdo a la naturaleza del material húmedo a secar, pudiendo ser este de tipo fibroso, pastoso, material granulado, sólido pulverizado, material rígido o flexible, entre otros.

***Secado tradicional (natural)**

Secador solar

Corresponde básicamente al aprovechamiento energético proveniente del sol, promoviendo el secado del material húmedo colocándolos al aire libre. El producto puede ser colocado directamente bajo el sol a la interperie (secado simple directo) o utilizar equipos como bandejas, cámaras o túneles de secado solar que optimicen, faciliten y aceleren el secado, además de aumentar la protección del producto contra el ambiente (degradación por contacto directo con energía solar, lluvia, polvo, etc).

Su alcance aplica a todo tipo de alimentos, desde productos agrícolas como hortalizas y vegetales hasta alimentos proteínicos como la carne y el pescado.

***Secado forzado (artificial)**

Secador de bandejas

El secador de bandejas consiste en una cámara de secado, cuyo tamaño dependerá del tipo de material a tratar. Dentro de la cámara un flujo de aire caliente y seco (calentado generalmente por vapor) es inyectado de tal manera que logre arrastrar y extraer el contenido de agua del material húmedo.

Secador de lecho fluidizado

El material a secar en este tipo de equipo "flota" sobre una placa perforada que suministra aire al lecho, y fluye a través del lecho del material húmedo con la suficiente velocidad para soportar el peso de las partículas en estado fluidizado. Un aspecto primordial en este tipo de secadores es garantizar una correcta distribución uniforme del gas fluidizante a través de la superficie del lecho. El resultado (del íntimo contacto entre las partículas y el gas fluidizante) son índices de transferencia de masa y de energía bastante elevados.

Secador rotatorio

Este tipo de secadores es utilizado para una gran variedad de materiales, principalmente de tipo granular que presenten aglutinación ni aglomeración, principalmente fertilizantes, minerales como la piedra caliza, arcilla, azúcar, café cereza, café pergamino, cacao,

Su beneficio característico frente a otros equipos de secado, es que promueve una correcta aireación y volteo de la materia a tratar, mejorando de manera considerable el proceso de extracción del contenido de agua en el material. El material húmedo se encuentra en un continuo movimiento promovido la rotación del cilindro y mediante paletas internas dispuestas de tal manera que el material sea "elevado" y caiga suavemente.

La velocidad de rotación recomendada es de 8-15 RPM y el porcentaje de carga de material húmedo de 12 al 25% del volumen total disponible.

Pueden operar en régimen continuo o por lotes (tipo "batch"), y el calentamiento puede ser directo o indirecto dependiendo del tipo de fuente de calentamiento y la naturaleza del material a secar.

Capítulo 4

Diseño del Secador rotativo

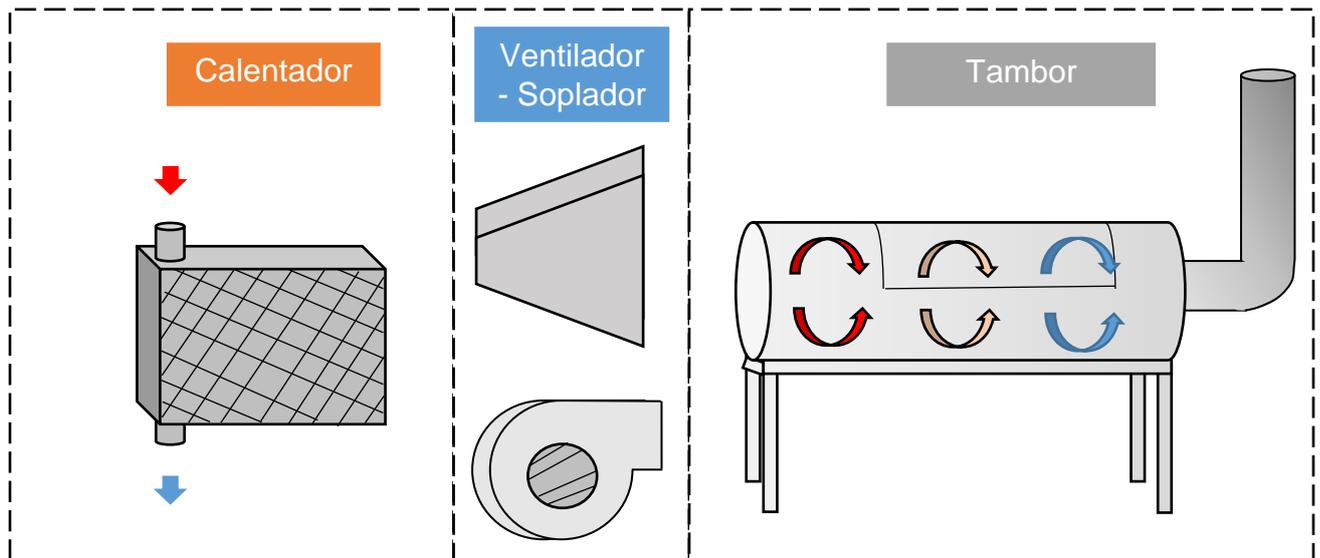
***Metodología de diseño de secadores rotativos**

Para que el proceso de secado de los sólidos sea factible económicamente se debe considerar grandes flujos de evaporación. Los secadores rotatorios están compuestos por tres secciones:

- Sección N.-1. Calentamiento: Consiste básicamente en la transferencia de calor hacia el fluido que promoverá posteriormente la operación de secado. Para nuestro caso particular hemos seleccionado un intercambiador de calor que calentará el aire ambiente, mediante el uso de vapor.
- Sección N.-2. Ventilación: Renueva el aire que está en contacto con el sólido mediante una corriente de aire caliente forzada.
- Sección N.-3. Tambor rotatorio y salida de aire: Tambor que favorece el contacto solido-aire mediante rotación sobre su eje. Además cuenta con un ducto de salida de aire.

A continuación, en la Figura N.-8 podremos distinguir las 3 secciones:

Figura N.- 10 Diseño primario de las diferentes secciones de un secador rotatorio por lotes (tipo Batch)

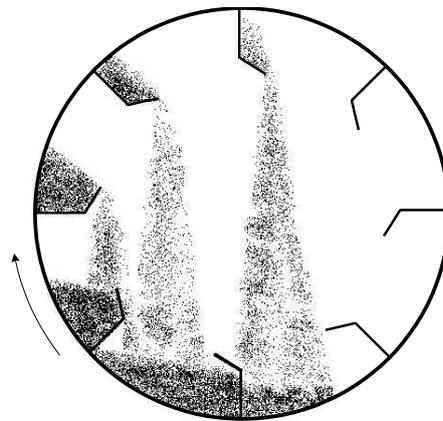


Zona del Intercambiador de calor: Mediante un flujo de vapor proveniente de la caldera situada en el laboratorio de Operaciones Unitarias, se procede a elevar la temperatura de la corriente de aire que será utilizada durante el proceso.

Zona del tambor rotatorio: Tanto como el sólido húmedo y el aire caliente circula por esta sección, en esta zona ocurre el secado. Mediante una compuerta ubicada en el cilindro se introduce el material húmedo, una vez adentro el sólido, la rotación del tambor se encarga en promover un íntimo contacto Sólido-Aire, haciendo que la evaporación sea más eficaz.

En el interior consta con una serie de palas soldadas, que facilita al aire tener un mejor contacto con el sólido (Figura N.-11).

Figura N.- 11 Disposición de las aletas Internas



Zona de salida: En esta zona se encuentra la chimenea que es la responsable de llevar el aire caliente que atraviesa el cilindro hasta el exterior. En el caso de los secadores continuos al existe otra pequeña sección donde se recoge el sólido seco. (F. Castaño, F.R. Rubio y M.G. Ortega, 2009)

***Selección del material húmedo a secar.**

Este tipo de secadores (Rotativos) es utilizado para una gran variedad de materiales, principalmente de tipo granular que presenten aglutinación ni

aglomeración, principalmente fertilizantes, minerales como la piedra caliza, arcilla, azúcar, café cereza, café pergamino, cacao.

El material húmedo seleccionado para el procesamiento es el café cereza (sólido granulado), debido a su alto potencial de impacto positivo en la industria agro-industrial ecuatoriana.

***Diseño Secador mediante correlaciones disponibles**

El mecanismo de transferencia de calor se puede expresar como un método de diseño para secados directo mediante la siguiente ecuación:

$$Q_t = U_\alpha * V * (\Delta T)_m$$

Donde:

Q_t = es el calor total transferido, J/s

U_α =coeficiente global de transferencia de calor volumétrico, $J/(S * m^3 * k)$

$(\Delta T)_m$ = Diferencia media real entre el gas caliente y el material, K

Mediante la media logarítmica de las depresiones de temperatura de bulbo húmedo a la entrada y salida del secador, se obtiene un valor aproximado de $(\Delta T)_m$, todo esto se lo realiza cuando no se posee la temperatura de los sólidos según Moyers. (Moyers, 1997).

Friedman y Marshall afirman que usar la media logarítmica de temperaturas es erróneo, puesto que la temperatura de los sólidos no cambia linealmente con respecto a la temperatura del gas. (Friedman, 1949)

Una de las correlaciones utilizadas para evaluar el coeficiente de transferencia de calor volumétrica se puede representar de la forma: $U_{\alpha} = KG^n/D$.

Donde:

K= constante de proporcionalidad

G=velocidad másica del gas

D= diámetro del secador

n= constante

*Curvas de secado

Empezaremos declarando que el grado de evaporación se determina con la velocidad de secado, que corresponde al cambio de la humedad (en base seca) con respecto al tiempo.

El secado se lo representa gráficamente mediante la humedad del sólido en función del tiempo, tomando en cuenta las condiciones que existen en el exterior deben de ser fijadas (Figura N.- 10).

Figura N.- 12 Humedad en Función del tiempo

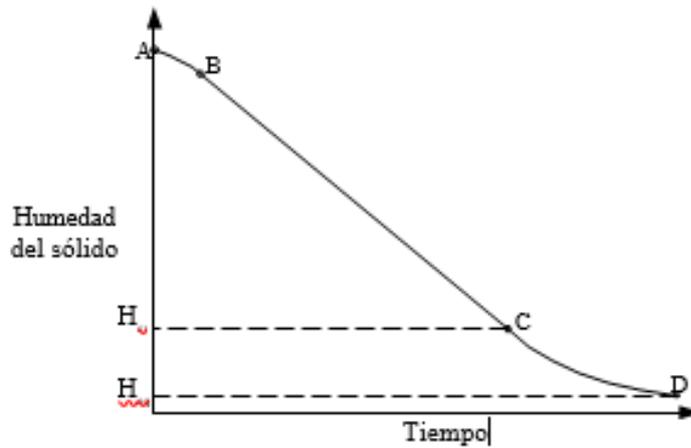
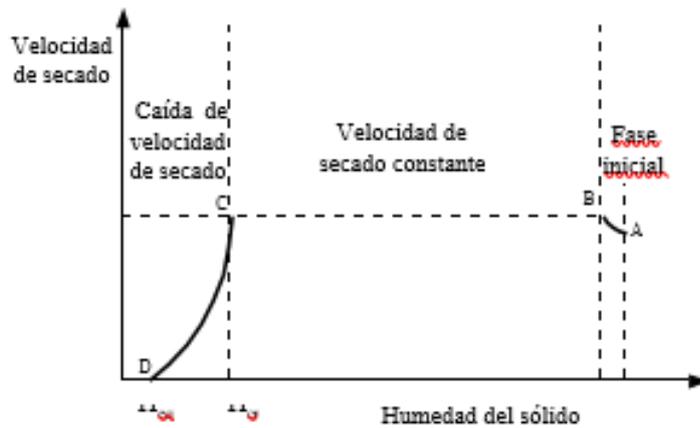


Figura N.- 13 Velocidad de secado en función a la Humedad



La figura N.-10 y Figura N.-11 muestran el comportamiento general de un sólido al ser sometido al proceso de secado. El proceso de secado que se puede observar en las curvas, no es uniforme. El tramo (A-B) es conocido como periodo de calentamiento; donde la velocidad de evaporación aumenta si la temperatura superficial del sólido es menor a la temperatura de equilibrio

que llega a alcanzar en el siguiente tramo (B-C), la siguiente fase es la velocidad de evaporación constante (B-C), donde la velocidad se relaciona más a los factores externos que internos del sólido. Finalmente, la fase de decrecimiento de la velocidad de evaporación que va desde el punto C hasta el punto D.

***Estudio de secadores rotativos**

Existen 2 tipos de modelos matemáticos relacionados al proceso de secado:

- Un modelo estático que establece las humedades, temperatura del sólido y gas a lo largo del cilindro.
- Un modelo cilíndrico: basado en ecuaciones diferenciales; que logran obtener la evolución de las propiedades (Humedad y temperatura) cuando varían las propiedades.

Las siguientes hipótesis son aplicables a un modelo estático de un secador rotatorio a contracorriente, realizados durante los primeros trabajos:

- Se utiliza un coeficiente volumétrico global de transferencia de calor.
- Durante la zona de velocidad de secado constante, la temperatura

del sólido permanece constante.

- Existe una relación lineal entre el porcentaje de humedad del sólido y la temperatura del aire.

Thorpe en el año de 1972 menciona que el cilindro del secador se divide en etapas, cada una de estas etapas se les deben realizar ecuaciones de balance de masa y energía. Dos años después los investigadores Deich y Stalskii elaboraron un modelo dinámico a base de las siguientes Hipótesis:

- Mientras se trabaja, utilizar parámetros distribuidos por el sólido y el gas.
- El calor específico del sólido es constante.
- En todo el cilindro la velocidad de secado del sólido permanece constante
- Se desprecian los fenómenos de conducción, convección y radiación.

Una de las principales dificultades al momento de elaborar un modelo de confianza es el tiempo que permanece el sólido en el cilindro y el cálculo del coeficiente de transferencia de calor.

En el año 1992 Douglas P.L. propone un modelo en el que indica dividir al cilindro en diferentes secciones, donde se asume parámetros fijos por cada

sección; estableciendo ecuaciones de equilibrios. Todo lo mencionado anteriormente se lo aplica a los secadores de azúcar. (F. Castaño, F.R. Rubio y M.G. Ortega, 2009)

En la actualidad varias industrias dedicadas a la comercialización del café, buscan modelos de secadores que ayuden en la disminución del tiempo de secado. El secador solar que consiste en una cubierta de plástico y soporte realizadas con guadua, este modelo busca reducir costos y energía. Otro modelo que actualmente las industrias usan en el proceso de secado, son los secadores rotatorios ofreciendo beneficios como una mejor aireación al sólido y transferencia de calor entre el aire caliente y el material a secar.

***Intercambiador de calor**

En la mayoría de procesos industriales ocurre que el calor de un fluido debe ser transferido a otro, para esto se utilizan los intercambiadores de calor; que son equipos que permiten la transferencia de calor de un (gas o líquido) a otro. Los intercambiadores de calor son utilizados por las siguientes razones:

- Calentar un fluido frío mediante con ayuda de un fluido de mayor temperatura y viceversa (disminuir un fluido con otro de menor temperatura).
- Llevar a un fluido hasta su punto de ebullición, a través del paso de un fluido con mayor temperatura.

- Condensar un fluido en estado gaseoso por un fluido de menor temperatura

La transferencia de calor ocurre mediante el contacto térmico de las paredes metálicas que separan a los fluidos.

Tipos de intercambiador de calor

Según su construcción

Carcasa y tubo

Consiste en un conjunto de tuberías que se encuentra dentro de un contenedor llamado carcasa. El fluido de las tuberías que se encuentran en el interior se denomina fluido interno, y aquel que fluye por la carcasa es llamado fluido exterior. El líquido con mayor presión normalmente es el que circula a través de los tubos, mientras el de menor presión por la carcasa.

Placas

Consiste en utilizar placas en vez de tuberías para separar los fluidos. Estos fluidos se alternan entre cada una de las placas y los baffles dirigen el fluido entre las placas, estas proveen un área extremadamente grande de transferencia térmica a los fluidos.

Con respecto a los intercambiadores de calor tubo y carcasa, el intercambiador de placas posee mayor eficiencia.

Según su operación

Flujo paralelo

El flujo interno (tubos) y el flujo externo (Carcasa) ambos fluyen a la misma dirección. Los dos fluidos entran al intercambiador de calor por el mismo extremo. El fluido con mayor temperatura cede calor al fluido de menor temperatura para alcanzar el equilibrio térmico entre ellos, pero el fluido con menor temperatura nunca alcanza la temperatura del fluido caliente.

Contra flujo

Consiste en hacer pasar dos fluidos a la misma dirección, pero en sentidos opuestos. Cada uno de los fluidos entran al intercambiador de calor por diferentes extremos. Resulta ser más eficiente que los otros tipos de intercambiador de calor, debido a que puede presentar una temperatura más alta en el fluido de frío y la más baja temperatura en el fluido caliente.

Flujo Cruzado

Consiste en el paso de los fluidos de manera perpendicular; uno de los fluidos pasa a través de la tubería mientras el otro fluido pasa por dichos tubos formando un ángulo de 90° . Son usados cuando uno de los fluidos presenta un cambio de fase, un ejemplo es en los sistemas de condensación

de vapor, donde el vapor que sale de un equipo entra como flujo externo a la carcasa del condensador y el agua fría que fluye absorbe el calor que el vapor sede, haciendo que el vapor se condense.

Aplicaciones del intercambiador de calor

En muchos sistemas mecánicos o químicos, los intercambiadores de calor sirven para ganar o expeler calor de un proceso determinado. Entre las aplicaciones más comunes están en sistema de calentamiento, ventilación, acondicionamiento de espacios, radiadores en máquina de combustión interna, calderas, condensadores y pre-calentadores o enfriamiento de fluidos.

Dimensionamiento de la sección del secador (tambor)

Las dimensiones del tambor fueron definidas partiendo de la capacidad de remoción de agua teórica disponible, siendo el punto de partido el vapor de la caldera.

La capacidad con la que trabaja la caldera es de 15 BHP (Boiler HorsePower); con base en el factor de 1 BHP igual a 34,5 lb/h, la caldera produciría teóricamente un flujo máximo de 517 libras de vapor por hora. Para el diseño del tambor se considera un consumo máximo del 50% de dicho flujo másico, es decir 258 libras por hora.

En la tabla 4 se detalla las características de la caldera utilizada para las prácticas de secado:

Tabla 4 Especificaciones técnicas de la caldera

Tipo de caldera	Pirotubular Vertical
Temperatura de vapor saturado	75 °C
Potencia de motor	2.2 Hp
Capacidad	15 BHP
Marca	Thermocon
Modelo N°	69308
Serial N°	1 ½ SR
Diámetro exterior de los tubos	1"
Números de tubos	40
Presión de trabajo	Hasta 100 PSI
Presión de operación	50 PSI
Tipo de combustible	Diésel
Amperaje	7.7 A
Consumo de combustible (Máx. Carga)	4,6 gal/h
Voltaje	120 V
Año de fabricación	2010
Numero de pasos	3

Material de los tubos	ASTM A-312-T304L
------------------------------	------------------

Una vez fijado el flujo de vapor de la caldera, se aplica el balance de energía respectivo en los sistemas vapor-aire (calentador) y aire-material húmedo (secador). La transferencia de calor se realiza mediante el contacto térmico de las paredes metálicas que separan a los fluidos. Al ingresar el vapor al calentador inicia su contacto con el aire a través de los tubos, cediendo su calor lo que resulta en un aumento de temperatura en el aire. Para calcular el calor transferido tenemos la siguiente ecuación:

$$Q_{VAPOR} = Q_{aire}$$

$$Q_{aire} = (m_{vapor} * \lambda_{vapor})$$

Donde:

m_{vapor} = Flujo masico del vapor (Kg/seg)

λ_{vapor} = calor latente de vaporización (KJ/ kg)

Q_{aire} = Calor del aire (KJ/seg)

El valor de calor latente es definido mediante tablas de vapor, con base en la la temperatura de saturación correspondiente a la presión de 64,7 PSI (presión manométrica + presión atmosférica).

Se listan a continuación condiciones y parámetros de operación requeridos de acuerdo a la tecnología de secado de café indicada en la literatura.

$$m_{vapor} = 117 \text{ kg/h}$$

$$\lambda_{vapor} = 2118,98 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$T_{aire ambiente} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{aire salida del calentador-entrada al tambor} = 64 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{aire salida del tambor} = 52 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$1.007 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg K}}$$

$$T_{café cereza al ambiente} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{café cereza durante el secado} = 53 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_{agua} = 2324 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$cp_{agua} = 4,84 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg * k}}$$

$$\text{Lambda}_{agua} = 2324 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$\rho_{aire} = 1,16 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Una vez obtenidos todos los valores y considerando un factor de eficiencia del 80% para la caldera, se procede a calcular el calor del aire con la **ecuación 3.1**

$$Q_{aire} = (m_{vapor} * \lambda_{vapor}) * e$$

$$Q_{aire} = \left(117 \frac{Kg}{h} \left(\frac{1 h}{3600 seg} \right) * 2118,98 \frac{KJ}{Kg} \right) * 0,8$$

$$Q_{aire} = 55,08 KJ/seg$$

Una vez obtenido de manera analítica la energía disponible por parte del aire, despejamos ahora el flujo másico de aire correspondiente:

$$Q_{aire} = \dot{m}_{aire} * cp_{aire} * \Delta T$$

$$\dot{m}_{aire} = \frac{Q_{aire}}{cp_{aire} * \Delta T}$$

$$\dot{m}_{aire} = \frac{55,08 KJ/seg}{1.007 \frac{KJ}{Kg K} * (64 - 30)k}$$

$$\dot{m}_{aire} = 1,25 kg/seg$$

El balance de energía en el secador relaciona el flujo de aire caliente y el material húmedo, este último cede parte de su contenido de agua, proceso que es promovido por el calor cedido por el aire. A continuación, se detallan cálculos para la estimación del flujo de agua retirada del material húmedo.

$$Q_{aire} = Q_{agua}$$

$$Q_{aire} = m_{agua}\lambda_{agua} + m_{agua}c_{p_{agua}}\Delta T$$

$$m_{agua} = \frac{\dot{m}_{aire} * c_{p_{aire}} * \Delta T}{(\lambda_{agua} + c_{p_{agua}}\Delta T)}$$

$$m_{agua} = \frac{1,25 \text{ kg/s} * 1.007 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg K}} * (64 - 52)}{(2324 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + (4,84 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg * k}} * (55 - 23)K)}$$

$$m_{agua} = \frac{0,00609 \text{Kg}}{s} = 21,95 \frac{\text{kg}}{h}$$

Para obtener los kilos de material húmedo iniciales se definen las siguientes consideraciones:

- Humedad Base seca del material húmedo (%Hbs) = 150% (De acuerdo a datos promedio en café cereza húmeda).
- El flujo de agua retirado corresponde al 100% de contenido inicial de agua en material a procesar, es decir, al finalizar el secado el sólido queda totalmente seco ((%Hbs = 0).

$$m_{s.h.} = m_{s.s.} + m_{agua.} \text{ Ecuación 3.5}$$

Se calcula la masa del sólido seco:

$$\%Hbs = 150,0\%$$

$$\dot{m}_{s.s.} = \frac{21,95 \text{ Kg Agua}}{1,5 \frac{\text{Agua}}{\text{kgss}}}$$

$$\dot{m}_{s.s.} = 14,64 \text{ Kg ss}$$

Reemplazando el valor de la masa seca en la Ecuación 3.5, obtenemos la cantidad de masa inicial requerida del material húmedo.

$$m_{s.h.} = 14,63 \text{ kg ss} + 21,95 \text{ kg Agua}$$

$$m_{s.h.} = 36,58 \text{ Kg}$$

Se calcula el volumen de sólido:

$$v_s = \frac{m_{s.h.}}{\rho_s}$$

$$v_s = \frac{36,58 \text{ Kg}}{650 \text{ kg/m}^3}$$

$$v_s = 0,0562 \text{ m}^3$$

La velocidad de rotación recomendada es de 8-15 RPM y el porcentaje de carga de material húmedo de 12 al 40% del volumen total disponible (del tambor). Partiendo del valor máximo de carga recomendado, obtenemos que el volumen del cilindro es de $v_c = 0,141 \text{ m}^3$.

Finalmente calculamos longitud referencial del tambor, partiendo de un diámetro fijado de 0,50 cm el diámetro, cumpliendo con lo indicado por Perry en el Manual del ingeniero Químico (valor comprendido entre 1 y 10 pies).

$$V_c = \Pi r^2 * L$$

$$L = \frac{0,141m^3}{\Pi(0,25)^2}$$

$$L = 0,71 \text{ m}$$

Considerando un factor de seguridad del 25%, se define una longitud de 1 metro, diámetro de 0,50 metros, resultando en un volumen total de 0,20 m^3 aproximado.

Se define una altura de estructura de base del equipo mínima de 50 cm, de tal manera que permita un fácil acceso a sus secciones para la operación del equipo.

Nota: Remitirse al Anexo III, para los cálculos de área de transferencia de calor y número de tubos del intercambiador de calor (Calentador).

Capítulo 5

Construcción y pruebas en el equipo

Secuencia de construcción del equipo

Como fue indicado en el capítulo anterior, se separó el equipo en 3 secciones principales: (1) Calentador, (2) Ventilador, (3) Tambor. Adicionalmente, se debe considerar la instalación del sistema eléctrico para accionamiento de los motores - (4) Sistema eléctrico / panel de control, dispuesto a una altura de 1,60 metros de tal manera que permita su cómodo acceso.

La construcción inició con la sección no. 3, partiendo de la adquisición de material nuevo para la construcción del tambor y el ducto de salida de aire. Se seleccionó planchas de acero inoxidable de 2mm de grosor, considerando el tipo de material húmedo a procesar. Posteriormente se avanzó con la búsqueda e identificación de rodamientos, chumaceras, ventilador y motores (todo de “segunda mano”) que cumplan con los requerimientos del proceso estipulado – sección no. 2.

Se selecciona un motorreductor de 3 HP de corriente trifásica, voltaje 220 V para el ventilador centrífugo y un motor de 1HP Monofásico, voltaje 220 V para el tambor rotativo.

Paralelamente se coordinó la re-construcción de un equipo de intercambiador de calor (calentador – sección no 1) tipo tubular que permita calentar aire ambiente con recurso de vapor de caldera según lo estipulado en el diseño del equipo.

Como paso final, previo a la instalación en el laboratorio, se revisó y confirmó con un técnico especialista en el tema, los requerimientos adicionales necesarios para la instalación eléctrica (Sección no. 4).

***Instalación**

Para la instalación del equipo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias se revisó el área disponible, tomando en consideración el espacio requerido (Medidas mínimas referenciales de acuerdo: 2 metros de longitud x 1,20 metros de ancho x 2 metros de alto) y la disponibilidad de los servicios requeridos (vapor y fuente eléctrica).

A continuación, se presenta el área seleccionada para la instalación física del equipo, la cual fue revisada y aprobada por el Ing. Carlos Balladares en calidad de Profesor designado como encargado del laboratorio.

Figura N.- 14 Área seleccionada para la instalación del equipo



El equipo fue colocado de tal manera que (1) el ingreso de vapor al intercambiador de calor (calentador) coincida con el sentido de la línea principal disponible de distribución en el laboratorio, (2) la salida de condensado pueda ser descargada directamente al drenaje del laboratorio y (3) la salida del aire del tambor con la sección más próxima hacia el exterior de las instalaciones.

Posteriormente se realizó la conexión de ingreso de vapor al calentador, proveniente del manifold de distribución, y la instalación eléctrica de los 2 motores con los que cuenta el equipo.

Figura N.- 15 Instalación del secador rotatorio



***Detalle de costos**

Costo de construcción

Se procede a detallar el listado de los materiales utilizados para la construcción del secador rotatorio con sus respectivos costos:

Tabla 5 Listado de materiales para la construcción del equipo

Calentador			
Artículo – Descripción	Cantidad	Costo unitario (US\$)	Costo (US\$)
Intercambiador de calor	1	600	600
Tubería de hierro negro cédula 40 para transporte de vapor	0,70 metros	40	28
Trampa de vapor	1	220	220
Válvula de bola	2	40	80
Aislamiento térmico de tubería*	0,70 metros	25	17,5
		Sub-total	945,50 USD
Ventilador			
Ventilador centrífugo + motor de 3HP Trifásico* + expansor de aire	1	800	800
Sensor de temperatura	1	60	60
Válvula mariposa	1	40	40
		Sub-total	900,00 USD
Tambor			
Tambor y ducto de salida de aire (plancha de acero inoxidable 2mm espesor, medidas 180mmx180mm)	1	243	243
Moto-reductor de 1HP, monofásico	1	150	150
Chumacera	2	100	200
Rodamiento y junta rotativa	2	80	160
Eje	1	220	220
Sensor de temperatura	1	60	60
Base del tambor - Estructura de (material)	1	200	200
Recipiente colector del producto seco	1	10	10
		Sub-total	873,00 USD

Sistema Eléctrico			
Breaker RIEL DIN 2X20 A (10 KA)	1	7,5	7,5
Breaker RIEL DIN 3X20 A (10 KA)	1	13	13
Rele térmico 9-13 A	1	25,27	25,27
Contactador (22A - 220 V)	1	23,99	23,99
Riel Din	1,0 metro	1,5	1,5
Luz piloto 22 MM 220 V Amarillo	1	1,1	1,1
Prensa Estopa 13,5 MM	2	0,15	0,3
Prensa Estopa 16 MM	2	0,198	0,396
Cable concéntrico 3x14	3,0 metros	0,9	2,7
Cable concéntrico 4x14	4,0 metros	1,16	4,64
Cable concéntrico 4x12	12,0 metros	1,77	21,24
Pulsador doble (On - Off)	2	20	40
Pintura Spray Plata	1	1,87	1,87
Luz piloto LED 22 MM 220 V verde	1	1,3	1,3
Gabinete 30x30x20	1	26	26
Cable no. 18 AWG	15,0 metros	0,40	6
		Sub-total	176,81 USD
		TOTAL	2.895,31 USD
*Equipos y materiales donados			
Proceso de fabricación e instalación			
Fabricación	1	400	400
Montaje (Transporte e instalación)	1	175	175

Valoración total construcción e instalación del equipo: \$3.470,31.

Total pagado (Inversión): \$2.952,81.

Velocidad y Tiempo de secado

Velocidad de secado

La velocidad de secado es la pérdida de humedad que sufre un sólido a medida que avanzan el tiempo, el proceso de secado se lo realiza en condiciones constantes, es decir que las propiedades como: Temperatura, presión, humedad, y velocidad del aire utilizado para este proceso debe ser constante durante el tiempo. La velocidad de secado se divide en dos periodos (Julian C. Smith, 2007):

1. Período constante o antecrítico
2. Período decreciente o postcrítico

Velocidad de secado constante

En esta fase, un líquido cubre totalmente la superficie del sólido y la evaporación dependerá de la velocidad de difusión del vapor o la intensidad o de la intensidad del calor a través de la capa límite del aire. Este segmento se lo represente como:

$$w_c = K_y(Y_i - Y) \text{ (Ecuacion 2.0)}$$

Donde:

K_y = coeficiente de transporte de materia

Y_i = Humedad en la interfase

Y = humedad en el seno del aire

Velocidad de secado decreciente

Este período se divide en dos tramos:

- La velocidad de secado varia linealmente con la humedad a partir del punto crítico
- La velocidad de secado no cumple la variación lineal, aunque puede no aparecer esta separación neta entre ambos tramos.

En el primer tramo, la velocidad de secado está dada por la evaporación del agua sobre la una parte de la superficie mojada, la cual va disminuyendo continuamente hasta secarse al final del periodo.

Para calcular la velocidad de secado en este tramo se lo representa por:

$$W = W_C - \frac{X_C - X}{X_C - X_F} (W_C - W_f) \text{ (Ecuación 2.1)}$$

En el segundo tramo de este período la superficie del sólido está totalmente seca y la velocidad de secado se evalúa tomando en consideración el proceso de transporte de humedad que va desde el interior del sólido hasta la superficie, se lo puede realizar por diversos mecanismos; en el caso de ser por difusión, la velocidad de secado está dada por la siguiente expresión:

$$W = \frac{\pi^2 \gamma D}{4Z} (X - X^*)$$

Tiempo de secado

El tiempo de secado de un sólido húmedo se la obtiene mediante la integración entre las humedades iniciales y finales:

$$\theta = \frac{S}{A} \int_{X_f}^{X_i} \frac{dx}{W} \text{ (Ecuación 2.3)}$$

Capítulo 6

Pruebas experimentales

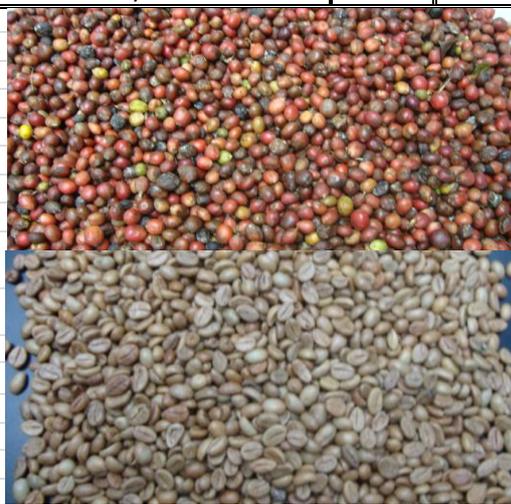
Caracterización del material húmedo a secar (café cereza)

El producto seleccionado para procesar es el café cereza, considerando la necesidad y potencial de su aplicación en la agricultura nacional, la cual demanda un procesamiento del grano una vez cosechado.

A continuación, se presenta un análisis de caracterización de la muestra seleccionada para las pruebas de secado (Se tuvo acceso a muestras de café cereza de la zona de Bucay, provincia de Chimborazo, cosechadas durante Julio del 2016).

Tabla 6 Análisis de la caracterización de la muestra café cereza del año 2016

Calidad	ROBUSTA TROPICAL							
Origen	BUCAY							
Fecha de recepción	17/07/2016							
Fecha de secado	29/07/2016							
Tiempo de secado (Días)	13							
ANÁLISIS EN CEREZA HÚMEDA		Peso inicial (Cereza Húmeda)		120				
Maduras	95.50%	Peso final (cereza seca)		53.64	KILOS			
Verdes	3.70%	Diferencia de peso (Agua retirada)		66.36				
Pintonas	0%	Peso café pilado		32.31				
Secas	0.60%	Rendimiento (Cereza seca a café pilado - verde)		1.66				
Materias Extrañas	0.20%	Rendimiento (Cereza húmeda a café pilado - verde)		3.71				
TOTAL	100.00%							
Densidad (g/l)	604							
ANÁLISIS CAFÉ PILADO (Verde)								
Humedad	10.3							
Densidad	756							
Enteros verdes	96.3							
Total defectos	3.7							
Granulometría		No. de Malla	18	17	16	14	13	Fondo
		%	13.1	17.7	27.6	37.9	3.1	0.6



- Rendimiento obtenido de conversión (por pilado) de café cereza a café verde es de 0,6024.
- El precio actual de venta actual de cereza seca húmeda de producción nacional puede variar de \$14-30/qq, sujeto primordialmente a factores como el nivel de mercado, disponibilidad del producto, demanda anual, calidad del grano, entre otros.

Resultados Obtenidos

Análisis Psicrométrico - Prueba de secado parcial (22/09/2016)

Tabla 7 Propiedades del aire la entrada del radiador

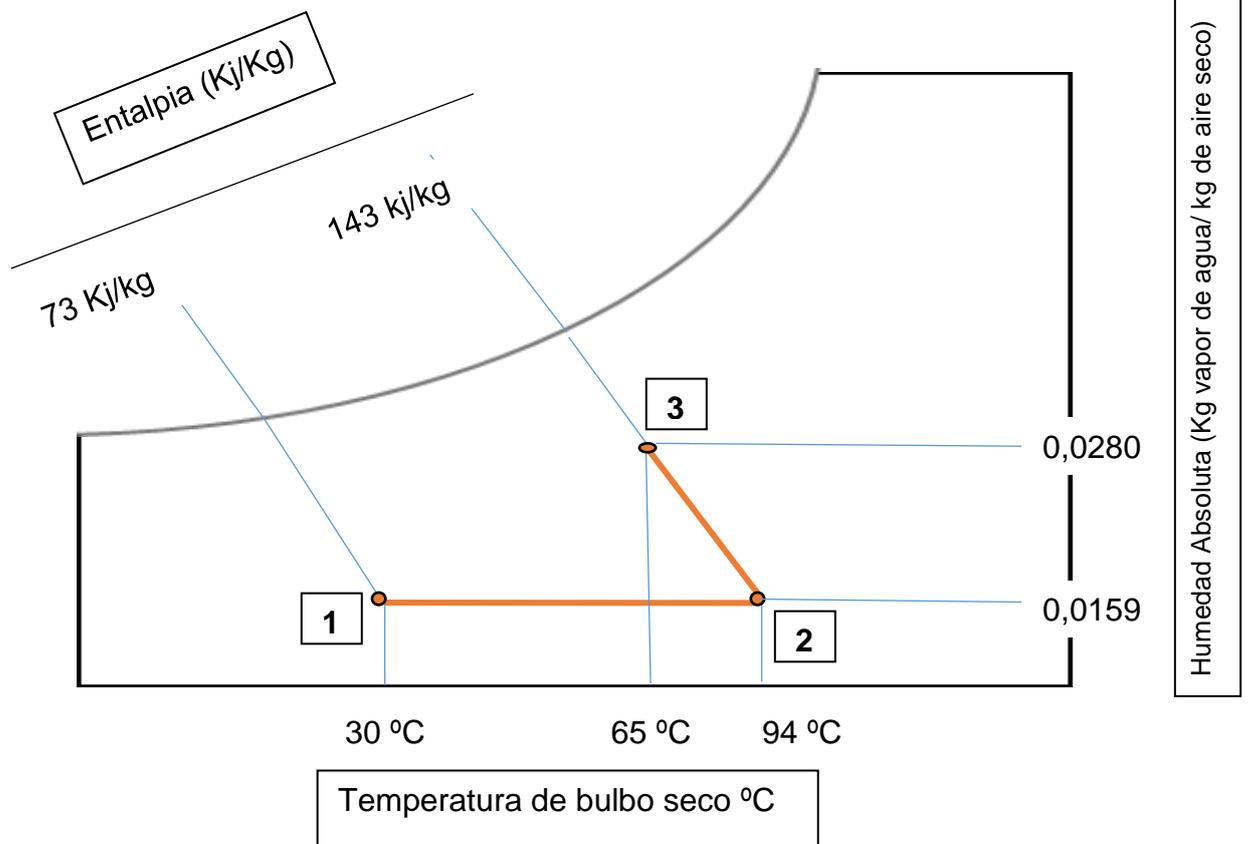
Temperatura bulbo seco (ts1)	30.5 °C
temperatura bulbo húmedo (tw1)	24 °C
Humedad absoluta (Y1)	0,0159 kg de vapor/Kg de aire seco
Entalpia especifica (h1)	73 KJ/ kg de aire seco

Tabla 8 Propiedades del aire a la salida del radiador

Temperatura bulbo seco (ts2)	94 °C
temperatura bulbo húmedo (tw2)	37 °C
Humedad absoluta (Y2)	0,0159 kg de vapor/Kg de aire seco
Entalpia especifica (h2)	143 KJ/ kg de aire seco

Tabla 9 Propiedades del aire a la salida del secador

Temperatura bulbo seco (ts3)	65 °C
temperatura bulbo húmedo (tw3)	37 °C
Humedad absoluta (Y3)	0,0280 kg de vapor/Kg de aire seco
Entalpia especifica (h3)	143 KJ/ kg de aire seco



Cálculo del flujo másico del aire

Tabla 10 Áreas de las secciones del secador

Área del tambor	0.196 m ²
Área de la chimenea	0.031 m ²

Velocidad del aire dentro del tambor.

$$Q_{Tambor} = Q_{chimenea}$$

$$V_t * A_t = V_c * A_c$$

$$V_t = \frac{V_c * A_c}{A_t}$$

$$V_t = \frac{1.6 \frac{m}{s} * 0.031 m^2}{0.196 m^2}$$

$$V_t = 0.25 m/s$$

Flujo másico de aire

$$Q_t = 0.049 \frac{m^3}{s} = 176.4 \frac{m^3}{h}$$
$$\dot{m}_a = 176.4 \frac{m^3}{h} * 1.16 \frac{kg}{m^3} = 204.6 \frac{kg}{h}$$

Balance de masa

Experimental

Tabla 11 Datos de la cantidad de agua removida

Masa inicial de la muestra	9.5 kg
Masa final de la muestra	6.5 kg
Masa de agua retirada	3 kg

Análisis Teórico

$$m_{agua\ r.} = (\Delta y * m_{aire})$$

$$m_{agua\ r.} = \left(0,0280 - 0,0159 \right) \frac{kg_{v.a}}{kg_{a.s.}} * 204.6 \frac{kg_{a.s.}}{h}$$

$$m_{agua\ r.} = 2.5\ kg_{agua}$$

Balance de energía Radiador

- Cálculo de la masa de vapor

$$Q_{1-2}$$

$$m_v * \lambda_v = m_{aire} * (\Delta h_{aire})$$

$$m_v = \frac{m_{aire} * (\Delta h_{aire})}{\lambda_v}$$

$$m_v = \frac{204.6 \frac{kg_{a.s}}{h} * (70) \frac{Kj}{kg_{a.s}}}{2118 \frac{Kj}{kg_v}}$$

$$m_v = 6.76 \frac{kg_v}{h}$$

Experimentalmente se recuperó durante una hora un total de 6,5 kg de condensado, representando una diferencia porcentual del 3,8% en comparación con el valor analítico.

- Cálculo del Calor entregado por el vapor

$$Q_v = m_v * \lambda_v$$

$$Q_v = 6.76 \frac{kg_v}{h} * 2118 \frac{Kj}{kg_v}$$

$$Q_v = 14322 \frac{Kj}{h}$$

Secador

$$Q_a = m_{aire} * (\Delta h_{aire})$$

$$Q_a = 204.6 \frac{kg_{a.s}}{h} * (Q_{sen} + Q_{lant}) \frac{Kj}{kg_{a.s}}$$

$$Q_a = 204.6 \frac{kg_{a.s}}{h} * (65) \frac{Kj}{kg_{a.s}}$$

$$Q_a = 13299 \frac{Kj}{h}$$

Calor por radiación

$$Q_r = Q_v - Q_a$$

$$Q_r = 14322 - 13299$$

$$Q_r = 1023 \frac{Kj}{h}$$

Eficiencia

Entonces la eficiencia es:

$$e = \frac{Q_{removido\ secador}}{Q_{entrada\ del\ aire}} * 100$$

$$e = \frac{13299 \frac{Kj}{h}}{14322 \frac{Kj}{h}} * 100$$

$$e = 92.85 \%$$

Tiempo de secado

Prueba de secado completo (t=60°C)

Tiempo de secado experimental.

Tabla 12 Datos adicionales del secador y solido a secar

Peso inicial del solido	28 Kg
Humedad en base húmeda	60%
Humedad en base seca	150%
Área de secado	0,196 m ²

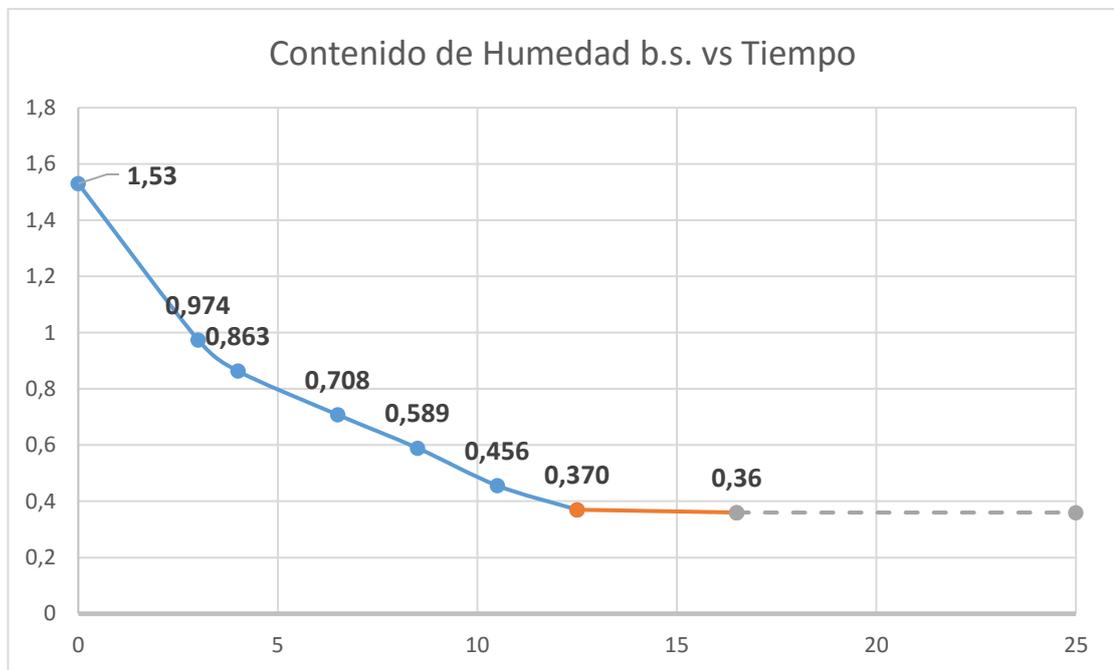
Tabla 13 Resultados de humedad retenida durante tiempo de secado

Fecha (toma de muestra)	Horas de secado (h)	Tiempo (acumulado)	Humedad b.s.
Martes 23-Ago	0	0	1,53
martes 23-Ago	3	3	0,974
Miércoles 24-Ago	1	4	0,863
Miércoles 24-Ago	2,5	6,5	0,708
Jueves-25-Ago	2	8,5	0,589
jueves-25-Ago	2	10,5	0,456
Tiempo total de secado (h)	10 h 30 min		

Tabla 14 Cálculos de velocidad de evaporación, velocidad de secado

Tiempo (seg)	Delta t(seg)	Masa de solido + agua(g)	Cantidad de agua evaporada	Velocidad de Evaporación (g/s)	N(g/m ² *seg)	1/N
0	0	28000	0	0	0	0
10800	10800	20500	7500	0,694	3,543	0,282
14400	3600	19000	1500	0,417	2,126	0,470
23400	9000	16900	2100	0,233	1,190	0,840
30600	7200	15300	1600	0,222	1,134	0,882
37800	7200	13500	1800	0,250	1,276	0,784

Figura N.- 16 Contenido de Humedad bs vs Tiempo



Tiempo de secado Teórico

Tiempo de secado constante

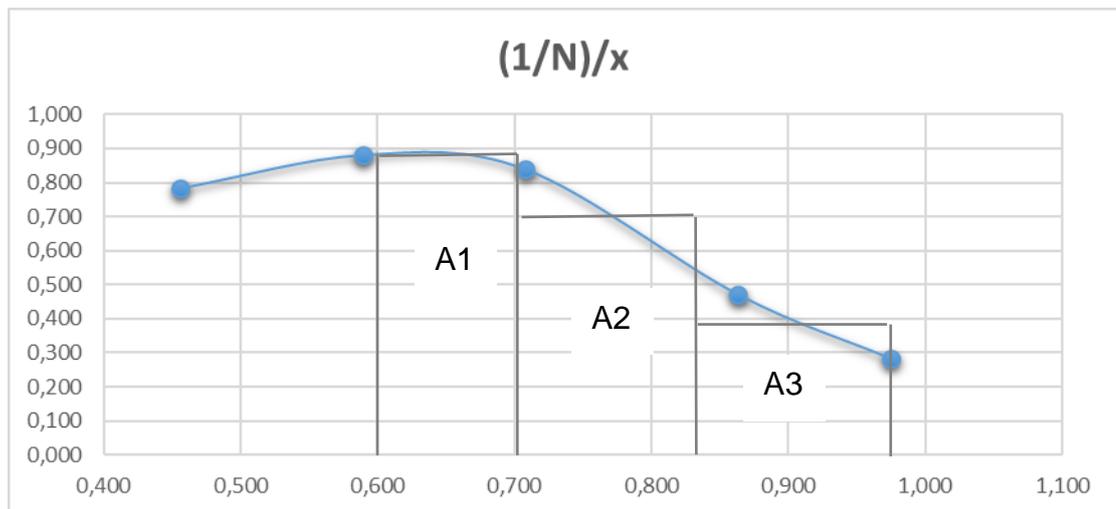
$$\theta = \frac{S}{A} \int_{x_c}^{x_i} \frac{dx}{Nc}$$

$$\theta = \frac{S}{A} \frac{(X_i - X_c)}{N_c} = \frac{11088}{0,196} * \frac{(1,53 - 0,45)}{1,27} = 47200 \text{ seg}$$

Para calcular la velocidad de secado constante, realizamos el promedio de los valores parecidos.

Tiempo de secado decreciente

Figura N.- 17 Curva (1/N)/x



$$\theta d = \text{área bajo la curva} * \frac{SS}{A}$$

$$\theta d = \frac{11088}{0,196} (A3 + A4 + A5)$$

$$\theta d = \frac{11088}{0,196} (0,089 + 0,092 + 0,0585)$$

$$\theta d = 13548,85$$

Tiempo total de secado

Tiempo total = tiempo de secado constante + tiempo de secado decreciente

$$\theta t = 47200 + 13548,85$$

$$\theta t = 60748 \text{ seg} = 16 \text{ h } 30 \text{ min}$$

Costos totales

Los costos totales corresponden a los gastos generados por la operación de secado durante cada lote de producción. Incluye a:

- Costos de producción: Correspondiente a los costos generados por la operación del equipo de secado para el procesamiento de un lote y los relevantes a los servicios complementarios, como el vapor suministrado por la caldera, y los costos que conllevan su producción (para el secado de un lote). Para el presente trabajo este rubro se encuentra considerado dentro de los costos de producción.
- Costos de material: Para el proceso de secado hace referencia al valor del producto a secar (carga de material húmedo: café cereza utilizada por cada lote).

*Costo de construcción del equipo corresponde al rubro de inversión inicial.

NOTA: Se toma como referencia la prueba no. 1 -> El lote de producción de 9,5 kilos de carga de material húmedo, a ser secados durante 3 horas para obtener 6,5 kg aproximadamente de material seco.

Costo de producción

$$\text{Costo de producción (\$/lote)} = \text{Costo eléctrico operación (\$)} + \text{Costo consumo combustible (\$)}$$

Para calcular el costo total de operación, se considera una operación individual del secador, es decir como el único equipo del laboratorio en consumir recurso proporcionado por la caldera. Se detalla a continuación el total de HP, producidos durante el tiempo de secado.

Tabla 15 Total de caballos fuerza producido durante el secado.

	Cantidad	Unidad
potencia total Equipo	4	HP
Potencia total Caldera	2,2	HP
Potencia total	6,2	HP

Obtenido el total de caballos fuerzas, realizamos la conversión a KW-h para calcular el costo durante el tiempo total de operación del equipo. Conocemos que 1 Hp es igual a 0,746 KW, entonces la potencia total con la que se trabaja en cada práctica de secado es 4,62 KW.

El costo eléctrico por operación es igual a la potencia total obtenida anteriormente por el tiempo de operación y el costo de energía, entonces:

$$C_{op} = [P (\text{kW})] \times [\text{Tiempo Op}] \times [\text{Costo energía (\$/kw - h)}] \text{ Ecuación 4.0}$$

En la ciudad de Guayaquil el consumo de Kw-h es de \$0,09 aproximadamente y el tiempo de secado fue de 3h (remitirse a los detalles definidos para el Lote de producción), se calcula la ecuación 4.0:

$$C_{op} = 4,62 \text{ (kW/h)} * 3 \text{ h/lote} * 0,09 \text{ (\$/kW)}$$

$$C_{op} = \underline{\$1,24 / lote}$$

$$C_{op} = \underline{\$0,13 / \text{kg café cereza húmeda}}$$

Costo de consumo del combustible

$$\text{Costo consumo combustible (\$/lote)} = [\text{Costo Combustible (\$/gal)}] \times$$
$$[\text{Consumo combustible (gal / h)}] \times [\text{Tiempo Op}]$$

$$\text{Costo consumo combustible (\$/lote)} = [1,03 \text{ (\$/gal)}] \times [0,60 \text{ (gal / h)}] \times [3$$
$$\text{ h/lote}]$$

$$\underline{\text{Costo consumo combustible (\$)} = \$1,85 / lote}$$

$$\underline{\text{Costo consumo combustible (\$)} = \$0,195 / \text{kg café cereza húmeda}}$$

Costo de producción (total)

$$\text{Costo de producción (\$/Kg)} = \text{Costo eléctrico operación (\$)} + \text{Costo consumo combustible (\$)}$$

$$\text{Costo de producción} = \$ 0.33 / \text{Kg café cereza}$$

$$\text{Costo de producción} = \$ 3.09 / \text{lote}$$

Costos por materiales

$$\text{Costo de carga material húmedo (\$)} = [\text{masa material húmedo (kg / lote)}] \times [\text{Costo cereza húmeda (\$ / qq)}] \text{ Ecuación 4.1}$$

$$\text{Costo de carga material húmedo Robusta (\$/lote)} = \$3,35/\text{lote}$$

$$\text{Costo de carga material húmedo Arábica (\$/lote)} = \$5,44/\text{lote}$$

Tabla 16 Costo total del proceso de secado y Beneficio Económico

Costo de operación + costo de combustible	\$3,09
Costo total / Lote Robusta	\$6,45
Costo total / Lote Arábica	\$8,55
Ganancia bruta (\\$/lote Robusta)	\$26,90
Ganancia bruta (\\$/lote Arábica)	\$32,27
Ganancia neta (\\$/lote Robusta)	\$20,44
Ganancia neta (\\$/lote Arábica)	\$23,72

NOTA: Se considera para la conversión de café cereza seca a café verde pilado un factor de 1,66 con base en la muestra analizada. Se calcula entonces una producción por lote procesado de café verde de hasta 8,13 kilos aproximados (por lote) de café verde limpio. Se utilizan precios de venta del productor de \$140/qq para el Robusta y \$180/qq para el Arábica (\$3,30/kg Y \$3,90/kg respectivamente). Para la Ganancia neta no se consideran costos de depreciación ni inversión inicial (Se requiere procesar un total de 145 lotes de Robusta = 1373 kilos para recuperar la inversión inicial).

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Se determinó el tiempo de secado teórico para el secado de café cereza húmeda, y fue comparado con el valor experimental, presentando apenas una diferencia de 16,42% lo cual permite decir que el proceso se lleva a cabo bajo condiciones estables controladas.

Se corroboran los valores obtenidos análisis psicométrico con base en los resultados experimentales de las pruebas realizadas. Se obtiene porcentaje de eficiencia del 92,85%.

Se comprueba experimentalmente que con un cilindro rotatorio de acero inoxidable (“cámara de secado”), con inyección de aire ambiente calentado mediante un intercambiador de calor alimentado con vapor de caldera, se logró reducir el contenido de humedad (base seca) del café cereza de 150% a 15.5% aproximadamente operando el equipo durante un periodo de 10 horas 30 minutos, manteniendo un buen rendimiento de conversión de café cereza seca a café verde. Mediante proceso de trillado a la muestra seca obtenido se obtiene un rendimiento de 0,60 (café pergamino = 0,60 x Café cereza seca; vs. El valor estándar de 0,5 definido por la OIC – ver Conversiones en el capítulo no. 1).

Es importante indicar que el tiempo de ciclo debe ser ajustado dependiendo de las características iniciales del material húmedo a secar.

Para fines didácticos se realizó también una prueba corta de secado “parcial”, fijando la temperatura inicial de entrada del aire al tambor en 94°C, permitiendo remover un total de 3 kilos de agua de una carga inicial de material húmedo de 9,5 kilos durante un periodo de secado de 3 horas, lo cual representaría una reducción del contenido de humedad en base seca de 125% a 51% (siendo el objetivo: 14,5%). Se certifica mediante análisis psicométrico los procesos ocurridos de transferencia de masa y energía durante el secado y la eficiencia del calentador de aire.

En términos generales, es posible mejorar el rendimiento del proceso de secado ya sea por aumento de temperatura del aire de secado o aumentando su caudal de ingreso a la cámara. Para nuestro caso particular, la primera opción no resulta problemática considerando la capacidad del calentador y el flujo de vapor disponible de la caldera del laboratorio, en resumen, no habría inconvenientes en aumentar la capacidad de secado. Con respecto al segundo punto, el motor del ventilador permite alimentar hasta 4 veces más el caudal utilizado en las prácticas, aunque aquí es imperativo evaluar en qué punto un caudal elevado presenta pérdidas en eficiencia y se vuelve económicamente no compatible con el equipo (por su alto consumo de energía). Adicionalmente se debe considerar las características intrínsecas del producto a procesar, es decir, bajo qué condiciones de operación sus

propiedades y características físico-químicas y organolépticas se degradan a una categoría irreversible.

Para el caso del café, el arábica en mayor nivel que el robusta, varias fuentes indican que temperaturas de aire de secado mayores a 70°C causan en la cereza degradación física, resultando en la aparición del defecto de cristalización (grano quebradizo), lo cual representa un impacto negativo directo en su rendimiento de conversión a grano verde limpio.

Otra propiedad fundamental del café que pudo ser evaluada de las muestras tratadas fue la taza, calificada con base en perfil de aroma, sabor cuerpo y acidez, apreciado mediante degustación del producto. No se detectó notas de degradación por fermentación o “sobre-secado”, comunes en café cuyo beneficio no haya sido controlado adecuadamente (por condiciones de operación, factores ambientales, higiene de los materiales, instalaciones en contacto con el producto, tiempo del proceso, etc).

De manera análoga, es posible declarar que el equipo cuenta con las condiciones para procesamiento de diversos tipos de productos granulares tales como el cacao, nueces, macadamia, pimienta, diversos tipos de semillas como la lenteja, entre otros-. Claro está, ajustando las condiciones de operación específicas requeridas de cada producto.

Recomendaciones

- Para asegurar una inherente calidad en los productos procesador en el secador, es necesario mantener una investigación permanente y evaluación continua de alternativas de operación y/o unidades complementarias que favorezcan la eficiencia del proceso.
- Aprovechamiento / Recuperación del calor: El equipo libera al ambiente el aire utilizado en cilindro de secado, aire que aún cuenta con poder calorífico (temperatura relativamente alta, mayor a 50°C, y en estado no de saturado). Es importante indicar que una alternativa para mejorar el aprovechamiento del calor y en términos generales la eficiencia en la etapa del secado principalmente, este flujo de aire podría ser recirculado para que (1) ingrese al calentador nuevamente o (2) directamente al ventilador, o (3) actué como medio de pre-calentamiento de la carga inicial (material húmedo), o al menos traspasar su aprovechamiento a algún otro equipo del laboratorio que lo requiera.
- Evitar que el café se rehumedezca durante el ciclo de secado, pues afectará el rendimiento de la operación y promoverá la degradación físico-química y organoléptica del grano.
- Asegurar una inyección de aire constante en términos de velocidad y temperatura.

- No almacenar el producto seco mientras se encuentre aún caliente, es necesario dejarlo reposar (etapa enfriamiento) para evitar problemas de calidad.
- Minimizar lo más posible la presencia de materia extraña en la carga a secar, tales como: piedras, palos, hojas, tierra, etc.
- Procurar que la carga a utilizar (en caso de ser recién cosechada) esté libre de cualquier insecto vivo o muerto.

Bibliografía

- Agricultura, S. d. (2012). *Ministerio de agricultura, ganadería, acuicultura y Pesca*. Obtenido de <http://www.agricultura.gob.ec/magap-ejecuta-proyecto-de-reactivacion-de-la-caficultura-ecuatoriana/>
- Aguiar, C. M. (2015). *Repositorio Espol*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/31960>
- B., R. (1980). *Coffee Production*. Hamburg: Gordian-Max-Rieck.
- café, E. s. (2013). *ProEcuador*. Obtenido de http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2013/05/PROEC_AS2013_CAFE.pdf
- Colombia, F. N. (2010). *Cafe de colombia*.
- D.R., k. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor*. Mexico : Continental.
- F. Castaño, F.R. Rubio y M.G. Ortega. (2009). Modelo de secadores Rotatorios en isocorriente. *Revista Ibeoamericana de Automatica e informatica Industrial*, 32-43.
- Faust, A. S. (2006). *Principio de operaciones Unitarias* . Mexico : Cecsa.
- Friedman, S. a. (1949). Studies in rotary drying. *American Institute of chemical engineers*, 484-573.
- INEN. (2006). *Public Resource*. Obtenido de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0285.2006.pdf>
- Intelectual, I. E. (18 de Julio de 2014). *Propiedad Intelectual*. Obtenido de <http://www.propiedadintelectual.gob.ec/ecuador-con-aroma-de-cafe/>
- Internacional, C. d. (Febrero de 2011). *Intracen*. Obtenido de <http://www.intracen.org/guia-del-cafe/el-comercio-mundial-del-cafe/Conversiones-y-estadisticas/>
- inversiones, I. d. (s.f.). Obtenido de ProEcuador: <http://www.proecuador.gob.ec/compradores/oferta-exportable/cafe/>
- Jose Garcia, F. F. (2004). *Cofenac*. Obtenido de <http://cofenac.org/documentos/Estudio-Calidad-Cafes-Robustas.pdf>
- Julian C. Smith, P. H. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Mexico: McGraw Hill.

- Lavazza, L. (2016). *Lavazza*. Obtenido de <http://www.lavazza.com/csa/coffee-passion/our-coffee/production/>
- M., S., & Desrosier, N. (1979). *Coffee Technology*. Connecticut: AVI Publishing Company .
- Moyers, C. (1997). Psychrometry, Evaporative cooling and solids drying. En R. Perry, *Perry's chemical Engineers Handbook* (págs. 25-90). New York: Mc Graw-Hill.
- Organization, I. C. (2016). *ICO*. Obtenido de http://www.ico.org/ES/field_processingc.asp
- Perry. (1980). *Manual del Ingeniero Químico* . Mexico : Union Tipografica .
- R.J., C., & R., M. (1987). *Coffee technology Vol. 2*. London: Elsevier Applied Science Publishers.
- Warren, M. (1991). *Operaciones básicas de Ingeniería Química*. Ed McGraw-Hill.

ANEXO I

Manual de operación Secador rotatorio de café

1. Introducción

El presente manual describe el equipo de secado instalado en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química - FCNM-ESPOL (“Secador rotativo piloto tipo batch para granos”). El equipo fue diseñado específicamente para el procesamiento de café, sea en presentación café cereza húmeda, café pergamino húmedo o café verde.

Todos los materiales y artículos utilizados en el equipo obedecen requerimientos funcionales y de seguridad como chumaceras, válvulas, poleas, otros. La simplicidad en su operación, tornan a este equipo un ejemplar destacable para el estudio e investigación del proceso de secado de café cereza.

2. Características Técnicas

2.1 Secciones del equipo

El equipo se encuentra compuesta de 3 secciones principales: Calentamiento, Ventilación, Tambor rotativo, más un panel de control eléctrico.

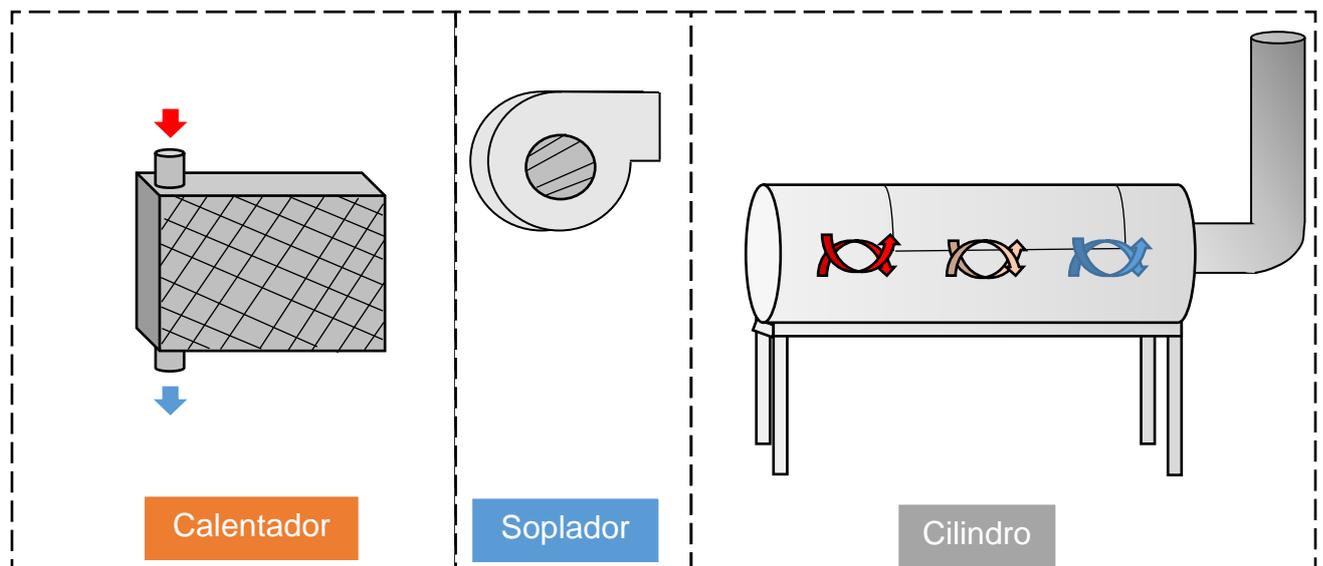
Sección N.-1. Calentamiento: Consiste básicamente en la transferencia de calor hacia el fluido que promoverá posteriormente la operación de secado.

Corresponde a un intercambiador de calor que calentará el aire ambiente, mediante el uso de vapor.

Sección N.-2. Ventilación (tipo centrífugo): Renueva el aire que está en contacto con el sólido mediante una corriente de aire caliente forzada. Promueve el paso de aire ambiente a través del intercambiador y su inyección en el cilindro rotatorio.

Sección N.-3. Tambor rotatorio y salida de aire: Tambor que favorece el íntimo contacto sólido-aire mediante rotación sobre su eje (cuenta además en su interior con paletas mezcladoras dispuestas en su sentido longitudinal para promover el correcto volteo del producto). El aire del tambor es liberado al ambiente por medio de un ducto de salida.

Figura N.- 18 Diseño primario de las diferentes secciones de un secador rotatorio tipo Batch



Peso total del equipo: 300 kilos

2.2 Producción

El equipo de secado rotatorio fue diseñado para procesar café cereza húmeda o pergamino húmedo por ciclo, considerando el ciclo de operación como el periodo de tiempo necesario para alcanzar el contenido de agua en base seca requerido por la Industria para su correcto almacenamiento y posterior uso (14-14,5% aproximadamente); ya sea para exportación o procesamiento en café soluble.

NOTA: El secador fue diseñado para procesar, en términos generales, cualquier material sólido granular húmedo que requiera una capacidad de secado elevada para retirar altos contenido de humedad. Entre los productos que se pueden citar están los siguientes: cacao, maíz, nueces, macadamia, lentejas, entre otros.

2.3 Ciclo de operación (secado)

Tiempo de ciclo y condiciones de operación pueden ser ajustadas dependiendo de las características iniciales y carga total del material húmedo. Las etapas del ciclo de operación se detallan a continuación:

Etapa	Tiempo
Acondicionamiento del tambor (cámara de secado) (Temperatura de operación de secado)	1 minuto
Ingreso de carga	1 minuto
Secado	3 horas
Enfriamiento	5 minutos
Descarga	2 minutos
TIEMPO TOTAL	3 horas 9 minutos

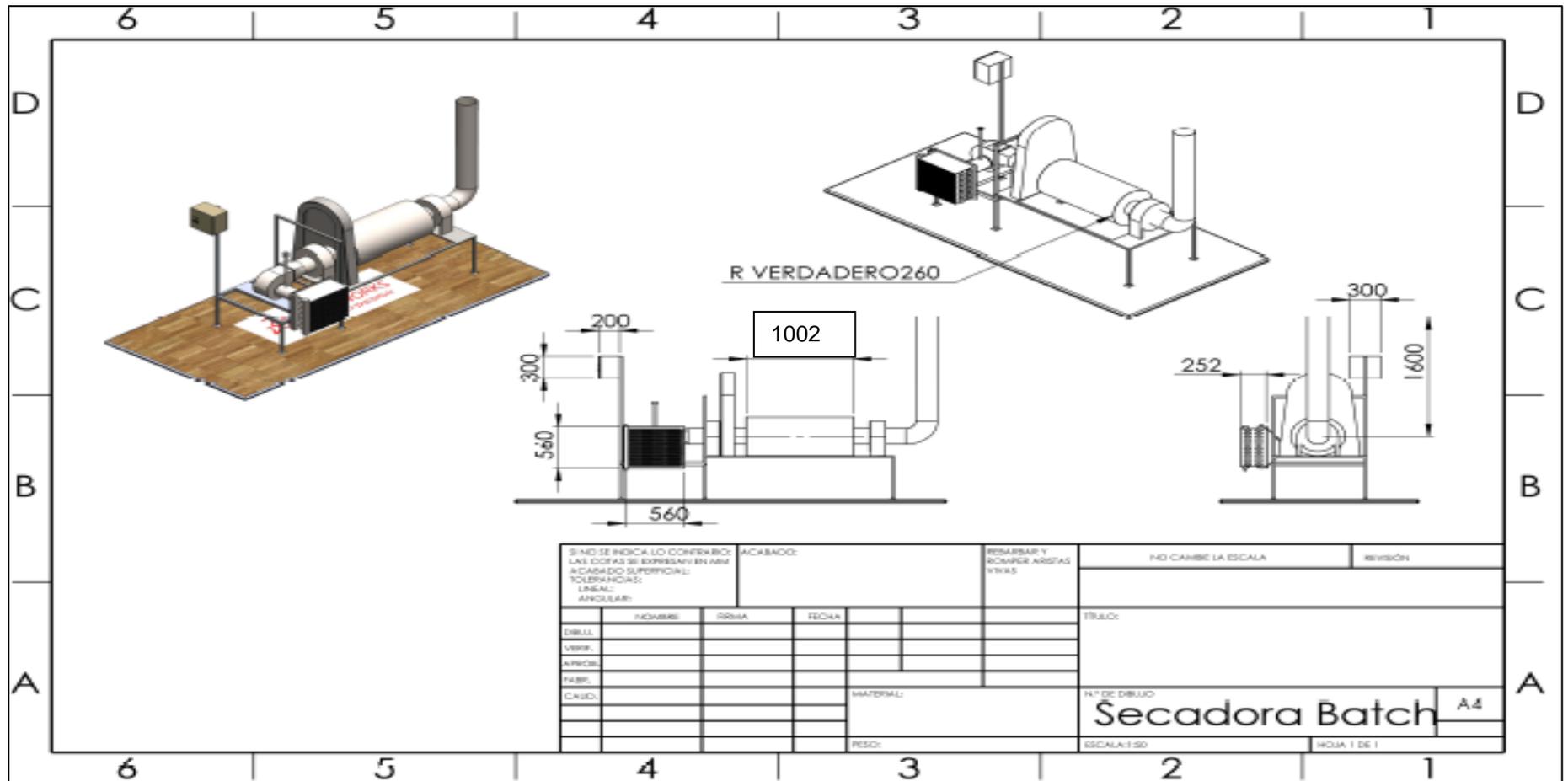
2.4 Motores

La potencia total de los motores que integran el secador es de 4 HP, los cuales están distribuidos como sigue:

Sección	Potencia (HP)
Motor del ventilador (220 V Trifásico)	3,00
Motor del tambor (220 V Monofásico)	1,00

2.5 Modelado del secador

Figura N.- 19 Modelado del tambor a diferentes ángulos



Panel de Control

- Botonera del motor monofásico del tambor: Pulsador doble con luz piloto verde.
- Botonera del motor trifásico del tambor: Pulsador doble con luz piloto amarillo.

3. Condiciones de operación

Para alcanzar la humedad definida para el procesamiento y posterior almacenamiento de una carga inicial de 10 kg de café cereza húmeda, se requiere un tiempo de secado mayor a 5 horas, frente a lo cual se definió un tiempo estimado de máximo 3 horas de operación permitiendo así su estudio y práctica en los cursos de la carrera de Ingeniería Química. El contenido en base seca esperado es de 34% aproximadamente, partiendo de un material húmeda con 120% de contenido de humedad en base seca. La temperatura del aire que ingresa al tambor debe ser de 95°C con una velocidad entre 0,5-3 m/s (Rotación del cilindro fijada en: 12 RPM).

- Carga de material húmedo: 10 kilos netos
- Contenido de humedad inicial estimado: 120-140% BS
- Temperatura de ingreso de aire al tambor: 94°C
- Velocidad del aire: 0,2-3 m/s).

4. Instrucciones de operación

Previo a cualquier operación se debe verificar que el reglamento de higiene y seguridad del laboratorio haya sido revisado.

Mano de obra requerida para operación: 1 persona.

Se inicia la operación mediante la inspección e identificación de las distintas secciones del secador (calentador, ventilador y cilindro rotatorio), junto con el panel de control eléctrico y los servicios complementarios (aire ambiente y vapor de caldera).

A continuación se detallan las siguientes etapas de operación.

4.1 Acondicionamiento de la cámara de secado.

- Se debe verificar que el interior del cilindro se encuentre limpio y vacío.
- Se comprueba funcionamiento de los 2 motores del equipo.
- Se enciende caldera del laboratorio.
- Se abre la válvula principal de ingreso de vapor en el calentador.
- Se enciende el motor del ventilador y se regula mediante el damper la velocidad de inyección de aire en el cilindro (haciendo uso de un anemómetro para fijar la velocidad en un valor determinado). Se registra ese instante como el tiempo (0).

4.2 Descripción del ciclo de secado en el equipo

Ingreso de carga

- Tan pronto se alcance la temperatura de aire deseada de ingreso al cilindro, mediante manejo de la apertura de la válvula mariposa, se procede a cargar el material húmedo por la compuerta del cilindro (Carga que ha sido previamente caracterizada y medida). Una vez cargado se procede con el arranque del motorreductor y se registra el tiempo de inicio de la etapa de secado.

Secado

- Las temperaturas y humedades de ingreso y salida del tambor deben ser verificadas y registradas a lo largo del ciclo de secado para asegurar que el proceso ocurra de manera estable y controlada, de acuerdo a los parámetros deseados & posteriormente poder realizar los cálculos respectivos.
- Se recomienda tomar muestras cada 15-20 minutos de operación (frecuencia mínima establecida para corridas de 4 horas) para determinación de contenido de humedad y paralelamente la temperatura y condiciones del interior del cilindro. Considerar un muestreo y análisis por duplicado para asegurar veracidad de los

datos y poder eliminar datos en caso de que se presente una desviación.

- El condensado liberado por el calentador puede ser recolectado para evaluación del consumo de vapor y eficiencia del equipo procurando alterar las condiciones lo menos posible

Enfriamiento y descarga

- Para finalizar la etapa de secado se procede a cerrar la válvula de ingreso de vapor al calentador y se inicia la etapa de enfriamiento (se registra tiempo), mediante apertura progresiva de la válvula mariposa y, de ser necesario, mediante aumento en el flujo de aire del ventilador.
- Una vez que la temperatura del interior del cilindro regrese al valor inicial se inicia con la descarga y almacenamiento del producto (se registra el tiempo).
- Se registra peso del producto recolectado y se calcula el agua removida.

NOTA: Una alternativa de operación del sistema es someter a la carga húmeda a un proceso de pre-secado natural, colocando a los granos bajo el sol durante algunos días reduciendo así su contenido de agua previo a su ingreso en el secador, permitiendo así que mediante el secado mecánico de 3 horas se logre alcanzar el contenido de humedad en base

seca requerido para la exportación y por la industria para su procesamiento y/o almacenamiento (14,5% base seca).

5. Ciclo del aire

5.1 Circulación de aire caliente y aire frío

Durante la fase de secado, el aire caliente que sale del calentador es inyectado en el tambor rotatorio por medio de un ventilador, y es liberado al ambiente por el ducto de salida.

6. Mantenimiento preventivo

Se presenta a continuación las actividades de mantenimiento que deben ser ejecutadas con base en la frecuencia indicada para prevenir cualquier tipo de anomalía que pueda presentar el equipo y reducir la probabilidad y grado de daño físico al operador.

- a) Inspeccionar el panel eléctrico: Abra la puerta del panel eléctrico y verifique las condiciones internas del panel de comando cada 720 horas. Verificar luces led del panel. Toda limpieza o reparos deben ser hechos con la llave eléctrica general desligada.
- b) Cada 24 horas de operación: Limpiar interior del cilindro y verificar que las mallas de ingreso y salida del cilindro estén desobstruidas.

- c) Limpiar tolva de descarga de producto: Limpiar cada 24 horas de uso, el área interna de la tolva de descarta y también las paredes laterales.
- d) Inspeccionar y verificar estado de los motores y reductor.
- e) Revisar el rotor del ventilador cada 500 horas de operación.
- f) Lubricación de los rodamientos: Verificar y lubricar chumaceras cada 300 corridas de secado.

*Todo mantenimiento debe quedar debidamente registrado para futura referencia / revisión.

NOTA: ES IMPORTANTE NOTAR QUE TODO REPARO Y LIMPIEZA DEL QUIPO DEBEN SER HECHOS SOLO CON LA LLAVE GENERAL DEL TABLERO APAGADA.

ANEXO II

Modelado del secador rotativo en diferentes vistas

Figura N.- 20 Secador rotativo vista posterior

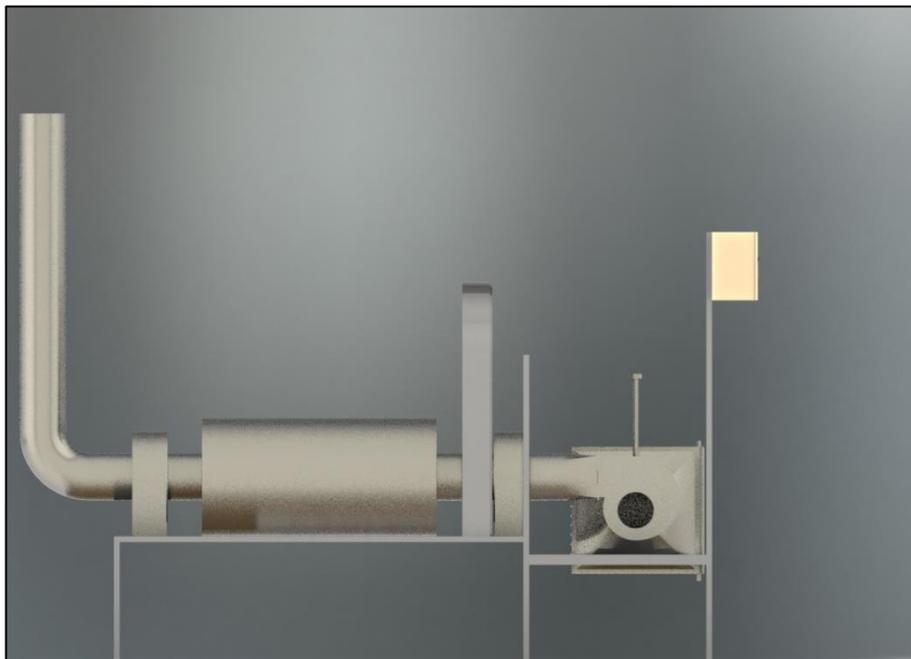


Figura N.- 21 Secador rotativo vista derecha

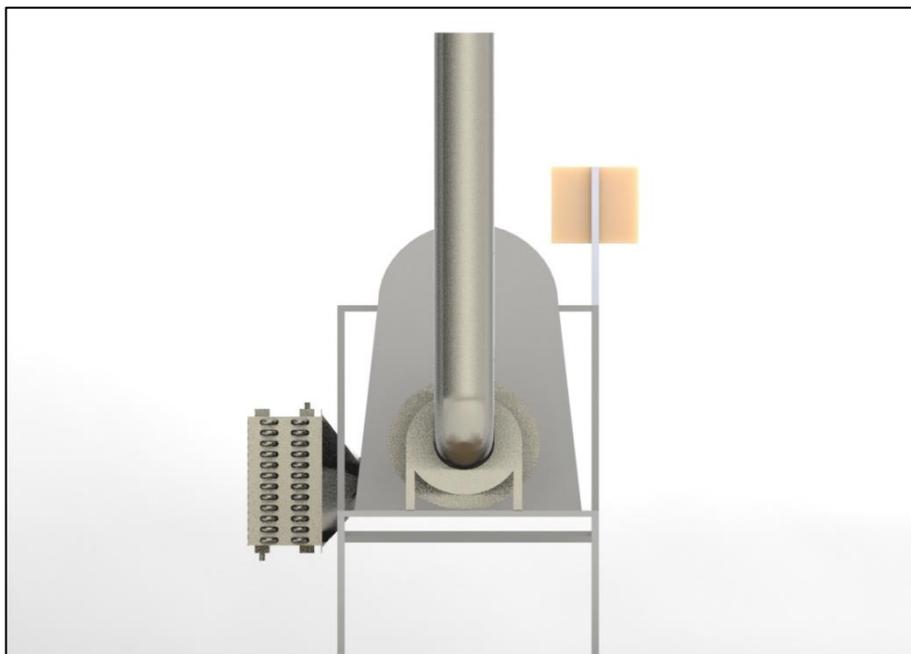


Figura N.- 22 Secador Rotativo vista Frontal

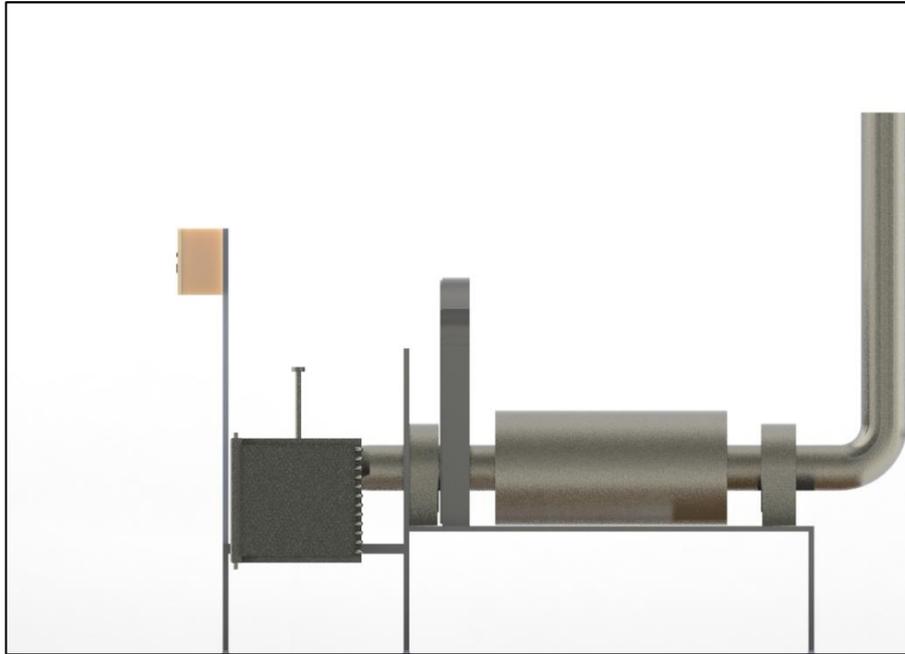
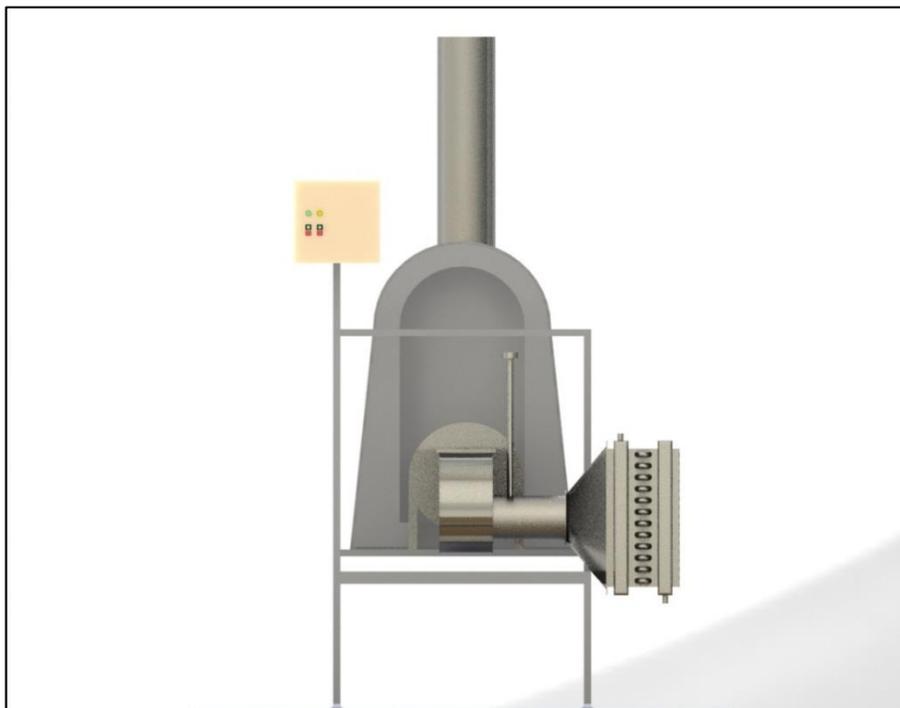


Figura N.- 23 Diseño del secador rotativo vista izquierda



ANEXO III

Cálculos de área de transferencia y número de tubos

Para el cálculo del área de transferencia se utilizará la siguiente expresión:

$$Q= A*U*MDLT*Ft$$

Donde

Q= Es el calor del aire (J/s)

U= coeficiente de calor del aire (J/s*°C*m2)

A= área de transferencia

Se procederá a detallar en las tablas N.-12 y 13 las propiedades del aire a la entrada y salida del intercambiador.

Tabla 17 Propiedades del aire al inicio del intercambiador de calor

Temperatura de entrada bs (t1)	30 °C
temperatura de entrada bh	24 °C
Humedad absoluta	0,0158 kg de vapor/Kg de aire seco
Entalpia especifica	75 KJ/ kg de aire seco

Tabla 18 Propiedades del aire a la salida del intercambiador de calor

Temperatura de salida bs (t2)	62 °C
temperatura de salida bh	32 °C
Humedad absoluta	0,0158 kg de vapor/Kg de aire seco
Entalpia especifica	110 KJ/ kg de aire seco

Tomando en cuenta que para calentar el aire se utilizara el vapor proveniente de la caldera a 50 psia; considerando que el vapor de la caldera es saturado, mediante el uso de las tablas de vapor se obtiene:

Presión	4,4 atm
Temperatura de saturación	147,1 °C
Entalpia	2120 Kj/ kg de aire seco
Volumen especifico	0,41 m3/kg

La media logarítmica (MLDT) se calcula en función del arreglo de las corrientes. El flujo del radiador a usar será de tipo cruzado, Como el fluido a condensarse es vapor caliente, el factor de corrección toma el valor de 1. Por tanto la MLDT sería:

$$MDLT = \frac{(T - t2) - (T - t1)}{\ln\left(\frac{(T - t2)}{(T - t1)}\right)}$$

$$MDLT = 99,13$$

Para conocer el calor transferido por el vapor hacia el aire se realiza el balance de calor para el aire:

$$Q = m_{\text{aire}} \cdot \Delta h$$

$$Q = 42,1 \text{ KJ/s}$$

El valor del coeficiente de calor (284 J/s*m2*°C) se establece mediante la figura N.-24, que muestra el U de acuerdo a los fluidos.

Figura N.- 24 Coeficiente Global de transferencia de calor de acuerdo a los fluidos

Fluido Caliente	Fluido Frío	Coeficiente "U"	
		W/m ² °C	BTU/h pie ² °F
ENFRIADORES			
Agua	Agua	1420-2840	250-500
Metanol			
Amoniaco			
Soluciones Acuosas		426-851	75-150
Sustancias Orgánicas Ligeras		283-710	50-125
Sustancias Orgánicas Medias		28-426	5-75
Sustancias Orgánicas Pesadas		11.35-284	2-50
Gases	Agua	568-1136	100-200
Agua	Salmuera	227-568	40-100
Sustancias Orgánicas Ligeras ¹¹	Salmuera	110-140	20-25
Fondos de Vacío	Agua	230	40
Gasóleo Pesado	Agua	630	110
DEA Regenerada	Agua		
CALENTADORES			
Vapor de Agua	Agua	1136-3975	200-700
	Metanol		
	Amoniaco		
	Soluciones acuosas $\mu < 2cP$	568-2839	100-500
	Soluciones acuosas $\mu > 2cP$	284-568	50-100
	Sustancias Orgánicas Ligeras	568-1136	100-200
	Sustancias Orgánicas Medias ¹²	34-340	6-60
	Sustancias Orgánicas Pesadas ¹³	28-284	5-50
	Gases		

$$A = \frac{Q}{(U * M * DLT * Ft)}$$

$$A = 1,52 \text{ m}^2$$

Para calcular el número de tubo se considera:

Tabla 19 Dimensiones de la tubería

Tipo de material: Cobre 5/8

Longitud por tubo	0,55 m
Numero pasos	4
Diámetro exterior	0,019 m

$$A = \pi * L * De * nc * nt$$

$$nt = A / (\pi * L * De * nc)$$

$$nt = 11,05$$

Por factor de seguridad se trabajará con 12 tubos.

ANEXO IV

Resultados de análisis de las muestras de corrida de secado parcial mediante método ISO 6673

Fecha de entrega de muestra	08/09/2016
Fecha de análisis	09/09/2016
Laboratorio	Departamento de Control de Calidad, ELCAFÉ CA
Tipo de muestra	Café cereza
Método	ISO 6673

Porcentaje de contenido de agua en cereza húmeda										
Muestra no.	Tiempo (h)	Peso cápsula (g)	Peso muestra (g)	Peso total inicial (g)	Peso total final (g)	Agua removida (g)	Hum (BH)	Hum (BH) - Prom	Hum (BS)	Hum (BS) - Prom
1	0	94,24	10,00	104,24	98,97	5,27	52,69%	52,30%	111,37%	109,64%
		94,20	10,03	104,22	99,02	5,20	51,90%		107,91%	
2	1	90,39	10,01	100,41	96,11	4,30	42,96%	43,12%	75,30%	75,81%
		95,49	10,00	105,49	101,16	4,33	43,28%		76,31%	
3	2	84,83	10,01	94,84	90,86	3,97	39,72%	39,19%	65,90%	64,46%
		91,81	10,00	101,82	97,95	3,87	38,66%		63,03%	
4	2,5	95,51	10,01	105,52	101,83	3,69	36,90%	35,56%	58,47%	55,25%
		94,32	10,00	104,32	100,90	3,42	34,23%		52,04%	
5	3	92,42	10,02	102,43	99,17	3,26	32,57%	33,53%	48,30%	50,47%
		96,14	10,01	106,15	102,70	3,45	34,48%		52,63%	
6	3,5	94,65	10,01	104,65	101,82	2,83	28,33%	28,67%	39,53%	40,19%
		93,04	10,02	103,07	100,16	2,91	29,00%		40,85%	

Anexo V Tabla Psicométrica Prueba realizada el 22/09/2016

FIGURA 3
GRAFICO PSICROMETRICO
 ALTAS TEMPERATURAS
 PRESION ATMOSFERICA
 101,325 kPa

