

**ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE SEPARACIÓN NUEZ – FIBRA EN
COLUMNA NEUMÁTICA APOYADA EN EVALUACIONES REALIZADAS A
ESCALA PILOTO.**

SILVIA LILIANA CALA AMAYA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2006**

**ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE SEPARACIÓN NUEZ – FIBRA EN
COLUMNA NEUMÁTICA APOYADA EN EVALUACIONES REALIZADAS A
ESCALA PILOTO.**

SILVIA LILIANA CALA AMAYA

**Trabajo de grado para optar el título de:
Ingeniera Química**

**Director
LUIS MARIANO IDARRAGA BERNAL
Ingeniero Químico**

**Subdirector
CARLOS ALBERTO FERNANDEZ BOTIA
Ingeniero Químico
Investigador auxiliar CENIPALMA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2006**

A Dios,
A mis padres
Y a todos aquellos que con su apoyo y afecto han ayudado a
cumplir mis metas.

AGRADECIMIENTOS

A los doctores César de Hart y Guillermo Londoño, al ingeniero Omar Cadena Gómez y a todo el personal operativo y administrativo de Agroince Ltda. & Cia. SCa por su respaldo, apoyo y constante colaboración.

Al Ingeniero Luis Mariano Idarraga Bernal, por su confianza y apoyo.

Al Ingeniero Carlos Alberto Fernández, por sus valiosos aportes y consejos.

RESUMEN

Título:

Análisis de la operación de separación fibra – nuez en columna neumática apoyado en evaluaciones realizadas a escala piloto.*

Autor: CALA AMAYA, Silvia Liliana **

Palabras clave: Separación neumática, Pérdidas de almendra, desfibrado, columna piloto, palmistería.

Descripción:

Mediante el desarrollo de este proyecto se busca disminuir los niveles de pérdida de almendra en fibras para los sistemas de separación neumática en plantas extractoras de aceite de palma africana, utilizando datos de velocidad de arrastre para los componentes de la torta de prensas, los cuales son obtenidos mediante la experimentación en columna neumática piloto.

Durante el análisis se establecieron los parámetros para la operación de la columna piloto, evaluando velocidades de fluidización y arrastre para nueces enteras, nueces rotas, almendras enteras, almendras rotas y cuesco. Se realizó un diagnóstico de las características de la torta proveniente del prensado y de sus componentes, teniendo en cuenta las variedades de fruto procesadas en Agroince Ltda. La calibración de la columna neumática en planta permitió determinar los caudales de aire requeridos para cumplir con las relaciones de 4, 5 y 6 kg aire / kg fibra y así evaluar configuraciones mecánicas que permitan mejorar el proceso de separación de nueces y fibras disminuyendo el arrastre de almendras.

Las configuraciones operativas de la columna elegidas presentaron una reducción notable en los niveles de pérdidas de almendra, logrando disminuirlas hasta en un 41% con respecto a las reportadas inicialmente. De esta manera se logran beneficios económicos importantes, ya que es posible recuperar hasta \$1000 por tonelada de RFF (Racimos de Fruta Fresca) procesados. Adicionalmente, al reducir el caudal de aire requerido para la separación, se reduce el consumo de energía en el motor del ventilador.

Los resultados obtenidos son aplicables en cualquier etapa del proceso de extracción de aceite donde se emplee la separación o el transporte neumático y puede ser adaptado a las condiciones particulares de cada planta extractora.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Ingeniería Química. Ing. M.Sc. Luis Mariano Idárraga Bernal. Ing. Carlos Alberto Fernández Botia.

SUMMARY

Title:

Analysis of the fiber – nut separation in a pneumatic column based on pilot plant evaluations. *

Author: CALA AMAYA, Silvia Liliana **

Keywords: Pneumatic separation, kernel waste, shredding, pilot column, palmistry.

Description:

With the development of this project we want to reduce the almond fiber waste levels for the pneumatic separation systems in the African palm oil extracting plants, using components of the cake of presses drag velocity data which are obtained experimentally in the pilot pneumatic column.

Operation parameters for the pilot column evaluating nuts, broken nuts, kernel, broken kernel and shells fluidization and drag velocities were established.

A diagnosis of the press cake and its components was made taking into account the fruit variety processed in Agroince Ltda. The calibration of the pneumatic column on plant allow us to determine the air mass flow required to accomplish with the 4, 5 and 6 kg air/kg fiber ratio and evaluate several mechanic configurations that allow to improve the separation of nuts and fiber processes by means of almond drag reduction.

The selected column operation configurations show a notorious reduction on the almond waste levels, reaching a 41% reduction with respect to the initially reported. In this way, important economical benefits were obtained; it is possible to recuperate around \$1000 per ton of processed FFB (Fresh Fruit Bunch). Additionally, reducing the required air mass flow for the separation we reduce the energy consumption of the fan motor.

The obtained results are applicable in any separation or pneumatic transport step of the oil extraction process and it can be adapted to the particular conditions of each extracting plant.

* Degree Work.

** Physical – Chemical Engineerings Faculty, Chemical Engineering. Eng. Luis Mariano Idarraga Bernal M.Sc. Eng. Carlos Alberto Fernández Botía.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	15
1. FUNDAMENTO TEÓRICO	16
1.1 GENERALIDADES DE LA AGROINDUSTRIA DEL ACEITE DE PALMA	16
1.1.1 Fruto de palma de aceite: variedades y composición.	16
1.1.2 Clasificación de variedades de palma africana.	19
1.1.3 Proceso de extracción de aceite de palma y palmiste.	20
1.2 FUNDAMENTOS DE LA SEPARACION NEUMATICA	20
1.2.1 FLUIDIZACIÓN DE PARTICULAS	20
1.2.2 Condiciones de mínima de fluidización y arrastre	22
1.2.3 Propiedades de las partículas.	23
1.3 SISTEMA DE SEPARACION FIBRA – NUEZ.	26
1.3.1 Columna	27
1.3.2 Ventilador	27
1.4 COLUMNA DE DESFIBRACION EN AGROINCE LTDA & CIA SCA.	28
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	29
2.1. ESTANDARIZACION DE LA METODOLOGIA DE EXPERIMENTACION EN COLUMNA NEUMATICA ESCALA PILOTO.	29
2.1.1 Columna de separación neumática piloto	30
2.1.2 Tamaños de muestra.	31
2.2 CARACTERIZACION DE LA TORTA PROVENIENTE DE 3. MATERIALES DE FRUTA.	32
2.2.1 Composición de la torta de prensas.	32
2.2.2 Distribución de tamaños para partículas en Torta de prensas	33
2.2.3 Pérdida de almendra en fibras ciclónicas.	34
2.3 DETERMINACION DE VELOCIDADES DE FLUIDIZACION Y	34

ARRASTRE PARA COMPONENTES DE TORTA DE PRENSAS EN COLUMNA NEUMATICA PILOTO.	
2.4 EVALUACION DE CURVAS DE OPERACIÓN EN COLUMNA DE SEPARACIÓN NEUMÁTICA.	35
2.4.1 Calibración del ventilador en la descarga	36
2.4.2 Medición de la velocidad del aire en zonas de separación para operación en vacío	36
2.5 SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE CONFIGURACIONES ÓPTIMAS PARA COLUMNA DE SEPARACIÓN NEUMÁTICA EN PLANTA.	37
2.5.1 Seguimiento a pérdidas de almendra en fibras para nuevas condiciones de proceso.	39
2.5.2 Valoración económica por reducción de pérdida	39
3. RESULTADOS	40
3.1 METODOLOGIA PARA LA OPERACIÓN DE LA COLUMNA NEUMÁTICA A ESCALA PILOTO	40
3.1.1 Tamaños de muestra a utilizar en columna piloto.	40
3.2 CARACTERÍSTICAS DE TORTA DE PRENSAS PARA LAS VARIETADES IRHO ADULTA, PAPUA ADULTA Y PAPUA JOVEN.	42
3.2.1 Distribución de tamaños para los componentes de la torta de prensas	44
3.2.2 Seguimiento a porcentajes de pérdida y distribución de tamaños de almendra en fibra ciclónica para capacidad de 15 ton/h rff.	44
3.3 VELOCIDADES DE FLUIDIZACION Y ARRASTRE POR TAMAÑOS DE PARTICULA PARA COMPONENTES DE TORTA DE PRENSAS EN COLUMNA NEUMATICA PILOTO.	45
3.3.1 Cálculo de velocidades de fluidización y arrastre mediante método numérico.	47

3.4 CURVAS DE OPERACIÓN EN COLUMNA DE SEPARACIÓN NEUMÁTICA PARA DIFERENTES APERTURAS DE COMPUERTAS	47
3.4.1 Calibración del ventilador de descarga	48
3.4.2 Curvas de operación para zonas de separación en columna neumática.	49
3.5 EVALUACIÓN DE CONFIGURACIONES OPERATIVAS ÓPTIMAS PARA COLUMNA NEUMÁTICA EN PLANTA.	49
3.5.1 Seguimiento a porcentajes de pérdida de almendra y distribución de tamaños de partícula en fibra ciclónica para capacidad de 22.5 Ton/h RFF.	50
3.5.2 Características de la torta de prensas.	51
3.5.3 Pérdidas de almendra en fibra para diferentes configuraciones de columna neumática.	51
3.5.4 Estimación económica por reducción de pérdida.	53
6. CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFIA	56
ANEXOS	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Etapas y productos en la cadena productiva que se deriva del cultivo de la palma de aceite	18
Tabla 2. Velocidades de arrastre para componentes de torta de prensas	24
Tabla 3. Tamaños de muestra evaluados a evaluar en columna neumática escala piloto.	32
Tabla 4. Tamices serie Tyler para análisis de distribución de tamaños por tamizado y tamices disponibles en la planta extractora Agroince Ltda.	33
Tabla 5. Caudales evaluados en columna neumática, operación en vacío.	38
Tabla 6. Configuración de la columna neumática para evaluación en proceso.	39
Tabla 7. Tamaños de muestra seleccionados para evaluaciones en columna neumática escala piloto.	42
Tabla 8. Diámetros de partícula predominantes en componentes de torta de prensas.	45
Tabla 9. Velocidades experimentales de fluidización y arrastre para componentes de torta de prensas.	47
Tabla 10. Beneficios económicos de la disminución de pérdida de almendra en fibra ciclónica.	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Composición de los racimos y los frutos de palma africana.	19
Figura 2. Diagrama del proceso de extracción de aceite de palma.	21
Figura 3. Curvas típicas de caída de presión y altura de lecho frente a velocidad superficial para un lecho de sólidos.	23
Figura 4. Medición de las dimensiones de una nuez.	26
Figura 5. Sistema de separación neumática: columna y ventilador	28
Figura 6. Diagrama de flujo de metodología experimental.	29
Figura 7. Columna de separación neumática escala piloto	31
Figura 8. Detalle dámper de descarga de ventilador en sistema de separación neumática de fibras.	37
Figura 9. Columna de separación neumática de fibra. Zonas de separación y puntos de muestreo.	38
Figura 10. Curva de calibración Velocidad Vs Frecuencia para ventilador en columna neumática escala piloto.	41
Figura 11. Composición particular de torta de prensas para tres variedades de fruto.	43
Figura 12. Composición general de torta de prensas para tres variedades de fruto.	43
Figura 13. Curvas de tendencia para velocidades de arrastre en almendra entera y rota.	46
Figura 14. Curvas de calibración para ventilador en columna de separación neumática.	48

Figura 15. Curvas de variación de velocidad para diferentes aperturas de compuerta en la zona de separación uno con operación en vacío.	50
Figura 16. Pérdidas de almendra en fibras ciclónicas para diferentes configuraciones de la columna neumática.	52

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Protocolo de experimentación en columna neumática escala piloto.	44
ANEXO 2. Curvas de distribución de tamaños de los componentes de la torta para 3 tipos de fruto.	45
ANEXO 3. Curvas de fluidización generadas en evaluación de las velocidades de mínima fluidización y arrastre para diferentes tamaños de partículas en columna piloto para los componentes de la torta de prensas.	51
ANEXO 4. velocidades de mínima fluidización y arrastre experimentales y analíticas.	54

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el sector palmero Colombiano ha prestado especial interés en la almendra o palmiste como importante subproducto dentro del proceso de extracción de aceite rojo debido a que se han notado sus repercusiones económicas para las plantas de beneficio. Dicha tendencia se ve reflejada en un aumento de la producción de aceite y torta de palmiste con relación a años anteriores. La razón fundamental de este comportamiento es el crecimiento de la demanda debido a la incorporación del aceite y torta de palmiste como materia prima alternativa para el sector industrial de alimentos de consumo humano, animal y para el sector farmacéutico.

En cuanto a la evaluación del proceso de recuperación de almendra, se ha establecido que los principales focos de pérdida de material corresponden a la separación neumática de Nuez - Fibra (Representa el 70% del total de pérdidas) y los sistemas de separación Almendra – Cuesco (Representan entre el 15 y el 30% de la pérdida total) ^[1]. En Colombia las pérdidas de almendra reportadas durante los últimos años superan el estándar internacional de 0.6% almendra/RFF (Racimos de Fruta Fresca) ^[2]. En la zona central durante el periodo comprendido entre junio de 2005 a mayo de 2006 se reportaron pérdidas totales entre 0.81 y 1.11% almendra/RFF; siendo ésta una situación compartida en el resto del país.

A pesar de que los parámetros de diseño para equipos de separación neumática son generalizados e implementados en la mayoría de las plantas de beneficio, las condiciones particulares del proceso y por lo tanto las variables influyentes en la separación neumática varían para cada caso en particular. Variables como velocidades de separación, caudales de alimentación de los equipos y condiciones operativas de los mismos no son apropiadamente controladas en la mayoría de las plantas extractoras en el país debido a la falta de información sobre la influencia de estas variables en el proceso, su medición y control.

Adicionalmente son mínimos los conocimientos acerca de la influencia de las variaciones del tipo de fruto procesado y las condiciones globales del proceso en la sección de separación neumática tanto de fibra y nuez como de almendra y cuesco en la palmistería.

Debido a esta problemática y a la necesidad de aumentar la eficiencia en el proceso de extracción tanto de aceite rojo como de aceite de palmiste, se genera la necesidad de estudiar la sección de separación neumática fibra – nuez buscando mecanismos para disminuir los niveles de pérdida de almendra en esta etapa del proceso ^[3, 4, 5].

El análisis planteado es desarrollado en este proyecto para la planta de beneficio de Agroindustrias del Sur del Cesar (Agroince Ltda.) y pretende estudiar el proceso de separación neumática de fibras, sintonizar la columna de desfibración de la planta de acuerdo a algunas mediciones de velocidades de arrastre y fluidización realizadas a escala piloto y aplicar los resultados en la sección de desfibración de la planta de beneficio. Adicionalmente, el proyecto da a conocer fundamentos teóricos y técnicos acerca del funcionamiento de los equipos y del comportamiento particular de cada uno de los elementos constitutivos de la torta de prensas, lo cual constituye una referencia importante para el sector pues los resultados obtenidos pueden ser adaptados a las condiciones particulares de cada planta de beneficio tanto en la sección de separación fibra – nuez, como en otras etapas del proceso donde tenga aplicación la separación neumática.

1. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 GENERALIDADES DE LA AGROINDUSTRIA DEL ACEITE DE PALMA

En la agroindustria del la palma de aceite se obtiene como producto principal el aceite de palma o aceite rojo y como subproductos el aceite de almendra y la torta de palmiste. Como lo muestra la tabla 1 son diversos los usos y aplicaciones tanto del aceite de palma y palmiste como de sus derivados.

El aceite de palma representa de 40 a 50% del peso total del fruto y a su vez un 19 – 25% / RFF (Racimo de Fruto Fresco). Las almendras representan de 2.5 a 3.5% del peso del racimo y su aceite constituye el 4.4% / RFF. Del procesamiento del palmiste se obtiene del 50 a 56% de torta; el porcentaje restante esta conformado por aceite, humedad y residuos aceitosos (ariche). El palmiste contiene entre 17 y 19% de proteína y el contenido de ésta en la torta depende del tipo de proceso de extracción empleado y el grado de impurezas en la almendra ^[6].

Colombia ocupa el quinto lugar en producción mundial de aceite de palma (por debajo de países como Malasia, Indonesia, Nigeria y Tailandia) y el primero en Latinoamérica. En el año 2004, nuestro país produjo 630.000 toneladas de aceite crudo de palma y 145.000 toneladas de almendra o palmiste, lo que represento un total de 974.345 millones de pesos y un 53,1% de participación en la oferta nacional de aceites y grasas. Así también, durante el mismo año las exportaciones de aceite de palma y palmiste a los mercados de Europa y América fueron de 283.000 toneladas, lo que equivale aproximadamente a 157 millones de dólares. ^[7]

1.1.1 Fruto de palma de aceite: variedades y composición. La palma africana es una planta *monocotiledónea* (un solo cotiledón por semilla), perteneciente al

orden de las *palmales* y a la familia *palmaceae*. Es calificada como perenne por que su periodo de vida es largo; para cultivos comerciales se estima que el promedio de vida por palma es de 24 a 28 años según el material plantado. La producción de racimos en las palmas se da luego de 24 meses de ser sembrada en campo y permanece durante toda su etapa productiva.

Tabla 1. Etapas y productos en la cadena productiva que se deriva del cultivo de la palma de aceite.^[7]

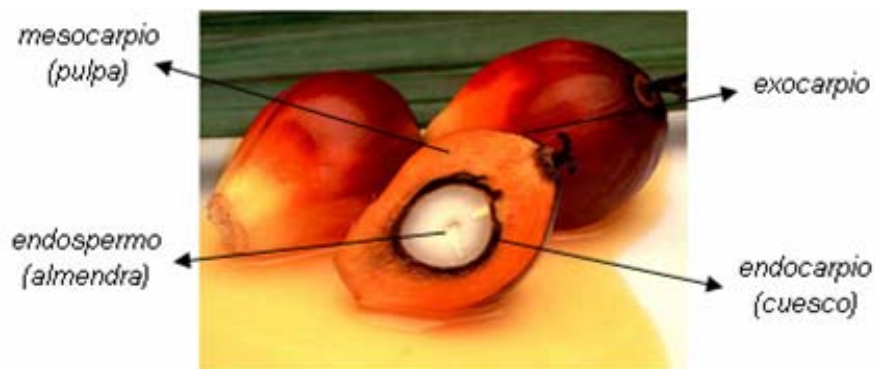
ETAPAS	Agroindustria			Industria de aceites y grasas
	Fase agrícola		Fase industrial primaria	Fase industrial avanzada
	Cultivo	Beneficio	Transformación industrial primaria	Transformación industrial mas compleja
PRODUCTOS	Fruto	Aceite crudo	Aceite de palma RBD* (granel). Oleína de palma. Estearina de palma. Ácidos grasos.	Aceites comestibles. Margarinas. Grasas para freír. Grasas para hornear. Grasas para confitería. Grasas para helados. Vanapasti. Jabones. Alimentos concentrados para animales. Alcoholes. Combustibles. Emulsificantes.
		Almendra de palma o palmiste	Torta de palmiste. Aceite de palmiste. Oleína de palmiste. Estearina de palmiste.	

* RBD: aceite refinado, desodorizado y blanqueado.

El racimo está compuesto básicamente por el raquis (tusa), las espigas y los frutos. Las espigas son el soporte de los frutos y rodean el raquis en forma helicoidal. Los frutos son de forma ovoide y alcanzan en su madurez un peso aproximado de 5 a 12 gramos. Como se puede apreciar en la figura 1, el fruto está compuesto por una piel lisa y brillante (exocarpio), un tejido carnoso donde se

encuentra el aceite atrapado en las células fibrosas (mesocarpio), una nuez o semilla compuesta de una corteza o cuesco (endocarpio) y una almendra aceitosa (endospermo) de donde se extrae el aceite de palmiste.

Figura 1. Composición de los racimos y los frutos de palma africana.



1.1.2 Clasificación de variedades de palma africana. Los tipos de palma africana se establecen de acuerdo a sus características físicas más relevantes como son el color del fruto, el grosor del cuesco y por ende con el contenido de aceite del fruto. Según el grosor del cuesco se clasifica en Pisífera (PxP), Dura (DxD) y Ténera (DxP).

En el tipo pisífera los frutos se caracterizan por que el cuesco es un cartílago blando muy delgado y las palmas tienen altas producciones de flores femeninas que en su mayoría no logran culminar con la formación de frutos; por ello esta variedad no es apetecida comercialmente. En el tipo Dura, los frutos presentan cuescos muy gruesos (2 a 8 mm de espesor en promedio) y por lo tanto los contenidos de mesocarpio son bajos. La palma tipo Ténera es un híbrido de la Dura y la Pisífera, por lo tanto el cuesco es mucho más delgado que la Dura y presenta porcentajes de pulpa considerables. Este tipo de palma es la más sembrada en el mundo actualmente. Los materiales Irho y Papúa son

pertenecientes al tipo Ténera y están presentes en gran parte de las plantaciones en el país.

1.1.3 Proceso de extracción de aceite de palma y palmiste. La figura 2 ilustra el proceso general de extracción de aceite de palma, dentro del cual el área de separación fibra – nuez (desfibración) tiene gran importancia. Una de las etapas previas que más influyen en la eficiencia de la desfibración es el prensado para extraer el aceite de palma rojo, pues debido al efecto de la presión ejercida por las prensas sobre la masa digestada (frutos cocidos) se produce el rompimiento de algunas nueces, generando partículas de almendra y cuesco de diferentes tamaños que posteriormente son arrastradas con el flujo de fibra en la columna neumática ^[8].

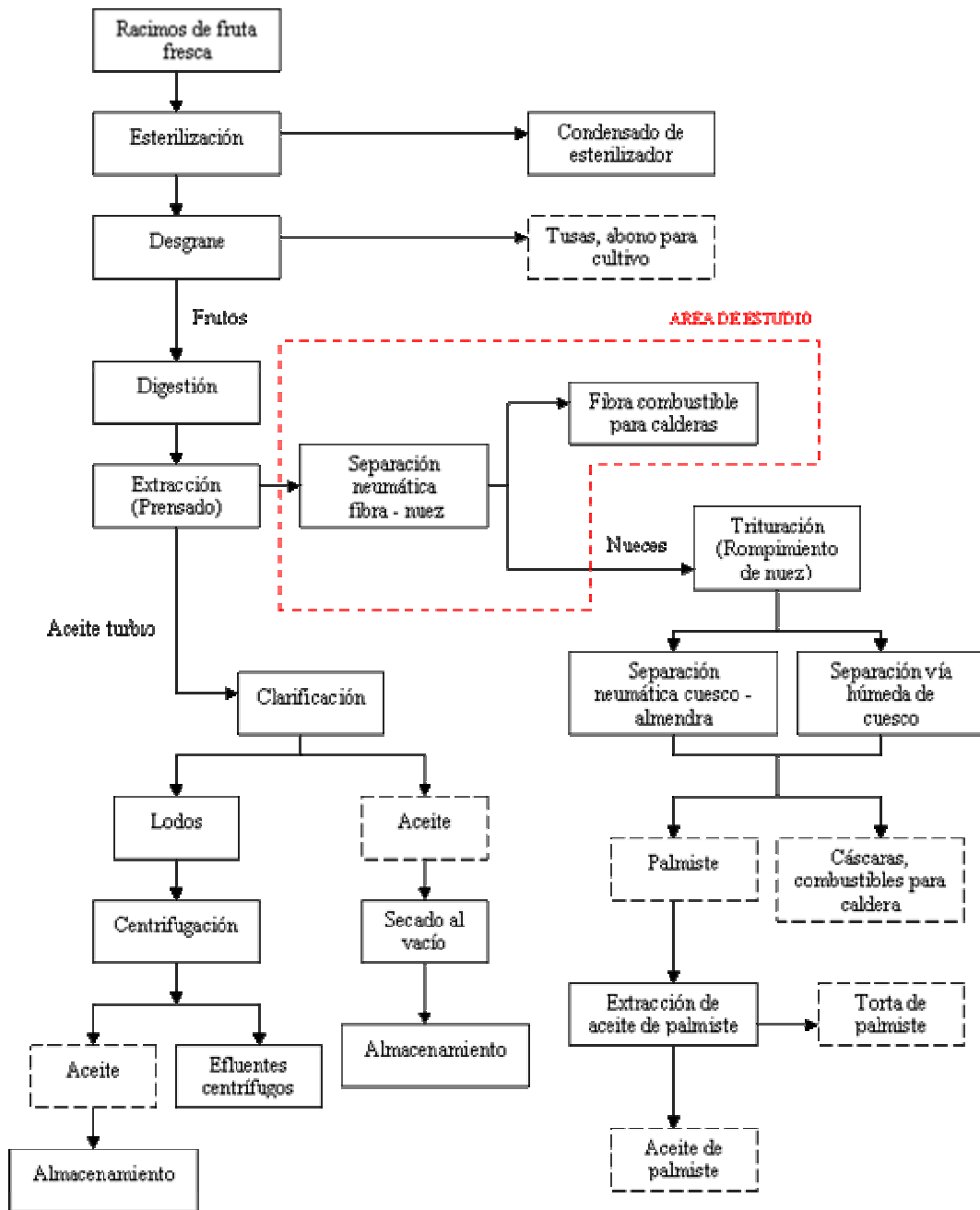
1.2 FUNDAMENTOS DE LA SEPARACION NEUMATICA.

El desarrollo industrial alrededor de la palma de aceite en Colombia es dirigida actualmente hacia la extracción de aceite crudo de palma y palmiste. Dentro de este proceso, la operación de fluidización tiene su aplicación en las etapas de separación neumática Nuez - Fibra, separación neumática Almendra – Cuesco y en ocasiones este sistema es implementado en el transporte de almendras y nueces hacia los silos de secado.

1.2.1 Fluidización de partículas. El fenómeno de fluidización es definido como la suspensión de un lecho de partículas sólidas sometidas a la acción de un fluido cuya fuerza de empuje actúa en el sentido opuesto a la fuerza ejercida por la gravedad sobre las mismas partículas.

En cuanto a la separación de materiales sólidos, se aprovechan las diferencias en peso por unidad de partícula, densidad y distribución geométrica para lograr determinar condiciones de arrastre individuales y separar los componentes de una mezcla.

Figura 2. Diagrama del proceso de extracción de aceite de palma.



Las variables más importantes que definen el fenómeno de separación neumática y se aplican en el proceso de extracción de aceite de palma son:

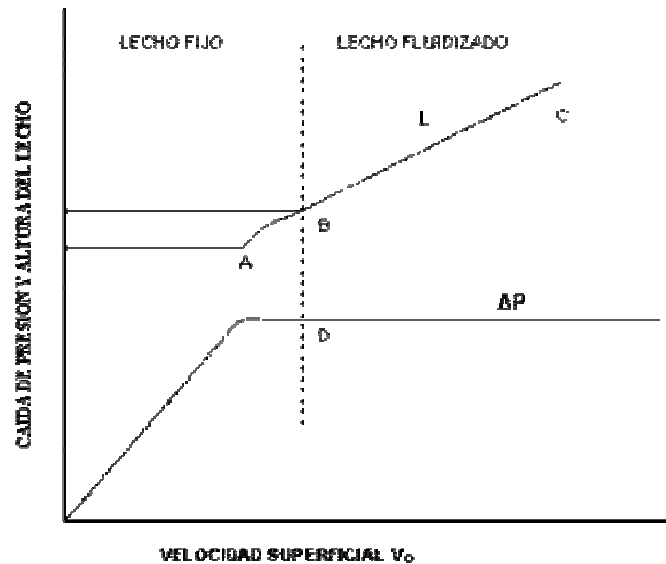
- *Velocidad de fluidización o suspensión*: Determina la zona de separación para los diferentes materiales que constituyen una mezcla.
- *Velocidad Terminal o de arrastre*: Determina condiciones mínimas de flujo y velocidad de aire para el transporte de sólidos en un fluido.
- *Caída de presión*: Determina la expansión del lecho en cada una de las etapas del fenómeno y se relaciona con la velocidad del fluido.
- *Propiedades de las partículas*: Son determinantes en el fenómeno e influyen directamente en las variables mencionadas. Las más importantes son volúmen, diámetro, densidad y forma de las partículas.

1.2.2 Condiciones de mínima de fluidización y arrastre. Bajo la acción de un fluido las partículas se fluidizan, presentado un comportamiento típico en las alturas del lecho y la caída de presión en el mismo con respecto a las velocidades lineales del fluido. Este comportamiento constituye una referencia en el estudio del fenómeno de separación neumática en la industria de la palma africana.

En la figura 3 se ilustra el comportamiento típico de la caída de presión en un lecho empacado a medida que se incrementa la velocidad de flujo. Desde el punto de velocidad cero hasta el punto **A**, el lecho y la caída de presión son estables. Entre los puntos **A** y **B** el lecho es inestable y las partículas ajustan su posición para presentar tan poca resistencia al flujo como sea posible.

En esta sección se obtiene el sistema de partículas más sueltas pero todavía en contacto. Al alcanzar el punto **B (D)**, todas las partículas están en movimiento. Este estado se conoce como de “mínima fluidización”. A partir del punto D, el incremento en ΔP es muy pequeño a medida que el lecho continúa expandiéndose.

Figura 3. Curvas típicas de caída de presión y altura de lecho frente a velocidad superficial para un lecho de sólidos ^[9].



Finalmente, luego del punto **C**, las partículas formarán una corriente con el fluido, ΔP disminuirá drásticamente y dejará de existir el lecho. Este estado se conoce como condición de arrastre. La tabla 2 muestra las velocidades de arrastre para partículas generadas en el proceso de extracción de aceite de palma ^[10].

1.2.3 Propiedades de las partículas. Las propiedades físicas de las partículas son importantes pues inciden directamente en la proporción de energía requerida para alcanzar el equilibrio de fuerzas en la condición de mínima fluidización de las partículas y para el arrastre de las mismas. En la separación neumática de los componentes de la torta de prensas se evalúa la humedad, densidad, forma y tamaño de las partículas, ya que son variables que influyen en la eficiencia de la desfibración.

Según su forma, las partículas pueden ser regulares o irregulares. La forma de las partículas se expresa mediante el factor de forma o factor de esfericidad Φ_s

(Ec.1), el cual es independiente del tamaño y determina la variación existente entre la forma de la partícula y la de una esférica de igual volumen (esfera equivalente).

$$\Phi = \frac{A_p}{A_c} = \frac{D_e}{D_c} \quad (1)$$

A_c = Área superficial real. Área del círculo más pequeño que circunscribe el eje de mayor longitud (m^2).

A_p = Area proyectada por una esfera de igual volumen (equivalente), en su posición normal de descanso (m^2).

D_e = Diámetro de la esfera equivalente (diámetro equivalente).

D_c = Diámetro esfera circunscrita más pequeña. Generalmente para partículas que no son equidimensionales se caracterizan por la dimensión de mayor longitud.

Tabla 2. Velocidades de arrastre para componentes de torta de prensas ^[11].

PARTÍCULA	VELOCIDAD DE ARRASTRE (M/S)
Cuesco (partículas pequeñas)	10
Cuesco (partículas medianas)	12 – 14
Almendras (partículas pequeñas)	14
Nueces pequeñas	16
Cuesco (partículas grandes)	16
Almendras medianas	18
Nueces medianas	20 – 24
Almendras grandes	20
Nueces grandes	24 - 28

Cuando la forma y el tamaño de la partícula dificultan determinar con exactitud su volumen y su forma, el diámetro de partícula se toma como el tamaño nominal basado en análisis de tamizado o en análisis indirectos. Para materiales como nueces y almendras, cuya forma se aproxima a la redondez, se utiliza el método de los tres ejes para determinar el diámetro equivalente (Ec. 2) ^[12]. Donde A, B y C corresponden a los tres ejes perpendiculares de las nueces, mayor, mediano y menor respectivamente. La figura 4 ilustra la determinación del diámetro equivalente D_e para una nuez.

$$D_e = \sqrt[3]{A * B * C} \quad (2)$$

Para la medición del diámetro de partícula mediante análisis de tamizado, se usan tamices normalizados como la escala estándar Tyler. Al utilizar las mallas la relación entre sus aberturas (longitud diagonal de cada orificio en la cuadrícula) debe permanecer constante y ser igual a $1/\sqrt{2}$ para dos mallas consecutivas y de $1/\sqrt[4]{2}$ cuando se utiliza alguna malla intermedia.

Para determinar tamaños de partícula mediante análisis de tamizado se utiliza como factor de ponderación la relación superficie - volumen o tamaño promedio de Sauter (Ec. 3).

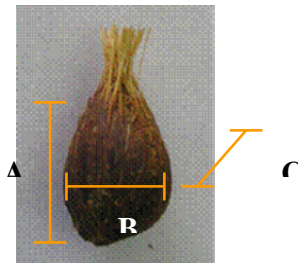
$$\bar{D}_p = \frac{1}{\sum_1^n \frac{x_i}{D_{p_i}}} \quad (3)$$

x_i = Fracción másica en cada intervalo de tamaños (mallas)

D_{p_i} = Promedio aritmético entre diámetro mayor y menor en el incremento para tamices.

n = número de mallas.

Figura 4. Medición de las dimensiones de una nuez.



1.3 SISTEMA DE SEPARACION FIBRA – NUEZ.

La torta de prensas es un material compacto que resulta luego de la extracción del aceite en la etapa de prensado y está compuesta por fibra, nueces, humedad y fracciones de almendras y cuesco libres. Esta masa dura es conducida hacia la columna de desfibración mediante un transportador sinfín del tipo de paletas, el cual la disgrega y la seca parcialmente preparándola para la separación neumática. ^[13]

El contenido de humedad de la fibra puede disminuir a lo largo del transportador, desde alrededor de 36 – 40% en el sitio de descarga de las prensas hasta 26 – 30% en el separador neumático de fibras ^[14]. El secado de la torta se obtiene por evaporación espontánea de la humedad, dado que normalmente la torta sale de las prensas muy caliente y al descargarse se descomprime y se seca relativamente rápido con la acción de las paletas que la agitan y la desmenuzan.

En el prensado se generan una cantidad de almendras y cáscaras rotas debido a la presión ejercida sobre las nueces. Los niveles de rotura (% de almendras rotas, cuesco libre, nueces rotas y almendras enteras / torta) deben ser máximo de 10 a 15% para evitar repercusiones negativas en la eficiencia de la separación neumática. Porcentajes de rotura superiores a los sugeridos indican desajustes por presión en las prensas de aceite rojo.

1.3.1 Columna. Las fibras se separan de las nueces en una columna de desfibración neumática que consiste básicamente en una columna vertical de sección rectangular por la cual pasa una corriente de aire con una velocidad lineal entre 8 y 12 m/s ^[14]. Las fibras son separadas gracias a que su densidad es mucho menor que la de las nueces y que por su forma son fácilmente arrastradas por el flujo de aire. En la parte superior de la columna hay un elemento de transición que se conecta con un codo en ángulo recto y uno tramos de conductos de sección cuadrada o redonda, los cuales conducen las fibras hacia un ciclón separador de aire y fibras.

En la sección rectangular de la columna donde se descarga la torta de prensas, denominadas zonas de separación, se dispone de láminas articuladas unidas a tornillos que pueden ser desplazadas hacia adentro y fuera de la columna con el fin de variar el área transversal de flujo de aire en estas zonas. Estas compuertas o dampers permiten la variación de las velocidades lineales del aire en las zonas de separación.

Las nueces caen el fondo de la columna y por medio de un transportador sinfín o tambor pulidor se descargan en un elevador de cangilones a través de una lámina o un tambor perforado donde se permite el paso de las nueces pero se restringe el de porciones de raquis que hayan podido quedar en la torta de prensas.

1.3.2. Ventilador. La corriente de aire en la columna es inducida por medio de un ventilador centrífugo colocado en succión, inmediatamente después del ciclón. El ventilador centrífugo es impulsado por un motor cuya potencia depende del caudal de aire manejado. En el ciclón se separan las fibras y el aire, el cual sale por un conducto superior hacia el ventilador y es expulsado hacia la atmósfera. El ventilador posee un conducto de descarga de aire, provisto de una lámina

graduable que restringe el área disponible de flujo, permitiendo regular el caudal de aire que circula en la columna.

1.4 COLUMNA DE DESFIBRACION EN AGROINCE LTDA & CIA SCA.

En esta planta extractora la columna de desfibración neumática es de tipo doble fase, es decir, posee dos zonas de separación independientes. La primera zona esta ubicada en la parte inferior de la columna en el punto de descarga de torta del transportador de paletas y realiza la separación primaria de la mezcla donde se descargan las nueces totalmente limpias a un transportador sinfín; la velocidad lineal en esta etapa es de 10 m/s. El flujo de fibra arrastrado en la primera zona contiene aún nueces de pequeños diámetros y partículas generadas por la rotura en las prensas como almendras rotas, enteras y fracciones de cuesco. La zona de separación secundaria tiene la función de recuperar éstas partículas, especialmente las almendras, generando un flujo de reciclo que se descarga en el transportador sinfín donde el mismo flujo de aire retira la fibra remanente. La velocidad lineal en esta zona de separación es de aproximadamente 8 m/s.

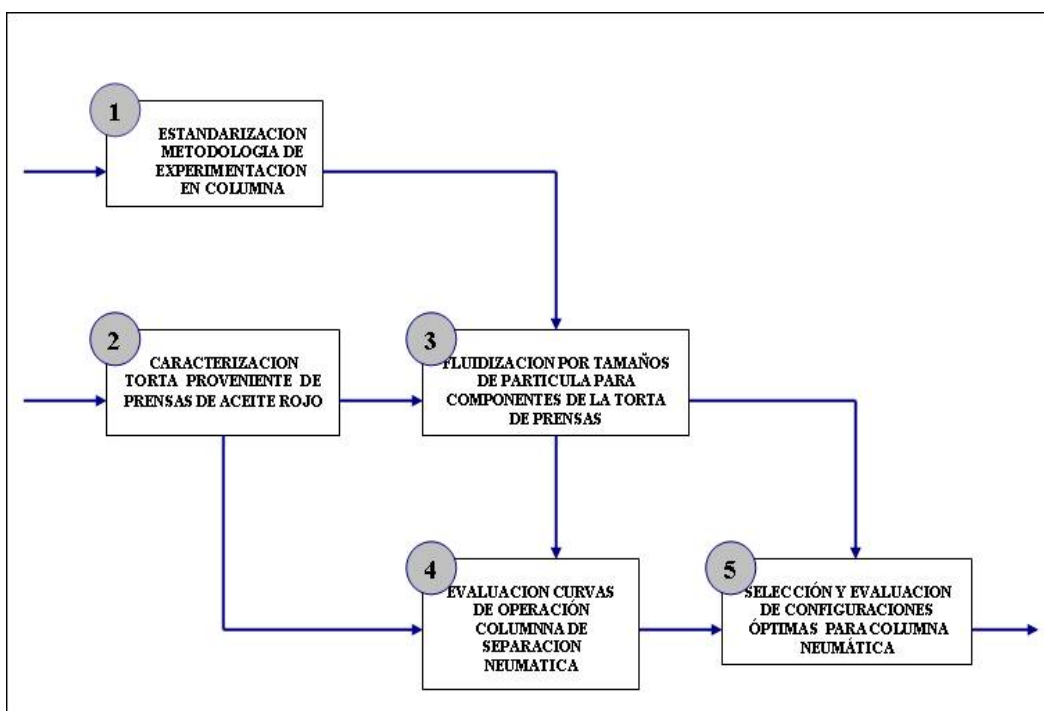
Figura 5. Sistema de separación neumática: columna y ventilador.



2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología del estudio se desarrolla en dos áreas principales, la experimentación en la columna piloto y la evaluación de la columna neumática en planta. La figura 6 muestra en detalle las etapas realizadas.

Figura 6. Diagrama de flujo de metodología experimental.



2.1. ESTANDARIZACION DE LA METODOLOGIA DE EXPERIMENTACION EN COLUMNA NEUMATICA ESCALA PILOTO.

La experimentación en la columna escala piloto busca evaluar las velocidades de mínima fluidización y arrastre de las partículas que componen la torta de prensas. Dado que el diámetro y la forma de las partículas es una variable importante en la determinación de la velocidad de fluidización y arrastre, se requiere un protocolo de experimentación en la columna neumática piloto, donde se establezcan parámetros como tamaños de muestra a utilizar en los ensayos, rangos de

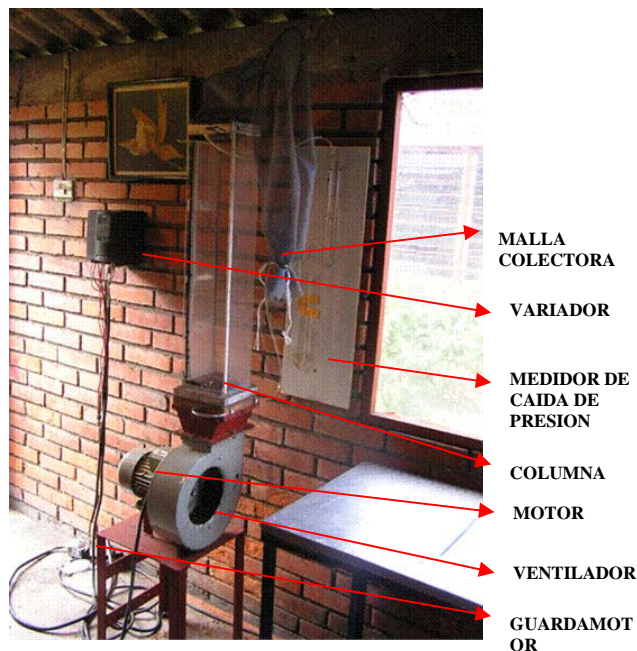
velocidades del fluido (calibración del ventilador), condiciones de operación del equipo, entre otros, para cada uno de los materiales de interés (fibra, nueces enteras, nueces rotas, almendras enteras, almendras rotas y cuesco).

2.1.1 Columna de separación neumática piloto. Este equipo opera en forma discontinua y permite la fluidización de todos los tipos de partículas que componen la torta. Permite medir variables como la velocidad de fluidización, de arrastre y caídas de presión en el lecho para diferentes caudales de fluido (figura 7). La columna neumática piloto consta de los siguientes elementos:

- Una columna en acrílico, transparente, de 0.78 m de altura y área transversal de 0.02 m². Posee un lado movable para permitir modificar el área transversal de flujo, una malla ajustada en el fondo como soporte del lecho, una malla colectora de material arrastrado y perforaciones en sus extremos para conectar con el medidor de presión.
- Un ventilador centrífugo impulsado por un motor de 1.5 kW (3410 rpm – 60 Hz) y conectado a un variador SIEMENS MICROMASTER 420, con el cual se controla su velocidad mediante la variación en la frecuencia.
- Un manómetro tipo tubo en U, vertical, el cual utiliza como líquido manométrico alcohol etílico al 96%.

La calibración inicial de la columna muestra la variación en la velocidad del aire, el caudal y la caída de presión en la columna para diferentes frecuencias, desde su valor mínimo (6 Hz) hasta el máximo permitido por el motor (41 Hz). La velocidad se mide con un anemómetro digital marca OMEGA Engineering.Inc, modelo HH30A tanto en la descarga de la columna piloto como en diferentes puntos de la columna de separación neumática en planta.

Figura 7. Columna de separación neumática escala piloto.



2.1.2 Tamaños de muestra. En esta etapa se evalúan estadísticamente los resultados obtenidos con diferentes tamaños de muestra para fibra, nuez entera, nuez rota, almendra entera, almendra rota y cuesco, controlando los diámetros y humedades de cada material. Se miden las alturas del lecho, caídas de presión para diferentes velocidades del motor, velocidades de sustentación y velocidades de arrastre. Estas últimas se hallan mediante el método gráfico a partir del comportamiento típico descrito anteriormente. La caída de presión a lo largo de la columna se determina a partir de las diferencias de altura de columna de etanol en el manómetro y se expresa en mmHg (Ec. 4), donde ΔP es la caída de presión en el lecho. $\Delta H 1$ y $\Delta H 2$ son las diferencias de altura de columna de etanol en el manómetro.

$$\Delta P = 57.84 * (\Delta H 1) - 57.84 * (\Delta H 2) + 0.045 \quad (4)$$

Tabla 3. Tamaños de muestra evaluados a evaluar en columna neumática escala piloto.

MATERIAL	TAMAÑO BASE X (kg)	TAMAÑOS EVALUADOS
FIBRA	0,2	0,25X - 0,5X - 0,75X - 100X
NUEZ ENTERA	0,4	0,5X - 0,75X - X - 1,25X
NUEZ ROTA	0,4	0,5X - 0,75X - X - 1,25X
ALMENDRA ENTERA	0,4	0,5X - 0,75X - X - 1,25X
ALMENDRA ROTA	0,4	0,5X - 0,75X - X - 1,25X
CUESCO	0,4	0,5X - 0,75X - X - 1,25X

2.2 CARACTERIZACION DE LA TORTA PROVENIENTE DE 3 MATERIALES DE FRUTA.

Para la extracción de aceite de palma africana son utilizadas diferentes variedades de la planta, lo que ocasiona que durante el proceso varíen notablemente los flujos y las características de las partículas que los constituyen. En el caso particular de la extractora Agroince Ltda, los tipos de fruto más usadas son Irho y Papúa. En la caracterización de la torta se evalúan las siguientes variables para cada tipo de fruto: composición de la torta, humedad, rotura (proporción de nueces rotas presentes en la torta), densidad aparente y distribución de tamaños de cada uno de los componentes de la misma torta.

2.2.1 Composición de la torta de prensas. Para las variedades de Papúa adulta*, Papúa joven[‡] e Irho adulta[¶] individualmente se evalúa el flujo de torta, la composición (cantidad de fibra, nueces enteras, nueces rotas, almendras enteras, almendras rotas y cuesco), densidad aparente y humedad con que ingresa a la columna de separación neumática para las condiciones de proceso de la planta (15 Ton/h Racimos de Fruto Fresco - RFF). La evaluación de variables como la

* Plantaciones sembradas antes de 1999.

‡ Plantaciones sembradas a partir de 1999.

¶ Plantaciones sembradas antes de 1999.

humedad, composición de la torta y la rotura se realizan siguiendo el procedimiento estándar de laboratorio para plantas de beneficio (ver Anexo 2).^[15]

Durante esta evaluación se deben controlar las condiciones del proceso previas al desfibrado (esterilización, digestión y prensado), manteniéndolas constantes en cada una de las evaluaciones realizadas. En el análisis estadístico se busca establecer diferencias significativas en cada uno de las variables medidas para las diferentes repeticiones por medio del test LSD al 5 % con un diseño DCA (diseño completamente al azar)*.

2.2.2 Distribución de tamaños para partículas en Torta de prensas. Debido a que el tamaño y la forma de las partículas que componen la torta de prensas es una de las variables más importantes en la separación neumática de materiales sólidos, se realiza un análisis de distribución de tamaños acumulada y diferencial mediante tamizado de los materiales presentes en la torta de prensas. Para ello se utilizan tamices de la serie Tyler (tabla 4) y se determina el diámetro medio retenido.

Tabla 4. Tamices serie Tyler para análisis de distribución de tamaños por tamizado y tamices disponibles en la planta extractora Agroince Ltda..

TAMICES ESTANDAR TYLER			N. MALLA	DIAMETRO (mm)
# MALLA	ABERTURA (mm)	ABERTURA (in)		
(3/4 in)	18,85	0,75	3/4 in	19
(1/2 in)	13,33	0,50	1/2 in	12.5
(3/8 in)	9,42	0,375	3/8 in	9.5
4,00	4,70	0,19	4	4.75
6,00	3,33	0,13	6	3.35
8,00	2,36	0,09	8	2.38
9,00	1,98	0,08	9	2
10,00	1,65	0,07		
12,00	1,40	0,06		

* empleando Software Statistix 8.0 para Windows.

2.2.3 Pérdida de almendra en fibras ciclónicas. Cuanto mas pequeños son los tamaños de partícula de los materiales generados por rotura en la torta de prensas, mayor es la probabilidad de ser arrastrados por el flujo de aire en la columna neumática. Por lo tanto, son evaluadas las pérdidas de almendra (como almendra rota y almendra adherida en cuesco) en la fibra separada por la columna y comparadas con las producidas en la torta de prensas.

2.3 DETERMINACION DE VELOCIDADES DE FLUIDIZACION Y ARRASTRE PARA COMPONENTES DE TORTA DE PRENSAS EN COLUMNA NEUMATICA PILOTO.

A partir del análisis de tamaños y de las pérdidas en fibras ciclónicas se establecen los tamaños de partícula predominantes en la torta de prensas y cuáles de ellos están siendo arrastrados con la fibra. Los tamaños predominantes tanto en la torta como en la almendra perdida en fibra se evalúan individualmente en la columna neumática escala piloto, determinando las siguientes variables: velocidades de fluidización y arrastre para diferentes tamaños de cada componente (nuez entera, nuez rota, almendra entera, almendra rota y cuesco), caídas de presión en lecho de partículas, diferencias estadísticas entre repeticiones y variaciones de los datos experimentales obtenidos.

Se realiza el cálculo analítico de las velocidades de mínima fluidización y arrastre constituye como un mecanismo de validación de los datos obtenidos en la columna piloto. Al reordenar la ecuación de Ergún ^[9] (Ec. 5) para la caída de presión en lechos, evaluarla en el punto de fluidización incipiente e igualarla a la ecuación producto del balance de fuerzas para el lecho, se obtiene una ecuación para determinar velocidad mínima de fluidización:

$$1.75 * \frac{\rho V_{mf}^2}{D_p \epsilon_{mf}^3} + 150 * \frac{\mu V_{mf}}{D_p^2 \epsilon_{mf}^3} (1 - \epsilon_{mf}) - g(\rho_p - \rho) = 0 \quad (5)$$

ϵ_{mf} = fracción volumétrica del fluido.

V_{mf} = velocidad mínima de fluidización

La velocidad Terminal o de arrastre puede ser calculada por medio de un método directo utilizando la correlación de Turian & Yuan ^[16] (Ec. 6). Esta correlación se obtuvo a partir de datos experimentales para partículas esféricas, por lo tanto se hace necesario tener en cuenta la aplicación del factor de esfericidad para partículas irregulares Φ_s (Ec. 7), donde (D) es el diámetro de las partículas irregulares hallado mediante medición directa o análisis de tamizado.

$$\lambda = \left[\frac{4}{3} g D_p^3 \rho \frac{(\rho_s - \rho)}{\mu^2} \right]^{1/2} = Re_p C_D^{1/2} \quad (6)$$

$$D_p = \Phi_s D \quad (7)$$

C_D es el coeficiente de arrastre de la partícula en el fluido, D_p es el diámetro de partícula, g es la fuerza de gravedad, μ es la viscosidad del fluido, ρ_s es la densidad de la partícula, ρ es la densidad del fluido y Re_p es el número de Reynolds de partícula.

2.4 EVALUACION DE CURVAS DE OPERACIÓN EN COLUMNA DE SEPARACIÓN NEUMÁTICA.

Teniendo en cuenta las velocidades de arrastres de los tamaños dominantes de

partícula hallados en la columna neumática y que la disminución de pérdida de almendra en fibra puede darse mediante el control de la velocidad en las zonas de separación, pues ésta velocidad a su vez depende directamente del área disponible en cada zona y el caudal del ventilador, se deben estimar unos rangos de velocidad que impidan el arrastre de partículas de almendra pero que a su vez permitan una óptima separación de nuez y fibra.

2.4.1 Calibración del ventilador en la descarga. Los parámetros de diseño para columnas neumáticas indican que debe existir una proporción entre el caudal de aire en la columna y la carga de alimentación ^[14]. La experiencia en el diseño y operación de columnas neumáticas para separación nuez - fibra instalados en las extractoras pertenecientes a la zona central muestran buenos resultados para relaciones de 4, 5 y 6 kilogramos de aire/kilogramo de fibra que ingresa a la columna.

Con el objetivo de conocer el rango de operación del ventilador, se realiza su calibración mediante la medición de la velocidad del fluido en el área transversal de descarga y el amperaje del motor para diferentes posiciones en el damper regulador de caudal (figura 8)

2.4.2 Medición de la velocidad del aire en zonas de separación para operación en vacío. La calibración del ventilador con diferentes posiciones en el damper de descarga permite establecer los caudales correspondientes para tener las relaciones de aire/fibra recomendados, adicionalmente brinda información acerca del comportamiento de la velocidad y la caída de presión en las zonas de separación con respecto a las mediciones hechas en la descarga del ventilador para diferentes caudales y combinaciones de áreas en las zonas de separación.

Figura 8. Detalle dámper de descarga de ventilador en sistema de separación neumática de fibras.



Los parámetros de diseño para este tipo de columnas recomiendan una velocidad de 10 m/s en la primera etapa de separación y una de 8 m/s en la segunda etapa. Teniendo en cuenta las velocidades de arrastre para cada uno de los componentes de la torta de prensas, los caudales de aire, las áreas transversales a lo largo de la columna y las velocidades recomendadas se estiman aperturas para las compuertas en cada una de las etapas de separación de la columna y se miden las correspondientes velocidades, tal como lo muestra la tabla 5.

2.5 SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE CONFIGURACIONES ÓPTIMAS PARA COLUMNA DE SEPARACIÓN NEUMÁTICA EN PLANTA.

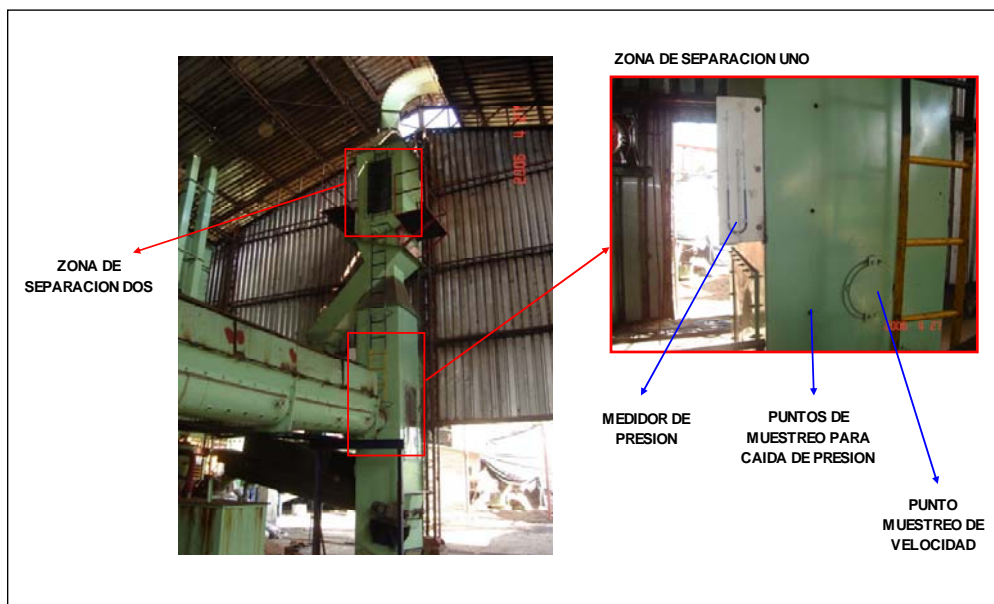
Esta etapa del estudio permite verificar las variaciones de velocidad en las zonas de separación evaluadas en la columna en vacío y con carga, así como establecer las condiciones operativas óptimas de la columna para disminuir los índices de pérdida de almendra en fibras. A partir de los resultados obtenidos en etapas previas se seleccionan tres configuraciones de aperturas de compuertas para las zonas de separación y el damper de descarga en la columna neumática; éstas

deben cumplir con la doble función de permitir la separación de nuez – fibra de la torta de prensas y a su vez disminuir el arrastre de almendra entera y rota en la fibra ciclónica.

Tabla 5. Caudales evaluados en columna neumática, operación en vacío.

Caudal del ventilador (m3/h)	Relación aproximada aire / fibra	Posición damper zona separación uno (cm)	Área zona de separación uno (m2)	Posición damper zona separación dos (cm)	Área zona de separación dos (m2)
11505	4	36	0.32	40	0.40
13621	5	39	0.35	46	0.46
16529	6	42	0.37	52	0.51

Figura 9. Columna de separación neumática de fibra. Zonas de separación y puntos de muestreo.



Las tres configuraciones se evalúan independientemente para proceso normal en planta a una capacidad de procesamiento de 22.5 Ton RFF/h, controlando el origen del fruto para repeticiones con la misma configuración. Las variables

evaluadas en esta etapa son: composición de la torta de prensas generada, distribución de tamaños de partícula de sus componentes, relación aire / fibra para cada configuración evaluada, caída de presión en las zonas de separación, pérdidas de almendra en fibra, su composición y la distribución de tamaños de sus partículas. Las configuraciones a evaluar se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Configuración de la columna neumática para evaluación en proceso.

Configuración columna	Apertura zona 1 (cm)	Apertura zona 2 (cm)	Caudal (m ³ /h)	Velocidad teórica Z 1 (m/s)	Velocidad teórica Z 2 (m/s)
1 (inicial)	41	42	20087	15.3	13.4
2	40	42	17454	15.1	11.7
3	36	42	16951	13.6	11.7
4	36	42	14713	13.6	11.7

2.5.1 Seguimiento a pérdidas de almendra en fibras para nuevas condiciones de proceso. Debido a la ampliación en la capacidad de procesamiento de la planta extractora de Agroince Ltda de 15 Ton/h RFF a 22 Ton /h RFF, se realiza un nuevo seguimiento a las pérdidas de almendra en el flujo de fibra para evaluar: condiciones operativas del equipo, porcentajes de pérdida de almendra, su composición y la distribución de tamaños de las partículas arrastradas en la fibra.

2.5.2 Valoración económica por reducción de pérdida. La recuperación de capital esa una de las bondades del estudio de la etapa de desfibración, por lo tanto, se realiza una estimación de las ganancias obtenidas por concepto de disminución de pérdida de almendra para cada una de las configuraciones de columna evaluadas.

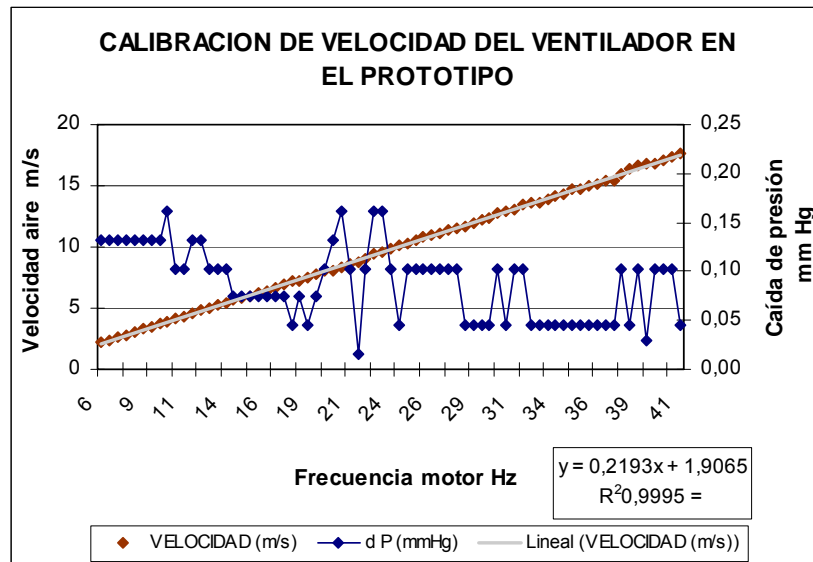
3. RESULTADOS

3.1 METODOLOGIA PARA LA OPERACIÓN DE LA COLUMNA NEUMÁTICA A ESCALA PILOTO.

A partir de la calibración del ventilador en la columna piloto se obtienen relaciones mediante las cuales es posible predecir velocidades y caudales en la columna piloto para determinadas frecuencias. Las curvas generadas a partir la calibración de la columna piloto muestran una relación lineal entre la frecuencia y la velocidad del aire en la columna (Figura 10). Así mismo, debido a que el área transversal de la columna permanece constante en 0.02 m^2 , el caudal de aire con respecto a la frecuencia presenta el mismo comportamiento. La caída de presión en la columna oscila de manera irregular en el rango de 0.02 a 0.16 mmHg. Las condiciones mínimas de operación de la columna para 6 Hz son 2.19 m/s y $154.5 \text{ m}^3/\text{h}$. Las condiciones máximas están determinadas por la carga del motor según configuración del variador de velocidad y se reporta un límite de 41 Hz, 17.6 m/s y $1239.7 \text{ m}^3/\text{h}$.

3.1.1 Tamaños de muestra a utilizar en columna piloto. Los parámetros para la experimentación en la columna y la determinación de las variables de interés se especifican en el “Protocolo de experimentación en columna neumática a escala piloto” (Anexo 1). Las curvas de fluidización generadas muestran comportamientos muy similares a los reportados por la literatura para fluidización de partículas sólidas, por lo tanto, las velocidades de mínima fluidización y arrastre para cada uno de los ensayos se identifican gráficamente. La información correspondiente a relación de aire requerido por unidad de masa de material no presenta una tendencia definida debido a que la columna opera de forma discontinua y la variación en el caudal se da por cambios en la velocidad del aire y no por variación en el área de la columna.

Figura 10. Curva de calibración Velocidad Vs Frecuencia para ventilador en columna neumática escala piloto.



La tabla 7 presenta los tamaños de muestra para los materiales evaluados por el método LSD (test por comparación de pares) al 0.05% y sus correspondientes velocidades de fluidización y arrastre. Los resultados para nuez entera, almendra entera y nuez rota, presentan normalidad según el test de Shapiro Wilk y algunas diferencias estadísticas significativas para las velocidades de arrastre. Teniendo en cuenta las desviaciones estándar y las velocidades reportadas por la literatura, el tamaño de muestra a utilizar para nuez entera es 400 gramos y 300 gramos para almendra entera y nuez rota.

Los datos obtenidos con los materiales almendra rota, fibra y cáscara (cuesco) no muestran normalidad según test de Shapiro Wilk. Tampoco es posible lograr transformaciones con funciones como: logaritmo, trigonométricas, exponencial, raíz, cuadrado; por lo tanto, no se logra la normalidad para el análisis con estadística paramétrica. Se recurre entonces a los datos reportados por la literatura^[11] para velocidades de arrastre de fibra y cáscaras en tamaños

pequeños, con lo cual se establece que el tamaño de muestra más adecuado es de 100 y 500 gramos respectivamente. Considerando que para la almendra rota no existen datos de velocidades de arrastre en la literatura, se selecciona el tamaño de muestra adecuado tomando el de menor desviación estadística entre los 3 valores que reportan velocidades entre 10 y 11 m/s. Este valor corresponde a 400 gramos.

Tabla 7. Tamaños de muestra seleccionados para evaluaciones en columna neumática escala piloto.

MATERIAL	TAMAÑO MUESTRA (g)	VELOC. MIN. FLUIDIZACION (Vmf) (m/s)	VELOCIDAD ARRASTRE (Va) (m/s)
NUEZ ENTERA	400	6,32	16,71
NUEZ ROTA	300	6	13,73
ALMENDRA ENTERA	300	5,64	14,17
ALMENDRA ROTA	400	4,49	10,84
CUESCO	500	3,38	10,12
FIBRA	100	1,01	6,08

3.2 CARACTERÍSTICAS DE TORTA DE PRENSAS PARA LAS VARIEDADES IRHO ADULTA, PAPUA ADULTA Y PAPUA JOVEN.

Las diferencias físicas en las variedades de fruto Irho adulta, Papua adulta y Papua joven dan lugar a que se genere torta con características que fluctúan según el fruto que se emplee y las condiciones del prensado. Los datos de composición particular (%/torta) y general (%/RFF) de la torta de prensas generados en evaluaciones por variedad muestran diferencias significativas entre sí. Las figuras 1 y 12 muestran los valores promedio de las variables evaluadas.

Las variedades Papúas presentan mayores porcentajes de fibra/RFF y mayores contenidos de humedad en torta (34% - 35%) con respecto a la variedad Irho (31%), lo que implica mayores requerimientos de caudal en la columna neumática para lograr una eficiente separación nuez – fibra.

Figura 11. Composición particular de torta de prensas para tres variedades de fruto.

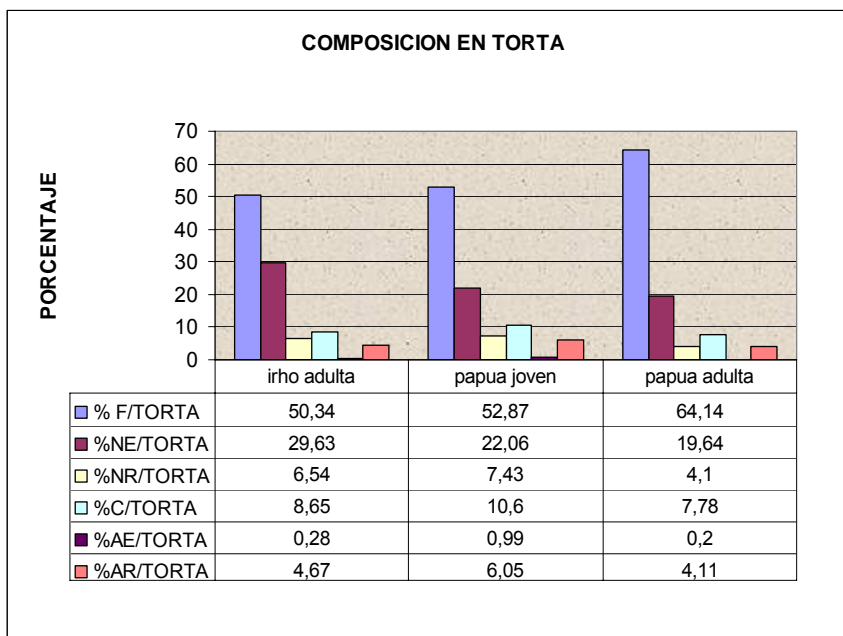
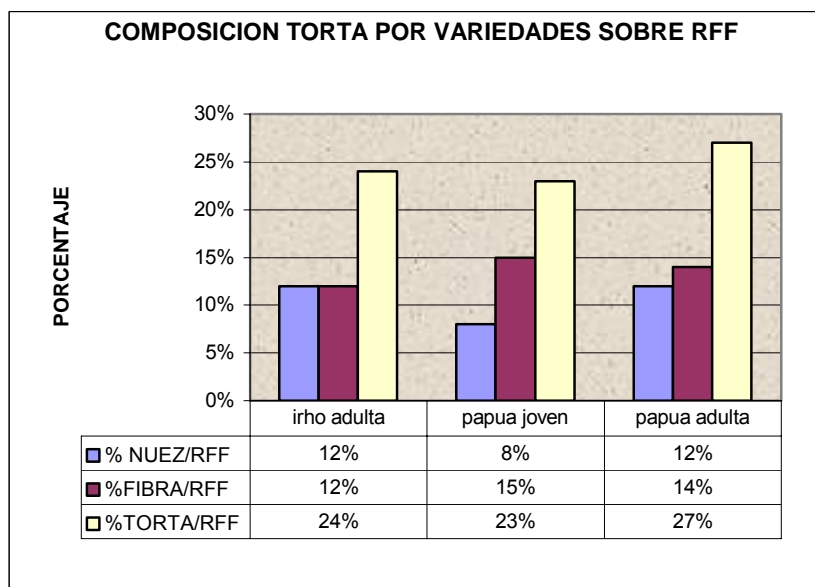


Figura 12. Composición general de torta de prensas para tres variedades de fruto.



La variación en el rompimiento de la nuez es el efecto más notorio cuando se procesan diferentes tipos de fruto, se observa que el rompimiento de nuez es mayor para la variedad Papua adulta (25.07 % / torta) y es menor para la Papua joven (16.19 % / torta). Si bien, la variedad papúa joven genera el mayor porcentaje de fibra /RFF, es la que menor cantidad y rompimiento de nuez produce, lo cual es una ventaja con respecto a la papúa adulta pues se disminuye la posibilidad de que se arrastren partículas de almendra en el flujo de aire y fibra.

3.2.1 Distribución de tamaños para los componentes de la torta de prensas. Las distribuciones de tamaños por tamizado permitieron establecer los diámetros más frecuentes de partículas generados en la torta de prensas (Tabla 8). En general estos tamaños coinciden para los tres tipos de fruto, sin embargo, en cada variedad se presentan en porcentajes distintos. (Curvas de distribución diferencial y acumulativa. Ver Anexo 3).

En cuanto a la nuez entera, la variedad Irho adulta presenta la mayor proporción de partículas de diámetro 7.06 mm, lo que indica que esta variedad puede presentar mayores problemas de pérdidas, pues mientras más pequeñas sean las partículas es mayor la posibilidad de ser arrastradas en la fibra. De forma similar, la variedad Papúa adulta es quien posee mayor porcentaje de almendra entera tamaño 7.06 mm y almendra rota tamaño 4.7 mm, lo que indica que este tipo de fruto puede presentar pérdidas de almendra en fibras donde predominen estos tamaños de partículas. Si bien el mayor porcentaje de almendra rota lo genera la variedad Papúa adulta (6.05%), las cantidades generadas por el tipo Irho adulta y Papúa joven no son menos significativas (5% y 4.11% respectivamente).

3.2.2 Seguimiento a porcentajes de pérdida y distribución de tamaños de almendra en fibra ciclónica para capacidad de 15 ton/h rff. Durante el periodo de

seguimiento se registraron pérdidas totales de almendra del 5.43%, de los cuales 4.93% corresponde a pérdidas como almendra rota (90.8% del total de pérdidas) y el restante 0.5% son pérdidas como almendra entera (9.2% del total de pérdidas). La almendra entera de tamaño 11.1 mm es la que se presenta en mayor proporción (36% del total de pérdidas); en cuanto a la almendra rota el tamaño predominante es el de 5.3 mm (21% del total de pérdida).

Tabla 8. Diámetros de partícula predominantes en componentes de torta de prensas.

MATERIAL	DIAMETRO MEDIO (mm)
CUESCO	4.70
	4.01
	2.84
ALMENDRA ROTA	4.70
	4.01
	2.84
ALMENDRA ENTERA	13.33
	11.38
	7.06
NUEZ ROTA	13.33
	11.38
	7.06
NUEZ ENTERA	13.33
	11.38
	7.06

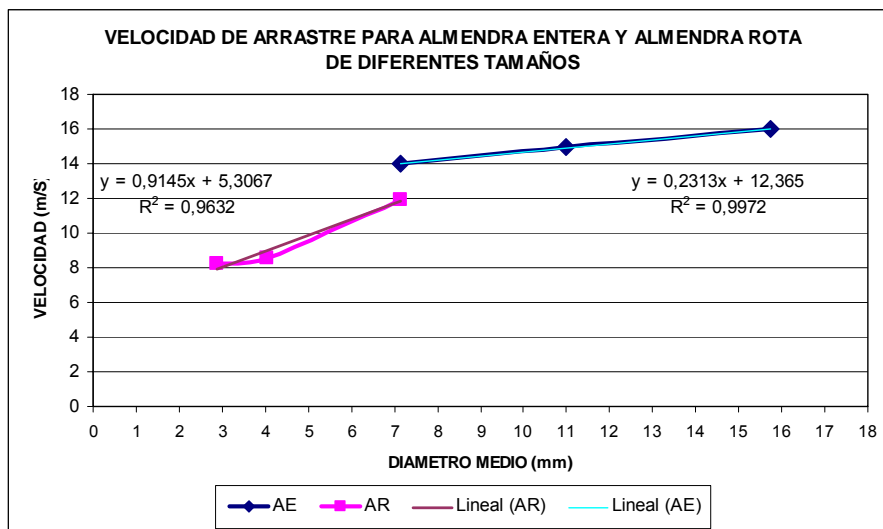
3.3 VELOCIDADES DE FLUIDIZACION Y ARRASTRE POR TAMAÑOS DE PARTICULA PARA COMPONENTES DE TORTA DE PRENSAS EN COLUMNA NEUMATICA PILOTO.

Las curvas de fluidización generadas (ver Anexo 4), tanto para altura del lecho como para caída de presión en la columna, presentan un comportamiento muy similar al reportado por la literatura. Los datos obtenidos para los materiales estudiados no presentan diferencias estadísticas significativas entre repeticiones (Tabla 9).

Las velocidades de arrastre obtenidas muestran leves diferencias con respecto a las velocidades reportadas por la literatura (Anexo 5), debido a las condiciones particulares de la experimentación (tamaños de partículas y de muestras, características de la columna piloto). Sin embargo, estos datos se ajustan a los obtenidos en mediciones preliminares anteriores al estudio en algunas plantas extractoras de la zona central.

El material almendra rota reporta velocidades de arrastre muy cercanas a la velocidad recomendada por diseño para la primera etapa de separación en la columna neumática (10 m/s). Este aspecto sugiere que leves cambios en la configuración de la columna tanto para la primera como en la segunda etapa podría causar cambios sensibles en los índices de pérdida de almendra en fibra ciclónica. A pesar de que en la distribución de tamaños existen diferencias notables entre los diámetros de partícula, los predominantes presentan sólo ligeras diferencias en sus velocidades de arrastre, por lo que se hace necesario hacer una calibración fina de la columna neumática.

Figura 13. Curvas de tendencia para velocidades de arrastre en almendra entera y rota.



En general para todos los materiales evaluados se observa un incremento de la velocidad de fluidización y arrastre a medida que aumenta el diámetro de las partículas. La almendra entera y rota, presentan un comportamiento lineal (Figura 13).

Tabla 9. Velocidades experimentales de fluidización y arrastre para componentes de torta de prensas.

MATERIAL	TAMAÑO (mm)	VELOCIDAD ARRASTRE (m/s)	VELOCIDAD FLUIDIZACION (m/s)
NUEZ ENTERA	7,13	14.19	9.18
	11	14.43	8.82
	15,75	15.98	8.78
ALMENDRA ENTERA	7,13	13.98	8.4
	11	14.97	8.55
	15,75	15.98	8.75
NUEZ ROTA	7,13	14.01	8.7
	11	14.46	8.44
	15,75	15.13	8.96
CASCARA	7,13	9.86	4.27
	4,05	9.56	3.94
	2,86	9.03	2.67
ALMENDRA ROTA	7,13	11.95	5.15
	4,05	8.57	3.17
	2,86	8.24	3.45

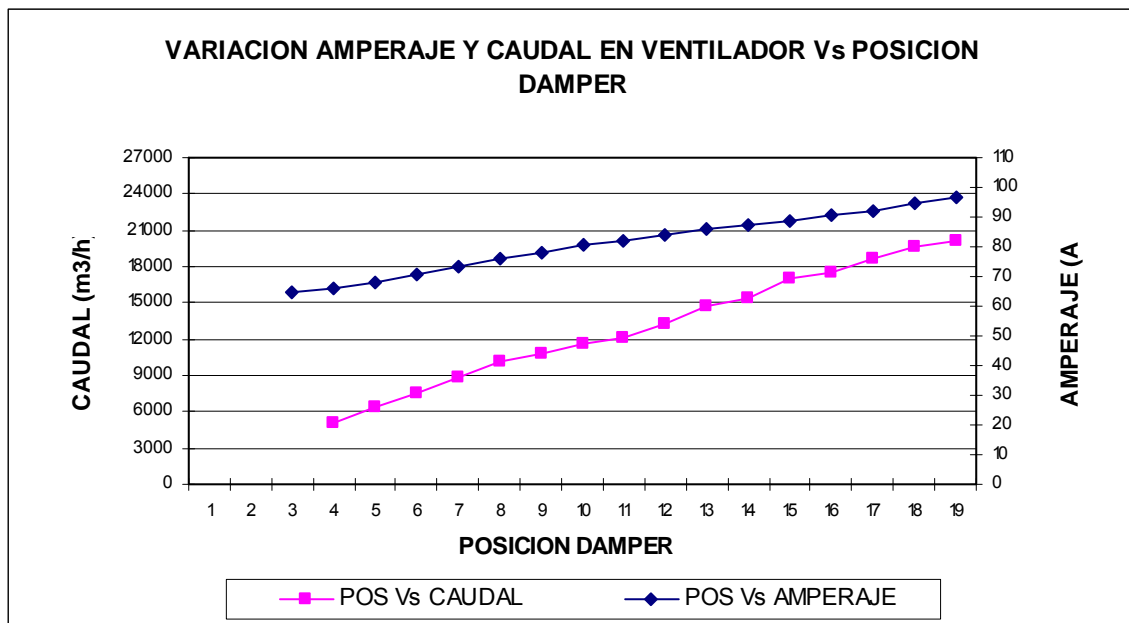
3.3.1 Cálculo de velocidades de fluidización y arrastre mediante método numérico. La velocidad de arrastre calculada presenta una velocidad promedio de 1.4 m/s por debajo de las halladas experimentalmente. Estas variaciones se deben principalmente a la irregularidad en las formas de las partículas. En cuanto a la velocidad de mínima fluidización se encuentran diferencias notables entre las velocidades calculadas y las determinadas experimentalmente. Las velocidades teóricas reportadas son mas altas que las experimentales (9.6 m/s en promedio).

3.4 CURVAS DE OPERACIÓN EN COLUMNA DE SEPARACIÓN NEUMÁTICA PARA DIFERENTES APERTURAS DE COMPUERTAS.

3.4.1 Calibración del ventilador de descarga. La figura 14 muestra las curvas de calibración del ventilador de fibras en Agroince Ltda, para 19 aperturas del dámper desde la posición cero hasta la máxima permitida por la capacidad del motor.

El máximo caudal registrado es de 20087 m³/h para posición número 19 y es a su vez la posición de operación del equipo actualmente. Si el caudal nominal del ventilador es de 30000 m³/h, se estima que el ventilador opera a un 66.5% de su capacidad total. La figura 14 muestra la variación del caudal y el amperaje del motor para las 19 posiciones.

Figura 14. Curvas de calibración para ventilador en columna de separación neumática.



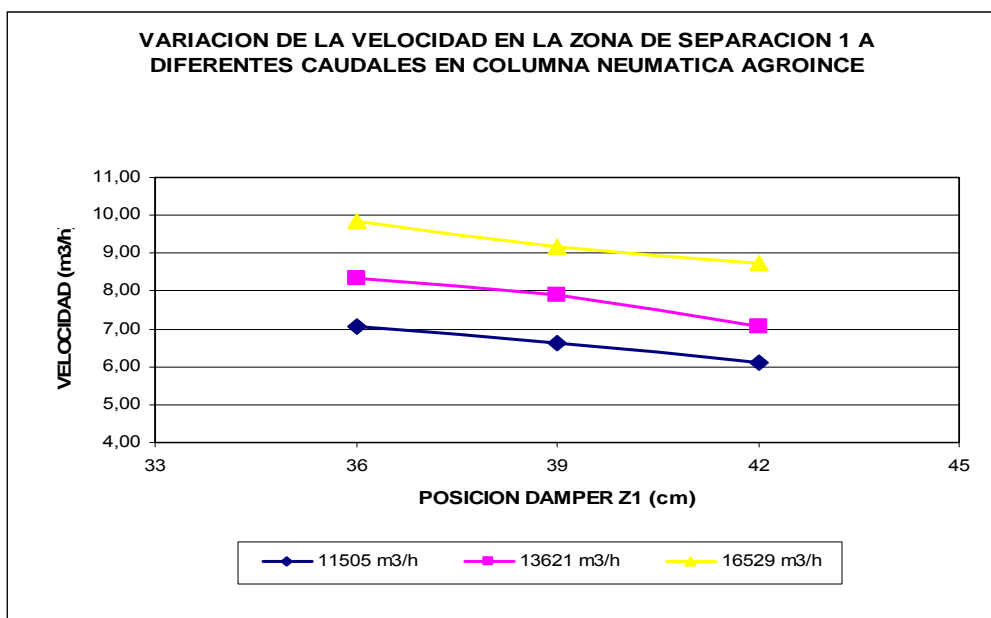
3.4.2 Curvas de operación para zonas de separación en columna neumática. Para determinar los caudales a evaluar en las zonas de separación de la columna se tuvieron en cuenta las relaciones aire / fibra recomendadas por diseño y la capacidad de procesamiento de la planta. Las aperturas de las compuertas en las zonas de separación se evaluaron velocidades con los caudales escogidos para las aperturas posibles en cada zona de separación. En los tres caudales evaluados se observan comportamientos similares, la velocidad disminuye con el aumento del área transversal de flujo. Esta tendencia se presenta de la misma manera en las dos zonas de separación (figura 15).

El flujo de aire se distribuye de manera irregular en el área de separación, creando zonas de mayor y menor velocidad. Estas diferencias pueden estar dadas por la ubicación de la toma de aire, la configuración física de la columna, o por filtraciones de aire a la columna a causa de orificios o ranuras a lo largo de los conductos. Los caudales obtenidos en mediciones realizadas a la descarga del ventilador presentan diferencias de aproximadamente 3000 m³/h con respecto a aquellos calculados con las velocidades evaluadas en la zona de separación uno, lo que da lugar a un replanteamiento de los caudales establecidos para cumplir las relaciones de 4, 5 y 6 Kg aire / Kg fibra.

3.5 EVALUACIÓN DE CONFIGURACIONES OPERATIVAS ÓPTIMAS PARA COLUMNA NEUMÁTICA EN PLANTA.

La caída de presión en la columna es mayor cuando la columna opera con carga, sin embargo, mientras mas alto es el caudal de trabajo de la columna, menores son las diferencias en la operación con respecto a la operación en vacío. El error ocasionado por el efecto de la carga en la operación y las variaciones en la valoración de los caudales de aire según el punto de muestreo es corregido adicionando 3000 m³/h de aire (que es el error aproximado) a los caudales establecidos previamente en la calibración de la columna neumática en vacío mediante mediciones a la descarga del ventilador.

Figura 15. Curvas de variación de velocidad para diferentes aperturas de compuerta en la zona de separación uno con operación en vacío.



Las velocidades obtenidas mediante medición en la zona uno de separación son más cercanas a las estimadas para operación de la columna con carga. Los caudales calculados son los correspondientes a las posiciones 13 (14713 m³/h), 15 (16961 m³/h), 16 (17454 m³/h) y 19 (20087 m³/h) del damper del ventilador y corresponden a las relaciones de 4, 5, 6 y 7 Kg aire / Kg fibra respectivamente.

3.5.1 Seguimiento a porcentajes de pérdida de almendra y distribución de tamaños de partícula en fibra ciclónica para capacidad de 22.5 Ton/h RFF. Durante el seguimiento de pérdidas de almendra en fibras ciclónicas para una capacidad de procesamiento de 22 Ton/h se registró una pérdida total de 3.76%, de los cuales 0.64% es nuez rota, 2.07% es nuez entera, 0.13% es almendra entera y 2.33% es almendra rota (ver ANEXO 9). En la almendra rota producida predominan los tamaños 4.75 y 3.35 mm (84.23% del total de almendra rota), los materiales restantes (nuez entera, nuez rota y almendra entera) tienen tamaños de 4.75 mm, 9.58 y 12.5 mm. La presencia de nuez entera y nuez rota en la fibra

ciclónica indica que el equipo requiere ser ajustado con el fin de disminuir el caudal con el que opera.

3.5.2 Características de la torta de prensas. La composición de la torta de prensas tanto particular (%/torta) como general (%/RFF) no presenta diferencias significativas con respecto a las composiciones por variedad evaluados anteriormente. La almendra rota representa el 7.36% de la torta de prensas y predominan los tamaños 9.58 y 4.75 mm (representan el 66.07%). La almendra entera representa el 0.49% de la torta de prensas y sus tamaños son 9.58 y 4.75 mm.

3.5.3 Pérdidas de almendra en fibra para diferentes configuraciones de columna neumática. La figura 17 muestra la composición de la fibra para cuatro diferentes combinaciones de caudal y áreas en zonas de separación. La posición uno corresponde a las condiciones de operación actual de la columna neumática (20087 m³/h, 41 cm de apertura para la compuerta de la zona uno y 41 cm para la segunda zona) y reporta una pérdida total de almendra del 4.28%, de los cuales 3.16% es almendra rota, 0.95% es nuez entera, 0.9% es nuez rota y 0.1% almendra entera. Empleando un caudal de 17454 m³/h, 40 cm de apertura para la zona uno y 41 cm para la zona dos, las pérdidas de almendra representan el 2.9%, de los cuales 2.48% es almendra rota, 0.39% es nuez entera y 0.39% nuez rota. Con esta combinación, las pérdidas de almendra se reducen en 32.2% con respecto a las condiciones iniciales.

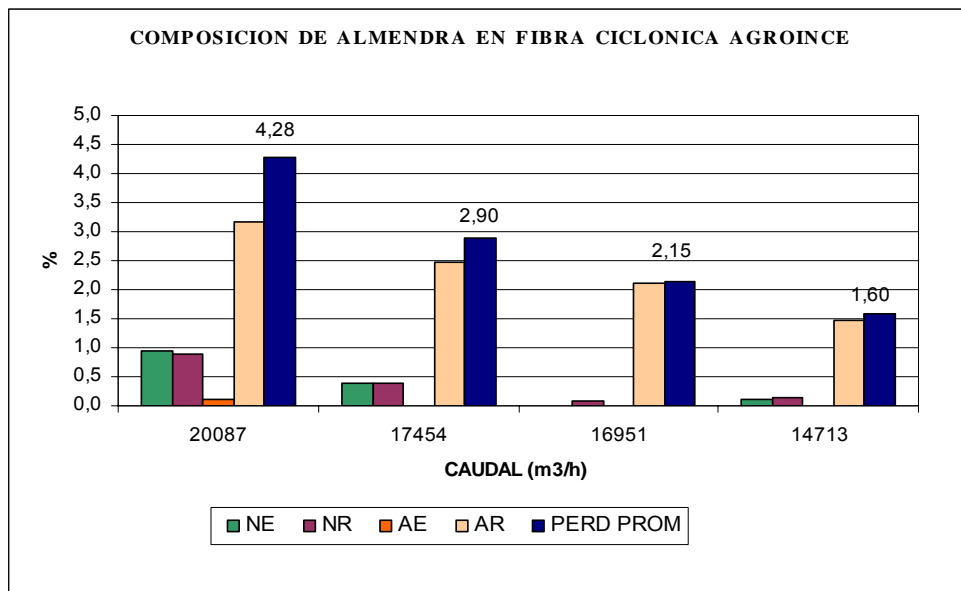
Con caudal de 16951 m³/h, 36 cm de apertura para la zona uno y 42 cm para la zona dos, las pérdidas de almendra representan el 2.15%, de los cuales 2.10% es almendra rota y 0.08% es nuez rota. En este caso las pérdidas de almendra disminuyen en un 49.8% con respecto a las condiciones iniciales. Usando un caudal de 14713 m³/h, 36 cm de apertura en la zona uno y 42 en la zona dos, la almendra perdida es el 1.6%, de los cuales 1.46% es almendra rota y 0.14% es

nuez rota. En esta última alternativa las pérdidas se reducen en un 62.6% con respecto a las condiciones iniciales.

La posición cuatro (14713 m³/h) no es viable debido a que presento caída de fibra en el flujo de nuez. La posición tres (16951 m³/h) no presentó caída de fibra en la nuez durante las evaluaciones pero mostró sensibilidad a los cambios en las condiciones de madurez del fruto y a fluctuaciones en el flujo de torta.

El estudio realizado en la etapa de separación neumática fibra – nuez brinda soluciones adecuadas a la necesidad de disminuir los niveles de pérdidas en fibras, sin embargo, las adaptaciones físicas que posee la columna (doble separación) brindan la alternativa de usar caudales más altos contrarrestando el efecto con la ampliación de la segunda zona de separación.

Figura 16. Pérdidas de almendra en fibras ciclónicas para diferentes configuraciones de la columna neumática.



3.5.4 Estimación económica por reducción de pérdida. Las notables reducciones en los niveles de pérdida de almendra para las configuraciones evaluadas se ven reflejadas en una recuperación de capital. Tomando como referencia las características de la torta de prensas evaluadas en la última etapa del estudio y el precio de la almendra a mayo de 2006 (\$423/kilo alm)¹⁴ se estima la recuperación obtenida (Tabla 10).

Tabla 10. Beneficios económicos de la disminución de pérdida de almendra en fibra ciclónica.

CAUDAL(m3/h)	% ALM/RFF	\$ perdidos/Ton RFF
20087	0,48	2038,49
17454	0,33	1383,11
16951	0,24	1023,65
14713	0,18	760,92

En términos generales empleando el caudal 17454 m³/h se alcanza un ahorro de \$655.4 / Ton RFF procesada; con el caudal 16951 m³/h se recuperan en total \$1014.8 / Ton RFF. El ahorro al disminuir la pérdida de almendra por la optimización operativa de la columna no sólo representa beneficios económicos por concepto de recuperación de almendra sino que a su vez representa un ahorro energético en el consumo del motor del ventilador.

¹⁴ Fuente: www.fedepalma.org

6. CONCLUSIONES

Las velocidades de arrastre para diferentes tamaños de partícula evaluadas a escala piloto, las velocidades lineales y los caudales obtenidos en la columna en planta son información fundamental para la calibración del sistema de separación neumática fibra – nuez, pues permiten establecer condiciones operativas óptimas en procura de una operación eficiente y de bajos niveles de pérdidas de almendra en fibra ciclónica.

A pesar de que los principios físicos que rigen la operación de separación neumática son los mismos en todas sus aplicaciones; en la agroindustria del aceite de palma, las características de los sistemas neumáticos de desfibrado varían notablemente con las características particulares de proceso en cada planta extractora. Por lo tanto se requiere un estudio detallado de las condiciones de proceso relacionadas con la etapa de desfibración, como lo son las características del fruto procesado, la capacidad de procesamiento de la planta y las condiciones operativas de los equipos para cada caso en particular.

Los resultados obtenidos a partir de la evaluación de velocidades de arrastre en la columna a escala piloto constituyen una herramienta importante en el estudio de separación neumática tanto de fibra y nuez, como de cuesco y almendra. Aún cuando las características de las etapas de extracción de aceite difieren de una planta extractora a otra, esta información es de gran utilidad y sencilla aplicación en todos los procesos donde se involucre separación o transporte neumático.

La pérdida de almendra en la fibra ciclónica depende directamente de la relación aire/fibra en el sistema de separación neumático y de la rotura de las nueces en la torta a la salida de la etapa de prensado. Por lo tanto, la separación nuez – fibra eficiente se logra garantizando las condiciones adecuadas de presión en las

prensas según el tipo de fruto procesado y la relación de aire – carga en las zonas de separación.

El estudio detallado de las variables que influyen en la etapa de separación neumática fibra – nuez permite establecer parámetros de control eficaces como la relación aire / fibra mediante el ajuste en el damper de descarga del ventilador y las velocidades lineales en las zonas de separación. A pesar de que los resultados obtenidos pueden ser aplicados a procesos en otras extractoras, los requerimientos de aire por tonelada de material a separar deben ser determinados para cada planta en particular pues dependen de las caídas de presión en el sistema.

Los resultados obtenidos a partir de los últimos análisis en la columna neumática en planta indican que el sistema de separación neumático fibra – nuez en Agroince Ltda opera con una relación kg aire / kg fibra superior a la óptima, lo cual genera niveles elevados de pérdida de almendra en fibras.

El ajuste de la columna de desfibración a partir del estudio de el fenómeno de separación fibra – nuez basado en mediciones a escala piloto permite obtener beneficios económicos importantes por concepto de disminución de las pérdidas de almendra en fibra, aumento en la eficiencia del proceso y disminución del consumo energético de los equipos.

En general, para condiciones normales de proceso se mantienen las proporciones de 4, 5 ó 6 veces la masa de aire respecto a la masa de torta o material a separar. Sin embargo, el estado físico de las columnas puede influir estas condiciones pues imperfectos como ranuras o perforaciones hacen que las condiciones de presión de la columna cambien y que se requiera operar con caudales muy superiores a los requeridos.

BIBLIOGRAFIA

1. DURAN, Querubín *et al.* Evaluación del proceso de recuperación de almendra. En: Palmas.Vol. 21, No. Especial, Tomo I, 2000.
2. GARCIA NUÑEZ, Jesús Alberto. Informe de Visita a Malasia. Agosto 18 – Septiembre 22 de 2002.
3. YAÑEZ, Edgar y GARCIA Jesús. Reducción de pérdidas de aceite y almendra en plantas de beneficio en Colombia. En: Palmas.Vol. 25, No. Especial, Tomo II, 2004.
4. DURAN, Querubín *et al.* Evaluación del proceso de recuperación de almendra. En: Palmas.Vol. 21, No. Especial, Tomo I, 2000.
5. MOLINA, Dorángela. Reducción de pérdidas de almendra en tres plantas de la zona oriental. En: Palmas.Vol. 25, No. Especial, Tomo II, 2004.
6. BERNAL NIÑO, Fernando. El cultivo de la palma de aceite y su beneficio. Guía general para el nuevo palmicultor. Fedepalma. Bogotá. 2001.
7. FEDEPALMA. Anuario Estadístico 2005. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo. www.fedepalma.org
8. HERNANDEZ BAEZ, Alexander. Estudio técnico de las variables de proceso en el prensado, desfibrado y sedimentación de una planta de beneficio de aceite de palma. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 2005.
9. Mc CABE, Warren L; SMITH, Julian y HARRIOTT, Peter. OPERACIONES UNITARIAS EN INGENIERIA QUIMICA. Mc Graw Hill, 6a Edición, 1995.

10. FOUST, Alan S. *Et al.* Principios de operaciones unitarias. J. Wiley. 1980.
11. Institutiu PENYELIDIKAN MINYAK. Mongana report (traslation). Second volume. Malasia. 1952 – 1955.
12. CASTILLO, Martha. DETERMINACION DE ALGUNAS PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE LA NUEZ DEL FRUTO DE PALMA DE ACEITE VARIEDAD TENERA (*Elaeis gineensis jacq*). Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. 2002.
13. DURAN SUAREZ, Querubín. Evaluación de la eficiencia en el proceso de recuperacion de almendra en una planta extractora de aceite de palma. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 2001.
14. WAMBECK, Noel. Sinopsis del Proceso de la Palma de Aceite. Edición en español. Fedepalma., SAC., SENA. Agosto de 2005.
15. Centro de Investigación en Palma de Aceite, CENIPALMA. Manual de Laboratorio Plantas de beneficio primario para Fruto de Palma de Aceite. 2002.
16. TURIAN., YUAN. *Alche Journal.*, Vol 23. p 232 – 242. Mayo 1977.

ANEXO 1.

PROTOCOLO PARA EXPERIMENTACIÓN EN COLUMNA DE SEPARACIÓN NEUMÁTICA A ESCALA PILOTO

1. OBJETIVO GENERAL

Establecer la metodología para la operación de la columna de separación neumática a escala piloto que facilite la obtención de datos para la construcción de las curvas de fluidización de algunos sólidos de la palmistería.

Estudiar el fenómeno de fluidización y arrastre de diferentes sólidos generados en la palmistería de las plantas de beneficio utilizando una columna de separación neumática a escala de laboratorio.

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar propiedades como factor de esfericidad, densidad aparente, humedad en los materiales a fluidizar.
- Determinar de forma experimental y teórica las velocidades de mínima fluidización y arrastre para materiales manejados en la palmistería como fibra, cuesco, nueces y almendras de diferentes tamaños.
- Realizar las curvas de fluidización de caída de presión vs. Velocidad del aire, altura del lecho vs. Velocidad del aire.

3. MARCO TEORICO

El fenómeno de fluidización es definido como la suspensión de partículas sólidas en un lecho fluido debido a la fuerza ejercida por el flujo en dirección opuesta a la fuerza ejercida por la gravedad sobre las mismas partículas. En la industria este fenómeno tiene grandes aplicaciones en el transporte, la separación de sólidos particulados y la ingeniería de las reacciones químicas.

En el caso del transporte, se aprovecha el fenómeno en la fase final cuando el comportamiento de las partículas se hacen iguales a las del fluido, así, se ofrece alternativas prácticas y de bajo costo para el desplazamiento de materiales a cortas distancias. Esta operación se clasifica según el fluido utilizado como medio de transporte, los mas usados son el aire y el agua, por lo que se denominan transporte neumático e hidráulico respectivamente. Las características específicas de cada uno de estos tipos de fluidización dependen de la naturaleza del fluido (compresibilidad, densidad, viscosidad) y de la relación sólido- fluido.

En cuanto a la separación de materiales sólidos, se aprovechan las diferencias en

cuanto a peso por unidad, densidad y distribución geométrica de las partículas para lograr condiciones de arrastre individuales que permitan la separación de los componentes de una mezcla.

Para estas dos aplicaciones específicas (separación y transporte), los parámetros más importantes que definen el fenómeno son:

- Velocidad de fluidización o suspensión: Determina la zona de separación para los diferentes materiales en una mezcla.
- Velocidad terminal o de arrastre: Determina condiciones mínimas de flujo y velocidad de aire para el transporte de sólidos en un fluido.
- Caída de presión: Determina las condiciones de presión del lecho en cada una de las etapas del fenómeno y tiene incidencia en la velocidad del fluido.
- Propiedades de las partículas: Son determinantes en el fenómeno e influyen directamente en los otros parámetros. Son fundamentalmente, el tamaño, diámetro, densidad, forma de las partículas.

3.1 APLICACIONES DE LA FLUIDIZACION EN LA INDUSTRIA DE LA PALMA ACEITERA

El desarrollo industrial alrededor de la palma de aceite en Colombia es dirigida actualmente hacia la extracción de aceite crudo de palma y palmiste. Dentro de este proceso, la fluidización tiene sus aplicaciones en dos zonas fundamentalmente:

Separación de fibras: Mediante una columna con flujo de aire inducido se separan los componentes más livianos de la torta (fibra y cuesco fino) de los más pesados (nueces enteras, nueces rotas, almendras rotas y enteras). Esta torta es procedente de la etapa prensado del fruto.

Separación de finos: Luego del rompimiento de las nueces, se separan el cuesco y la almendra mediante una columna con flujo de aire inducido. El cuesco obtenido de la descarga superior de esta columna se denominan "finos".

En el caso particular de Agroince Ltda & CIA S.CA, no se implementa el transporte neumático en otras áreas del proceso, sin embargo, dentro de la industria palmera este sistema es implementado en el transporte de almendras y nueces hacia los silos de secado.

3.2 PROPIEDADES DE LAS PARTICULAS SÓLIDAS

Los sólidos particulados se clasifican y caracterizan según su forma, tamaño, densidad y el factor de fricción. Estas características físicas son determinantes en transporte neumático ya que inciden directamente en la proporción de energía requerida para alcanzar el equilibrio de fuerzas en la condición de mínima

fluidización de las partículas y para el arrastre de las mismas. Se puede observar en las correlaciones que describen el fenómeno de fluidización que las velocidades de mínima fluidización y arrastre dependen de propiedades como la densidad, el diámetro de la partícula y el factor de esfericidad, por lo tanto, al realizar la experimentación se debe tener especial cuidado en el control de variables como la forma, el tamaño y la humedad de las partículas a evaluar.

3.1.1 FORMA DE LAS PARTICULAS

Según su forma pueden ser partículas regulares (tales como esferas o cubos) o irregulares (como granos de arena). La forma de las partículas se expresa mediante el factor de forma o factor de esfericidad Φ_s , el cual es independiente del tamaño y determina la variación existente entre la forma de la partícula y la de una esférica de igual volumen (esfera equivalente). El factor de esfericidad se define como la relación entre el área superficial de una esfera equivalente y el área superficial real de la partícula. Sus valores oscilan entre 0 y 1 donde 1 corresponde a una esfera perfecta

$$\Phi = \frac{A_p}{A_c} = \frac{D_e}{D_c} \quad (1)$$

Donde:

A_c = Área del círculo más pequeño que circunscribe el eje de mayor longitud (m^2)

A_p = Area proyectada por una esfera de igual volumen (equivalente), en su posición normal de descanso (m^2).

D_e = Diámetro de la esfera equivalente (diámetro equivalente)

D_c = Diámetro esfera circunscrita más pequeña. Generalmente para partículas que no son equidimensionales se caracterizan por la dimensión de mayor longitud.

Cuando las partículas no se ajustan a formas redondeadas o esferoidales y su forma puede aproximarse a otra figura geométrica específica, el diámetro equivalente se calcula igualando el volumen experimental de la partícula con el definido para una esfera perfecta.

$$V_{part} = \frac{\pi}{6} D_e^3 \quad (2)$$

El diámetro equivalente se define como el diámetro de una esfera de igual

volumen, pero cuando la forma y el tamaño de la partícula dificultan determinar con exactitud su volumen y su forma, el D_p se toma como el tamaño nominal basado en análisis de tamizado o en análisis indirectos.

Para materiales como nueces y almendras, cuya forma se aproxima a la redondez, se utiliza el método de los tres ejes para determinar el diámetro equivalente:

$$D_e = \sqrt[3]{A * B * C} \quad (3)$$

Donde A, B y C corresponden a los tres ejes perpendiculares de las nueces, mayor, mediano y menor respectivamente.

Según el tamaño de las partículas, éstas se pueden clasificar aplicando distribuciones dadas por métodos ópticos (si el diámetro es menor de 40 μm) o por análisis de tamizado (si los diámetros son mayores a 40 μm). Para ésta última se usan tamices normalizados, la más frecuente es la escala de tamices Estándar Tyler, esta escala de tamices está basada en una abertura de 0,0029 pulg. (0,074 mm) que es la abertura del tamiz patrón de 200 mallas y 0,0021 pulg. (0,0053 cm.) de diámetro del hilo, tal como ha sido adoptada por la National Bureau of Standards. Al utilizar las mallas la relación entre sus aberturas (longitud diagonal de cada orificio en la cuadrícula) debe permanecer constante y ser igual a $1/\sqrt{2}$ para dos mallas consecutivas y de $1/\sqrt[4]{2}$ cuando se utiliza alguna malla intermedia.

Para determinar tamaños de partícula mediante análisis de tamizado se utiliza como factor de ponderación la relación superficie - volumen o tamaño promedio de Sauter:

$$\bar{D}_p = \frac{1}{\sum_1^n \frac{x_i}{D_{p_i}}} \quad (4)$$

Donde:

x_i = fracción másica en cada intervalo de tamaños (mallas)

D_{p_i} = Promedio aritmético entre diámetro mayor y menor en el incremento para tamices.

n = número de mallas.

3.1.2 DENSIDAD DE LAS PARTICULAS

La densidad absoluta (ρ), es una propiedad física intrínseca del sólido y esta dada por la relación entre su masa y volumen.

$$\rho = \frac{m_p}{V_p} \quad (5)$$

Donde:

m_p = masa de la partícula

v_p = volumen de la partícula

La densidad relativa o aparente (ρ_a), tiene que ver con la disposición de partículas en un lecho, por lo tanto relaciona la masa de las partículas con el volumen ocupado por ellas cuando se encuentran aglomeradas y contenidas en un recipiente.

$$\rho = \frac{m_p}{V_l} \quad (6)$$

Donde:

v_l = volumen total ocupado por las partículas.

La relación entre el volumen ocupado por las partículas contenidas y los volúmenes vacíos en el mismo se denomina fracción de vacíos (ε) y se define como:

$$\varepsilon = \frac{V_{vacios}}{V_{total}} \quad (7)$$

La relación existente entre las densidades absoluta, relativa y la fracción de vacíos se da como:

$$\rho_a = \rho(1 - \varepsilon) \quad (8)$$

3.3 FLUIDIZACION

Cuando un fluido pasa a través de un lecho de sólidos sufre una caída de presión. A medida que aumenta la velocidad del fluido la caída de presión se hace mayor y se empiezan a notar los efectos del aumento en la fuerza de empuje y de rozamiento ejercida por el fluido sobre las partículas, como consecuencia se observa un movimiento vibratorio en el lecho. Si la velocidad sigue aumentando,

las partículas se suspenden en el lecho justo cuando la velocidad del fluido es igual a la velocidad de caída libre de la partícula. En estas condiciones los sólidos del lecho se comportan como un fluido denso y pueden ser descargados de éste a través de tuberías. En estas condiciones se describe un lecho "fluidizado".

Al fluidizarse el sólido puede distribuirse dentro del fluido como:

- Distribución uniforme: También llamada fluidización particulada, en ella no existen aglomeraciones del sólido cuando se dispersa en el fluido. Se presenta más fácilmente cuando el fluido es un líquido.
- Distribución irregular: Hay mayor acumulación de sólido en ciertos sectores del lecho, es denominada fluidización agregativa o de "burbujeo". Se presenta usualmente cuando el fluido es un gas.

La siguiente correlación es un criterio para definir el tipo de fluidización según la distribución de las partículas en el lecho:

$$Fr_m * Re_{pm} * \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho} * \frac{L_m}{D_p} > 100 \quad \text{Distribución agregativa} \quad (9)$$

$$Fr_m * Re_{pm} * \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho} * \frac{L_m}{D_p} < 100 \quad \text{Distribución uniforme}$$

Donde:

L_m = longitud del lecho en condición de mínima fluidización

D_{pm} = diámetro promedio de partícula

ρ_p = densidad de la partícula (kg/m³)

$$Fr_m = \frac{V_{mf}^2}{D_p g} \quad (10)$$

$$Re_{pm} = \frac{D_p V_{mf} \rho}{\mu} \quad (11)$$

Fr_m = número de Froude (adim) para mínima fluidización

V_{mf} = velocidad mínima de fluidización (m/s)

D_p = diámetro de la partícula

Rem = Número de Reynolds para condiciones de mínima fluidización.

g = gravedad m/s^2

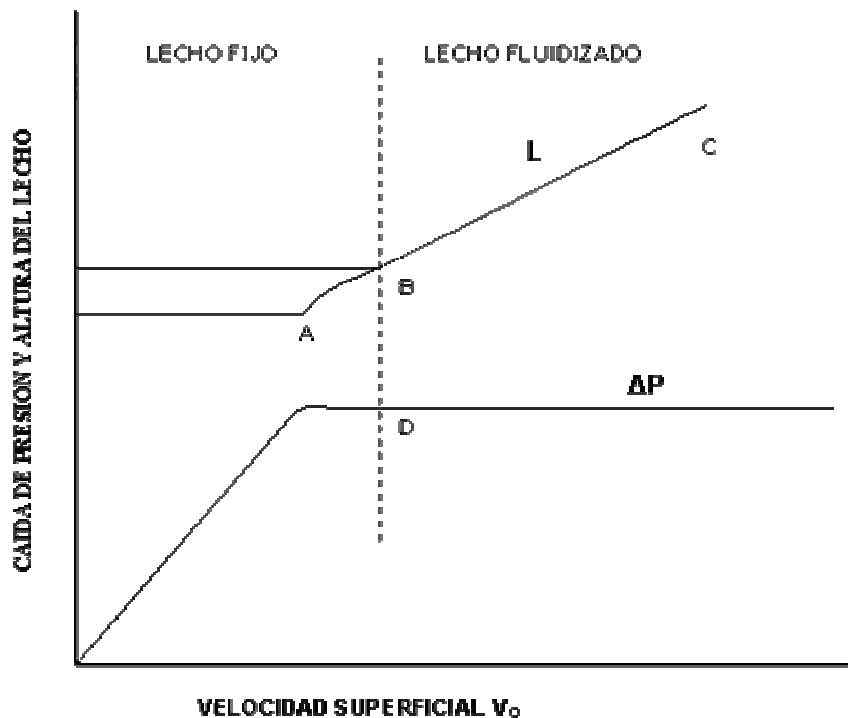
ρ = densidad del fluido (kg/m^3)

μ = viscosidad del fluido ($Pa*s$)

3.4 CONDICIÓN MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

Considerando una determinada masa de partículas contenidas en una columna a la cual se adapta un dispositivo que permite transportar un fluido a través de la misma; al aumentar la velocidad del fluido en el lecho, la caída de presión aumenta hasta equilibrar la fuerza de gravedad que se ejerce sobre las partículas (peso). Un posterior aumento de la velocidad provoca un movimiento vibratorio (figura 2) **A** y posteriormente una suspensión del lecho en el fluido **B**. Esta condición se denomina punto mínimo de fluidización.

Figura 2. Caída de presión y altura de lecho frente a velocidad superficial para un lecho de sólidos.



Una vez que el lecho está fluidizado, la caída de presión a través del mismo permanece constante, pero la altura del lecho continúa aumentando al aumentar

el flujo. El lecho puede operar con grandes velocidades y con muy poca o ninguna pérdida de sólidos, toda vez que la velocidad superficial que se requiere para soportar el lecho de partículas es mucho menor que la velocidad límite para las partículas individuales.

Si se reduce gradualmente la velocidad de flujo en el lecho fluidizado, la caída de presión permanece constante y la altura de lecho disminuye siguiendo la línea **BC** que se observaba al aumentar las velocidades. Sin embargo, la altura final del lecho puede ser mayor que la inicial para el lecho fijo, debido a que los sólidos vertidos en un lecho tienden a empaquetarse mejor que los sólidos que sedimentan lentamente a partir de un estado fluidizado. La caída de presión para bajas velocidades es menor que en el lecho fijo original. Arrancando de nuevo, la caída de presión contrarresta el peso del lecho en un punto **B**, y este punto en vez del A deberá considerarse como el correspondiente a la velocidad mínima de fluidización (V_{mf}). Para determinar V_{mf} deberá fluidizarse vigorosamente el lecho, dejarlo sedimentar disminuyendo el flujo de gas y aumentar después gradualmente el flujo hasta que el lecho comienza a expansionarse. A veces pueden obtenerse valores más reproducibles de V_{mf} a partir de la intersección de las líneas de caída de presión en el lecho fijo y en el lecho fluidizado.

3.3.1 VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

Se puede obtener una ecuación para la velocidad mínima de fluidización tomando la caída de presión a través del lecho igual al peso del lecho por unidad de área de la sección transversal, teniendo en cuenta la fuerza de flotación del fluido desplazado. Al reordenar la ecuación de **Ergun** para la caída de presión en lechos, evaluarla en el punto de fluidización incipiente e igualarla a la ecuación producto del balance de fuerzas para el lecho, se obtiene una ecuación para determinar velocidad mínima de fluidización:

$$1.75 * \frac{\rho V_{mf}^2}{D_p \epsilon_{mf}^3} + 150 * \frac{\mu V_{mf}}{D_p^2 \epsilon_{mf}^3} (1 - \epsilon_{mf}) - g(\rho_p - \rho) = 0 \quad (12)$$

Donde:

ϵ_{mf} = fracción volumétrica del fluido.

V_{mf} = velocidad mínima de fluidización

En el proceso de aceite de palma, donde las partículas generadas no son totalmente esféricas, se aplica la correlación de Wen & Yu como método de aproximación para determinar la velocidad mínima de fluidización aplicando el factor de corrección por esfericidad. De esta manera:

$$14(1.75)Re_{pmf}^2 + 150(11)Re_{pmf} - Ga = 0 \quad (13)$$

Donde:

Ga = Número de Galileo

$$Re_{pmf} = \frac{V_{mf} D_p \rho}{\mu} \quad (14)$$

$$Ga = \frac{D_p^2 g \rho}{\mu^2} (\rho_p - \rho) \quad (15)$$

$$\Phi \epsilon_{mf}^3 \approx 1/14 \quad (16)$$

$$\frac{1 - \epsilon_{mf}}{\Phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \approx 11 \quad (17)$$

Una adaptación con ajuste de parámetros de la ecuación (13) es la denominada correlación de Grace:

$$V_{mf} = \frac{\mu}{D_p \rho} \left\{ 27.2 + \left[(27.2)^2 + 0.0408 Ga \right]^{1/2} \right\} \quad (18)$$

3.5 CAÍDA DE PRESIÓN EN EL LECHO

La caída de presión en el lecho depende de la altura del mismo y de la distribución del fluido. El comportamiento entre la caída de presión a lo largo de la torre u la velocidad de fluidización nos dará una idea de la claridad del proceso de fluidización que se está llevando a cabo; para tasas de flujo relativamente bajas en un lecho compacto la caída de presión es aproximadamente proporcional a la velocidad del fluido, la porosidad o fracción vacía aumenta hasta una condición de mínima fluidización, resultando una disminución en la tasa de caída de la presión del lecho. Con velocidades superiores a la mínima de fluidización el lecho se expande y la caída de presión permanece constante gracias al gran espacio de flujo existente en este lecho.

$$\Delta P = Lg(1 - \epsilon)(\rho_p - \rho) \quad (19)$$

Donde:

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L} \quad (20)$$

ϵ = fracción volumétrica del fluido

L_0 = Longitud del lecho fijo o estático

El manómetro Tubo "U" es usado comúnmente para la determinación experimental de la caída de presión en una columna neumática a escala piloto.

Realizando un balance de energía para los tubos en "U", se determina la caída de presión entre la parte inferior y superior de la columna en función de las diferencias de altura en el líquido manométrico. Para la disposición mostrada en la figura 2 se tiene que:

$$\Delta P = \rho_{lm}g(h_w - h_g - h_g^* + h_w^* - \rho_{aire}g(h_w - h_w^*)) \quad (19a)$$

ρ_{lm} = Densidad del líquido manométrico

G = Aceleración de la gravedad.

3.6 VELOCIDAD DE ARRASTRE

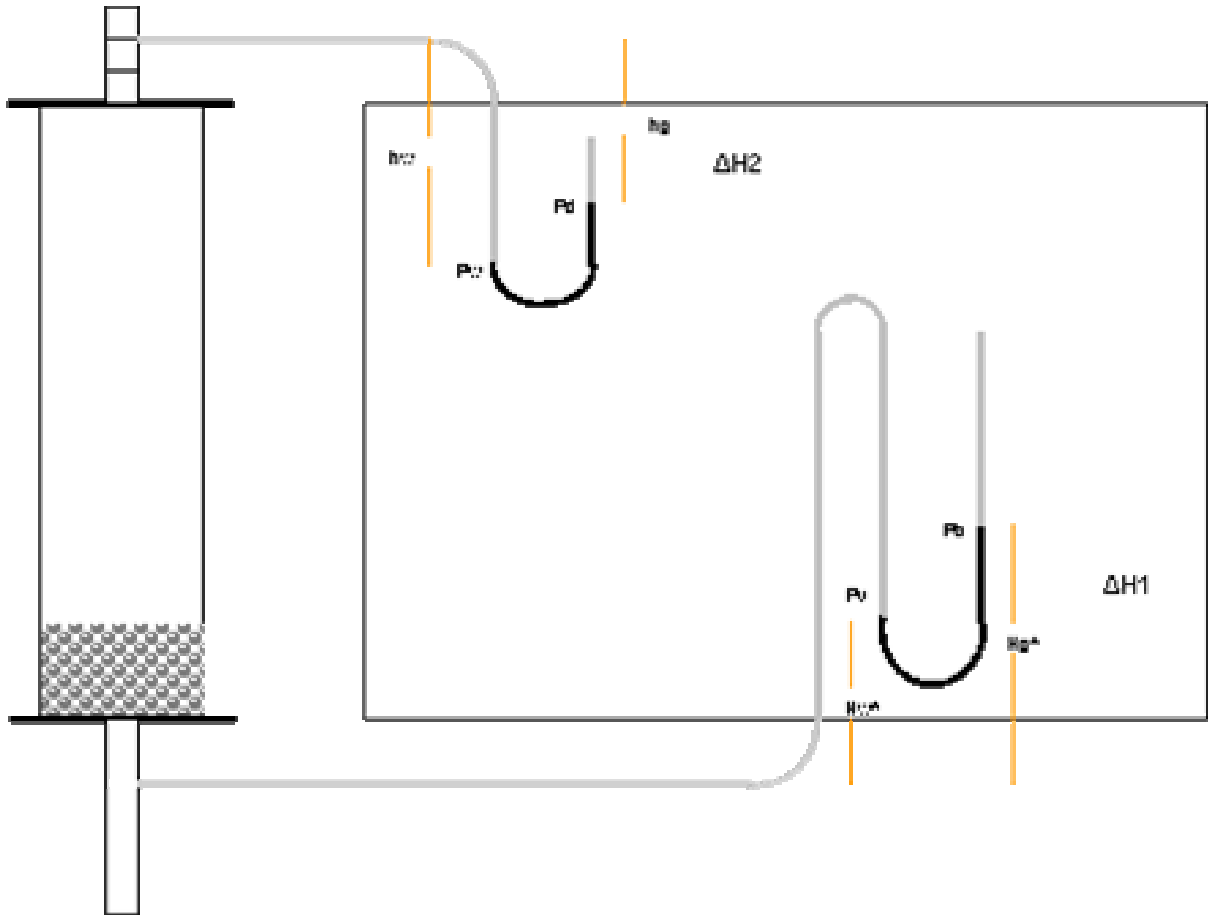
Es también denominada velocidad terminal y representa el punto en el cual la fuerza de empuje es mayor que la fuerza producida debido al efecto de la gravedad sobre las partículas. En la condición de arrastre las partículas son transportadas por la corriente llegando a un punto tal donde el lecho desaparece, las partículas llegan a "hacer parte del mismo fluido" y por ende la caída de presión decrece hasta volverse mínima.

La velocidad terminal puede ser calculada por medio de métodos directos utilizando la correlación de Turian & Yuan. Esta correlación se obtuvo a partir de datos experimentales para partículas esféricas, por lo tanto se hace necesario tener en cuenta la aplicación del factor de esfericidad para partículas irregulares.

$$D_p = \Phi_s D \quad (21)$$

Donde D = diámetro de las partículas irregulares hallado mediante medición directa o análisis de tamizado.

Figura 3. Esquema Columna Neumática escala piloto y Dispositivo medidor de Presión.



$$\lambda = \left[\frac{4}{3} g D_p^3 \rho \frac{(\rho_s - \rho)}{\mu^2} \right]^{1/2} = Re_p C_D^{1/2} \quad (22)$$

Donde C_D es el coeficiente de arrastre de la partícula en el fluido.

$$\begin{aligned} \text{Log } Re_p = & -1.38 + 1.94(\text{log } \lambda) - 8.6 * 10^{-2}(\text{log } \lambda)^2 - 2.52 * 10^{-2}(\text{log } \lambda)^3 \\ & + 9.19 * 10^{-4}(\text{log } \lambda)^4 + 5.35 * 10^{-4}(\text{log } \lambda)^5 \end{aligned} \quad (23)$$

A partir de las ecuaciones 22 y 23 se hace una estimación inicial del Reynolds de

partícula. Según el Re_p existen aproximaciones al coeficiente de arrastre*:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad 0 < Re_p < 2$$

$$C_D = \frac{18.5}{Re_p} \quad 2 < Re_p < 500$$

$$C_D \approx 0.44 \quad 500 < Re_p < 2 \cdot 10^5 \quad (24)$$

Finalmente tenemos:

$$V_T = \left[\frac{4(\rho_s - \rho)g\bar{D}_p}{3C_D\rho} \right] \quad (25)$$

Donde

\bar{D}_p = diámetro promedio experimental obtenido por análisis de tamizado o diámetro Sauter.

4. EQUIPOS UTILIZADOS EN PRUEBAS PILOTO DE FLUIDIZACIÓN

4.1 VARIADOR

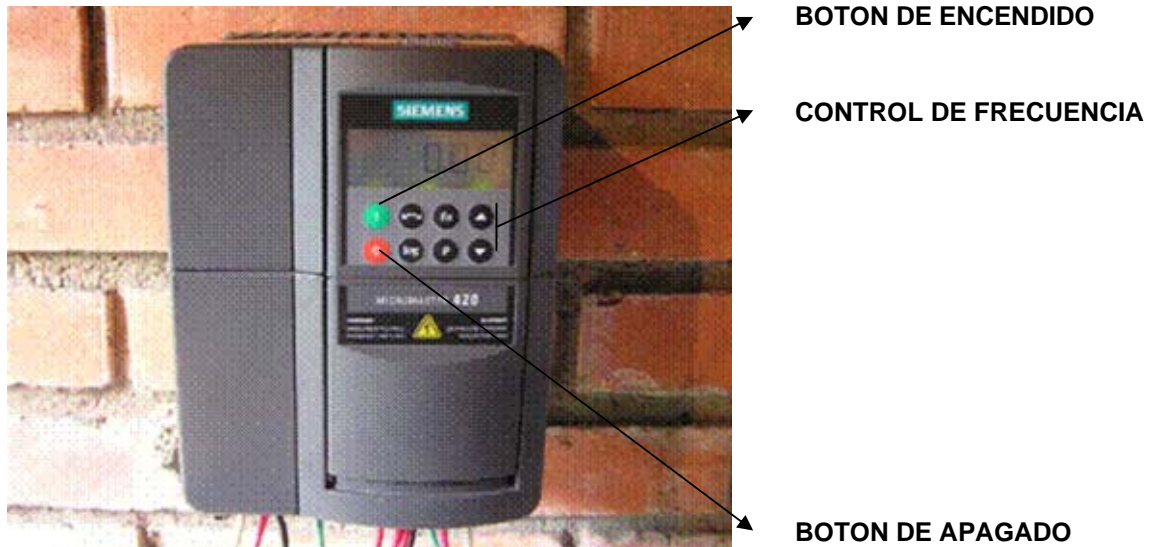
El variador es un equipo mediante el cual se puede variar las condiciones nominales del motor, por lo tanto, se controla el caudal del ventilador. Para la columna piloto se hacen variaciones en la frecuencia.

El equipo utilizado es Siemens Micromaster 420. Entrada 200-240 V mas o menos el 10% (7.4 - 8.3 A). Frecuencia de entrada 47 – 63 Hz, frecuencia de salida 0 – 650 Hz. Para motores de 1.5 Kw. Rango de Temperatura –10 – 50 °C.

* BRODKEY, Roberts. HERSHEY, Harry. Transport Phenomena A Unified Approach. Ed: McGraw Hill. p 592 – 594.

Tiempo de aceleración/desaceleración de 10 segundos.

Figura 4. Variador.



4.2 SISTEMA MOTOR – VENTILADOR - COLUMNA

La columna piloto en su conjunto consta del ventilador, la columna de acrílico, la malla colector y los medidores de presión.

4.2.1 COLUMNA

Tiene una altura total de 0.78 m y un área transversal de $(0.14*0.14)m^2$, tiene en su parte inferior una malla que sostiene el material a fluidizar.

4.2.2 MOTOR

La columna cuenta con un motor Siemens de 2 Hp- 1.5 Kw, con entrada de 220 V (6.2 A), velocidad y frecuencia nominal de 3410 rpm 60 Hz respectivamente.

4.2.3 VENTILADOR

En esta máquina, el fluido entra moviéndose axialmente a lo largo del eje central del impulsor, luego, el fluido es forzado radialmente hacia los pasajes dentro del impulsor; al pasar a través del impulsor, el fluido experimentará un cambio en la

presión y en la velocidad relativa al impulsor. Entonces el flujo emerge del impulsor hacia la carcasa que actúa como un difusor para convertir la energía cinética en altura de presión.

4.2.4 MALLA COLECTORA

La malla colector esta elaborada en anejo mosquitero y tiene como función colectar el material que se arrastra a medida que aumenta la velocidad. Tiene un diámetro medio de 26 cm.

4.2.5 MEDIDOR DE CAIDAD DE PRESION

El manómetro de Tubo en U, tal como lo ilustra la figura 2, consta de una estructura de soporte y dos tubos de vidrio conectados a la columna por medio de mangueras. El líquido manométrico utilizado en el caso particular de Agroince es etanol al 96%.

4.3 ANEMÓMETRO

El equipo utilizado para medir la velocidad del aire en la columna es un anemómetro digital modelo VT-200 de Dwyer Instruments, Inc. El equipo tiene un rango de velocidad de 0 – 45 m/s con un error de mas o menos el 3% y de temperatura de 0 – 45°C. Esta diseñado para medir velocidad, caudal y temperatura en diferentes unidades.

Figura 5. Medidor de Velocidad.



5. SEGURIDAD

Para el uso seguro de la columna piloto y los equipos que la integran es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Verificar el buen estado de las conexiones eléctricas y los aislamientos en los cables antes de encender los equipos e iniciar el ensayo.
- No introducir los dedos ni otros elementos en el área de succión del ventilador mientras éste permanezca encendido.
- Cualquier manipulación interna de los equipos como ajustes y limpieza se debe llevar a cabo cuando éstos estén apagados.
- En el caso del Micromaster, una vez desconectado de la fuente de alimentación se debe esperar por lo menos cinco minutos antes de realizar cualquier manipulación interna del equipo. Esta recomendación es debida a que el variador conserva un nivel de tensión peligroso tiempo después de ser desconectado.

6. EXPERIMENTACIÓN CON ELEMENTOS INDIVIDUALES

6.1 PRUEBAS PRELIMINARES

Las variables críticas a evaluar en pruebas de separación neumática tanto en el proceso en planta como a escala laboratorio son la humedad, la forma y el tamaño de las partículas, éstas pueden ser inherentes y/o impuestas por las condiciones del medio o del mismo proceso. Las variaciones presentadas en los materiales se relacionan con cambios en el peso (humedad), áreas superficiales y volúmenes.

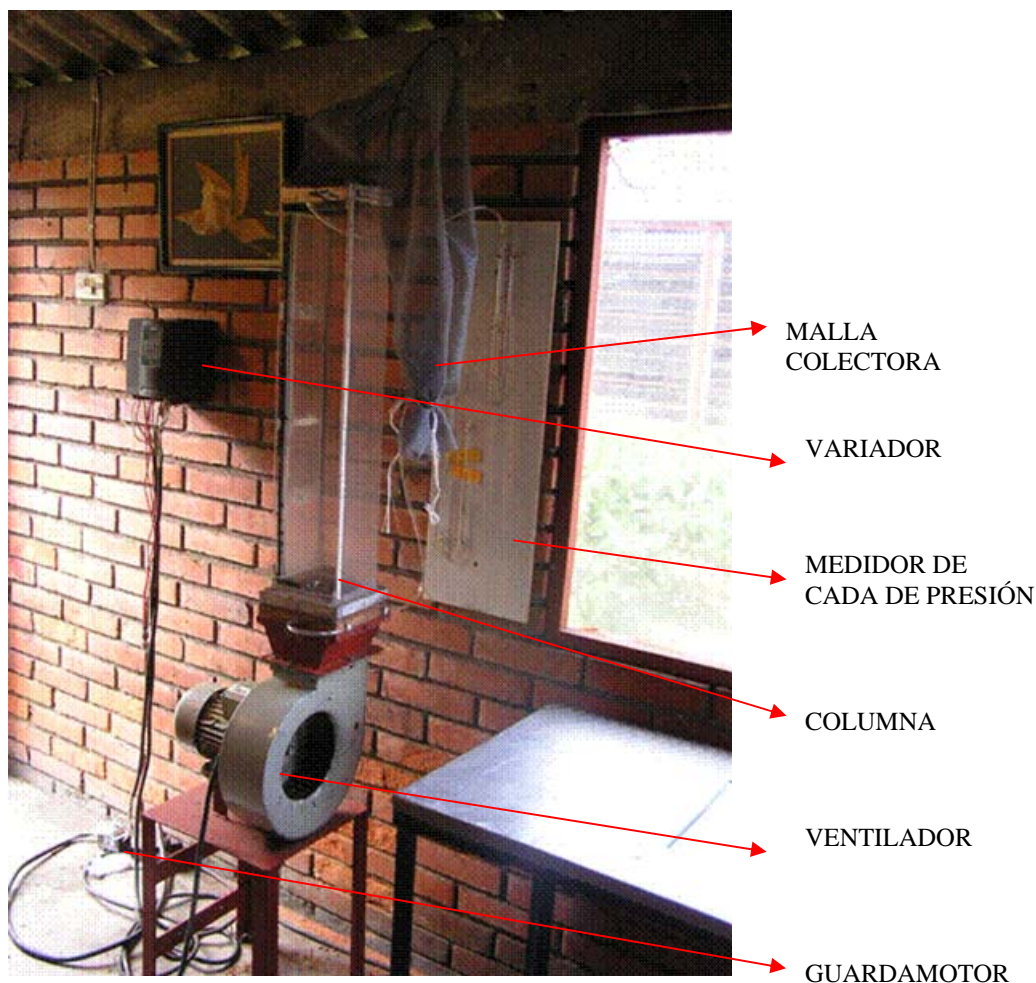
6.1.1 HUMEDAD

Debido a que el contenido de agua en las muestras contribuye notablemente en su peso, se deben evaluar las condiciones de humedad para cada muestra a analizar y reportarla junto con los datos obtenidos en el ensayo.

6.1.1.1 HUMEDAD EN FIBRA:

Dentro del proceso de palmistería se analiza humedad en la fibra correspondiente a los flujos de torta en prensa y torta a la entrada de la columna de separación neumática. La metodología utilizada para la obtención de las muestras varía según el propósito del ensayo pero se recomienda implementar El procedimiento analítico contenido en el *Manual de Laboratorio de Plantas de beneficio Primario para Fruto de Palma de Aceite-CENIPALMA*.

Figura 6. Montaje final de Columna neumática piloto.



Como producto del muestreo se debe obtener una cantidad de muestra 1.5 veces mayor que la requerida (ítem7) para hacer las pruebas en columna, esto con el objetivo de garantizar disponibilidad de muestra en las mismas condiciones de humedad para todas las repeticiones en los ensayos y la requerida para los análisis preliminares. Determinar la humedad de la fibra como lo indica *Manual de Laboratorio de Plantas de beneficio Primario para Fruto de Palma de Aceite-CENIPALMA.*, página 43.

6.1.1.2 HUMEDAD EN OTROS COMPONENTES

NUECES: Pesar una cápsula de porcelana limpia y seca. Registrar su peso. Hacer un cuarteo de la muestra total y tomar 50 gramos aproximadamente de nueces. Llevar al horno la cápsula con las nueces a 105 C durante aproximadamente 9 horas (o hasta obtener un peso constante). Sacar la cápsula,

dejándola enfriar en el desecador por 30 minutos. Pesar la cápsula con el material seco. Registrar su peso.

ALMENDRAS: Determinar la humedad en nueces según *Manual de Laboratorio de Plantas de beneficio Primario para Fruto de Palma de Aceite-CENIPALMA.*, Pagina 65.

6.1.2 DENSIDAD DE LA MUESTRA

Los elementos como nueces, almendras y cuesco cuentan con una gran heterogeneidad en sus características individuales, aún cuando la muestra consta de uno solo de estos materiales, por lo tanto se hace necesario determinar la distribución de masa por unidad de volumen tanto individual como en el lecho. La densidad absoluta de las partículas es requerida en los cálculos teóricos de las velocidades de mínima fluidización y de la caída de presión en el lecho.

6.1.2.1 DENSIDAD APARENTE

Hacer un cuarteo con la muestra a analizar y tomar 40 a 50 gramos. Verter la muestra en una probeta limpia y seca. Registrar el volumen de la probeta ocupado. También es posible determinar la densidad aparente de las muestras en la misma columna neumática piloto si se conoce el área transversal de la columna, el peso de la muestra y la altura del lecho estático.

Al determinar la densidad aparente de muestras poco densas como la fibra y las procedentes directamente del proceso, como torta, se debe tener en cuenta que éstas conserven sus condiciones iniciales, es decir, que no se someta a presiones, golpes o movimientos fuertes en los recipientes que puedan producir alteraciones en sus volúmenes.

6.1.2.3 DENSIDAD ABSOLUTA

NUEZ, ALMENDRAS Y CUESCO: Medir en una probeta 150 mL de agua. Se puede hacer uso del material empleado para determinar la densidad aparente. Tomar de la muestra a analizar 40 a 50 gramos aproximadamente. Tomar el peso. Depositar el material pesado en la probeta y registrar el volumen de agua desplazado. El volumen de agua que se desplaza es el equivalente al volumen del material analizado.

FIBRA: Pesar aproximadamente 20 gramos de material a fluidizar. Hacer con ella un grumo y con la ayuda de una prensa compactar la fibra tanto como sea posible, esto con el fin de disminuir al máximo los espacios libres entre las fibrillas. Cortar la lamina comprimida en un cuadrado con dimensiones conocidas (medidas con calibrador) no menores a dos centímetros. Pesar la lámina obtenida

luego del corte (este será el volumen ocupado por las partículas sin espacios vacíos).

6.1.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA:

Cuando la muestra que se fluidiza es una mezcla, ya sea elaborada o directamente de proceso se debe especificar la composición de la misma. Para mezcla de proceso tomar la muestra, hacer un cuarteo y pesar 200 gramos aproximadamente. Separar cuidadosamente cada componente y pesarlo individualmente. Registrar los pesos.

6.2 PROCEDIMIENTO DE EXPERIMENTACIÓN EN COLUMNA

A lo largo del mismo experimento se puede recopilar la información necesaria para determinar las curvas de fluidización de cada material.

6.2.1 CONDICIONES PREVIAS AL ENSAYO.

Se recomienda tener en cuenta el formato que aparece en la figura 1. Este constituye un check list inicial que nos permite controlar de manera adecuada el ensayo.

Figura 7. Check list inicial para experimentación con columna neumática escala piloto.

PARAMETRO	OK
1. CONEXION DEL GUARDAMOTOR A FUENTE DE 220 V.	
2. GUARDAMOTOR EN BUEN ESTADO (AISLAMIENTOS, CONEXIONES)	
3. VARIADOR EN BUENAS CONDICIONES (CONEXIONES)	
4. MOTOR EN BUENAS CONDICIONES (CONEXIONES).	
5. COLUMNA EN BUENAS CONDICIONES: SIN FISURAS, SIN ESCAPES, BUEN AJUSTE DE LOS TORNILLOS, VISIBILIDAD DEL ACRILICO.	
6. MALLA COLECTORA EN BUENAS CONDICIONES	
7. MANGUERAS Y MEDIDORES DE PRESION EN U EN BUENAS CONDICIONES: SIN IMPUREZAS DENTRO DEL LIQUIDO MANOMETRICO, BUENOS AJUSTES DE LAS MANGUERAS EN LAS SALIDAS DE LA COLUMNA	

8. NIVEL DEL LIQUIDO MANOMETRICO CONSTANTE: DEBE MANTENERSE DE ACUERDO A LAS CONDICIONES DE LA EXPERIMENTACION.	
9. MANOMETRO EN BUENAS CONDICIONES	
10. DISPONIBILIDAD DE REGISTROS PARA TOMA DE DATOS	
11. DISPONIBILIDAD DE MUESTRAS PREVIAMENTE ANALIZADAS: HUMEDAD, TAMAÑO, DENSIDAD, PESO	

Inicialmente se debe verificar que el equipo tenga condiciones aptas para iniciar el ensayo. Revisar que los cables de las conexiones no estén pelados ni descubiertos. Revisar el buen estado de la malla colector. Revisar que los tubos en U tengan líquido manométrico al nivel requerido para los cálculos y que no tengan impurezas que puedan afectar las mediciones. Verificar que la malla base de la columna corresponda a la adecuada para el ensayo particular a realizar, de igual manera corregir cualquier fuga de aire que se presente en la zona de inserción de dicha malla.

Es importante disponer de un material adecuado de registro para el ensayo. Este material consiste en formatos debidamente diseñados donde para cada variación se permita el registro de la frecuencia, la velocidad del fluido, la altura del lecho, los dH en el manómetro tipo tubo "U" y las cantidades de material arrastrado en la columna. Este formato debe contener además: fecha, número de ensayo, número de repetición, tamaño de la muestra a evaluar, tamaño promedio de las partículas y el tipo de material.

6.2.2 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO:

Luego de preparar la muestra a evaluar, se carga en la columna por la parte superior. La columna junto con la muestra se colocan en su base de apoyo y se atornilla, se conectan las mangueras que van al medidor de presión tipo tubo en "U" y por último se ajusta la malla colector al extremo superior de la columna.

Se debe tomar el peso adecuado de muestra para cada tipo de material. Las cantidades de muestra a utilizar se indican en la tabla 1.

Tabla 1. Cantidades de muestra a utilizar en columna prototipo.

MATERIAL	TAMAÑO MUESTRA (Kg)
NUEZ ENTERA	0.4
NUEZ ROTA	0.3
ALMENDRA ENTERA	0.3
ALMENDRA ROTA	0.4
CUESCO	0.5

Se enciende el guardamotor. Debido a que las partículas en reposo se aglomeran de forma distinta cuando se cargan en la columna y cuando son sometidas a la acción de una corriente de aire, se requiere hacer una fluidización rápida antes de iniciar el ensayo. Para ello se enciende el variador y se aumenta la frecuencia a partir de su condición mínima (6 Hz) hasta que el material se expanda por completo en la columna. Se recomienda sujetar la malla colector a ras para evitar que se pierda material. Luego de estar expandido completamente el lecho, se disminuye lentamente la frecuencia hasta volver nuevamente a la condición inicial (6 Hz). En este punto se toma la primera lectura de la altura del lecho. Este dato previo permite el cálculo de la densidad aparente de la muestra al iniciar el ensayo. Se debe procurar hacer esta primera expansión en el menor tiempo posible (siempre y cuando se haga de manera correcta) ya que el material pierde humedad cuando se somete al flujo de aire, lo cual puede ocasionar variaciones en los datos obtenidos del ensayo.

La expansión inicial sirve también para determinar el rango de variación de frecuencia en el cual el lecho se expande, se fluidiza y se arrastra. Al observar este rango se debe colocar especial atención en detectar la etapa en que inicia la expansión del lecho y la etapa en la cual éste se arrastra, pues en estos puntos las mediciones deben ser mucho mas finas (menor variación de frecuencia) con el fin de obtener datos precisos.

Se inicia el ensayo aumentando la frecuencia de dos o tres Hz por vez. Cada vez que varíe la frecuencia en el variador se deben seguir los siguientes pasos:

1. Medir la diferencia de alturas en el manómetro tipo tubo en "U" (dH1 y dH2):
Generalmente la altura del líquido manométrico esta variando; se recomienda tomar el valor mas alto en el que la altura se estabilice por lo menos 3

segundos.

2. Medir la altura del lecho en la columna: Al igual que los dH en el manómetro, la altura del lecho varía según la naturaleza del material a fluidizar. La almendra rota y el cuesco son los que mayor variación presenta debido a que su diámetro es menor y/o a que tienen mayor resistencia al flujo del aire (formas aplanadas con mayor área superficial por unidad de masa). El tipo de fluidización que se observa para los materiales constitutivos de la torta es de tipo irregular o de burbujeo, que se caracteriza por que no presenta una distribución uniforme dentro del área de expansión, sino un comportamiento cíclico donde una parte del material se expande por la acción del flujo de aire mientras que la otra permanece semiestática. Se recomienda que al tomar esta medición se observe la mínima altura total que alcanza la parte expandida del lecho en un lapso breve y se registre este dato como la altura de lecho para cada variación de la frecuencia.
3. Medir la velocidad del fluido: La velocidad del fluido (en este caso aire) se mide en la parte superior de la columna, donde el fluido se descarga a la atmósfera. Se deben seguir los siguientes pasos:
 - Encender el anemómetro y programarlo para que tome lecturas máximas (En el caso del anemómetro digital modelo VT-200 de Dwyer Instruments, Inc, corresponde al botón #6). Con el uso de otros equipos se recomienda mantener constante la configuración del mismo.
 - Ubicar la hélice del anemómetro en posición de medir, tirar la malla colector a ras de la columna y ubicar la hélice de manera tal que, sobre la malla, ésta quede equidistante con todos los lados del marco de la columna y justo en el punto donde finaliza la columna.
 - Leer el dato mostrado en la pantalla del anemómetro y registrar.

Al finalizar estos pasos se procede a variar nuevamente la frecuencia en el variador y tomar sucesivamente los datos ya mencionados.

Es necesario tener en cuenta que luego de cada variación de frecuencia y antes de la lectura de la velocidad del fluido deben transcurrir de 10 a 15 segundos como mínimo. Este lapso es el necesario para la estabilización del flujo de aire.

Si se tiene en cuenta el orden en la metodología del ensayo sugerida en este manual, no se tendrán inconvenientes, pues ese tiempo se invierte en el registro de los dH en el manómetro.

Al llegar a la frecuencia a la cual se da el inicio de la fluidización, se recomienda hacer variaciones de frecuencia de 0.5 Hz hasta observar una expansión total de las partículas. Desde que el lecho esté totalmente expandido hasta aquel punto en el cual se hace inminente el arrastre de las partículas se pueden hacer mayores variaciones en la frecuencia del variador con el fin de agilizar el proceso.

La condición de arrastre se inicia con la pérdida del material particulado en la malla colector y se da del todo cuando el lecho puede "irse" de la columna de manera aproximadamente uniforme y rápida (10 segundos o menos)

Debido a que cuando se da la condición de arrastre, las partículas abandonan la columna de forma rápida, la velocidad de arrastre medida corresponde a la velocidad en vacío.

Si se requiere realizar curvas donde se analice *Velocidad de arrastre Vs % material perdido*, se debe hacer mas finas las variaciones de frecuencia en el rango de pérdida de material en la columna para obtener como mínimo, cuatro lecturas (datos) de % material arrastrado. En estos puntos, luego de medir la velocidad, se deposita en un recipiente el material que ha sido acumulado en la malla. Este material colectado se debe guardar separado mientras termina el ensayo para luego pesar individualmente o de forma acumulativa.

Cuando se realicen ensayos con materiales frescos y varias repeticiones para un mismo material se debe mantener en lo posible sus condiciones iniciales de humedad. Para ello se recomienda:

- Realizar el ensayo en el menor tiempo posible (siempre y cuando no se afecte la calidad de las mediciones)
- Evitar hacer muchas repeticiones con el mismo material. En este caso se debe preparar una cantidad mayor de muestra inicial con el fin de permitir trabajar con material siempre fresco.

- Evitar tener el material fluidizado, o expuesto al flujo de aire cuando dentro del ensayo no sea necesario.

Si se realizan varias repeticiones de ensayos con una misma muestra, las frecuencias a las cuales se tomen los datos deben ser las mismas para cada repetición. Esto permite un mejor análisis de la información obtenida. Por lo tanto, si las repeticiones son continuas, se recomienda hacer el ensayo correspondiente a la primera repetición, apagar el variador, llenar los formatos para los siguientes ensayos con las frecuencias requeridas (según lo que muestra el primer ensayo) y por último encender nuevamente el variador. Así, se agilizan las pruebas sin cambiar notablemente las condiciones del material a evaluar.

7. CÁLCULOS

7.1 CÁLCULOS PRELIMINARES

7.1.1 CÁLCULO DE HUMEDAD

$$\% H = \frac{\text{pesofibrahum} - \text{pesofibra seca}}{\text{pesofibrahum}} * 100 \quad \text{(a)}$$

7.1.2 CÁLCULO DE DENSIDAD APARENTE

$$\rho_A = \frac{\text{pesomuestra}}{\text{volumenrealocupadopormuestra}} \quad \text{(b)}$$

7.1.3 CÁLCULO DE DENSIDAD ABSOLUTA

$$\rho = \frac{\text{pesomuestra}}{\text{volumenocupadopormuestrasinvacios}} \quad \text{(c)}$$

7.1.4 COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA

Al analizar la composición de la muestra se separan los componentes individuales y se aplica:

$$\% A = \frac{\text{pesoA}}{\text{pesototalmuestra}} * 100 \quad \text{(d)}$$

7.1.5 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LA PARTÍCULA

Si son partículas de forma esferoide como las nueces o las almendras se aplica las ecuaciones (1) y (3). Para partículas cuya forma se aproxima a otras formas geométricas definidas se aplica la ecuación (2). Para partículas irregulares se determina el diámetro mediante análisis de tamizado.

En este caso el material se tamiza siguiendo la relación entre los tamices. Para determinar el diámetro medio del material retenido en cada malla en particular, este material tendrá como diámetro promedio la media de las aperturas de la malla en la cual se retiene y la anterior (por la que pasa). Por otra parte si se requiere el diámetro medio de todo el material tamizado se usa la relación superficie-volumen de Sauter (ecuación 4).

7.2 CALCULO DE VARIABLES CRÍTICAS

7.2.1 CÁLCULO VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN TEÓRICA

El cálculo teórico de la velocidad mínima de fluidización se da en varias etapas:

- Cálculo del diámetro medio de la partícula.
- Cálculo de la densidad absoluta de la partícula.
- Cálculo del número de Galileo. Ecuación (15).
- Cálculo de la velocidad mínima de fluidización Ecuación (18).

7.2.2 CÁLCULO DE CAÍDA DE PRESIÓN TEÓRICA EN LA COLUMNA

- Cálculo de la fracción volumétrica del fluido. Ecuación (20).
- Cálculo de caída de presión en el lecho. Ecuación (19).

7.2.3 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE ARRASTRE

Para partículas que no son totalmente esféricas se debe hacer el ajuste mediante el factor de esfericidad (ecuación 21). Las ecuaciones utilizadas para determinar la velocidad de arrastre son en su orden:

- Ecuación (22)
- Ecuación (23)
- Ecuación (24)
- Ecuación (25)

7.2.4 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

Según el comportamiento que describen las partículas cuando son sometidas a la acción de un fluido (figura 2). La velocidad de mínima fluidización se determina teniendo en cuenta la caída de presión y la velocidad en los puntos **B** y **D**. Para ello es importante tener en cuenta la frecuencia con que se toman datos cuando las condiciones del lecho se acercan a las de fluidización, es decir, después de haber iniciado el movimiento vibratorio de las partículas en el lecho.

7.2.5 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE VELOCIDAD DE ARRASTRE

La velocidad de arrastre experimental será aquella a la cual la totalidad del lecho sea transportado por el fluido a lo largo de la columna.

Observación: Cuando se tenga la inminencia del arrastre es importante agilizar la toma de datos de tal manera que el tiempo entre variaciones de frecuencia no se extienda por encima de 30 segundos. Esto debido a que el experimento se da de forma discontinua, dando como consecuencia una disminución en la cantidad de muestra fluidizada acelera el arrastre del total de muestra y por lo tanto errores en los datos de velocidad de arrastre.

7.2.6 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN LA COLUMNA

Para cada una de las variaciones en la frecuencia del variador se toma una lectura de las diferencias de altura entre los puntos **Pd -Pw** y los puntos **Pb-Pv** como se indica en la figura 3. El cálculo de la caída de presión a partir de datos experimentales se hace a partir de la ecuación (19a).

8. PRESENTACION DE RESULTADOS

8.1 FORMATOS DE REGISTRO

Formato 2. Determinación de condiciones de Fluidización y arrastre:

FECHA: ENSAYO: HOJA ____ DE ____

MATERIAL: CANTIDAD (Kg):

PRELIMINARES:

<i>PESO CAPSULA (g)</i>	<i>PESO CAPSULA+MUESTRA (g)</i>	<i>PESO CAPSULA+MUESTRA SECA (g)</i>	<i>% HUMEDAD</i>

<i>PESO MUESTRA (Kg)</i>	<i>VOLUMEN AGUA (m3)</i>	<i>VOLUMEN DESPLAZADO (m3)</i>	<i>DENSIDAD ABSOLUTA (Kg/m3)</i>

<i>PESO MUESTRA (Kg)</i>	<i>VOLUMEN OCUPADO (m3)</i>	<i>DENSIDAD APARENTE (Kg/m3)</i>

<i>MATERIAL</i>	<i>DIAMETRO MEDIO (m)</i>

COMPOSICIÓN MUESTRA COMPUESTA

# M	(Kg) SUBM	Kg F	Kg FINOS	Kg NE	Kg NR	Kg AE	Kg AR	Kg C
		%	%	%	%	%	%	%

BIBLIOGRAFIA

Mc Cabe W.L., Smith J.C. OPERACIONES UNITARIAS EN INGENIERIA QUIMICA. Mc Graw Hill, 6a Edicion, 1995.

Foust, Alan S. Et al. PRINCIPIOS DE OPERACIONES UNITARIAS. J. Wiley. 1980.

Fedepalma. Cenipalma. MANUAL DE LABORATORIO PLANTAS DE BENEFICION PRIMARIO PARA FRUTO DE PALMA DE ACEITE. 1999.

Castillo. M. DETERMINACION DE ALGUNAS PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE LA NUEZ DEL FRUTO DE PALMA DE ACEITE VARIEDAD TENERA (*Elaeis gineensis* jacq). Universidad Nacional de Colombia. 2002.

ANEXO 2.

CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE LOS COMPONENTES DE LA TORTA PARA 3 TIPOS DE FRUTO.

Figura 1. Curvas de distribución de tamaños fraccional y acumulada para nuez entera variedad irho adulta.

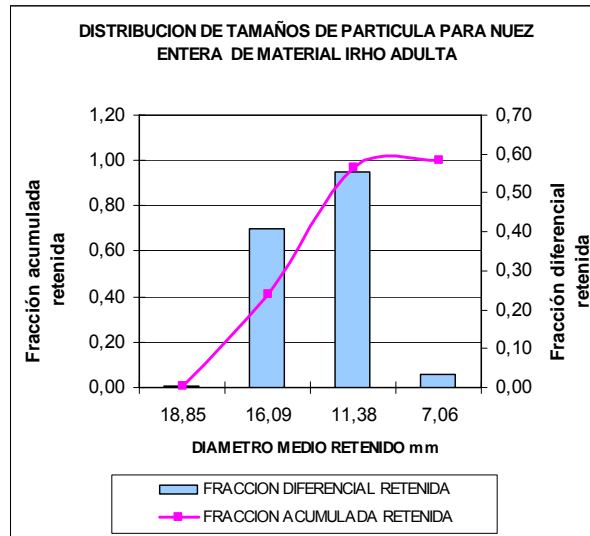


Figura 2. Curvas de distribución de tamaños fraccional y acumulada para nuez entera variedad Papua adulta.

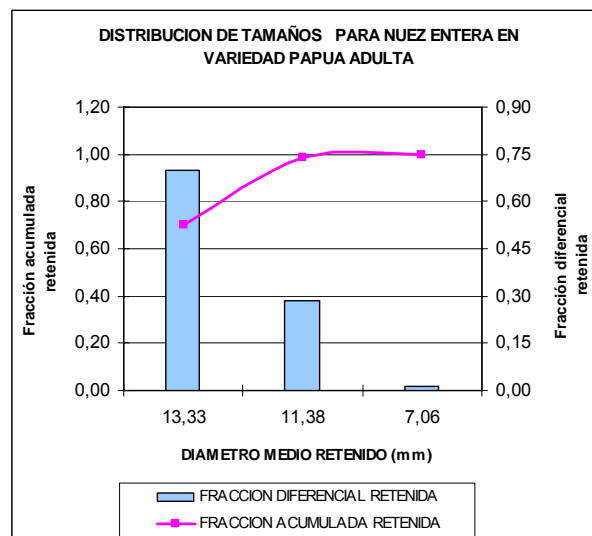


Figura 3. Curvas de distribución de tamaños fraccional y acumulada para nuez entera variedad Papua joven.

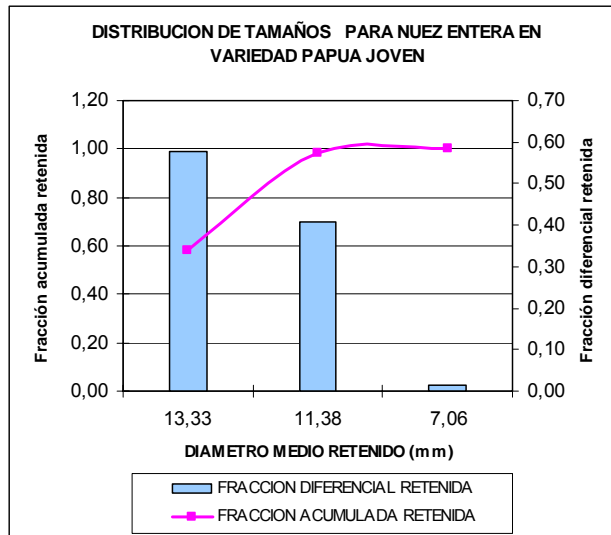


Figura 4. Curvas de distribución de tamaños fraccional y acumulada para almendra rota variedad irho adulta.

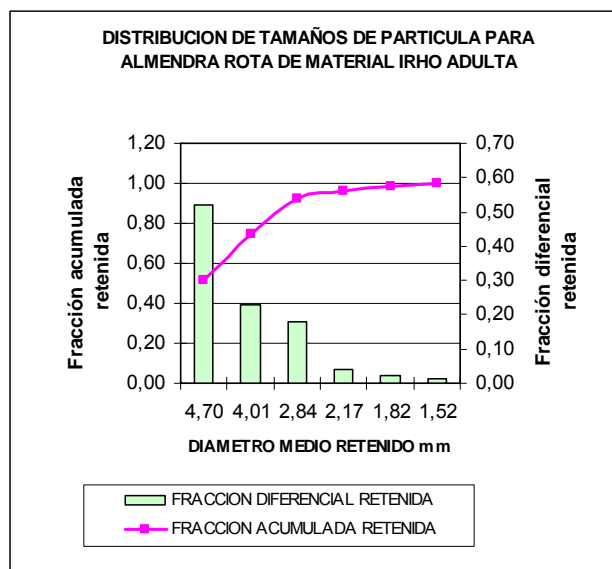


Figura 5. Curvas de distribución de tamaños fraccional y acumulada para almendra rota variedad Papua adulta.

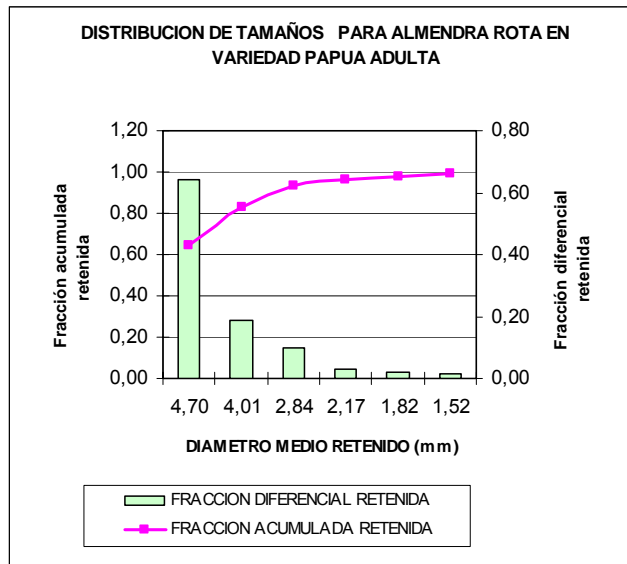


Figura 6. Curvas de distribución de tamaños fraccional y acumulada para almendra rota variedad Papua joven.

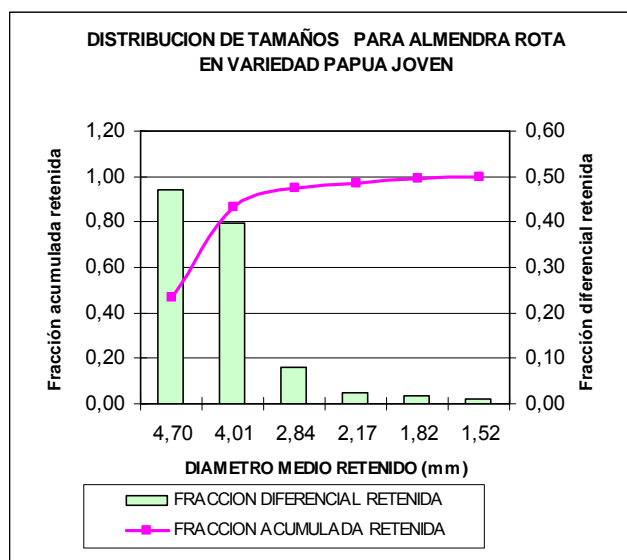


Figura 7. Curvas de distribución de tamaños fraccional y acumulada para almendra entera variedad Irho adulta.

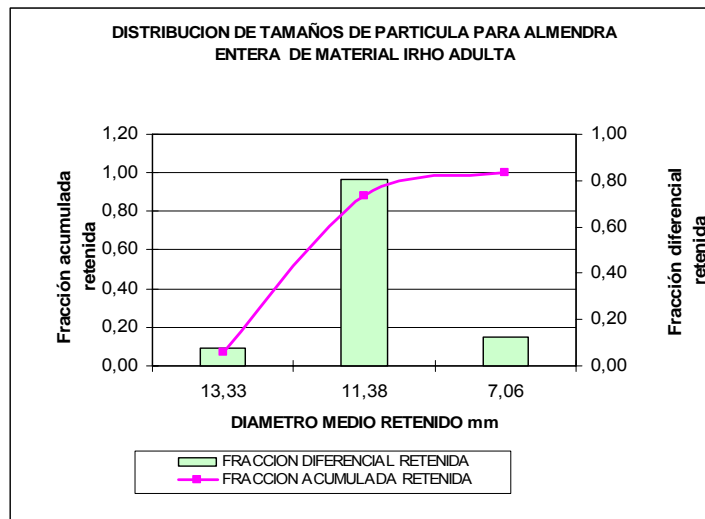


Figura 8. Curvas de distribución de tamaños fraccional y acumulada para almendra entera variedad Papua adulta.

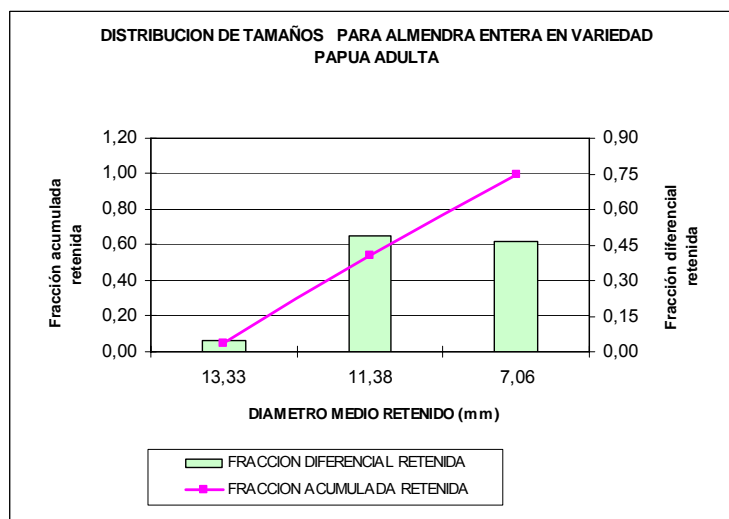


Figura 9. Curvas de distribución de tamaños fraccional y acumulada para almendra entera variedad Papua joven.

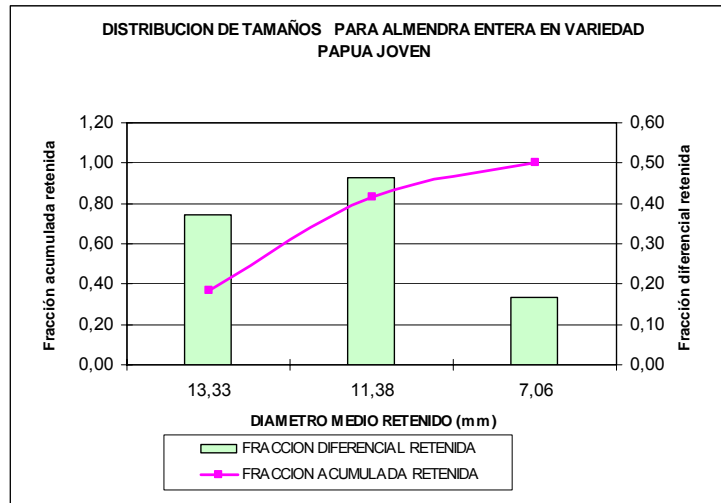


Figura 10. Curvas de distribución de tamaños fraccional y acumulada para cáscaras variedad Papua joven.

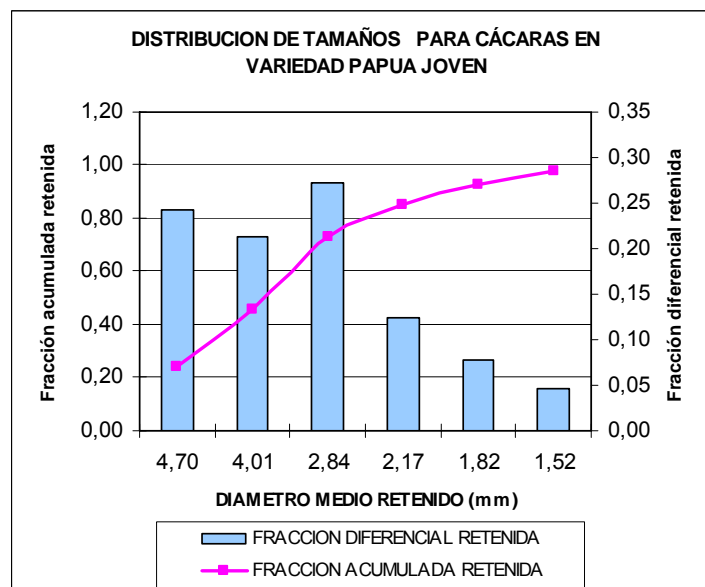


Figura 11. Curvas de distribución de tamaños fraccional y acumulada para cáscaras variedad irho adulta.

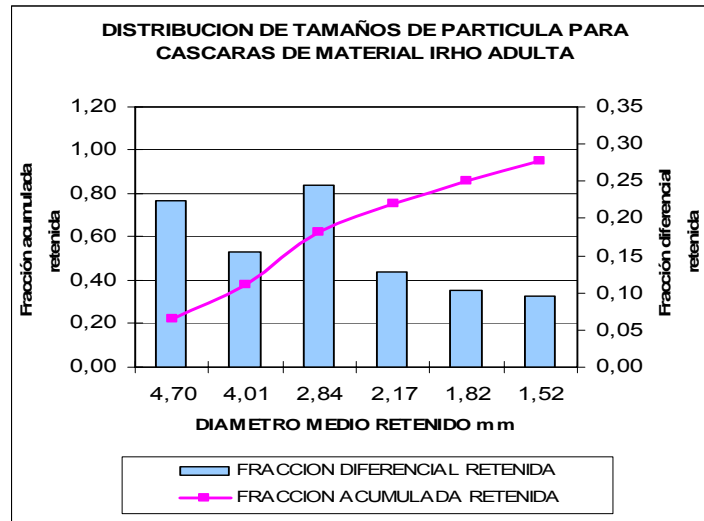
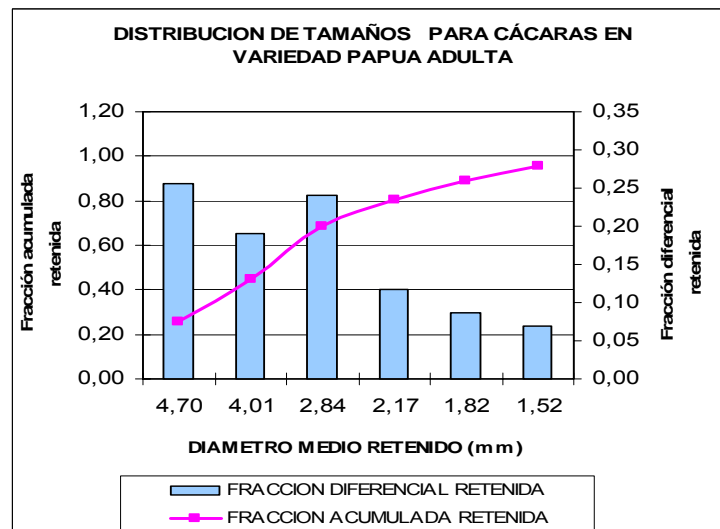


Figura 12. Curvas de distribución de tamaños fraccional y acumulada para cáscara variedad Papua adulta.



ANEXO 3.

CURVAS DE FLUIDIZACIÓN GENERADAS EN EVALUACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE MÍNIMA FLUIDIZACIÓN Y ARRASTRE PARA DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTÍCULAS EN COLUMNA PILOTO PARA LOS COMPONENTES DE LA TORTA DE PRENSAS.

Figura 1. Curva de arrastre de nuez entera para sus diámetros predominantes.

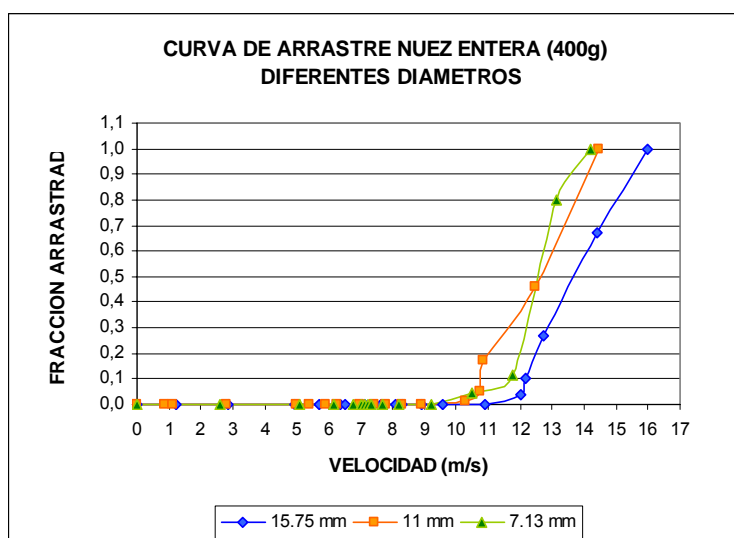


Figura 2. Curva de arrastre de nuez rota para sus diámetros predominantes.

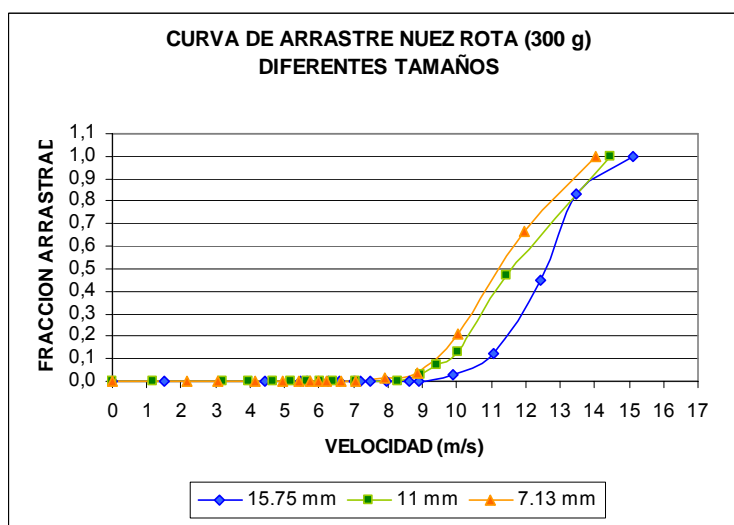


Figura 3. Curva de arrastre de almendra entera para sus diámetros predominantes.

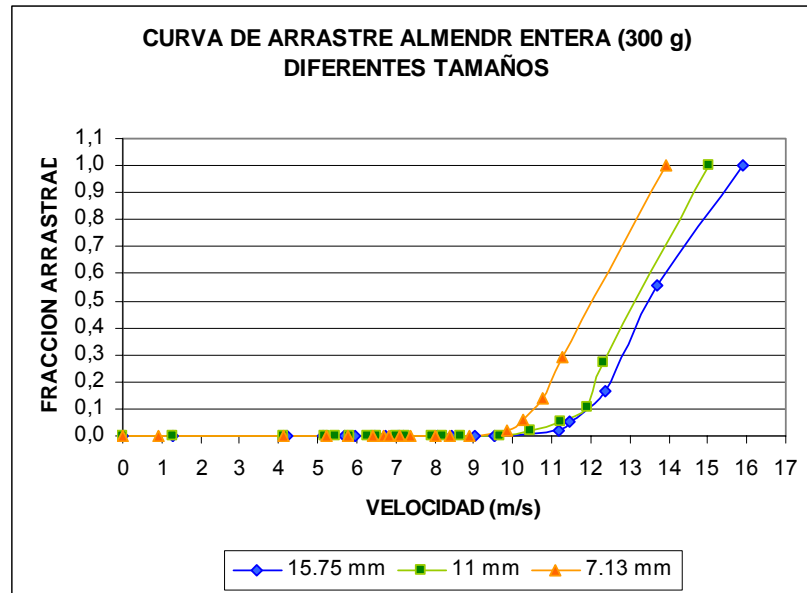


Figura 4. Curva de arrastre de almendra rota para sus diámetros predominantes.

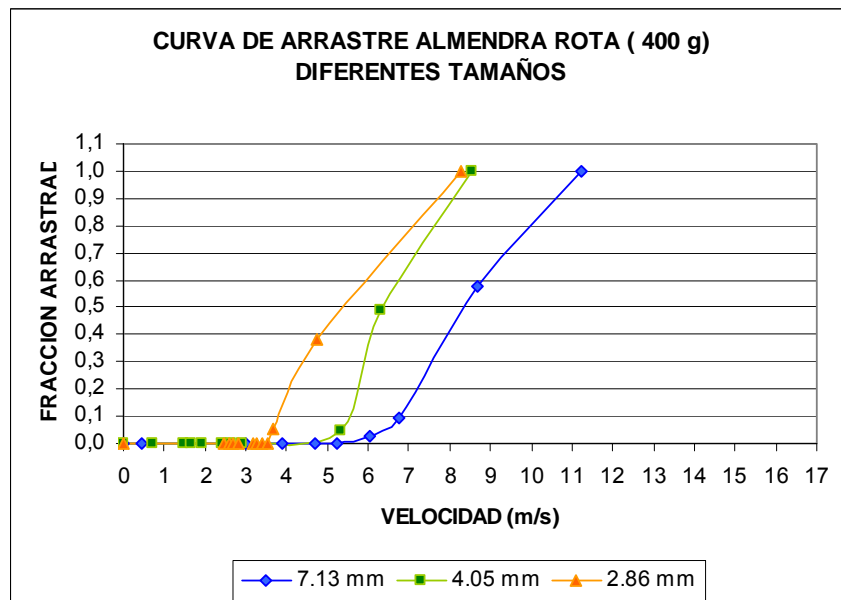
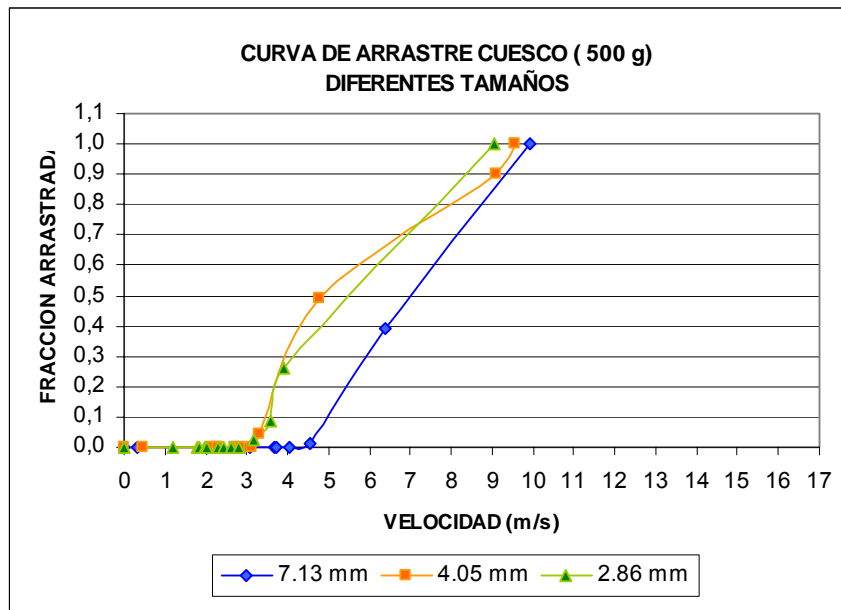


Figura 5. Curva de arrastre de cuesco para sus diámetros predominantes.



ANEXO 4.

VELOCIDADES DE MINIMA FLUIDIZACION Y ARRASTRE EXPERIMENTALES Y ANALÍTICAS.

Tabla 1. Velocidades de fluidización y arrastre, experimentales y teóricas para componentes de torta de prensas.

MATERIAL	DIAM. PARTICULA (mm)	VELOC. ARRASTRE TEORICA (m/s)	VELOC. ARRASTRE EXPERIM. (m/s)	VELOC. MIN. FLUIDIZACION TEORICA (m/s)	VELOC. MIN. FLUIDIZACION EXPERIMENT. (m/s)
NUEZ ENTERA	15,75	16,43	15,98	15,92	8,78
	11,00	11,89	14,43	14,20	8,82
	7,13	11,05	14,19	16,80	9,18
ALMENDRA ENTERA	15,75	15,58	15,98	15,14	8,75
	11,00	13,02	14,98	15,45	8,55
	7,13	10,48	13,98	16,02	8,40
NUEZ ROTA	15,75	14,22	15,13	13,88	8,96
	11,00	14,56	14,46	17,16	8,44
	7,13	9,57	14,01	14,76	8,70
CUESCO	7,13	9,57	9,86	14,76	4,27
	4,05	8,62	9,56	18,56	3,94
	2,86	7,25	9,03	19,75	2,67
ALMENDRA ROTA	7,13	11,00	11,19	16,80	5,15
	4,05	8,33	8,57	18,03	3,17
	2,86	7,00	8,24	19,21	3,45