



Reporte Final de Estadía

FLORENCIO SALVADOR COCOTLE OLTEHUA

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO
DE AGLOMERACIÓN DE
POLVOS FINOS DE CAFÉ**



Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz

Programa Educativo

Ingeniería en Procesos Bioalimentarios

Reporte para obtener título de
Ingeniero en Procesos Bioalimentarios

Proyecto de estadía realizado en la empresa
Café Tostado de Exportación S.A. De C.V.

Nombre del proyecto

“Optimización del proceso de aglomeración de polvos finos de café”

Presenta

TSU. Florencio Salvador Cocotle Oltehua

Cuitláhuac/, Ver., a 19 de abril de 2018.



Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz

Programa Educativo
Procesos Bioalimentarios

Nombre del Asesor Industrial
Ing. Ramón Adrián López

Nombre del Asesor Académico
MCIQ. María Esther Alonso Palacios

Jefe de Carrera
MCIBQ. Darney Citlali Martínez Díaz

Nombre del Alumno
TSU. Florencio Salvador Cocotle Oltehua



AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la oportunidad de existir, aquí y ahora; por mi vida gracias por iluminarme, darme fuerzas y guiarme por tu sendero.

A mis Padres, por apoyarme en todo momento, por su dedicación, por los valores inculcados. Sobre todo por ser ejemplo de arduo trabajo.

A mis hermanos por ser parte importante de mi vida y representar la unidad familiar especialmente a mi hermana por llenar mi vida de alegrías y amor cuando más lo he necesitado.

A mi familia, tíos y primos, porque de una u otra forma, con su apoyo me han motivado a seguir adelante, a lo largo de toda mi vida.

A la Universidad tecnológica del centro de Veracruz, y a mis estimados maestros, que, a lo largo de mi carrera, me han transmitido sus amplios conocimientos.

Al gerente de producción por brindarme su apoyo incondicional y darme la oportunidad de ser miembro de la empresa.

RESUMEN

El presente proyecto se realizó en la empresa café tostado de exportación en la etapa de aglomeración de polvos finos de café, donde el principal problema es la adhesión de las partículas finas a las paredes del equipo que disminuye el rendimiento del producto terminado y la eficacia del proceso, es seguimiento de un proyecto anterior pero ahora basado en técnicas experimentales y estudio más a fondo con el objetivo de optimizar las variables incidentes y los parámetros operacionales.

En este trabajo se implementaron dos diseños experimental factorial 2^3 , para evidenciar el efecto de algunos parámetros de operación en el crecimiento de partículas sólidas, evaluando dos propiedades fisicoquímicas: la dureza y el porcentaje de aglomerado. El primer diseño factorial fue de tres factores (parámetros de operación) con dos niveles en 8 corridas para 4 tipos de productos, en el segundo diseño los factores estuvieron definidos en las propiedades iniciales de las partículas sólidas, así mismo se empleó un diseño de bloques completamente al azar para determinar la significancia de la concentración de azúcares sobre el porcentaje de adhesión. Se aplicó un análisis de varianza con un nivel de significancia del 5% a los resultados experimentales para las pruebas de hipótesis. Posteriormente se evaluaron las condiciones de presión del sistema, flujo de aire, humedad relativa y el rendimiento en diversos tipos de productos mediante un monitero que abarco varios lotes de producción, finalmente se procedió al balance de materia y energía para cuantificar la cantidad de aire y calor necesario para eliminar toda la humedad, así como la determinación de las eficiencias térmicas del equipo.

Mediante el diseño experimentos se encontró que el aumento de dos factores: temperatura de salida y el tamaño de partícula influyen en el bajo porcentaje de aglomerado así como el incremento en la dureza por que el granulo aglomerado presenta fragilidad y una cantidad de polvos finos. En el diseño por bloques se determinó que la concentración de azúcares de los cafés no tiene efecto significativo, tomando como muestra patrón un producto sin concentración que también presento adhesión en las tres repeticiones. Durante el monitoreo los sólidos aglomerados a condiciones de bajo vacío con humedad relativa del aire baja no presentaron adhesión, mientras que los producto a condiciones de vacío alto con humedades por encima de 60% tuvieron mayor adhesión, en el balance de materia se observó que una humedad relativa alta en la salida del equipo necesita mayor calor y cantidad de aire de entrada para ser eliminado, así mismo mediante las eficiencias térmicas se evaluó el sistema en una carta psicométrica encontrándose que hay pérdida de calor en la cámara de secado al no ser un sistema adiabático, por lo que la optimización del proceso solo fue parcial enfocándose a las condiciones del aire de entrada y salida que mantuvieron un vacío de 0.4 In/H₂O mediante el control de estas variables el rendimiento mejoró en un promedio del 96 % .



Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Estado del Arte	2
1.2 Planteamiento del Problema.....	6
1.3 Objetivos	6
1.3 Definición de variables	6
1.5 Hipótesis.....	7
1.6 Justificación del Proyecto	7
1.7 Limitaciones y Alcances.....	8
1.8 La Empresa	8
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	10
2.1 Elección de los factores y los niveles	10
2.2 Selección de la variable de respuesta.....	10
2.3 Elección del diseño experimental	10
2.4 Realización del diseño de experimentos.....	10
2.5 Monitoreo de los flujos de aire, humedad relativa y presión del sistema	10
2.6 Análisis de datos.....	10
2.7 Análisis de los efectos de los parámetros operacionales	11
2.8 Aplicación del balance de materia y energía.....	11
2.9 Optimización del proceso	11
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL PROYECTO	12
3.1 Equipo experimental	12
3.2 Monitoreos.....	12
3.3 Diseño de experimentos	12
3.4 Realización del diseño de experimentos.....	14



3.5 Análisis de datos.....	15
3.6 Balance de materia energía	15
3.7 Optimización	17
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	18
4.1 Resultados.....	18
4.2 Conclusiones.....	26
4.3 Trabajos Futuros	26
4.4 Recomendaciones	26
ANEXOS	27
Anexo 1. Equipo aglomerado	27
Anexo 2 .Carta psicométrica	28
Anexo 3. Cálculos de velocidad lineal, caudales de aire y volumen del equipo.....	29
Anexo 3.Cálculos de balance de materia y energía.....	31
Anexo 4.Calculo de eficiencias térmicas.....	33
BIBLIOGRAFÍA	34

Índice de tablas

Tabla	Descripción	Página
1	Tratamientos del diseño por bloques al azar	12
2	Factores y niveles del Diseño factorial 2^3	13
3	Corridas experimentales del diseño 2^3	13
4	Diseño de bloques completamente al azar	14
5	Análisis de varianza de dos factores con una sola muestra por grupo	23
6	Análisis de Varianza para dureza - Suma de Cuadrados Tipo III	23

Contenido de figuras

Figura	Descripción	Página
1	Diagrama de flujo del balance del aglomerador	16
2	Grafica de efectos normales para el café soluble ABCD	18
3	Grafica de interacción para café soluble A	19
4	Grafica de interacción para café soluble B	19
5	Grafica de interacción para café soluble C	19
6	Grafica de interacción para café soluble D	19
7	Grafica de efectos normales para dureza del café regular	20
8	Grafica de interacción para dureza del café regular	20
9	Grafica de efectos normales para porcentaje de aglomerado	20
10	Grafica de interacción para porcentaje de aglomerado del café regular	20
11	Grafica de dispersión de la presión del sistema	21
12	Grafica del vacío vs porcentaje de adhesión	21
13	Gráfico de humedad relativa del aire	22
14	Grafico anova para dureza	24
15	Grafica de rendimientos con flujo de aire de 900 rpm a 1100 rpm.	25

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de aglomeración han existido desde hace varios años con el fin de acondicionar físicamente diferentes tipos de materiales y para diferentes propósitos, como es el caso de la palatización del mineral de hierro, que es realizada en las siderurgias. Por su parte en la industria farmacéutica y en la producción de algunos alimentos como el café soluble, los productos lácteos, entre otros, la aglomeración de partículas finas tiene gran aplicación ya que permite obtener gránulos de mayor tamaño con una estructura de poros abiertos, a fin de poder absorber líquidos y facilitar la dispersión inmediata lo permite obtener un producto de alta dispersabilidad, fluidez, segregación, densidad, fragilidad, etc. (Wolfgang , 2008).

La aglomeración es un proceso que promueve el incremento de tamaño del sólido (gránulo) mediante la adhesión de partículas pequeñas (sólidos finos) sobre otra partícula de mayor tamaño por la acción de un líquido ligante en un sistema que presentan dos zonas: la zona de aspersión, que es el área donde el líquido aglomerante tiene el primer contacto con las partículas finas que colisionan entre sí, formando puentes líquidos que al evaporarse dan lugar a enlaces sólidos donde los finos se adhieren a los gruesos (Kumar & Ramkrishna, 1997). Y la zona de dispersión, que es el área donde se mezclan con aire caliente para el secado. Para llevar a cabo esta operación se emplean diversos equipos en su mayoría granuladores de lecho fluidizado, mezcladores y secadores de lecho fluido. (Litster J. , 2003).

Actualmente puede observarse como una combinación de tres diferentes mecanismos: humectación y nucleación, consolidación y coalescencia, atrición y rompimiento. El aumento del tamaño de partículas es un término genérico que engloba las operaciones unitarias relacionadas con la tecnología de materiales pulverizados, de medios granulares y la mecánica de sólidos. (Litster & Bryan, 2004).

La aglomeración depende de la naturaleza física del sistema partícula sólida-líquido aglomerante, y de las variables asociadas al equipo. De esta forma, es importante controlar dichos parámetros operacionales dado que una mala relación entre estos traería problemas en la operación.

1.1 Estado del Arte

El proceso de aglomeración ha sido estudiado y analizado por varias décadas, el diseño y análisis de tales sistemas permanece enraizado al empirismo debido a que no hay una metodología para el diseño y operación de tales procesos, así mismos las plantas industriales donde se llevan a cabo procesos de granulación y secado por aspersión han enfrentado una serie de problemas relacionados con la pegajosidad de las partículas inertes a las paredes de los diversos equipos empleados incluyendo: razones de reciclado, pobre control en la calidad del producto obtenido siendo necesario el reprocesado del producto, incrementando el costo de producción. Este problema tiene su origen en el escaso entendimiento de la influencia de los parámetros operacionales sobre el proceso (Iveson & Hapgood, 2001).

Investigadores como: (Lister & Waters, 1988), (Parveen, 2012) han establecido que durante el proceso de aglomeración se ve influenciado por la distribución de tamaños de los sólidos, pues la polidispersidad de la población de sólidos induce al recubrimiento o adhesión de las partículas pequeñas sobre las de mayor tamaño. Así mismo, existe una posible influencia combinada entre el parámetro temperatura (cuyos niveles de estudio son adecuados para averiguar la influencia de éste parámetro sobre el comportamiento de crecimiento del aglomerado) y la polidispersidad de los sólidos.

(Sastry & Fuerstenau, 1973)Estudiaron que la adhesión de partículas sin formación de puentes (fuerzas de van der Waals o electrostáticas) forman aglomerados relativamente débiles. En cambio, los que forman puentes, son más fuertes. Por su parte (Canela, 1996) determino que la resistencia de los aglomerados depende de las fuerzas físicas que mantienen unidas a las partículas y la magnitud de éstas depende del tamaño de partícula, la carga superficial, la estructura cristalina, la proximidad de las partículas, la cantidad de aditivos, y de otras propiedades fisicoquímicas del sistema como lo son la naturaleza química de la partícula, los coeficientes de frotamiento interno de la partícula, masa volumétrica y fuerza de cohesión.

(Schaafsma & Kossen, 2006)Estudiaron la influencia de alimentar el líquido aglomerante atomizado por pulsos y temperatura del medio fluidizante (40 y 60°C) sobre el crecimiento del aglomerado. El aglomerador empleado tenía una geometría cónica y contaba con un ciclón para limpiar el aire de los finos arrastrados por éste. Se emplearon sólidos de α -lactosa monohidratada malla No. 110 y como líquido aglomerante polyvinylpirrolidona al 8%. Los resultados obtenidos indicaron que el crecimiento del aglomerado se ve influenciado por la humedad presente en el lecho, mientras que encontraron diferentes efectos de la temperatura del medio fluidizante sobre el crecimiento del aglomerado: a baja temperatura 40°C, el gránulo crece a su tamaño final más rápido que a 60°C.

(Tan, H.S.; Salman, A.D., 2006)Estudiaron la influencia de algunos parámetros operacionales responsables del crecimiento del aglomerado empleando como sólido de trabajo Glass Ballotini cuya distribución de tamaños estaba comprendida entre 73-375 micrómetros. El agente

aglomerante empleado fue Polyentilen Glycol. Los parámetros operacionales analizados fueron: tasa de atomización del agente aglomerante ($2.88 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), temperatura en el lecho de sólidos (28, 32, 36 y 40°C), presión de atomización (1.5 bar) y velocidad del aire fluidizante ($0.97 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Los resultados indicaron que el crecimiento del aglomerado depende directamente de la cantidad relativa del agente aglomerante atomizado sobre el lecho, el cual determina la velocidad del proceso de agregación. Así mismo, el crecimiento del aglomerado se ve favorecido con el incremento en los niveles de temperatura. Con referencia al tamaño de gota del agente aglomerante atomizado, concluyeron que una gota de mayor tamaño incrementa el crecimiento global del aglomerado, mientras que una gota de menor tamaño induce a un crecimiento inicial más rápido. Finalmente, el crecimiento global del aglomerado se reduce al incrementar la velocidad del aire.

(Dolinski, 2000) Encontró que en el secado de aspersión de zumos de frutas con elevado contenido de azúcares: los compuestos tienen temperaturas de transición vítrea bajas presenta problemas de pegajosidad (stickiness). El término "stickiness" hace referencia a los fenómenos de cohesión partícula-partícula y de adhesión partícula-pared que presentan los polvos obtenidos, que dificulta su presentación en estado polvo y mancha las paredes de los cilindros de pulverización (Al quedar en la pared del compartimiento de secado como un jarabe da lugar a bajas producciones del producto y a problemas operacionales).

(Boonyai, 2004) Explica que la mayor causa de la pegajosidad en polvos amorfos de zumos en el secado por aspersión es la acción plastificante del agua en la superficie, que da lugar a la adhesión y cohesión. El alto contenido en azúcares de bajo peso molecular y ácidos orgánicos disminuye la temperatura de transición vítrea (T_g) por debajo de la temperatura de preparación del producto, incluso a la temperatura de salida del secado. Esto conlleva a la existencia de un estado pseudo-líquido de material amorfo, que es responsable de la cohesión interpartículas y de la adhesión de las partículas a las paredes del cilindro. Cuanto mayor sea esta diferencia de temperatura ($\Delta T = T_p - T_g$) mayor será el grado de pegajosidad.

Como puede visualizarse, existe un grupo muy amplio de parámetros operacionales que inciden en el comportamiento del proceso de aglomeración y los problemas asociados a este. Sin embargo, la investigación y análisis de este tipo de proceso se centra en los parámetros que se pueden controlar de manera adecuada, pues los equipos empleados para tal investigación, son de tipo escala piloto o banco, los cuales son diseñados y construidos para manipular un número reducido de parámetros. Por su parte se han propuesto técnicas para resolver anomalías presentadas por la influencia de variables que se afectan unas con otras.

(España Patente nº 36848, 1967) Propuso un procedimiento para obtener aglomerados fuertes de café soluble mediante la reducción de la temperatura de las partículas hasta menos 7° antes de entrar en contacto con vapor de agua y con humedades de 3 a 4 %. El enfriamiento se logra con la inyección de CO_2 líquido en el molino de martillos; así mismo demostró que la reducción de tamaño a menos de 54 micras se forman enlaces fuertes y se evita la degradación o separación de los gránulos durante el secado en la cámara. Su metodología consistió en pruebas a diferentes

niveles de temperaturas, cantidad de vapor, humedad y temperatura del producto inicial obteniendo aglomerados de gran dureza y buena apariencia física.

(Schaafsma, S.H., 1998) Propuso en su trabajo de investigación relacionado con la aglomeración de sólidos, un proceso de crecimiento de un aglomerado originado a partir de una gota de líquido. En su propuesta, describe el crecimiento del aglomerado a partir de dos etapas. Inicialmente, se presenta un rápido crecimiento que toma lugar por el mojado de las partículas, lo cual resulta en la formación de un aglomerado inicial. La segunda etapa de crecimiento es iniciado por el transporte de líquido del aglomerado hacia las partículas que lo rodea. El crecimiento del aglomerado toma lugar por la unión de partículas. Si un poro en la superficie de un aglomerado está saturado con líquido, entonces partículas libres pueden alcanzar la fase líquida en el poro y un puente líquido puede ser formado. Acorde a este proceso, se puede concluir que la distribución de tamaños de partículas y porosidad juega un papel importante en el tamaño final del aglomerado.

Diversos autores han utilizado diferentes aproximaciones ingenieriles para entender y describir el comportamiento de un proceso de granulación. Un análisis estadístico de un diseño experimental permite determinar cualitativamente el efecto de un parámetro del proceso sobre el aglomerado, tomando como referencia el tamaño promedio de la población de partículas aglomeradas (Montgomery, 2007). Mientras que el uso de un balance de población permite tratar de manera fundamental procesos que involucran fenómenos de nacimiento y muerte de partículas en un determinado volumen de control (VC). (Hulbert, 1967).

(Cryer, A. S. y Scherer, N.R, 2003) Implementaron un diseño factorial fraccional a $\frac{1}{2}$ en un aglomerador cónico, para evidenciar la influencia de ciertos parámetros importantes relacionados con la aglomeración de un producto agroquímico cuya distribución inicial comprendía tamaños entre 0.1 a 100 micrones y cuyo diámetro promedio inicial era de 20 micrones. El agente aglomerante empleado fue agua destilada. Los parámetros operacionales analizados fueron: flujo de aire (0.106-0.153 m³ ·s⁻¹), temperatura de alimentación del aire (40-60°C), tasa de atomización del agente aglomerante (3.70x10³ -5.42x10³ kg s⁻¹), carga de sólidos inicial (25-35kg) y altura de la boquilla de atomización (posiciones 1 y 3). A partir del análisis estadístico (el cual se realizó con un nivel de significancia de 99%) se evidenció la significancia de los factores bajo estudio, siendo la tasa de atomización y carga de sólidos los de mayor efecto, mientras que la temperatura y flujo de aire resultaron marginalmente significativos en el crecimiento del aglomerado, mientras que la altura de la boquilla no influye en el crecimiento del aglomerado.

(Ríos, 2005) Implementó un diseño factorial 2 a la 3 en un aglomerador de lecho fluidizado cónico para aglomerar sólidos de Tamarindo con un diámetro promedio de 78.4 micrones. Los factores controlables fueron: temperatura del aire fluidizante (80-100°C), tiempo de atomización (3-5 min) y masa de sólidos cargados al sistema (200-300g). El agente aglomerante empleado fue agua destilada. El análisis estadístico (realizado con un nivel de significancia del 95%) determinó que el tiempo de atomización del agente aglomerante fue el principal parámetro que afecta el crecimiento del aglomerado, mientras que la temperatura y carga de sólidos no afectan el crecimiento del aglomerado. Cabe resaltar, que se probaron los niveles de significancia de 90% y

75% con el objetivo de probar los posibles efectos de los parámetros que no resultaran significativos a un nivel del 95%. El resultado obtenido a un nivel de significancia del 90% determinó que el tiempo de atomización, así como la temperatura del aire resultaron significativos, es decir afectan en el crecimiento del aglomerado. Así mismo, se determinó que a un nivel de significancia del 75% los parámetros: tiempo de atomización, temperatura, carga de sólidos así como la interacción entre la temperatura y carga de sólidos afectan el crecimiento del aglomerado. El análisis realizado a estos niveles de significancia (75% y 90%) se evaluaron para futuros trabajos relacionados con la aglomeración de sólidos de Tamarindo.

(Dacanal & Menegalli, 2008) Implementaron un diseño factorial fraccional 2^{4-1} en un aglomerador con geometría cónica, el cual contaba con un ciclón para limpiar el aire de los finos arrastrados, con el objetivo de evidenciar la significancia de ciertos parámetros operacionales que influyen en el proceso de crecimiento de aglomerados de sólidos de acerola (Cerezo de las Antillas). La población inicial de los sólidos contaba con un diámetro promedio inicial de 95.4 micrones. El agente aglomerante empleado fue agua. Los parámetros bajo estudio fueron: temperatura del aire fluidizante (75-90°C), velocidad del aire fluidizante (0.25-0.45 m·s⁻¹), flujo de aire de atomización (0.50-0.70 l·h⁻¹) y altura de la boquilla con respecto al lecho (0.50-0.70 m). El análisis estadístico (realizado con un nivel de significancia del 95%) evidenció la influencia de solo la velocidad del aire sobre el crecimiento del aglomerado. Sin embargo, los autores expresan que la temperatura del aire debe afectar el crecimiento del aglomerado pero los niveles ensayados no fueron los adecuados. Cabe resaltar que la altura de la boquilla y flujo de aire en la boquilla no resultaron significativos, es decir, no influyeron en el crecimiento del aglomerado.

1.2 Planteamiento del Problema

En Café Tostado de Exportación durante el proceso de aglomeración de café soluble para la obtención de granulado efectuado en un secador por aspersion con lecho fluido integrado se presenta la pegajosidad de los polvos finos a las paredes de la base cónica del equipo y conforme transcurre el tiempo ; la cantidad adherida se compacta formando capas gruesas llegando al punto en que el mismo calor en el interior lo derrite y cae en forma de masas elásticas o masas solidas de gran volumen obstruyendo el paso de los gránulos por lo que la producción se detiene generando contratiempos al quitar todo el café compactado. Esta anomalía afecta la eficiencia del proceso y disminuye el rendimiento.

La problemática se da en la producción de diversos tipos de café granulado desde mezclados, descafeinados y puros, así como en los diversos parámetros de operación y aunque se han implementado vibradores de alto rendimiento en la base cónica del equipo, el problema sigue teniendo impacto.

1.3 Objetivos

General

Optimizar el proceso de aglomeración de polvos finos de café soluble para la mejora del rendimiento.

Específicos

- Evaluar el efecto de las variables de operación sobre el comportamiento de los aglomerados, así como las características finales deseadas.
- Determinar mediante corridas experimentales las variables con mayor incidencia en la pegajosidad del producto.
- Optimizar los parámetros operacionales mediante el balance de materia y energía.

1.3 Definición de variables

Las variables que se manejaran en este proyecto se mencionan a continuación:

- Condiciones operativas del sistema; temperatura de aire de entrada y salida, presión de vapor, flujo de aire de entrada y salida.
- Propiedades de los sólidos iniciales: tamaño de partícula, humedad, temperatura y densidad.
- Humedad relativa del aire
- Presión del sistema y transferencia de calor

1.5 Hipótesis

1. Los aglomerados pierden cohesión durante el secado debido a que hay un enlace de partículas débiles las cuales se separan generando una cantidad de polvos finos que son arrastradas por la corriente de aire de forma turbulenta hasta la parte inferior dando lugar a la adhesión y compactación.
2. La variación de la presión del sistema (vacío) presenta anomalías en la distribución de aire, trayendo consigo alto acarreo de polvos finos por lo que presenta depósitos a las paredes de la cámara de secado.
3. La continua variación de las condiciones de operación afecta en la formación y crecimiento de las partículas dando lugar al arrastre excesivo de polvos como del medio aglomerante reflejando en el escaso o nulo crecimiento de la partícula y por ende adhesión a las paredes.
4. La concentración de azúcares tiene efecto significativo en la pegajosidad.

1.6 Justificación del Proyecto

Hoy en día el control de los procesos de aglomeración bajo su contexto de granulación húmeda es muy complejo al llevar a cabo diferentes mecanismos dentro de sistemas que manejan transferencia de calor, transferencia de masa, mecánica de fluidos y termodinámica por consiguiente dependen de las variables de operación, la naturaleza de los sólidos y del líquido ligante.

El presente proyecto se realiza en una empresa de café soluble donde se lleva cabo el proceso de aglomeración en la cual presenta problemas de pegajosidad de partículas finas a las paredes del equipo y el rendimiento se ve afectado. El proyecto es seguimiento de un estudio anterior en la que se analizaron y estudiaron varios tipos de cafés encontrándose que los mezclados presentaban más adhesión que los puros, por consiguiente se determinaron las condiciones óptimas de operación de acuerdo las especificaciones finales mediante el uso de graficas de control; sin embargo eso no detuvo la problemática ya que hasta la fecha sigue presenciándose. Siendo necesario estudios más a fondo basado en técnicas experimentales o de modelos matemáticos para entender la interacción de una variable sobre el comportamiento.

La finalidad de este proyecto es la optimización de los parámetros operacionales de las variables del proceso que inciden en la anomalía. Para ello se emplearan herramientas estadísticas (diseño de experimentos) para la evaluación y determinación de los efectos de las variables de entrada (factores) sobre una variable de salida (respuesta) y el balance de materia-energía para el control y la optimización.

1.7 Limitaciones y Alcances

Limitaciones

- Se respetaran los lineamientos de la empresa por lo que los nombres de los productos a estudiar serán restringidos y su uso será mediante letras o números.
- El tiempo de estudio comprenderá 3 meses por lo que simplemente se abarcaran los tipos de café que se produzcan en ese lapso.
- Debido a que el proceso es continuo; los operarios son los únicos que tienen el control de las condiciones del equipo por consiguiente se tomaran solo los parámetros empleados para cada tipo de producto y estas son las que se manejaran en el diseño experimental.

Alcances

- Determinación de los factores influyentes en la pegajosidad del café y optimización de los mismos.
- Control de los parámetros operacionales.
- Implementación de acciones de mejora continua para el sistema.

1.8 La Empresa

Café Tostado de Exportación tiene su inicio el 13 de Mayo de 1972 en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Es una empresa que pertenece al grupo SANROKE, que actualmente se encuentra ubicada en la ciudad de Córdoba Veracruz. Comenzó produciendo café tostado y molido; posteriormente inicia en el proceso de café soluble logrando obtener otros subproductos del café soluble como el aglomerado, lechero y capuchino. Fue una de las primeras empresas en su ramo en estar certificada por la norma ISO 9001:2008. Actualmente cuenta con certificaciones de labor social, medio ambiente, calidad, orgánicas e inocuidad, lo que refleja su cumplimiento de los estándares internacionales.

Es una compañía líder por su firme compromiso con la calidad y la satisfacción del cliente. Sumando hasta el día de hoy décadas de experiencia y dedicación en la industria del café. El aumento del consumo de esta bebida en el mundo ha sido paralelo a su desarrollo económico, representando una gran oportunidad para encontrar nuevos socios y expandir sus actividades demostrando al resto del mundo cómo la disciplina y el trabajo duro conducen al éxito.

Misión

Elaboración de productos de la más alta calidad a través de la selección de materia prima superior y los más altos estándares de manufactura, satisfaciendo el gusto de los consumidores generando beneficios para los accionistas, colaboradores, clientes, proveedores y comunidad en general.

Visión

Convertirse en líderes del mercado nacional y ampliar su presencia en el mercado extranjero con productos de calidad insuperable con el mejor sabor que proporcione deleite y satisfacción a quien los consuma.

En café tostado de exportación para obtener café soluble granulado se llevan cabo varias operaciones unitarias.

- Tostado: se exponen los granos de café a un calentamiento en el cual provoca inicialmente una liberación de agua ligada, hasta alcanzar el calor deseado; manteniéndolo en continuo movimiento para asegurar un tostado completo del grano; cuando finaliza el tostado, el café es enfriado y almacenado.
- Molienda y Extracción: para la reducción del tamaño el café tostado requiere un corte mediante una acción de compresión y fricción, para provocar partículas de tamaño y forma adecuados. Una vez molido se hace la extracción de sólidos solubles aplicando agua caliente para generar una infusión que obtenga todo el sabor y aroma presente en los granos.
- Centrifugación y evaporación: mediante una máquina de fuerza centrífuga se elimina la mayor parte de los residuos que quedan de la extracción. Posteriormente el extracto líquido obtenido entra en la evaporación donde se elimina la mayor parte de agua y el producto queda concentrado.
- Secado: el líquido es secado mediante un secador por aspersión en una corriente de aire caliente donde las gotitas finamente al contacto con el calor evaporan el agua convirtiéndose en polvo esférico instantáneo.
- Aglomeración: es la operación designada para la formación de partículas de mayor tamaño operando sobre la base de re-humidificación de la superficie del polvo de café con vapor de agua en una atmósfera turbulenta de aire caliente de manera que, al colisionar las partículas entre sí, los finos se adhieren a los gruesos formándose los aglomerados.

La variedad de presentaciones y la calidad de sus productos, han permitido permanecer en el gusto del público, contando con sus tradicionales cafés tostados y molidos, los prácticos cafés solubles aglomerados y ahora liofilizado, cápsulas de café expreso, té de café verde y crema untable Caferetas. Actualmente es líder en el mercado internacional del café instantáneo, líder local y regional de café soluble granulado bajo el nombre de café "Los Portales de Córdoba".

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1 Elección de los factores y los niveles

Los factores serán las condiciones de operación del equipo aglomerador de las cuales se seleccionaran solo las que tengan más impacto en la formación del granulo y posible influyente en el problema, los niveles estarán definidos como altos y bajos.

2.2 Selección de la variable de respuesta

La variable de respuesta está definido como las características fisicoquímicas del producto final: color, densidad, humedad, dureza y porcentaje de aglomerado pero solo se seleccionarán dos de ellas. También se contemplara como respuesta el porcentaje de adhesión.

2.3 Elección del diseño experimental

La elección del diseño implicara la consideración del tamaño de la muestra (número de réplicas). El interés se centrara en identificar "qué" factores causan esta diferencia y en estimar la magnitud del cambio de la respuesta. Por lo que pueden utilizarse uno o más diseños experimentales, de acuerdo a las variables manejadas las cuales pueden ser: factorial, por bloques completamente al azar y superficie de respuesta.

2.4 Realización del diseño de experimentos

Una vez seleccionado el o los diseños se ejecutaran para obtener los valores de las respuestas para la cuales se contara con el apoyo de área de control de calidad quien proporcionara esta información , así como también la ayuda de los operarios quienes son los expertos en manejar las condiciones del equipo. Los datos obtenidos se ingresaran a un programa estadístico para determinar los efectos y obtener las gráficas.

2.5 Monitoreo de los flujos de aire, humedad relativa y presión del sistema

Se hará un monitoreo en los flujos de aire, humedad relativa y presión del sistema en lapso de tiempo adecuado para evaluar el comportamiento de estas variables, los datos se registraran en Excel para la elaboración de gráficas.

2.6 Análisis de datos.

En esta fase, se utilizaran programas estadísticos para analizar y comparar los datos a fin de determinar que los resultados y las conclusiones sean objetivos. Se aplicara un análisis de varianza

(anova) la cual puede ser de un solo factor o multifactorial con niveles de significancia dependiendo del tipo de diseño y con ello se hará la prueba de hipótesis.

2.7 Análisis de los efectos de los parámetros operacionales

El análisis de los efectos de los parámetros operacionales (factores) sobre la variable de respuesta se efectuara mediante las gráficas de interacción y las gráficas de efectos normales que se obtendrán en el software estadístico, con la finalidad de determinar cómo afecta cada factor en el comportamiento de una propiedad característica del granulo.

2.8 Aplicación del balance de materia y energía

Para realizar este cálculo primero se harán las conversiones de flujo de aire de velocidad angular a velocidad lineal para posteriormente calcular el caudal del aire que pasa por los conductos, así mismo se calculara el volumen de la cámara de secado y la base conica.El uso de la carta psicométrica será de gran importancia para determinar la humedad absoluta del aire, las eficiencias térmicas y la temperatura de saturación adiabática. Para la entalpia del aire se utilizaran fórmulas adecuadas de termodinámica. Las formulas del balance de materia y energía que se utilizara será las establecidas para secadores por aspersion. Una vez reunido los valores se sustituirán para obtener los correspondientes; la variable que se necesita encontrar es la cantidad de humedad relativa y el calor en la salida de la cámara de secado.

2.9 Optimización del proceso

La optimización del proceso se efectuará de acuerdo a los resultados de los monitoreos del flujo de aire, humedad relativa, los efectos obtenidos en el diseño de experimentos y sobre todo los cálculos de balance de materia –energía.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Equipo experimental

El equipo experimental utilizado fue un secador por aspersión con lecho fluido integrado (Anexo1) que consta de una cámara de secado proyectado sobre una base cónica, mediante la cual una corriente de aire caliente es suministrado por un ventilador de entrada creando una atmosfera turbulenta donde los polvos finos entran en contacto con vapor de agua, y mediante el secado se forman los aglomerados, este equipo maneja varias condiciones de operación que le dan las características al producto. Las herramientas estadísticas empleados fueron Excel para el análisis de varianza y prueba de hipótesis del diseño por bloques al azar, minitab para el análisis de los efectos de los factores sobre la variable de respuesta y stargrapics para el análisis de varianza del segundo diseño experimental.

3.2 Monitoreos

Se hizo un monitoreo en los flujos de aire de entrada, flujo de salida, el vacío del sistema y la humedad relativa del aire en un lapso de 5 horas diarias por 10 lotes de producción evaluando también la adhesión en cada uno de ellos se registraron los datos en Excel, mediante estos datos se elaboró una gráfica de dispersión para ver el comportamiento de estas variables.

3.3 Diseño de experimentos

Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar en la cual los tratamientos fueron la concentración de azúcares con respuesta de porcentaje de adhesión. Cabe mencionar que cada tratamiento indica un tipo de producto por su concentración.

Tabla 1. Tratamientos del diseño por bloques al azar

TRATAMIENTO	CONCENTRACION
A	0
B	5
C	10
D	15
F	17

Se formularon dos hipótesis

H_0 =La concentración de azúcares no tiene efecto en la pegajosidad de los polvos finos si F es menor o igual a la F tabulada.

H1=La concentración de azúcares tiene efecto significativo si F de Fisher es mayor que la F tabulada.

Se utilizó un diseño factorial 2^3 para determinar el efecto de tres condiciones de operación (factores) las cuales fueron velocidad de aire, temperatura de entrada y temperatura de salida con dos niveles teniendo como respuestas la dureza del granulo para 5 tipos de café soluble.

Tabla 2. Factores y niveles del Diseño factorial 2^3

TIPOS	FACTORES	NIVEL BAJO	NIVEL ALTO	RESPUESTAS
Café soluble A,B,C,D,F	Temperatura de entrada	217	235	Dureza
		227	231	
		220	236	
		212	228	
	Temperatura de salida	133	135	
		139	142	
		137	138	
		134	135	
	Velocidad de aire	800	1000	
		849	850	
		690	950	
		975	1050	

También se empleó un diseño factorial de 2^3 para determinar los efectos de tres factores: No. Criba del molino de martillos con nivel de 33-55, la presión de vapor con nivel de 1.5,-2.0 y la temperatura de producto nivel de 30-35, las respuestas que se eligieron para este diseño fue la dureza del granulo y el porcentaje de aglomerado, este experimento se inició empleado la herramienta estadista minitab en la cual se ingresaron estos factores con sus niveles arrojando 8 corridas por las combinaciones.

Tabla 3. Corridas experimentales del diseño 2^3

corridas	Factores		
	Presión de vapor	No.Criba	Temperatura de partícula
1	1.5	33	30
2	2	33	30
3	1.5	54	30
4	2	54	30
5	1.5	33	35
6	2	33	35
7	1.5	54	35
8	2	54	35

3.4 Realización del diseño de experimentos

Para la ejecución del diseño de experimentos se siguió con el programa de producción iniciando con el diseño por bloque completamente al azar; la cual se llevó en la aglomeración de 5 tipos de café con diferentes concentraciones mencionadas anteriormente desde el arranque del equipo en la cual los sólidos finos iniciales que se cargaron fueron un café A sin concentración posteriormente se cambió a los siguientes tipos (BCDF) las condiciones operativas del equipo estuvieron de la siguiente manera: temperaturas de entrada de 190 a 230, temperatura de salida de 100-140 y velocidad de aire de 600 a 1000 rpm. Cada vez que se hacía un cambio de producto se sacó la cantidad de sólidos finos adheridos de la siguiente manera:

(Cantidad alimentada x 98 % de rendimiento fijo)- (Cantidad producida)

Mediante esta fórmula se obtuvo el porcentaje de cada tipo de café retenido en la base cónica

$\frac{\text{Cantidad adherida}}{\text{Cantidad alimentada}} \times 100$

Los datos quedaron registrados en la tabla 4 donde cada repetición indica un lote de producción diferente.

Tabla 4. Diseño de bloques completamente al azar

TRATAMIENTOS	REPETICIONES		
	I	II	III
A	6.25	6.033	7.02
B	10.71	8.59	12
C	7.015	6.033	9.27
D	5.83	9.5	8.92
F	9.92	7.04	8.59
G	11.3	8.53	9.05

El primer diseño factorial se llevó a cabo en la aglomeración de 4 tipos de café soluble en la cual se monitoreo la interacción de cada factor de acuerdo a los niveles establecidos sobre la respuesta y se registraron los resultados. Las partículas finas tenían las siguientes propiedades iniciales:

Densidad: 180-210 gr/cm³

Color: 72-84

Humedad: 2 a 3.5 %

Los resultados de los análisis fisicoquímicos (dureza) fueron proporcionados por el área de control de calidad, estos datos se ingresaron en minitab y se hizo el análisis factorial obteniendo las gráficas de interacción así como también la significancia de los efectos.

El segundo diseño factorial se llevó cabo en la aglomeración de un lote de café soluble regular con las siguientes propiedades

- Color 72-85
- Humedad: 2-3.5
- Densidad: 190-210

La duración del lote fue de 10 horas, el equipo empleo una velocidad de aire entrada de 900 rpm con temperatura de 220°C y una velocidad de aire salida de 1765 rpm con temperatura de 135 °C. Se recibió ayuda por parte de los operarios para las combinaciones y cada vez que esta se ejecutaba se tomó muestras de 10 grs y se llevó a control de calidad para los análisis de dureza y porcentaje de aglomerado por cada corrida, finalizando este experimento se registraron todos los resultados en minitab y se hizo el análisis del diseño para las significancias de los factores, cabe mencionar que mediante este programa se obtuvieron las gráficas de interacción.

3.5 Análisis de datos

Para determinar cualitativamente el efecto de los parámetros del proceso en la aglomeración de las partículas de café soluble se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia, α , del 5% a los resultados experimentales. La dureza y el porcentaje de aglomerado se seleccionaron como parámetro de respuesta. se utilizó el programa de stargraphics para el análisis.

3.6 Balance de materia energía

Para el balance de materia y energía primero se hicieron las conversiones de la velocidad angular del aire de entrada y salida (rpm) a velocidad lineal (m/s) empleando la fórmula:

$(1\text{rpm}) (2\pi \text{ rad})/60 \times (\text{radio})$. Así como el cálculo del volumen de la cámara de secado (anexo 3)

El cálculo del caudal de aire de entrada se realizó empleando la fórmula

$$Q = V \cdot S$$

Donde:

V=velocidad lineal del aire (m/s)

S=área de la sección transversal (m²)

El radio de la sección transversal para ventilador de entrada fue 0.335 y la de salida de 0.195

Se sacaron las eficiencias térmicas del equipo de la siguiente manera:

$$\text{Eficiencia térmica global} = \left(\frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 \cdot T_0} \right)$$

$$\text{Eficiencia de evaporación} = \left(\frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 \cdot T_{sat}} \right)$$

Para determinar las temperaturas de saturación adiabática (T_{SAT}) y (T_0) se utilizó la carta psicométrica. (Anexo 2).

El balance quedó estructurada de la siguiente forma:

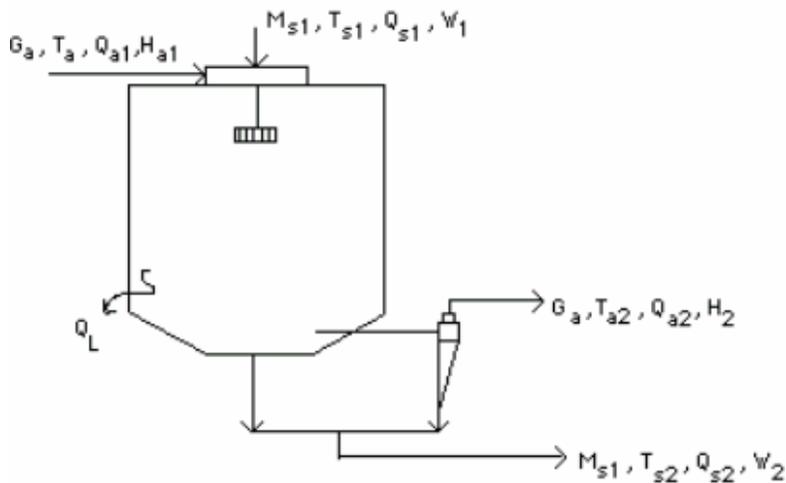


Figura 1. Diagrama de flujo del aglomerador

Donde

FS_1 =masa del solido seco (kg)

G_a : flujo de aire (kg/h)

WS =contenido de humedad del alimento (kg agua/ kg solido seco)

T_a =temperatura de entrada

T_{a1} =temperatura de salida

T_{a2} =temperatura de solidos

G_{a1} =flujo de aire entrada

G_{a2} =flujo salida de aire

H_1 = humedad relativa del aire entrada

H_2 =humedad relativa del aire salida

El balance del sistema, sin pérdidas ni acumulación quedó de la siguiente manera:

$$FS \cdot WS_1 + G_a \cdot Ha_1 = FS \cdot WS_2 + G_a \cdot Ha_2$$

Mientras que el balance de energía:

$$FS \cdot Q_{S1} + G_a \cdot Q_{a1} = FS \cdot Q_{S2} + G_a \cdot Q_{a2} + Q_L$$

Donde q_{s1} y q_{s2} son las entalpías del sólido entrando y saliendo del secador (KJ/Kg), q_{a1} y q_{a2} son las entalpías del aire entrando y saliendo del secador (KJ/Kg), q_L es el calor perdido (KJ).

El balance con respecto a la humedad se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$G_{H2} + L S X_1 = G_{H1} + L S X_2$$

Donde

G_{H2} = flujo de aire

L_s = flujo de alimentación

X_1 = humedad de los sólidos iniciales

La entalpia de la salida de aire se calculó mediante la fórmula:

$$H_G = C_2 (T_G - T_0) + H \lambda$$

Donde

T_G = Temperatura del aire

T_0 = Temperatura saturación

$H \lambda$ = Entalpia del solido seco

3.7 Optimización

La optimización del proceso se llevó a cabo en el control de los factores incidentes en la cual se establecieron los rangos a utilizar esto derivado de los cálculos de balance y lo obtenido de los efectos en el diseño experimental, los operarios se apegaron a estas condiciones con sus respectivos rangos y lo llevaron a cabo durante 8 lotes de producción, en ese lapso de tiempo se evaluó el comportamiento del rendimiento, se registraron los datos y se graficaron.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1 Resultados

Análisis de efectos diseño factorial No.1

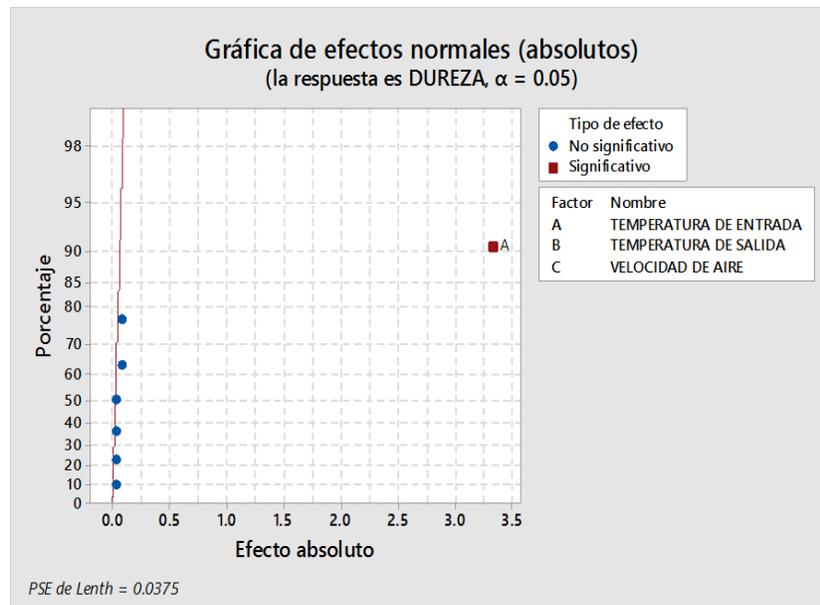


Figura 2. Grafica de efectos normales para el café soluble ABCD

En la figura 2 se observa la distribución de los factores A, B, C para los 4 tipos de café en la cual la temperatura de entrada tiene efecto significativo en la dureza con una significancia del 92 % mientras que los demás factores no presentaron efectos significativos aunque también influyen en una combinación para dar la característica fisicoquímica.

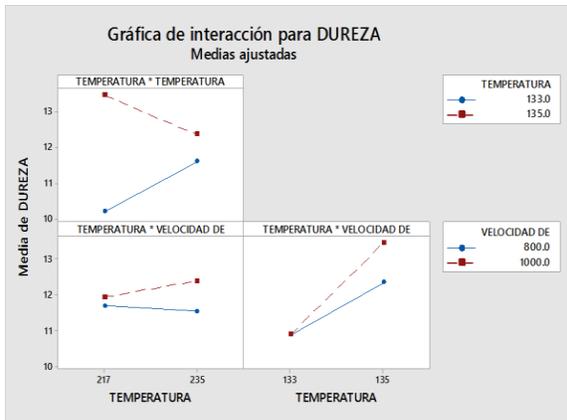


Figura 3. Grafica de interacción para café soluble A

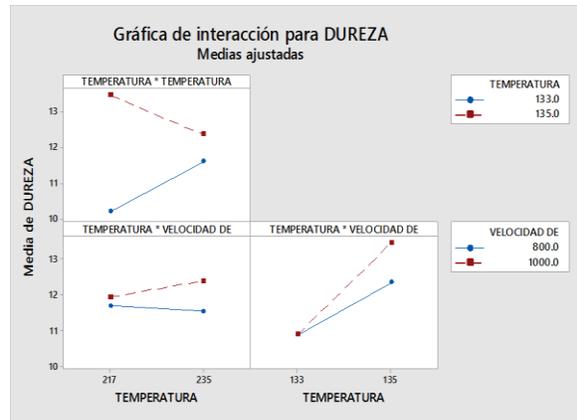


Figura 4. Grafica de interacción para café soluble B

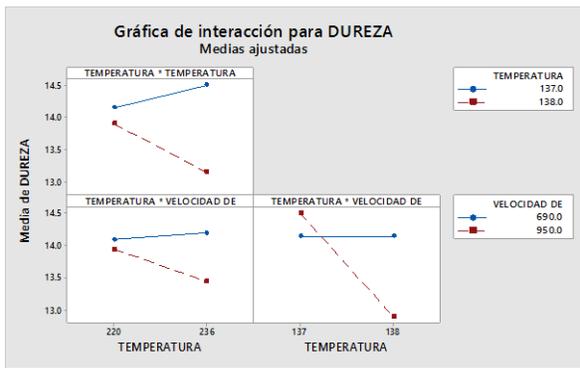


Figura 5. Grafica de interacción para café soluble C

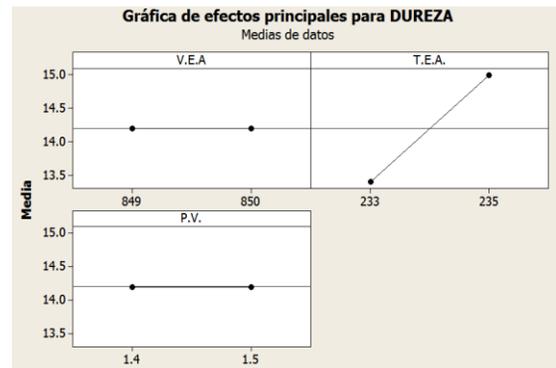


Figura 6. Grafica de interacción para café soluble D

En las figuras 3, 4, 5 y 6 se muestran el comportamiento de la dureza de acuerdo a los factores manejados para los cuatro tipos de café y en cada una de ellas se aprecia que los niveles menores de la temperatura de salida con la temperatura de entrada dieron una dureza igual y por debajo de 10, así mismo en el factor de velocidad de aire también tuvo un comportamiento con niveles menores. Cabe mencionar que ninguna de las combinaciones obtuvo una dureza optima por lo que se determinó que el incremento en la temperatura de salida aumenta la dureza obteniendo un granulo más frágil.

Análisis del diseño factorial No.2

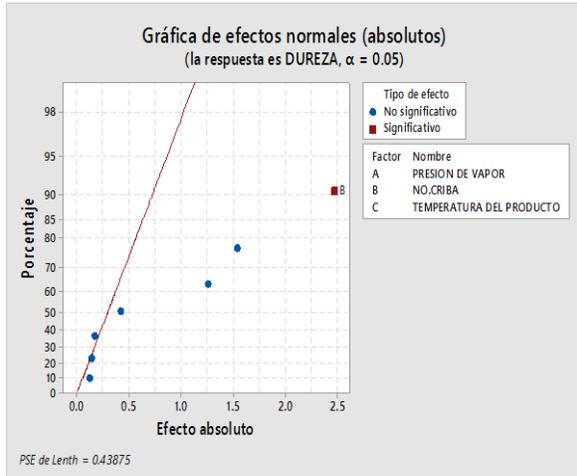


Figura 7. Gráfica de efectos normales para dureza del café regular

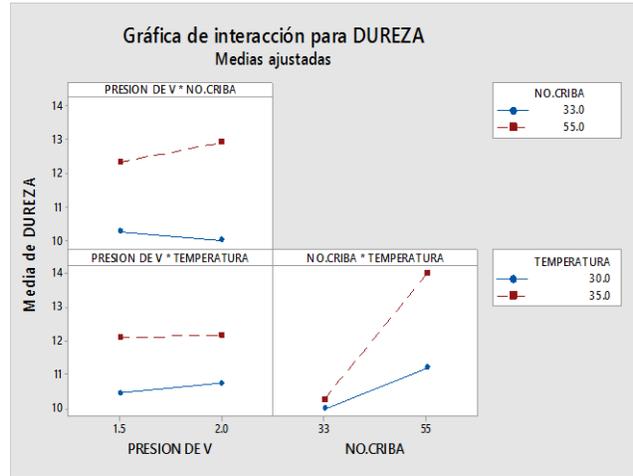


Figura 8. Gráfica de efectos principales para dureza del café regular

En las figuras 7 y 8 se observa que el No. de criba tiene efecto significativo sobre la dureza es decir entre menor abertura tenga la criba la dureza es mucho menor: los gránulos son más resistentes mientras que entre mayor sea la abertura; los gránulos son más frágiles (dureza alta), cabe mencionar que la mejor dureza obtenida fue con el número de malla 33, la presión de vapor de 1.5 y la temperatura de partícula de 30° c.

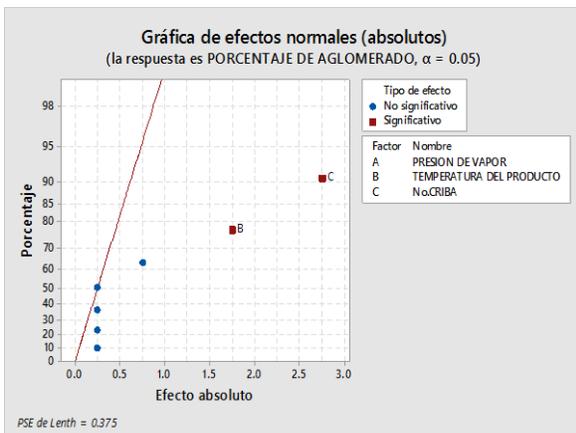


Figura 9. Gráfica de efectos normales para porcentaje de aglomerado del café regular

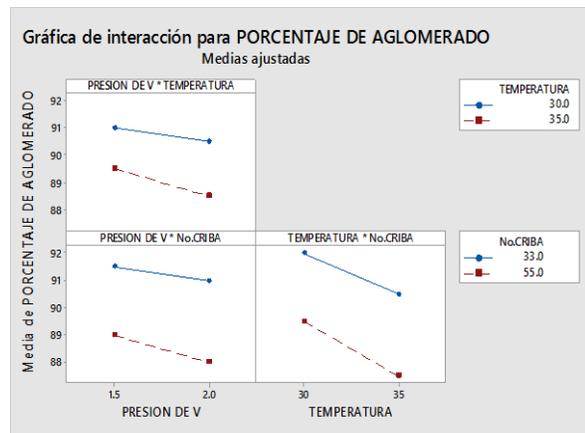


Figura 10. Gráfica de interacción para porcentaje de aglomerado del café regular

En las figuras 9 y 10 se observa que la temperatura del producto, el número de criba tiene efecto significativo sobre el porcentaje de aglomerado; entre mayor es el nivel el porcentaje de aglomerado disminuye, determinado que hay más cantidad de polvos finos, así mismo si el nivel de los factores es bajo; el porcentaje incrementa constantemente. Por lo que el comportamiento del gránulo se acopla al incremento o disminución de estas variables.

Monitoreos

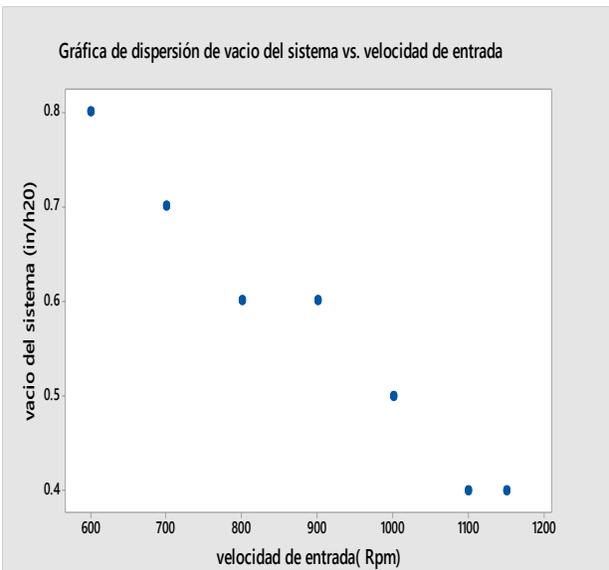


Figura 11. Gráfica de dispersión de la presión del sistema

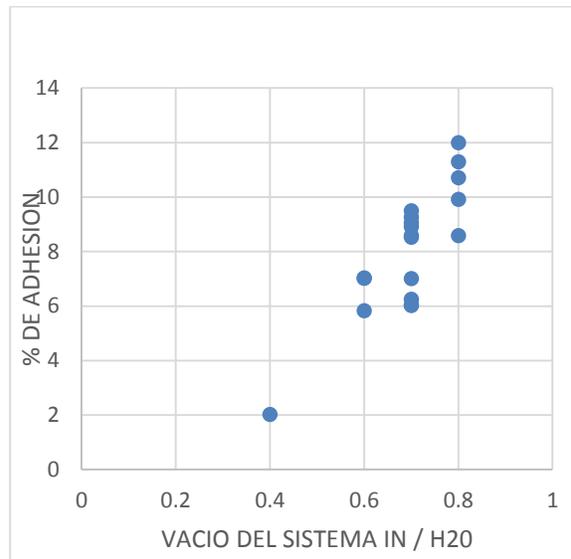


Figura 12. Gráfica del vacío vs porcentaje de adhesión

En las figuras 11 y 12 se observa el comportamiento del vacío con las variaciones de aire de entrada. Cabe mencionar que el sistema emplea una sola salida de aire de 1765 rpm. Durante los monitoreos los productos presentaron pegajosidad con entradas de aire menores a 900 rpm mientras tanto de 1000 a 1150 rpm los productos no presentaron pegajosidad. Lo mismo sucedió en el comportamiento del vacío del sistema para la cual la pegajosidad aumenta y el rendimiento disminuye con respecto al incremento del vacío. Por lo que esta variable es el factor determinante y con ello se prueba la hipótesis que la variación en la presión del sistema genera un arrastre excesivo de polvos y la humedad no se elimina lo suficiente.

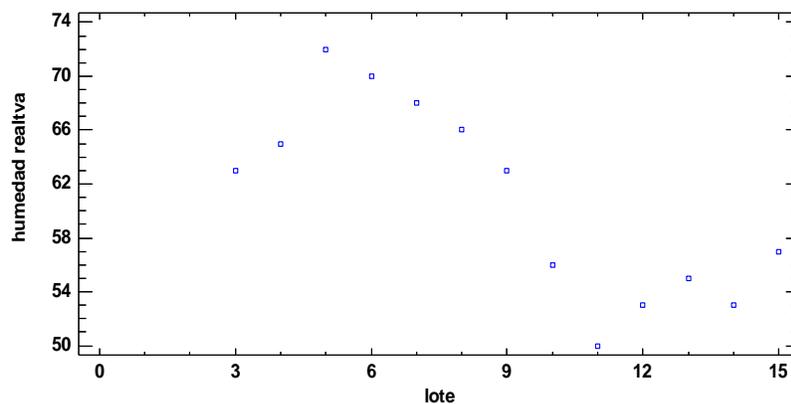


Figura 13. Gráfico de humedad relativa del aire

En la figura 13 se aprecia que la humedad relativa del aire inicialmente fue de 66 % que incrementó durante los siguientes días pero fue disminuyendo hasta llegar al 50%. Esto debido a los cambios climáticos, cabe mencionar que el equipo no cuenta con un filtrador para retirar el porcentaje de agua del aire por lo que esta ingresa directamente a la cámara de secado siendo una variable más influyente en la adhesión de los polvos finos.

Análisis de datos

Tabla 5. Análisis de varianza de dos factores con una sola muestra por grupo

<i>RESUMEN</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Fila 1	3	19.303	6.43433333	0.26902633
Fila 2	3	31.3	10.43333333	2.96443333
Fila 3	3	22.318	7.43933333	2.75458633
Fila 4	3	24.25	8.08333333	3.89223333
Fila 5	3	25.55	8.51666667	2.07763333
Fila 6	3	28.88	9.62666667	2.16763333
Columna 1	6	51.025	8.50416667	5.82740417
Columna 2	6	45.726	7.621	2.1353864
Columna 3	6	54.85	9.14166667	2.60997667

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamientos	31.6103776	5	6.32207552	2.97461023	0.06699316	3.32583453
Bloques	6.99763344	2	3.49881672	1.64623405	0.24097493	4.10282102

Error	21.2534586	10	2.12534586
Total	59.8614696	17	

En la tabla 5 se muestra el análisis de varianza de del diseño por bloques completamente al azar de las diferentes concentraciones de azúcar por cada tipo de producto. Dado que el f de Fisher es menor que la f tabulada indica que no hay diferencias significativas por lo que se acepta la hipótesis nula, la concentración de azúcares no tiene efecto significativo en la adhesión del café, ya que la mayoría tuvo un porcentaje de adhesión alta en las tres repeticiones cabe mencionar que el producto A sin concentración también tuvo adhesión, en la suma de cuadrados por bloques tampoco hubo diferencias significativas.

Tabla 6. Análisis de Varianza para dureza - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:PRESION DE VAPOR	0.05445	1	0.05445	0.06	0.8164
B:TAMAÑO DE PARTICULA	12.1525	1	12.1525	13.72	0.0208
C:TEMPERATURA DE PARTICULA	4.71245	1	4.71245	5.32	0.0823
RESIDUOS	3.54305	4	0.885763		
TOTAL (CORREGIDO)	20.4624	7			

La tabla 6 muestra el análisis de varianza del diseño factorial en la cual se descompone la variabilidad de dureza en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que un valor-P es menor que 0.05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre dureza con un 95.0% de nivel de confianza.

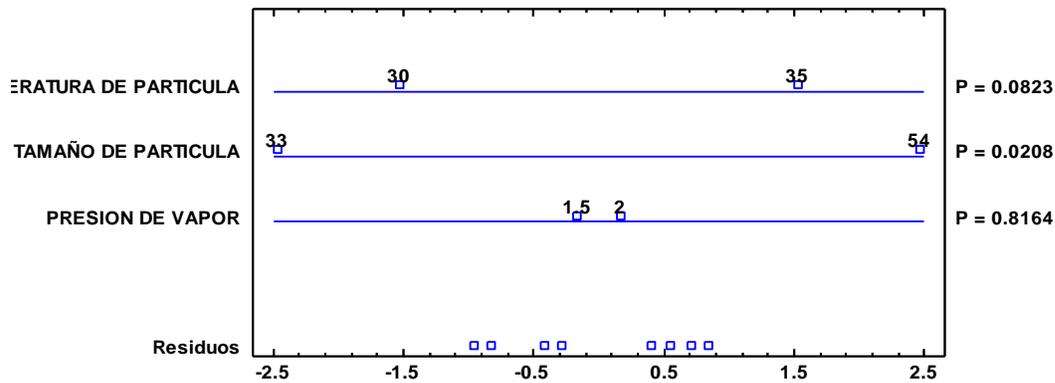


Figura 14. Grafico anova para dureza

En la figura 14 se muestra el grafico anova y se observa la distribución de la respuesta para los factores en la cual todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual. La mayoría presenta distribución anova con el valor p mayor a 0.5 sin embargo para el factor; tamaño de partícula el valor es menor a 0.5 con significancia.

Balace de energía

En el balance de materia y energía se obtuvo que la humedad en la salida aglomerado es del 73 % cuando hay una entrada de aire de 15.50 m³ / s con 50 % de humedad relativa a una temperatura de 230°C; necesita 1730 KJ/ kg de calor con una cantidad de aire seco de 2600 kg/ h para sistema adiabático sin embargo el aglomerador no es de este tipo de sistema por lo que se evaluó en un gráfico psicométrico (anexo1) encontrándose:

El aire se calienta a humedad constante (T_o -T₁). Si la cámara estuviera aislada y toda la energía posible se utilizara, el aire se enfriaría adiabáticamente y la temperatura mínima a alcanzar sería la de bulbo seco de saturación (T_{sat}). En realidad, la cámara no está aislada y no se sigue un enfriamiento adiabático. El aire sale a una temperatura T₂' (ni está saturado ni el proceso es adiabático), debido a la baja relación aire-producto. Si el proceso fuera adiabático, saldría a T₂ (proceso adiabático y masas iguales de aire y producto).

Optimización

De acuerdo a los cálculos de balance de materia los flujos de aire de 900 pm a 1100 rpm con una salida de 1765 rpm, mantienen el calor necesario para eliminar la humedad por lo que estas variables son las que se implementaron y controlaron para la aglomeración de los diversos productos.

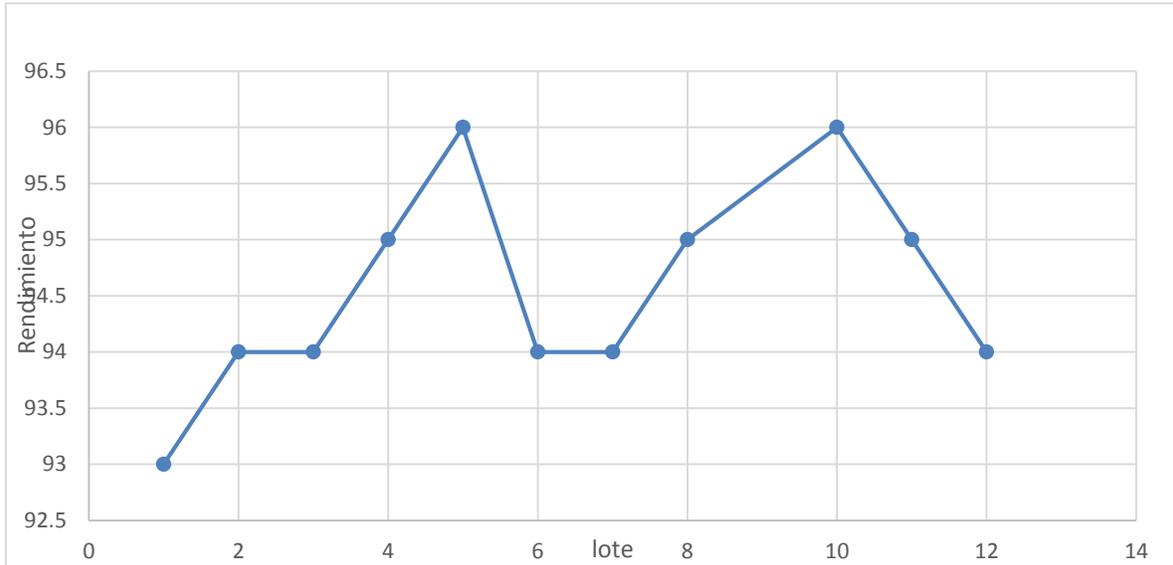


Figura 15. Grafica de rendimientos con flujo de aire de 900 rpm a 1100 rpm.

En la figura 15 se observa el comportamiento del rendimiento con las condiciones aire manejadas que mantuvieron un vacío de 0.4 y 0.5, inicialmente el rendimiento no fue favorable debido a la humedad relativa sin embargo en los siguientes lotes el rendimiento se mantuvo del 94 %, mejorando en los siguientes días al 97 % siendo favorable, con ello el porcentaje de adhesión disminuyó al 3 %, con estas condiciones la característica de porcentaje de aglomerado incremento al rango óptimo.

La optimización de las variables de temperatura de salida y tamaño de criba consistió en la reducción de sus rangos de operación para la cual la dureza mejoró apegándose al rango óptimo.

4.2 Conclusiones

Mediante el diseño experimentos se encontró que el aumento de dos factores: temperatura de salida y el tamaño de partícula influyen en el bajo porcentaje de aglomerado y el incremento en la dureza por que el granulo aglomerado presenta fragilidad y una cantidad de polvos finos. Así mismo con el diseño por bloques se determinó que la concentración de azúcares de los cafés no tiene efecto significativo, tomando como muestra patrón un producto sin concentración que también presento adhesión en las tres repeticiones. Durante el monitoreo se observó que los sólidos aglomerados a condiciones de bajo vacío con humedad relativa del aire baja no presentaban ningún problema de adhesión, mientras que los producto a condiciones de vacío alto con humedades por encima de 60% presentaban mayor adhesión, en balance de materia se observó que una humedad relativa alta en la salida del equipo necesita mayor calor y cantidad de aire de entrada para ser eliminado, así mismo mediante las eficiencias térmicas se evaluó el sistema en una carta psicométrica y se determinó que hay perdida calor en la cámara de secado al no ser adiabático, por lo que la optimización del proceso solo fue parcial enfocándose solo a condiciones del aire de entrada y salida, en la que el rendimiento mejoro en un promedio del 96 %.

4.3 Trabajos Futuros

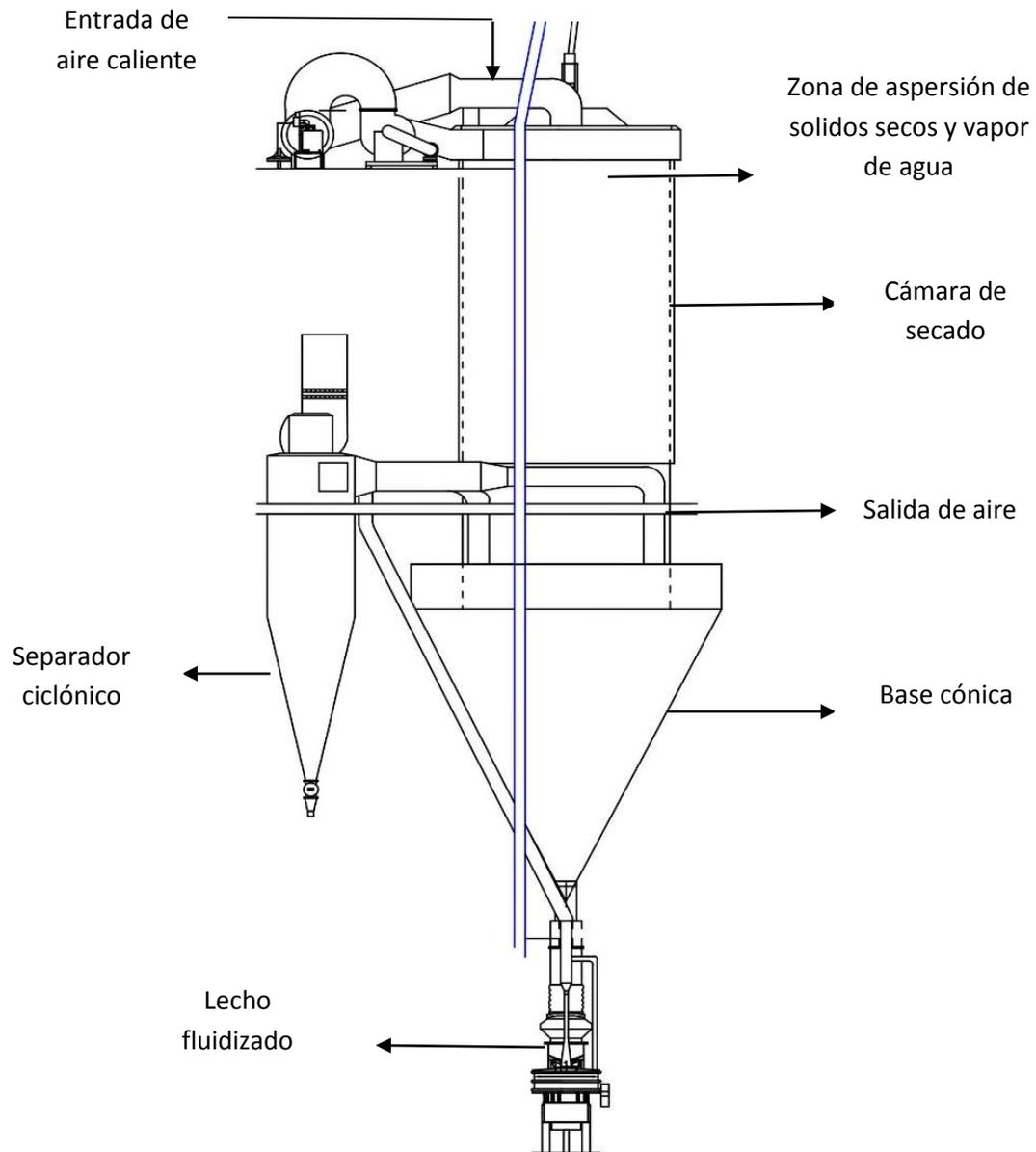
Derivado al balance y los cálculos; la humedad relativa es un factor importante en la adhesión del producto es por ello que el proyecto tiene continuidad en la implementación de un desumificador de aire para que el sistema tenga una inyección de aire seco, el aislamiento (encamisado) de la cámara de secado para evitar pedidas del calor también y la determinación de nuevas condiciones de operación debido a los cambios en los flujos aire.

4.4 Recomendaciones

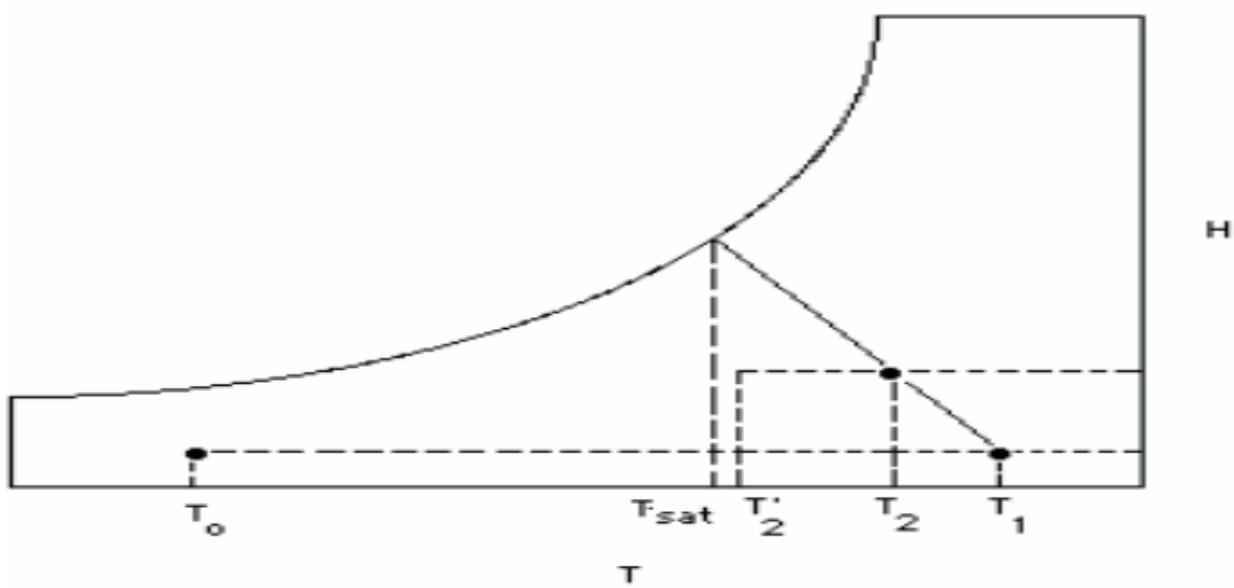
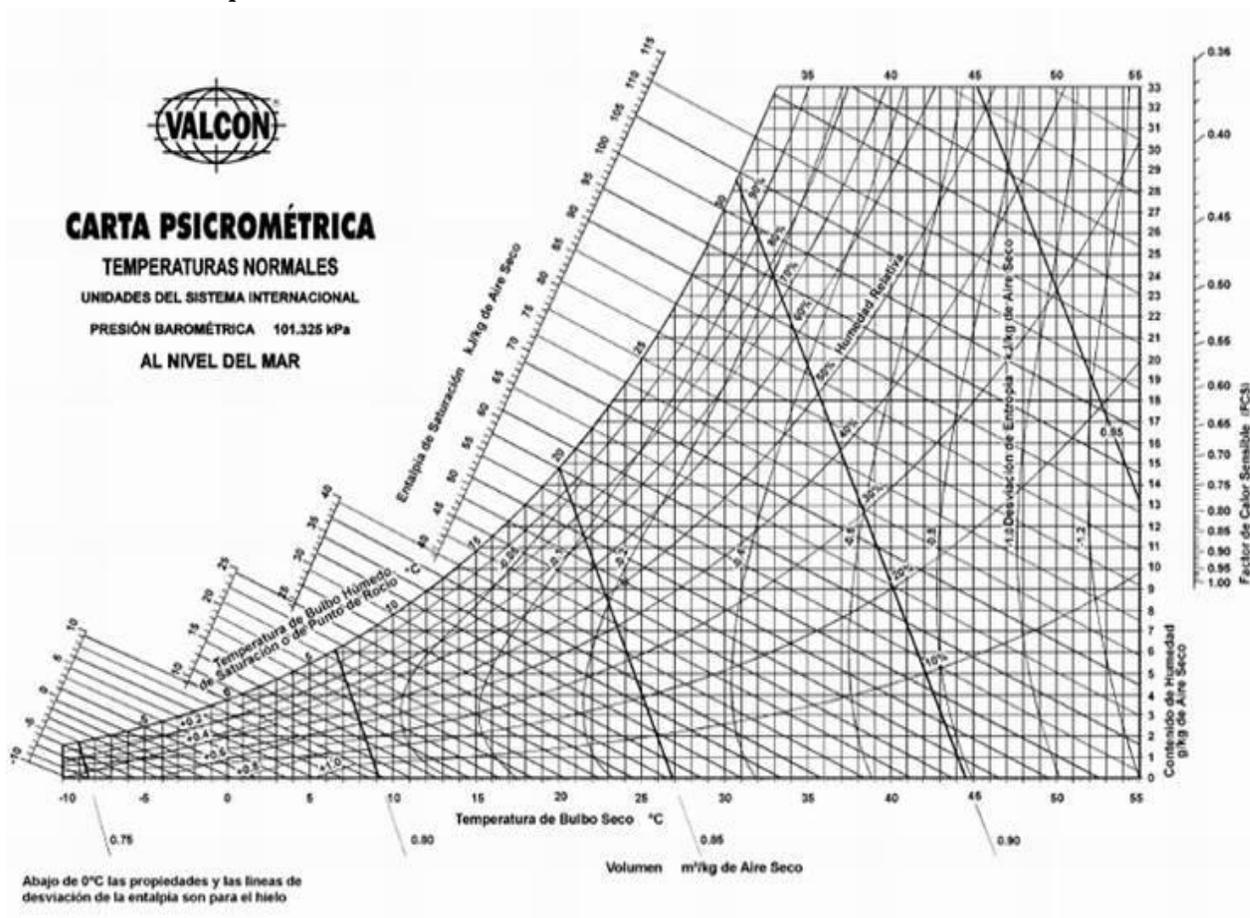
De acuerdo al estudio realizado mediante el diseño factorial se determinó que la variación de la entrada de aire afecta la presión del sistema por lo que se recomienda manejar una sola condición de aire para cada producto con respecto a la velocidad de salida ya que el sistema necesita mantener el equilibrio de las corrientes de aire para que el calor sea necesario y elimine toda la humedad posible del vapor de agua para evitar que se concentre en la base cónica, así mismo la alimentación de los sólidos finos debe tener propiedades características óptimas para evitar la variación de las condiciones .

ANEXOS

Anexo 1. Equipo aglomerado



Anexo 2 .Carta psicrométrica



Fuente: Spray Drying Handbook (Masters, 1991)

Anexo 3. Cálculos de velocidad lineal, caudales de aire y volumen del equipo

$$1765 \text{ rpm } (2\pi\text{rad/s}) \cdot (0.42) = 77.63 \text{ m/s}$$

$$600 \text{ rpm } (2\pi\text{rad/s}) \cdot (0.30) = 26.38 \text{ m/s}$$

$$700 \text{ rpm } (2\pi\text{rad/s}) \cdot (0.30) = 30.78 \text{ m/s}$$

$$800 \text{ rpm } (2\pi\text{rad/s}) \cdot (0.30) = 35.18 \text{ m/s}$$

$$900 \text{ rpm } (2\pi\text{rad/s}) \cdot (0.30) = 39.65 \text{ m/s}$$

$$1000 \text{ rpm } (2\pi\text{rad/s}) \cdot (0.30) = 43.48 \text{ m/s}$$

$$1150 \text{ rpm } (2\pi\text{rad/s}) \cdot (0.30) = 50.57 \text{ m/s}$$

Caudal para las diferentes velocidades lineales.

1) $Q = V \cdot S$

$$Q = 26.38 \text{ m/s } (\pi \cdot 0.0335 \text{ m})^2$$

$$Q = 9.30 \text{ m}^3/\text{s}$$

2) $Q = V \cdot S$

$$Q = 30.78 \text{ m/s } (\pi \cdot 0.0335 \text{ m})^2$$

$$Q = 10.85 \text{ m}^3/\text{s}$$

3) $Q = V \cdot S$

$$Q = 35.18 \text{ m/s } (\pi \cdot 0.0335 \text{ m})^2$$

$$Q = 12.40 \text{ m}^3/\text{s}$$

4) $Q = V \cdot S$

$$Q = 43.48 \text{ m/s } (\pi \cdot 0.0335 \text{ m})^2$$

$$Q = 15.50 \text{ m}^3/\text{s}$$

5) $Q = V \cdot S$

$$Q = 50.57 \text{ m/s } (\pi \cdot 0.0335 \text{ m})^2$$

$$Q = 20.02 \text{ m}^3/\text{s}$$

6) $Q = V \cdot S$

$$Q = 77.63 \text{ m/s } (\pi \cdot 0.195 \text{ m})^2$$

$$Q = 37.08 \text{ m}^3/\text{s}$$

Velocidad angular de aire (rpm)	Caudal (m3/s)
600 rpm	9.3
700	10.85
800	12.40
1000	15.50
1150	20.02
1765	37.08

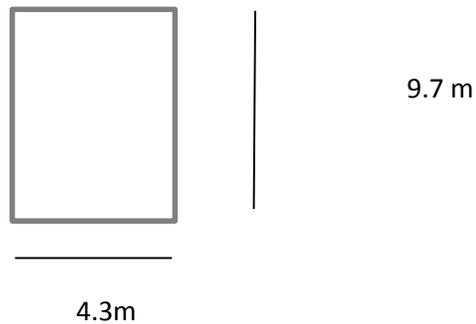
Caudales de aire de entrada y salida

Volumen de la cámara de secado

$$V = h\pi r^2$$

$$v = 9.7 \pi (2.1\text{m})$$

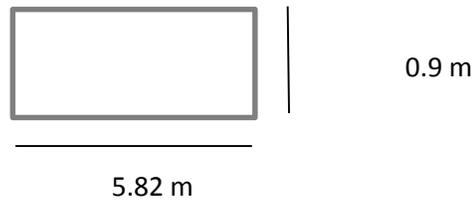
$$v = 140.844 \text{ m}^3$$



$$V = h\pi r^2$$

$$v = (0.9\text{m}) (\pi * 2.1\text{m})$$

$$v = 24.20 \text{ m}^3$$

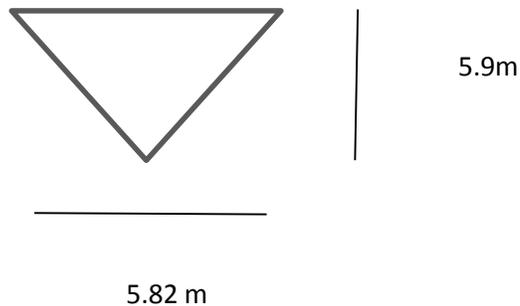


Volumen de la base cónica

$$v = \frac{\pi r^2 h}{3}$$

$$v = \frac{\pi (2.91) * 5.9}{3}$$

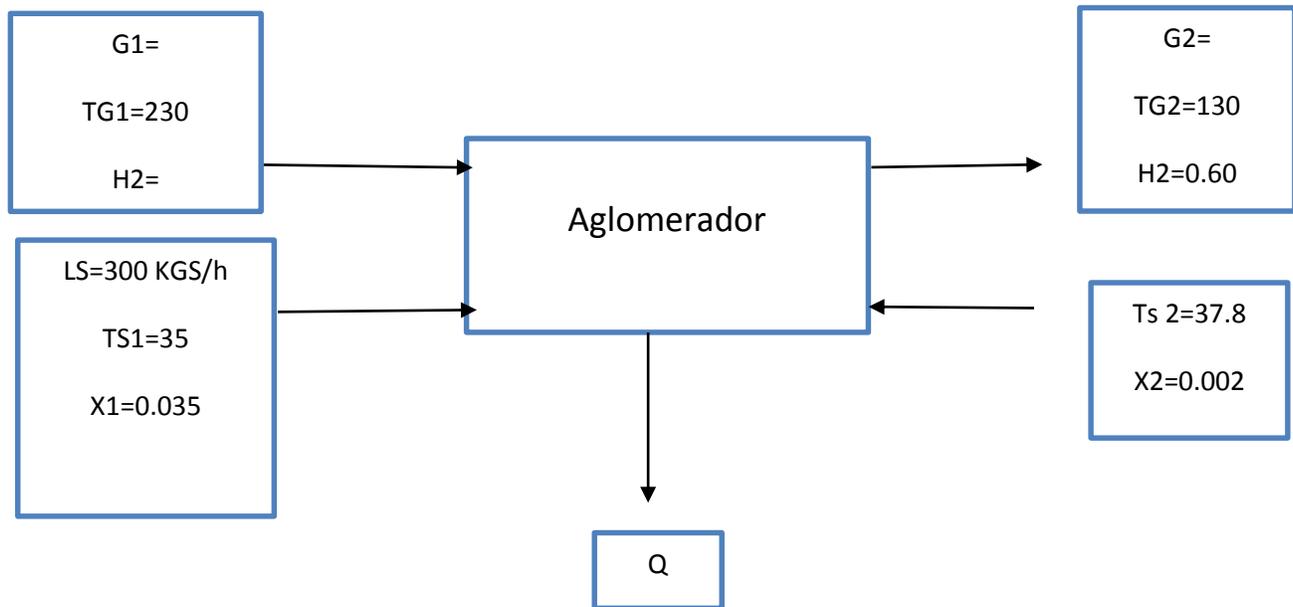
$$V = 52.313 \text{ m}^3$$



Volumen total del equipo = 217.34 m³

Anexo 3. Cálculos de balance de materia y energía

Se determina la velocidad de flujo de aire y la humedad de salida del aglomerador; suponiendo que no hay pérdidas de calor en el secador, el balance inicia con la alimentación de 300 kg de sólidos seco/h que contienen 0.035 kg de humedad total/kg de sólido seco hasta un valor de 0.002 kg de humedad total/kg de sólido seco. El polvo fino a granular entra a 35 °C y se desea descargarlo a 32 °C. El sólido seco tiene una capacidad calorífica de 1.465 kJ/kg.K que se supone constante. El aire de calentamiento entra a 230 °C y con humedad de 0.060 kg H₂O/kg de aire seco y debe salir a 130.



Balance de materia con respecto a la humedad

$$GH_2 + LS X_1 = GH_1 + LS X_2$$

Reemplazando valores:

$$(0.60) + 300 (0.035) = GH_1 + 300 (0.002)$$

El balance de calor para el secador es:

$$GH_{G2} + L_s H_{S1} = GH_{G1} + L_s H_{S2} + Q$$

Se calcula la entalpía del aire de entrada H_{G1}

$$H_{G1} = C_S 1.005 + 1.88H = 1.005 + 1.88(0.60)$$

$$H_{G1} = C_S (T_{G1} - T_0) + H \lambda$$

$$H_{G1} = C_S (230 - 0) + 0.060(2501) = 1730.6 \text{ KJ/ Kg aire seco}$$

Se calcula la entalpía del aire de salida H_{G2}

$$C_2 = 1.005 + 1.88H = 1.005 + 1.88 H_1$$

$$H_{G1} = C_S (T_{G2} - T_0) + H \lambda$$

$$H_{G1} = (1.005 + 1.88 H_1)(130 - 0) + H_1(2501)$$

$$H_{G1} = 130 + 2745.4 H_1$$

Se calcula las entalpías de los sólidos:

$$H_{S1} = C_{P S} (T_{S1} - T_0) + X_1 C_{P A} (T_{S1} - T_0)$$

$$H_{S1} = 1.465(35 - 0) + 0.035(4.187)(35 - 0) = 57.13 \text{ kJ / kg}$$

$$H_{S2} = C_{P S} (T_{S2} - T_0) + X_2 C_{P A} (T_2 - T_0)$$

$$H_{S2} = 1.465(32 - 0) + 0.002(4.187)(32 - 0) = 47.14 \text{ KJ / Kg}$$

Reemplazando en el balance de energía:

$$G(1730.6) + 300(57.13) = G(130 + 2745.4 H_1) + 300(47.14) + 0$$

$$G = 2600 \text{ Kg / aire seco por hora}$$

Resolviendo conjuntamente con el balance de materia:

$$G(0.60) + 300(0.035) = GH_1 + 300(0.002)$$

$$2600(0.60) + 10.5 = 2600 H_1 + 0.6$$

$$H_1 = \frac{2600(0.60) + 10.5 - 0.6}{2600}$$

$$H_1 = 0.7427 \text{ Kg agua / kg aire seco}$$

Anexo 4. Calculo de eficiencias térmicas

Datos

$$T = 230$$

$$T_s = 147$$

$$T_0 = 30$$

$$T_{sat} = 45$$

Eficiencia térmica global

$$N_{termica\ global} = \frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_0} \times 100$$

$$N_{termica\ global} = \frac{230 - 147}{230 - 30} * 100 = 41.5 \%$$

Eficiencia de evaporación

$$N_{evaporacion} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{sat}}$$

$$N_{evaporacion} = \frac{230 - 147}{230 - 45} * 100 = 44.86 \%$$

BIBLIOGRAFÍA

- Litster, J. (2003). Scaleup of wet granulation processes. *Powder and Tecnology*, 130, 35-40.
- Ayazi, S. p., Liu, z., & Yates, G. (1990). Hydrodynamic influences on particle breakage in fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 45 (4), 809–817.
- Boonyai, P. (2004). Stickiness measurement techniques for food powder. *Powder Technol*, 34-36.
- Canela, I. (1996). Fluidizacion de particulas finas obtenidos en un secador por aspersion. *Avances en Ingenieria Quimica*, 20-23.
- Cryer , A. S. (1999). Modelado de procesos de aglomeración en lechos fluidizados. *AIChE Journal*, 45 (10), 2069–2078.
- Cryer, A. S. (2003). Observations and process parameter sensitivities in fluid–bed granulation. *AIChE Journal* 45 (10), 2069–2078.
- Cryer, A. S. y Scherer, N.R. (2003). Observations and process parameter sensitivities in fluid–bed granulation. *AIChE Journa*, 2069–2078 .
- Dacanal, G., & Menegalli, F. (2008). Experimental study of fluidized bed agglomeration of acerola powder. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 51–58.
- Dolinski, A. (2000). Fruits and vegetables powders produccion technology on the bases of spray convetive drying methods. *Drying Technology*, 747-758.
- Ezabra , A. (1967). *Procedimiento para aglomerar particulas finas de café soluble.España Patente nº 36848*.
- Hulbert, H. (1967). Some Problems in Particle Technology. A Statistical. *Chemical Engineering Science* 19, 555-574.
- Iveson, S. M., & Hapgood, k. (2001). Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes. *Powder Technology*, 117 (1–2), 3–39.
- Kumar, S., & Ramkrishna, D. (1997). On the Solution of population balance equations by discretization–III. Nucleation, growth and aggregation of particles. *Chemical Engineering Science*, 52(24), 4659–4679.
- Lister, J., & Waters, A. (1988). Kinetics of iron ore sinter feed granulation. *Powder Technology*, 125-134.
- Litster, J., & Bryan, E. (2004). *The Science and Engineering of Granulation Processes*. Madeburg: Springer Science & Business Media.
- Montgomery, C. (2007). *Diseño y analisis de experiementos*. John wiley.
- Mort, P. (2005). Escalado de procesos de aglomeración de aglutinantes. *Powder Technology*, 86, 103.
- Papadakis, E. (2006). Spray drying of raisin juice concentrate. *Drying Technol*, 173-180.

- Parveen, F. (2012). Effect of size and density on agglomerate breakage in a fluidized bed. *Powder Technology* 231, 102-111.
- Pietsch , W. (2003). An interdisciplinary approach to size enlargement by agglomeration. *Powder Technology*, 8-13.
- Ríos, M. (2005). *Agglomeración de Finos en un Sistema Combinado Aspersión–Fluidización*. Universidad Autónoma Metropolitana, México.: Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química.
- Sastry , K., & Fuerstenau, D. (1973). Mechanisms of agglomerate growth in green pelletization. *Powder Technology*, 7, 97-105.
- Schaafsma , S., & Kossen, N. (2006). A Model for the spray zone in early–stage fluidized bed granulation. *AIChE Journal*, 2736–2741.
- Schaafsma, S.H. (1998). Description of agglomerate growth. *Powder Technology* 97, 183-190.
- Tan, H. (2006). Kinetics of fluidized bed melt granulation I: The effect of process variables. *Chemical Engineering Science*, 61 (5), 1585–1601.
- Tan, H., & Salman, A. (2005). Kinetics of fluidized bed melt granulation V: Simultaneous modelling of aggregation and breakage. *Chemical Engineering Science*, 3847–3866.
- Waldie, B. (1991). Growth mechanism and the dependence of granule size on drop size in fluidized–bed granulation. *Chemical Engineering Science*, 46 (11), 2781–2785.
- Wolfgang , B. P. (2008). *Agglomeration Processes*. Weinheim: Phenomena, Technologies, Equipment.