

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

**ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE SECADO DEL AZÚCAR REFINO PARA
LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO EN UN
INGENIO**

LUDWING CRISTÓBAL GARCÍA PÉREZ



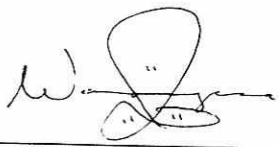
TRABAJO DE GRADUACIÓN PRESENTADO PARA OPTAR
AL GRADO ACADÉMICO DE

LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

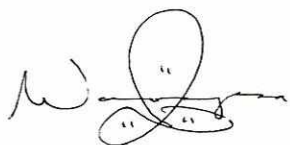
GUATEMALA
1997

**ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE SECADO DEL AZÚCAR REFINO PARA
LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO
EN UN INGENIO**

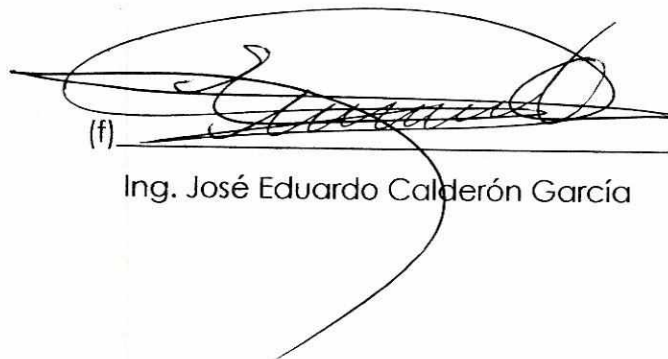
Vo. Bo.

(f) 
Ing. Walter Oswaldo Zelada Sánchez
Asesor

Tribunal:

(f) 
Ing. Walter Oswaldo Zelada Sánchez

(f) 
Lic. Roberto De León Fajardo

(f) 
Ing. José Eduardo Calderón García

Fecha de aprobación: 30 de septiembre de 1997.

Dedico este trabajo

A Dios

A mis padres:

Cristóbal Bruno García García

Lidia Cristina Pérez de García

A mis hermanos, Libni y Lestter

A mis familiares y amigos.

RESUMEN

La fabricación del azúcar refinado es una actividad en ascenso para la industria azucarera de Guatemala. Esto ha permitido una actualización tecnológica que ha beneficiado a todo el proceso de fabricación de este producto. Además ha motivado la investigación, el desarrollo y la evolución de las operaciones unitarias que la conforman. El secado es una de las etapas críticas de este proceso, ya que el atterramiento del azúcar empacado disminuye su calidad y precio.

El presente trabajo de investigación, se concentra en un análisis de las condiciones de secado del azúcar refinado, el cual se utilizará para la implementación de la etapa de acondicionamiento. Para su realización, se estudió el proceso de secado en un ingenio azucarero. Luego se realizó el muestreo y análisis en el laboratorio de control de calidad. Se analizaron los diferentes tipos de azúcar que se procesan en la refinería. Los resultados se presentaron en gráficas para observar con facilidad las tendencias y similitudes encontradas.

Se encontró que se deben optimizar los tiempos de residencia del azúcar dentro del secador rotatorio, basándose en cada tipo de azúcar que se procese. Además, se debe mejorar el aprovechamiento de la capacidad de secado del aire, y se debe acondicionar para reducir su humedad relativa. La optimización del secado del azúcar, debe anteceder al diseño de la etapa de acondicionamiento, para el mejor aprovechamiento de los recursos disponibles.

CONTENIDO

	PÁGINA
RESUMEN	V
I. INTRODUCCION	1
II. ANTECEDENTES	2
III. JUSTIFICACION	17
IV. OBJETIVOS	18
V. PROBLEMA A RESOLVER	19
VI. METODOLOGIA	20
VII. RESULTADOS	21
VIII. DISCUSION DE RESULTADOS	31
IX. CONCLUSIONES	36
X. RECOMENDACIONES	37
XI. BIBLIOGRAFIA	38
XII. APENDICE	39

Índice de Tablas

	página
Tabla II-1: Efecto de cambios simples en secadores directos	16
Tabla VII-1: Datos misceláneos del azúcar refinado en el secador rotatorio	21
Tabla VII-2: Características de las cuatro diferentes masas	21
Tabla A.1: H_o y T_o del azúcar de la masa cocida A	41
Tabla A.2: H_o y T_o del azúcar de la masa cocida B	41
Tabla A.3: H_o y T_o del azúcar de la masa cocida C	42
Tabla A.4: H_o y T_o del azúcar de la masa cocida D	42
Tabla A.5: H de cada mesh del azúcar de la masa cocida A	43
Tabla A.6: H de cada mesh del azúcar de la masa cocida B	43
Tabla A.7: H de cada mesh del azúcar de la masa cocida C	43
Tabla A.8: H de cada mesh del azúcar de la masa cocida D	43
Tabla A.9: H del azúcar refinado tipo A	44
Tabla A.10: Especificación ASTM-E-II	46
Tabla A.11: Distribución del tamaño de partícula del azúcar A	46
Tabla A.12: Distribución del tamaño de partícula del azúcar B	46
Tabla A.13: Distribución del tamaño de partícula del azúcar C	47
Tabla A.14: Distribución del tamaño de partícula del azúcar D	47
Tabla A.15: Distribución del tamaño de partícula del azúcar refinado tipo A	48
Tabla A.16: Temperatura del azúcar refinado que sale del secador rotatorio	50
Tabla A.17: Temperatura del azúcar refinado que sale del enfriador rotatorio	50
Tabla A.18: Perfil de temperatura en la entrada de aire del secador rotatorio	51
Tabla A.19: T_{bs} , T_{bh} , T_1 y T_2 en el secador rotatorio	51
Tabla A.20: Velocidad lineal del aire que entra al secador rotatorio	54
Tabla A.21: Velocidad lineal del aire que entra al enfriador rotatorio	54
Tabla A.22: T_{bs} y T_{bh} en la entrada del aire a la enfriadora	55
Tabla A.23: Datos importantes del secado del azúcar refinado	56
Tabla C.1: Anova de dos factores	58
Tabla C.2: Fórmulas para el método anova de dos factores	58
Tabla E.1: Datos típicos para un secador/enfriador de lecho fluidizado	61
Tabla E.2: Resultados de operación de una unidad a escala industrial	61
Tabla F.1: Comparación de los parámetros esenciales de un secador/enfriador rotatorio vrs. lecho fluidizado	62
Tabla G.1: Datos del ANOVA de dos factores para T_1	64
Tabla G.2: Cuadrados medios para cada fuente de variación	64
Tabla G.3: Datos del ANOVA de dos factores para T_2	65
Tabla G.4: Cuadrados medios para cada fuente de variación	65
Tabla G.5: Predicción de la distribución del tamaño de partícula del azúcar refinado A	68
Tabla G.6: Construcción de gráficas	68

Índice de Figuras y Gráficas

		página
Figura 1:	Diagrama de flujo para la fabricación de azúcar refinado	3
Figura 2:	Secador rotatorio con aire caliente en contracorriente	14
Gráfica 1:	H _o de cada centrífuga	22
Gráfica 2:	H _o de cada masa cocida	23
Gráfica 3:	Humedad de cada mesh del azúcar refinado	24
Gráfica 4:	Distribución del tamaño de partícula	25
Gráfica 5:	Porcentaje másico acumulado	26
Gráfica 6:	Predicción vs. datos promedio, para el porcentaje másico acumulado del azúcar refinado A	27
Gráfica 7:	Coefficiente de variación	28
Gráfica 8:	Perfil de temperatura en la entrada de aire del secador rot.	29
Gráfica 9:	Velocidad lineal del aire que entra al secador rotatorio	30

I. INTRODUCCION

En el presente trabajo de investigación, se determinaron las condiciones de secado y los principales problemas de esta etapa, en el proceso de fabricación del azúcar refino en el Ingenio Concepción S. A. Actualmente se utiliza un secador rotatorio que opera a contracorriente con aire caliente, donde el azúcar se introduce dentro del mismo por cinco centrifugas que operan en secuencia. El aire es calentado en un intercambiador de calor con vapor de agua. La etapa de secado opera en forma continua durante todo el día.

El estudio del secado del azúcar refino se dividió en dos partes: el análisis del azúcar refino, y el análisis del aire durante el secado. Este trabajo de investigación se utilizó para determinar las condiciones de secado promedio, para la implementación de la etapa de acondicionamiento. Esta etapa permitirá obtener un producto de mayor calidad, evitando la formación de grumos de azúcar durante su almacenamiento, por medio de la eliminación de la humedad ligada que es la causante principal de este problema.

Esta etapa tiene como objetivo alcanzar un secado homogéneo y más efectivo que el logrado en el secador rotatorio. Pero requiere de flux máxicos estables y controlados, de aire limpio y de otras condiciones de proceso específicas. Así, el buen funcionamiento de esta etapa, depende de la estabilidad del proceso de refinamiento del azúcar.

Por consiguiente, es necesario determinar las condiciones de secado del azúcar refino, ya que es la etapa que precede al acondicionamiento del mismo. Este análisis determinará la magnitud del problema que tendrá que resolver la etapa de acondicionamiento (o etapa de maduración) del azúcar refino, basándose en las condiciones de secado y a los problemas típicos que podrían afectar el buen desempeño de la misma.

II. ANTECEDENTES

A. Proceso de refinamiento del azúcar en un ingenio

El proceso de refinamiento del azúcar en un ingenio azucarero, incluye los siguientes pasos: afinación, clarificación, decoloración, evaporación, cristalización, centrifugación, secado, acondicionamiento, almacenaje y empaque¹. La figura No. 1 (pag. 3) muestra un diagrama de flujo típico para la fabricación de azúcar refino (1). A pesar de las diferencias existentes entre las refinerías, a continuación se describen brevemente las operaciones unitarias comunes del proceso de refinación del azúcar.

1. Afinación:

El primer paso en el proceso de refinación del azúcar, es llamado afinación o lavado, y consiste en la remoción de la película de melaza que se encuentra en la superficie de los cristales. La película de melaza tiene una pureza máxima del 65% (9).

Este es un proceso mecánico, donde los cristales se mezclan con un licor de sacarosa concentrado y las melazas son removidas por la acción abrasiva de unos cristales contra otros. El jarabe resultante se separa con una centrífuga y el sedimento de azúcar se rocía con agua. Los cristales se conducen al equipo fundidor, donde se disuelven con la mitad de su peso de agua caliente, parte de la cual es agua dulce que sale de los filtros prensa. El jarabe que sale de la centrífuga se divide y una de las porciones se diluye y se vuelve a utilizar como jarabe de mezclado. El resto se diluye hasta lograr 54°Brix² y se conduce a clarificación y

¹ Las etapas de acondicionamiento, almacenaje y empaque, usualmente se conocen como terminado del producto.

²°Brix = porcentaje peso/volumen de sacarosa en una solución acuosa a 20°C.

refiltración con las bandejas para que se hierva y se funda nuevamente (1).

Todas las centrífugas modernas para afinación, son completamente automáticas, de alta velocidad variable, y operan entre 1100-1200 r.p.m.³ Debido a su automatización, las centrífugas proveen de un producto de alta pureza con un mínimo de agua de lavado (9).

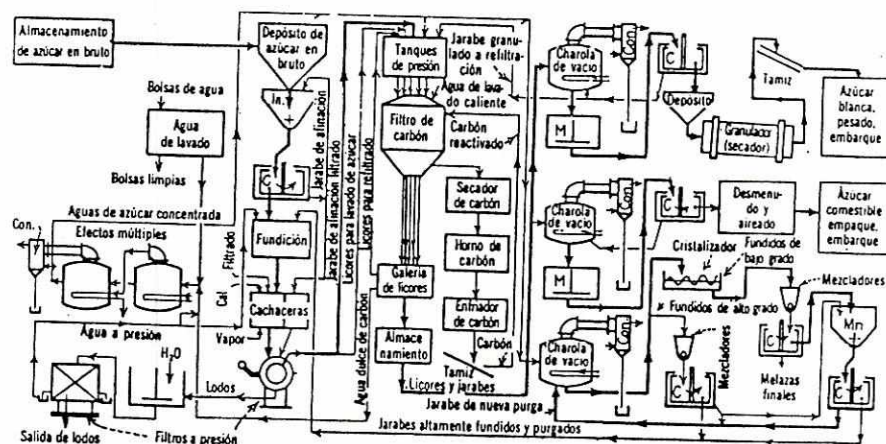


Figura 1: Diagrama de flujo para la fabricación de azúcar refinado

2. Clarificación:

El licor del azúcar (solución de azúcar) lavado, contiene algunas impurezas insolubles como arena, y una apreciable cantidad de partículas finas en suspensión, como gomas, pectinas, y otros coloides. Este licor es ácido. La clarificación puede ser definida como el tratamiento del licor de azúcar con ciertos compuestos químicos y calor, para producir la precipitación de las impurezas solubles y coloides (9).

³ r.p.m. = revoluciones por minuto

Existen dos tipos de clarificación. El primero, que podría ser llamado tratamiento químico, emplea materiales que forman precipitados en el licor. El segundo utiliza filtros inertes que permiten una filtración bajo presión. Los compuestos químicos más comunes para la clarificación, son el ácido fosfórico, la cal, y el dióxido de carbono. Los filtros utilizan un poco de cal para neutralizar los ácidos orgánicos presentes (9).

Para ayudar a la floculación de las impurezas, es necesaria la utilización de algunos compuestos químicos. Existen dos procesos principales para lograr este propósito. El primero de ellos consiste en agregar anhídrido fosfórico e hidróxido de calcio, agitando e introduciendo una corriente de aire que hace subir la espuma para ser separada por medio de agitadores de paletas de velocidad lenta. La espuma removida contiene gran parte de las impurezas, así como cierta cantidad de sacarosa que todavía puede recuperarse por disolución (7).

El otro proceso, consiste en agregar hidróxido de calcio y crear burbujas de dióxido de carbono a través del licor, para obtener un precipitado de carbonato de calcio, que adsorbe la mayoría de las partículas suspendidas, así como sales inorgánicas. El siguiente paso es una filtración (9).

La sulfitación del azúcar o proceso de blanqueado, es también otro proceso de floculación-remoción del color, pero a diferencia de los floculantes comerciales, no siempre retira los colorantes, sino que los reduce sin eliminarlos. Este proceso es similar a la carbonatación o fosfatación antes mencionados, con la sustitución del dióxido de carbono (CO_2) o el anhídrido fosfórico (P_2O_5) por parte del anhídrido sulfuroso (9).

3. Decoloración:

La decoloración es la clave en el proceso de refinación del azúcar. El color es la diferencia más grande entre el azúcar común y el azúcar refinada. Los colorantes son de tres tipos: a) sustancias melanoides producidas por reacción de los aminoácidos del azúcar con los ácidos reductores, b) sustancias tipo caramelo producidas por la degradación térmica de la sacarosa, y 3) pigmentos vegetales de la caña. Para su eliminación, se utilizan tres métodos principales: 1) carbón activado, 2) adsorbentes de huesos calcinados y 3) resinas de intercambio iónico (9).

El carbón activado, remueve el color por adsorción en la superficie. Se agrega carbón activado entre 0.1 y 0.5% en peso de la cantidad de sólidos del licor (a 65°Brix aproximadamente) y luego de agitación continua durante 15 a 20 minutos, se filtra la mezcla. El carbón activado a utilizar, puede ser tanto granular como en polvo. El polvo se descarta luego de usarlo una vez. El carbón granular se puede regenerar por medio de vapor de agua (9).

Los adsorbentes de hueso calcinado, contienen también un 10% de carbón, que ayuda en la adsorción de los colorantes. El resto es fosfato de calcio (hidroxiapatita). Debido a su naturaleza iónica, muchas de las sustancias contenidas en el licor, son precipitadas químicamente (7).

Las resinas de intercambio iónico (basadas en el estireno o acrílicas) tienen la ventaja de reducir también parte del contenido de cenizas (sales inorgánicas). El intercambio iónico, se ha probado ampliamente como una alternativa para el tratamiento de carbón activado pero tiene un costo demasiado alto. Los principales problemas, son la forma en que se ensucian las resinas y el manejo de las aguas de lavado que se desechan durante la regeneración. Dependiendo del tamaño del

ingenio, las resinas podrían reemplazar completamente los demás métodos decolorantes, o solamente suplementarlos. Independientemente del método utilizado para remover el color, es necesaria una nueva filtración para remover residuos sólidos o turbidez (1).

4. Evaporación:

La evaporación y la cristalización, son los únicos pasos de todo el proceso que no son esencialmente continuos. El jarabe obtenido del paso de remoción de colorantes, posee un contenido de sacarosa entre 58 y 65 ° Brix. Es recomendable preevaporar el jarabe para concentrarlo y llevarlo a 72-78° Brix en equipos de múltiple efecto. El objetivo primordial de esta etapa, es reducir el contenido de agua del azúcar hasta el punto necesario para la cristalización. Se debe realizar en el menor tiempo posible y a la menor temperatura para reducir la caramelización y la inversión del azúcar. La tendencia general, es utilizar evaporadores del tipo calandria, los cuales son evaporadores verticales en donde el licor está dentro de los tubos que se calientan con vapor en el exterior de los mismos (14).

5. Cristalización:

La etapa de cristalización, se inicia con la concentración del licor evaporado (primer licor) del cual se obtiene el primer azúcar y jarabe (98.5% de pureza). A partir del primer jarabe, se obtiene un segundo azúcar y un jarabe de segunda (97.5% de pureza). El jarabe de segunda da origen a una tercera azúcar y a un jarabe de tercera (94.5% de pureza). En algunas refinerías se continua con esta secuencia hasta obtener un quinto jarabe (90% de pureza). Este último jarabe, puede ser utilizado como meladura en el proceso de fabricación de azúcar sin refinar. Es muy importante controlar el tamaño de los cristales para que no

retengan impurezas o residuos de melazas (estos cristales ya no serán procesados). El calentamiento se realiza bajo vacío. El azúcar y el licor, son separados en las centrífugas (14).

6. Centrifugación:

Como en la producción de azúcar corriente, los cristales se separan del jarabe por centrifugación. Es necesario utilizar agua caliente o vapor, para lavar el azúcar refinada. Las centrífugas son de alta velocidad de rotación, y se controlan en forma automática. La cantidad de agua usada debe ser medida con exactitud en cada batch. Es común el uso de cuatro centrífugas o más, que operan en secuencia para alimentar al secador en forma continua y constante. Para cada tipo de masa cocida que entra a las centrífugas (contiene el licor y el azúcar antes de ser separados), se tienen tiempos de lavado y secado característicos, que satisfacen requerimientos de flujo de fluidos y control de calidad del proceso de refinación (14).

7. Secado:

El azúcar que sale de las centrífugas contiene 1% de agua, y es transportado por medio de un tornillo sin fin, o de elevadores, u otro transportador de sólidos, hacia los secadores o granuladores. De acuerdo a estudios de Farag (9), se debe tener una temperatura de secado alrededor de 145°C (293°F) para obtener una granulometría y secado adecuado (9).

Los azúcares requieren de un tratamiento térmico suave, debido a que tienden a caramelizarse o a carbonizarse si es sobrecalentado (4).

El secador usado es del tipo rotatorio. El aire es calentado por un intercambiador de calor de tubos, por los que pasa vapor de agua. Las refineras modernas filtran y lavan el aire que entra al secador, para evitar la entrada de polvo y microorganismos dentro del azúcar (9).

Los secadores rotatorios son los más usados debido a las siguientes razones:

- Tiempos de retención largos son posibles a bajas diferencias de temperaturas.
- El calentamiento es uniforme a través del cilindro del secador.
- El desgaste de la estructura cristalina del azúcar es mínimo, debido a la acción mecánica suave.
- La mayoría de los otros secadores no pueden manejar azúcares por su naturaleza resbaladiza (4).

Los secadores para azúcares, son diseñados para flujo en contracorriente de aire y producto, para que la velocidad de transferencia de calor sea máxima sin daño para el producto (4).

Los cristales secos pasan luego a la sección de empaque, donde se determina su granulometría. Como parte del control de calidad, se debe determinar la humedad en el azúcar y de pol o contenido de sacarosa (6). Para cada caso, se deben seguir las regulaciones establecidas por la International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis, ICUMSA (12).

8. Acondicionamiento:

El principal problema que presenta el azúcar luego de pasar por la etapa de secado, es el aterronamiento de sus cristales. El problema del aterronamiento en los azúcares refinados empacados, puede corregirse

fácilmente manteniendo el azúcar en un almacén con aire acondicionado o calefacción. Las siguientes precauciones evitan la conglutinación del azúcar refinado:

1. Secado y enfriamiento primario en granuladores convencionales.
2. Adición de aire químicamente seco, usando el sistema Kathabar, al sistema granulador-enfriador.
3. Enfriamiento adicional en el transportador enfriador helicoidal Holo-flite (enfriado con agua) para dar azúcar de 90 a 110°F (32-43°C).
4. Almacenamiento en tolvas o silos con aislamiento adecuado: masonite, fibra de vidrio, capa de aire, etc.
5. Un movimiento lento del aire seco a través del azúcar almacenado.
6. "Madurar" o secar al aire el azúcar, dejándolo permanecer en almacenamiento durante varios días.
7. Mover el azúcar de una tolva a otra, para eliminar el ligero endurecimiento que puede haber ocurrido durante el período de aireamiento.
8. Eliminar el aire contenido en los carros tolva (también de tolvas y silos) con aire presecado antes de cargar (9).

No todas estas precauciones se practican en las refinerías que proporcionaron los datos, ni el orden de procedimiento es el mismo en todas ellas. El énfasis se ha puesto en un azúcar bien cristalizado y de grano regular. El azúcar, antes de ser acondicionado, debe tener una humedad de 0.04 a 0.06% y después del acondicionamiento ésta debe estar por debajo de 0.02 (9).

El azúcar refino que se almacena, debe ser acondicionado apropiadamente. Existen tres categorías de humedad en los cristales del azúcar refino: (1) Humedad libre. Esta es relativamente fácil de remover con los secadores convencionales. (2) Humedad ligada. Esta es la mayor enemiga del manejo del producto, y es comparativamente difícil de

remover. (3) Humedad inherente. Esta es la humedad incluida dentro de los cristales, y no hay evidencia directa de su migración o difusión. Así, el propósito del acondicionamiento es remover la humedad ligada, y esto toma tiempo (9).

Investigaciones realizadas en Surafrica, indican que a pesar de la formación de conglomerados de azúcar y de una granulometría gruesa, el azúcar refino puede ser adecuadamente acondicionado en 72 horas. Ellas determinaron la humedad del azúcar por el análisis de Karl Fischer usando formamida para disolver el azúcar, y encontraron que el azúcar acondicionado tiene 0.04-0.05% de humedad, que es equivalente a 0.01-0.02% cuando es determinada en un horno a 105°C por 3 horas (método ICUMSA). Basados en su registro de datos, ellos diseñaron y construyeron un silo de 8 m de diámetro y 30 m de altura, con una capacidad nominal de 750 ton. El aire de acondicionamiento, (35 m³/min) tiene una temperatura de 42°C y 20 % de humedad relativa. Usando un secador de lecho fluidizado, el tiempo de acondicionamiento fue reducido de 10 días (con un secador rotatorio) a 4 días. Es evidente que las condiciones climáticas y el control de los factores principales, son diferentes de una refinería a otra (9).

9. Almacenamiento del azúcar refino:

El azúcar refino es almacenado en silos o en grandes compartimientos. Es aconsejable hacer circular aire seco para mantener la calidad del azúcar. La densidad a granel del azúcar refino después del acondicionamiento es 49-52 lb/pie³ (0.87-0.92 t/m³). Para mantener el producto en condiciones óptimas, se deben observar los siguientes factores: (1) lavado apropiado en las centrifugas, seguido de un secado constante y uniforme; (2) tamizar el azúcar para eliminar las partículas finas; (3) el azúcar debe estar el tiempo suficiente en acondicionamiento

para eliminar la humedad ligada de los cristales. El azúcar debe ser almacenado y resguardado contra la introducción de humedad y cambios bruscos de temperatura (9).

10. Empaque:

El azúcar es empacado directamente de los silos hacia bolsas de material sintético o de cartón, de 100, 50 y 25 lb. El empaque está automatizado en la mayoría de las refinerías, en cuartos con aire acondicionado. Luego, el azúcar refinado empacado, es transportado por medio de bandas hacia cuartos secos donde es almacenado para su posterior entrega al cliente (9). Se realizan pruebas de control de calidad del azúcar a empacar, de acuerdo con las normas recomendadas por la International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis, ICUMSA (12).

B. Secado de sólidos

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido, con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. El secado es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones y con frecuencia, el producto que se extrae de un secador pasa al área de empaque. Se efectúa en la mayoría de los procesos químicos de fabricación, como por ejemplo, en la fabricación del rayón, del celofán, de pigmentos, colorantes, insecticidas, productos químicos finos, textiles, cuero, productos de madera y de cerámica, artículos comestibles secos, jabón y papel. El costo del secado es a menudo una fracción considerable de la inversión pecuniaria total y de los costos de operación (8).

El secado es una operación múltiple que incluye la transferencia de calor y de masa, flujo de fluidos, transporte y manipulación de materiales y recolección de polvo. Entre las razones que existen para efectuar el secado se tienen las siguientes: extraer un líquido de un sólido, ya para facilitar el manejo de éste en otra operación, ya por ser inconveniente el agua en alguna operación subsecuente de elaboración. El producto final debe estar totalmente seco para que pueda ser utilizado, como sucede con los pigmentos, el rayón, el azúcar, etc. Para eliminar costos excesivos de transporte, aunque un producto a la postre sea usado en estado húmedo, por lo común es más barato extraerle el agua por medio de calor, que transportarlo en estado de hidratación. En tiempo de guerra, se secan los comestibles para reducir peso en el transporte y disminuir el espacio que ocupen. Ello para asegurarse de la conservación de un producto en el almacenamiento o el transporte, aumentar la capacidad de otros equipos en el proceso de fabricación y acrecentar el valor y la utilidad de desechos o subproductos (8).

En cualquier problema de secado, por regla general es el estado físico del sólido lo que determina la clase de secador más apropiado. Sucede a menudo que por la naturaleza física del material que ha de ser secado, es necesario el diseño de un tipo enteramente nuevo de secador que se ajuste a las particulares circunstancias. Por tal razón, se hallan muchos diseños en plantas industriales. Los materiales que serán secados, pueden variar en forma física dentro de los límites de un sólido rígido y un líquido fluido. Muchas veces el líquido que se eliminará, es un disolvente no acuoso, lo que implica el diseño de unidades para la recuperación de disolvente y la consideración de medidas de seguridad para prevenir los riesgos que acarrearán los vapores tóxicos o inflamables (15).

Para seleccionar el secador adecuado para cierta aplicación, deben analizarse las propiedades del producto. Existen diagramas de flujo para simplificar esta elección (13).

Los secadores rotatorios directos, son los más usados para el secado del azúcar refinado en los ingenios (9). Además, se usan mucho en la industria química, y constan de un cilindro ligeramente inclinado que gira sobre cojinetes y conduce el material húmedo de un extremo a otro, poniéndolo en contacto con gases calientes. Se mejora el contacto de los sólidos y gases por medio de paletas fijas en el casco, que sirven para rociar el material sobre la corriente de gas caliente. Cuando el secador no tiene estas paletas, se suele llamar horno rotatorio (7).

En la figura 2 (pag. 14) se presenta un típico secador rotatorio adiabático que opera con aire caliente en contracorriente. Una carcasa giratoria A, construida con chapa de acero, está soportada sobre dos conjuntos de rodillos B y accionada por medio de un engranaje y un piñón C. En el extremo superior hay una campana D, que a través del ventilador E conecta con una chimenea, y una conducción F que introduce el material húmedo desde la

tolva de alimentación. Las pestañas G, que elevan el material que se seca y lo dejan caer después a través de la corriente de aire caliente, están soldadas sobre la superficie interior de la carcasa. Por el extremo inferior del secador, descarga el producto en un transportador de tornillo H. Justamente detrás del transportador de tornillo hay un conjunto de tubos con aletas calentados con vapor para precalentar el aire. El aire circula a través del secador, mediante un ventilador que, si se desea, descarga en el calentador de aire, de forma que todo el sistema se encuentra a sobrepresión. Opcionalmente, el ventilador puede estar situado en la descarga, con lo cual aspira el aire a través del secadero y mantiene el sistema con un ligero vacío. Esto resulta útil cuando el material tiende a formar polvos. Los secadores rotatorios de este tipo, se utilizan con frecuencia para sal, azúcar y todo tipo de materiales granulares y cristalinos que han de mantenerse limpios y que no se pueden exponer directamente a gases de combustión muy calientes (8).

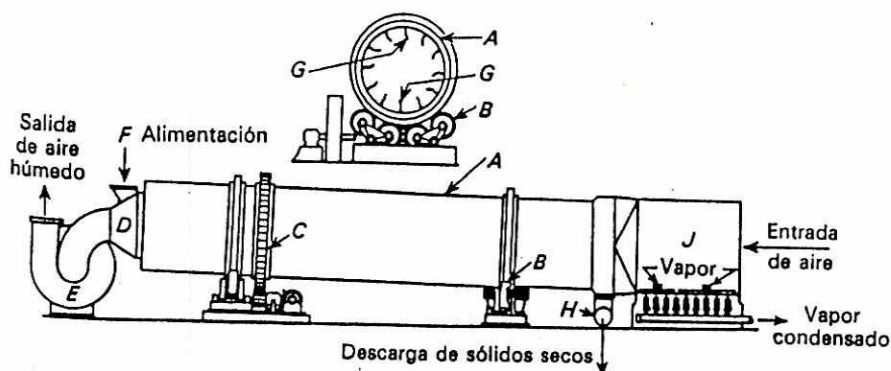


Figura 2. Secador rotatorio con aire caliente en contracorriente: A, carcasa del secadero; B, rodillos para el soporte de la carcasa; C, engranaje; D, campana de descarga de aire; F, conducto de alimentación; G, pestañas elevadoras; H, descarga de producto; J, calentador de aire.

Dependiendo del material a secar, el secador puede alimentarse con gas de combustible caliente y no con aire. Además, si el gas sale del secador a una temperatura lo suficientemente alta, al ser descargado a través de una gran cantidad de aire, puede proporcionar una corriente de aire natural adecuada que proporcione el gas suficiente para el secado. Sin embargo, de ordinario, se utiliza un ventilador de extracción para extraer el gas a través del secador, porque así se obtiene un control más completo del flujo de gas. Se puede interponer un recolector de polvo, del tipo de ciclón, filtro o de lavado entre el ventilador y el gas caliente. También puede ponerse un ventilador de empuje en la entrada del gas. De esta forma, se mantiene una presión cercana a la atmosférica en el secador. Esto previene la fuga de aire frío en los extremos de almacenamiento del secador. Si la presión está bien balanceada, la fuga hacia el exterior también puede reducirse al mínimo (15).

El flujo de masa (i.e. densidad de flujo de masa) permitida para el gas en un secador rotatorio de contacto directo, depende de las características de formación de polvos del material que se seca. La temperatura más conveniente del gas a la salida, es una cuestión económica (8).

Las velocidades típicas de rotación, se encuentran en un rango de 1 a 10 revoluciones/minuto, pero pueden ser tan rápidas como 30 revoluciones/minuto. El porcentaje de carga en la carcasa, se encuentra en un rango de 9-15%, aunque ocasionalmente puede ser mayor. El tiempo de exposición varía por minutos y hasta por horas (4).

El funcionamiento de los secadores rotatorios puede ser mejorado de la siguiente manera:

1. Aumentar la temperatura de entrada del aire.
2. Disminuir la temperatura de salida del aire.
3. Reducir la carga de evaporación.
4. Precalentar la alimentación de producto.

5. Reducir las pérdidas de aire en la entrada.
6. Utilizar un secado de dos etapas.
7. Aislar la zona de secado (5).

Además puede recircularse el aire de salida para calentar el aire de entrada al secador (3). Los ahorros potenciales de energía y mejoramiento de la productividad en secadores directos, se basan en la reducción de su demanda de flujo de aire. Es necesario, sin embargo, guardar un mínimo de flujo para fluidizar o transportar los sólidos. La tabla No. 1 muestra el efecto de cambios simples en secadores directos. Estos resultados son independientes entre sí (4).

Tabla II-1: Efecto de cambios simples en secadores directos

CONDICIÓN	CAMBIO	AHORROS DE COMBUSTIBLE, %	AHORROS EN ENERGÍA, %	INCREMENTO DE LA PRODUCCIÓN, %
Temp. aire de entrada	10°F	14	16	16
Temp. de salida del aire	-5°F	14	14	14
Temperatura de alimentación	+50°F	10	10	10
Humedad de alimentación	-1%	16	16	16
Pérdidas	-5%	4	10	9
Aislamiento	2 "	5	5	4

iii. JUSTIFICACION

El secado del azúcar es parte de la etapa terminal de la actividad desarrollada en los ingenios. El contenido de humedad del azúcar refinado que se empaca, afecta la pureza del mismo y por ende, su precio en el mercado internacional. En Guatemala, esta operación unitaria se lleva a cabo en secadores rotatorios a contracorriente. Así, resulta necesario evaluar las características principales del secado en este equipo, por medio de un análisis del mismo.

Para poder administrar correctamente esta etapa, se deben determinar las condiciones promedio de operación del azúcar refinado y del aire que se usa. Este análisis permitirá evaluar el secado de este producto. El proceso de secado involucra el uso de vapor de la caldera, y una optimización de las condiciones de esta etapa, implicaría un considerable ahorro económico.

Además, el análisis de las actuales condiciones de secado permitirá la implementación de la etapa de acondicionamiento del azúcar refinado desde el punto de vista del proceso. Esta etapa permitirá obtener un producto de mayor calidad, evitando la formación de grumos de azúcar durante su almacenamiento, por medio de la eliminación de la humedad ligada, que es la causante principal de este problema. La industria azucarera guatemalteca goza de prestigio en el ámbito internacional, lo cual debe mantenerse por medio de la actualización tecnológica constante.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Determinar las condiciones de secado del azúcar refino, para implementar la etapa de acondicionamiento en un ingenio.

B. Objetivos específicos

1. Determinar las condiciones promedio de entrada y de salida del aire en el secador rotatorio.
2. Determinar las condiciones promedio de entrada y de salida del azúcar en el secador rotatorio.
3. Analizar las condiciones de secado, para implementar la etapa de acondicionamiento del azúcar refino.
4. Dar un marco teórico-práctico del secado de la humedad ligada, por medio del uso de silos de acondicionamiento y maduración del azúcar refino.

V. PROBLEMA A RESOLVER

El secador rotatorio a contracorriente, se utiliza con dos objetivos principales:

1. El secado del azúcar refino.
2. La formación del grano del azúcar.

Sin embargo, el contacto aire-azúcar no siempre es homogéneo para todos los granos, ya que existen diferencias de tamaño y por consiguiente, diferencias en el área de contacto. Además, la humedad ligada no es removida en su totalidad en la etapa de secado. Así, se ha recomendado incluir una etapa intermedia entre el secado del azúcar y su empaque: la etapa de acondicionamiento del refino.

Esta etapa tiene como objetivo alcanzar un secado homogéneo y más efectivo que el logrado en el secador rotatorio. Pero requiere de flux másicos estables y controlados, de aire limpio y de otras condiciones de proceso específicas. Así, el buen funcionamiento de esta etapa, depende de la estabilidad del proceso de refinamiento del azúcar.

Por consiguiente, es necesario determinar las condiciones de secado del azúcar refino, ya que es la etapa que precede al acondicionamiento del mismo. Este análisis determinará la magnitud del problema, que tendrá que resolver la etapa de acondicionamiento (o etapa de maduración) del azúcar refino, basándose en las condiciones de secado y a los problemas típicos que podrían afectar el buen desempeño de la misma.

VI. METODOLOGIA

Para la realización del presente trabajo de investigación, se utilizó la siguiente metodología:

1. Estudio del proceso de secado del azúcar refinado en el Ingenio Concepción S.A.
2. Recolección de muestras de azúcar en el Ingenio Concepción S.A.
3. Análisis de las muestras de azúcar en el laboratorio de control de calidad del ingenio.
4. Determinación de las condiciones de secado del aire.
5. Análisis estadístico de los resultados obtenidos.
6. Evaluación de la implementación de la etapa de acondicionamiento del azúcar refinado, en base a información bibliográfica y a los resultados obtenidos.

VII. RESULTADOS

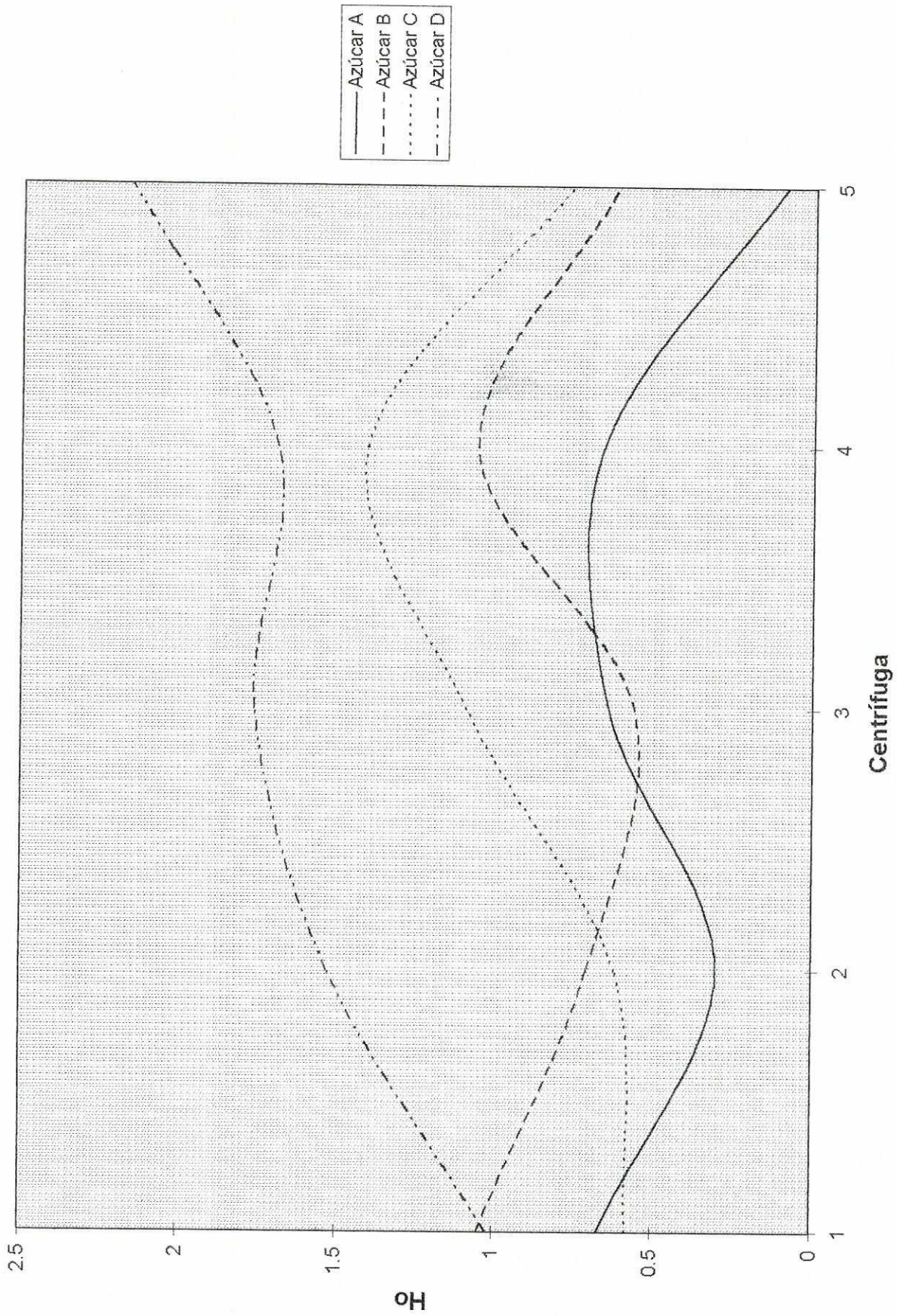
Tabla VII-1: Datos misceláneos del azúcar refino en el secador rotatorio

Datos misceláneos del secador rotatorio	
Carcasa	
Diámetro	1.98 m (6 pies 5 3/4 pulg.)
Longitud	10.98 m (36 pie)
Velocidad de rotación	7.67 rpm
Inclinación	7 cm/m
Alimentador	Transportador de tornillo, con motor de 10 HP
Calentador	Intercambiador de calor (de vapor de agua)
Motor	1 de 30 HP
Velocidad lineal del aire	Contracorriente, 719 m/h
Características del producto y de la alimentación	
Temperatura del producto (salida secador)	52.0°C
Temperatura del producto (salida enfriador)	49.1°C
Porcentaje de humedad en la alimentación	0.95% (p/p)
Porcentaje de humedad en el producto (azúcar refino A)	0.04% (p/p)
Flux máxicos, Kg/h	
Alimentación aire al secador rotatorio	1995.0
Alimentación aire al enfriador rotatorio	25036.5
Alimentación azúcar	16998.75
Producto	16837.3
Evaporación	154.75
Datos del Aire	
Entrada calentador	T _{bs} =40.4°C T _{bh} =29.0°C
Entrada secador	95.0°C
Salida secador	51.9°C
Entrada enfriador rotatorio	T _{bs} =33.8°C T _{bh} =24.9°C
Humedad relativa del aire que entra al secador rotatorio	43%
Humedad relativa del aire que entra al enfriador rotatorio	60%

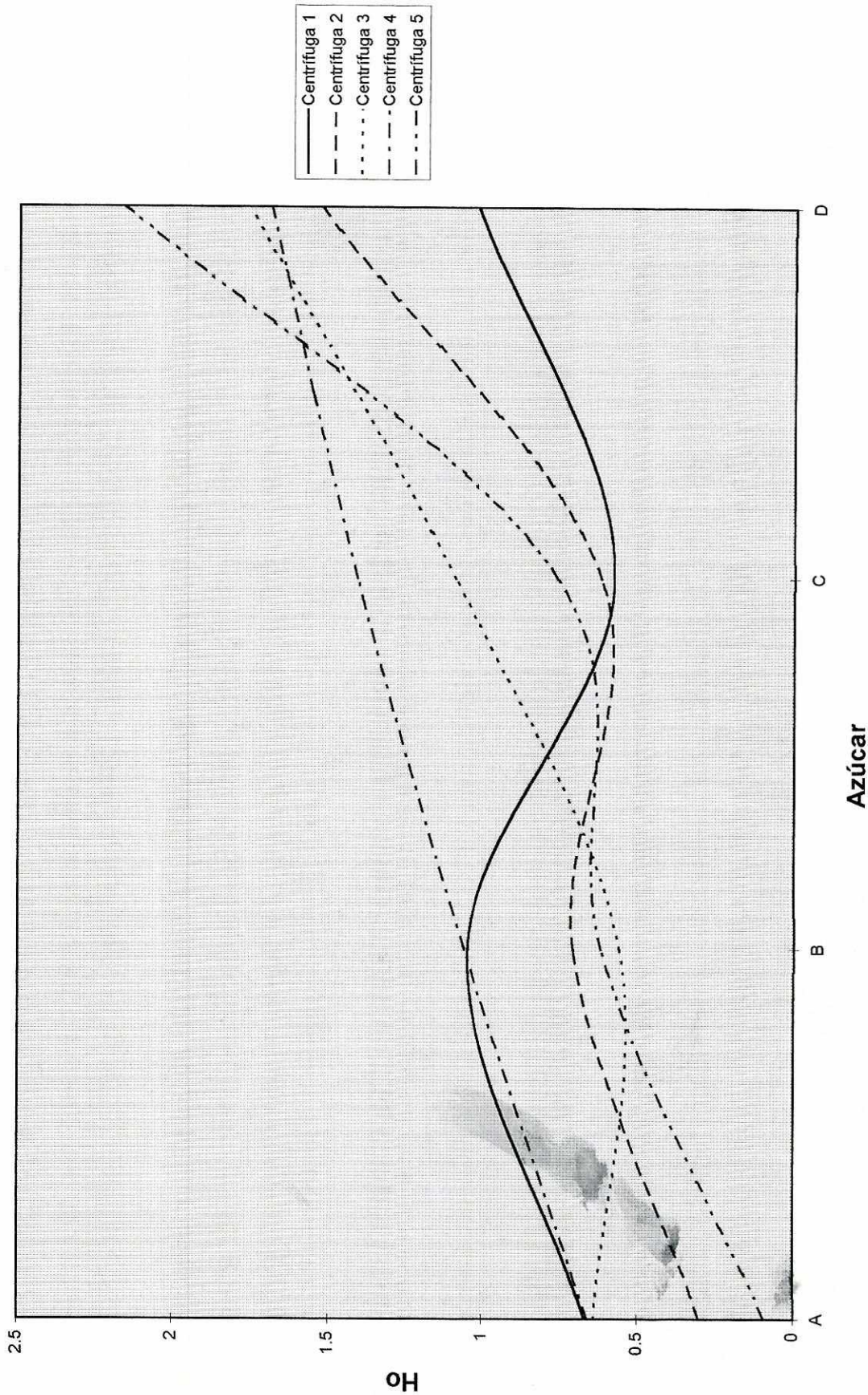
Tabla VII-2: Características de las cuatro diferentes masas que entran a las centrifugas

CARACTERÍSTICA	MASA COCIDA A	MASA COCIDA B	MASA COCIDA C	MASA COCIDA D
°Brix	88-89	88-89	88-89	88-90
Pol	88-89	88-89	88-89	88-89
Pureza	>99.80	99.70-99.80	99.60-99.65	99.50-99.55
PH	6.8-7.0	6.8-7.0	6.8-7.0	6.8-7.0
Color masa ICUMSA	200-400	400-600	700-1000	>1000
Color azúcar ICUMSA	10-20	30-50	60-90	150-250

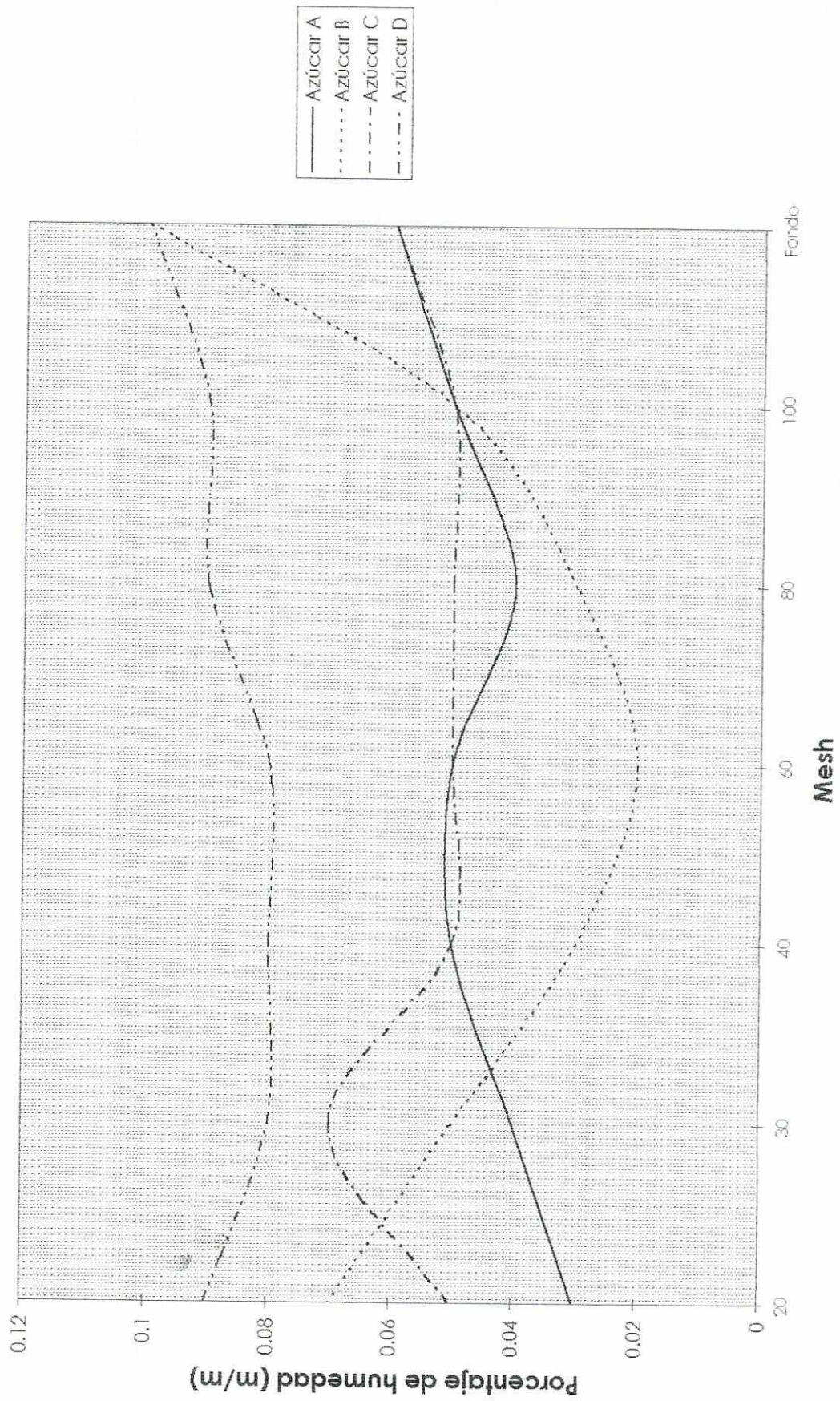
Gráfica 1: Ho de cada centrífuga (base húmeda)



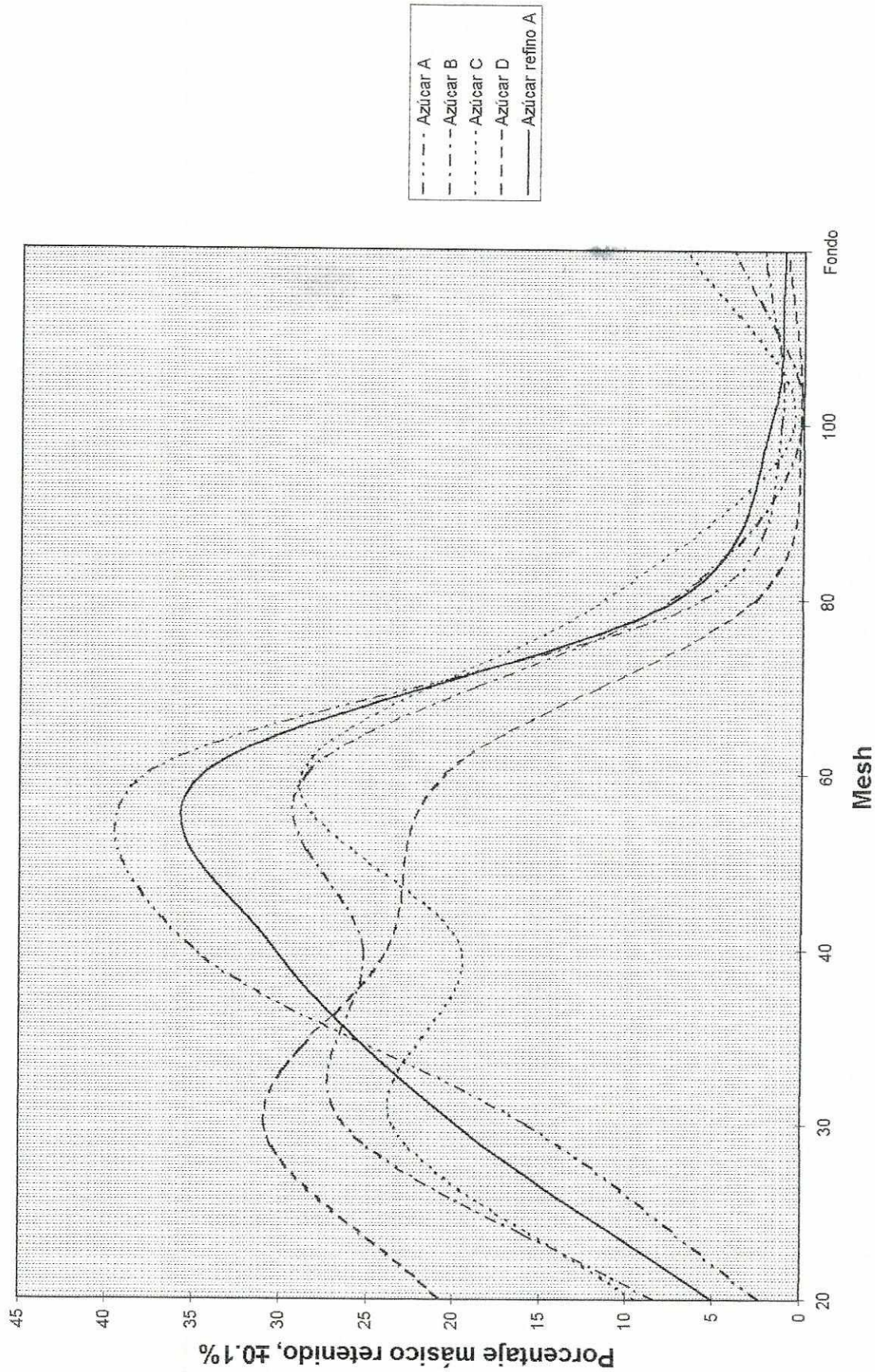
Gráfica 2: Ho de cada masa cocida (base húmeda)



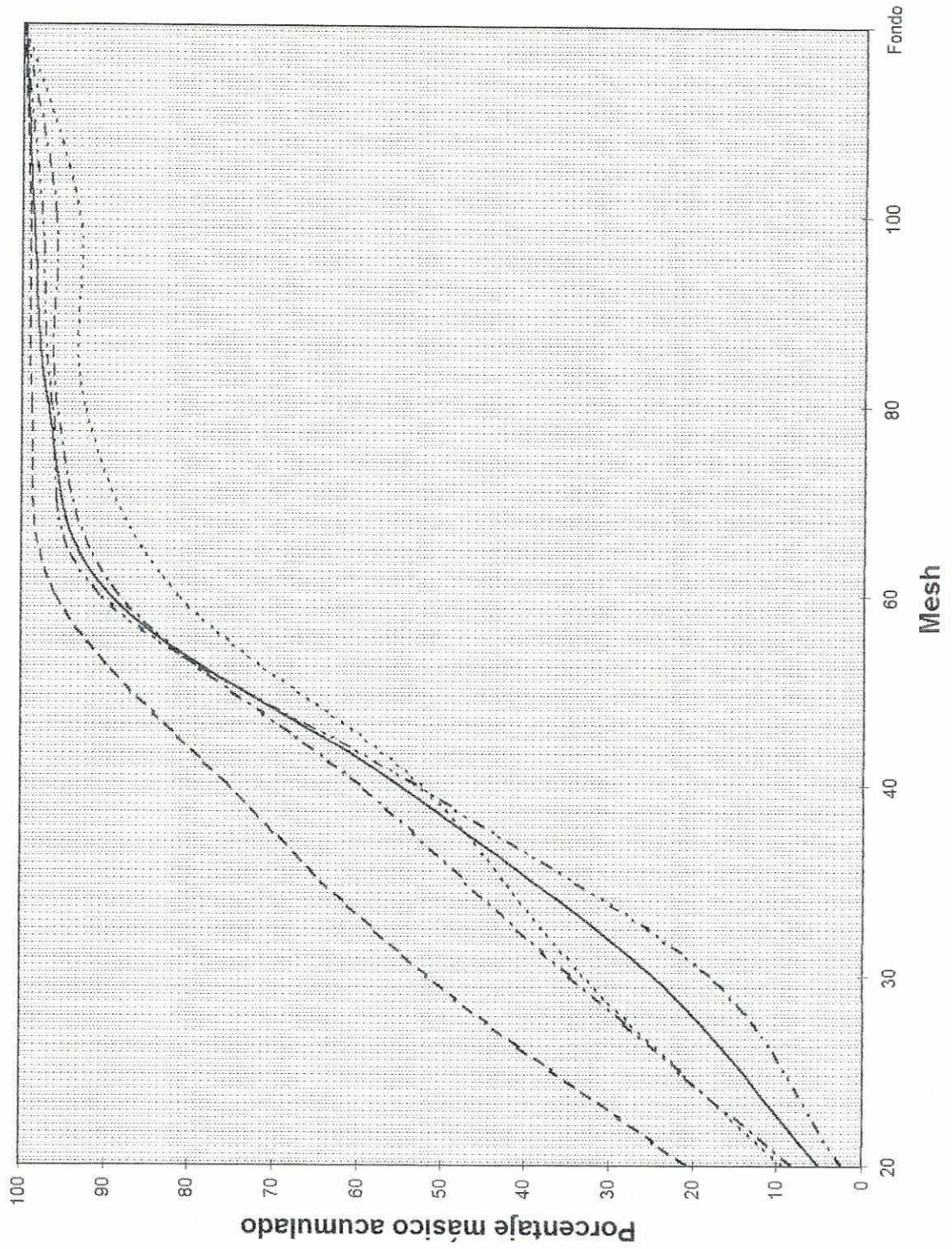
**Gráfica 3: Humedad de cada mesh del azúcar refinado
(base húmeda)**



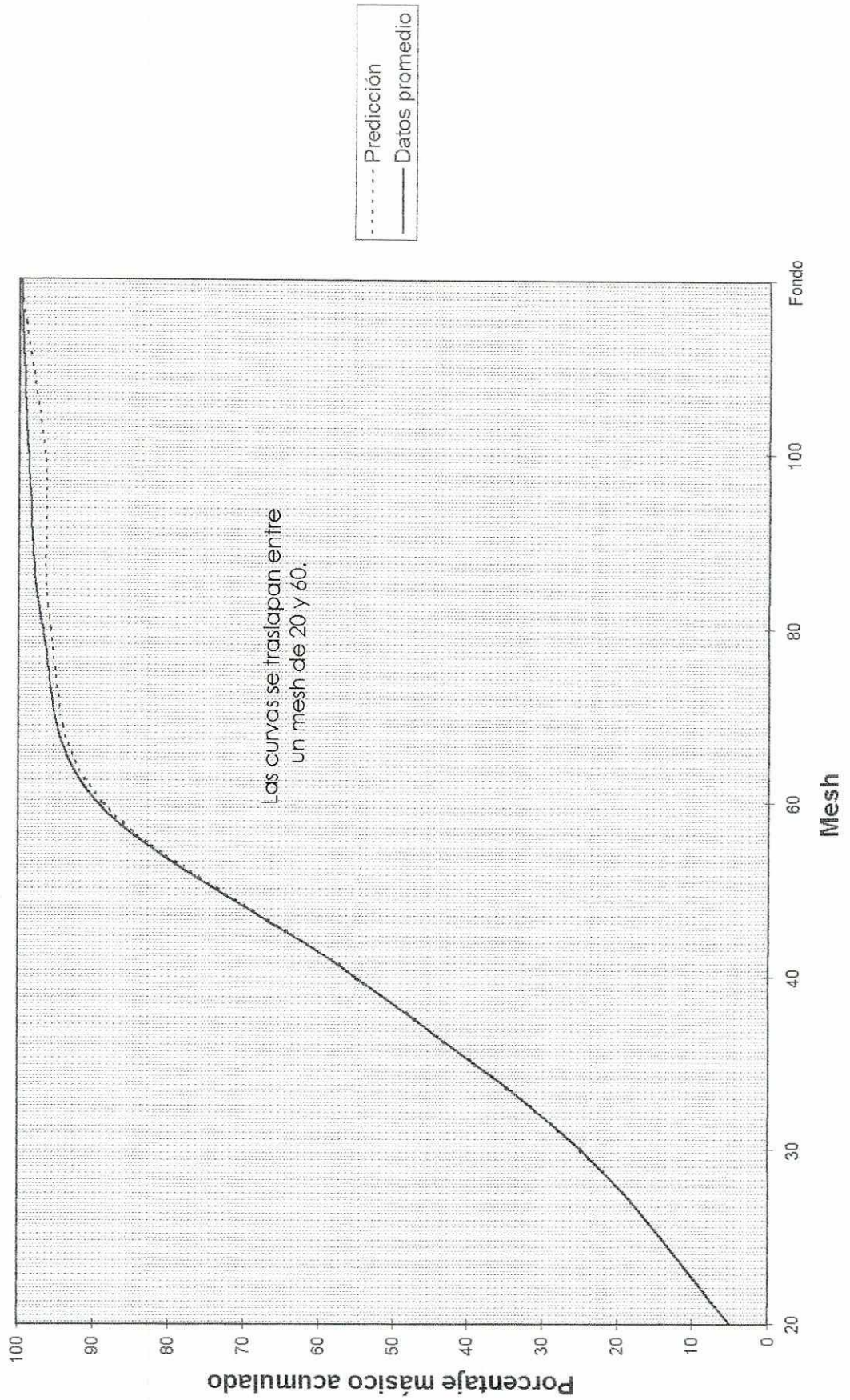
Gráfica 4: Distribución del tamaño de partícula



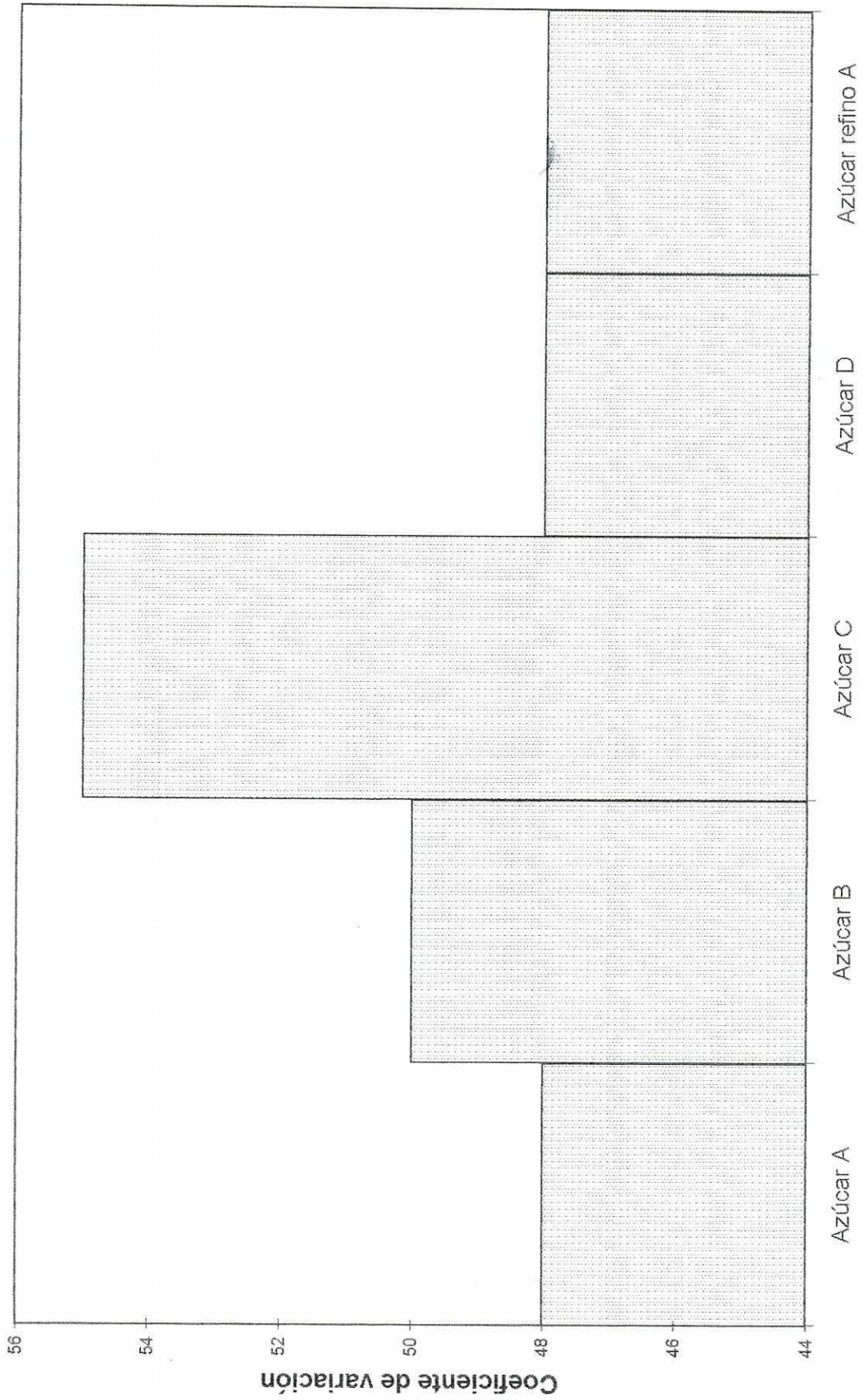
Gráfica 5: Porcentaje másico acumulado



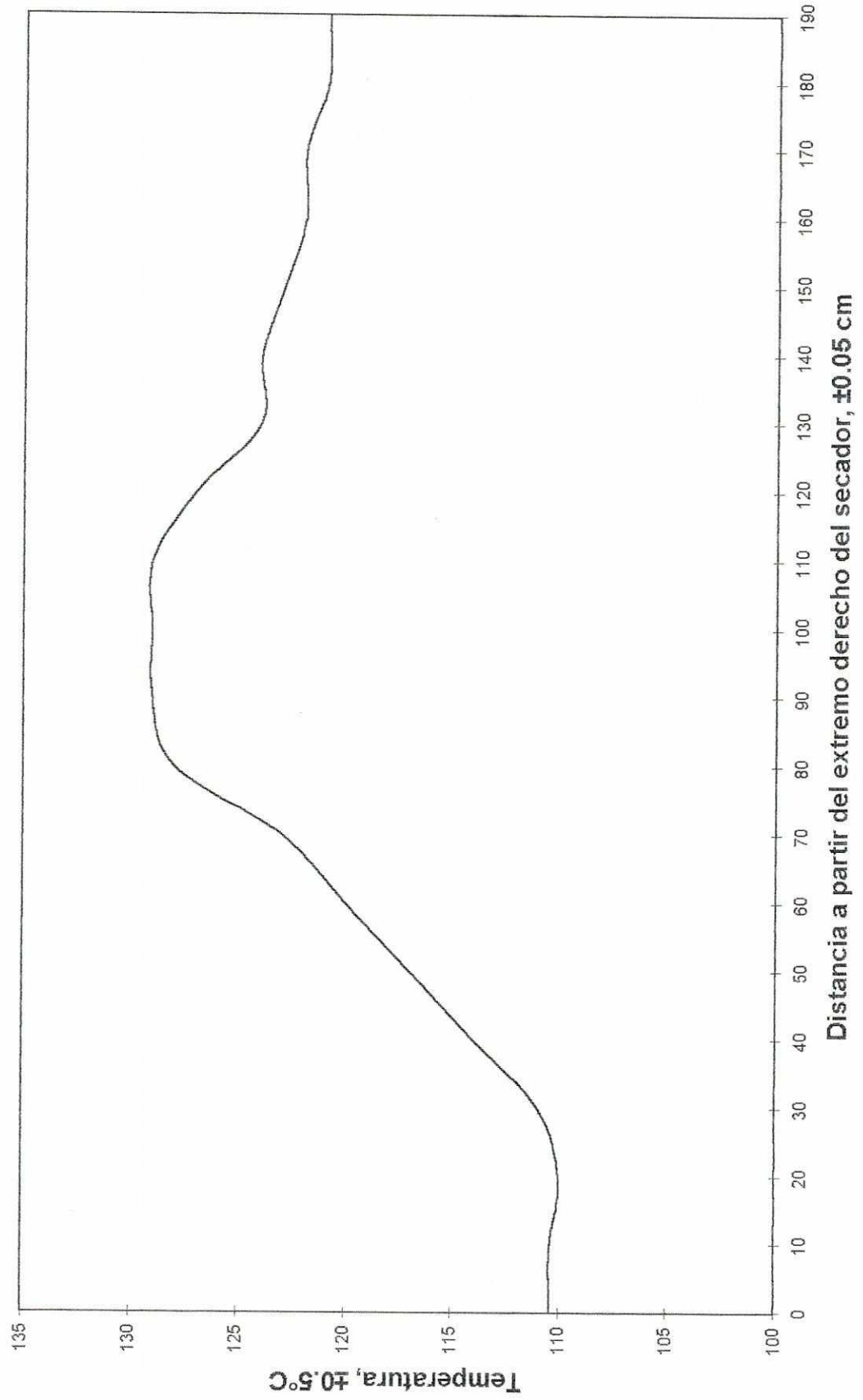
Gráfica 6: Predicción vrs. Datos promedio, para el porcentaje másico acumulado del azúcar refino A



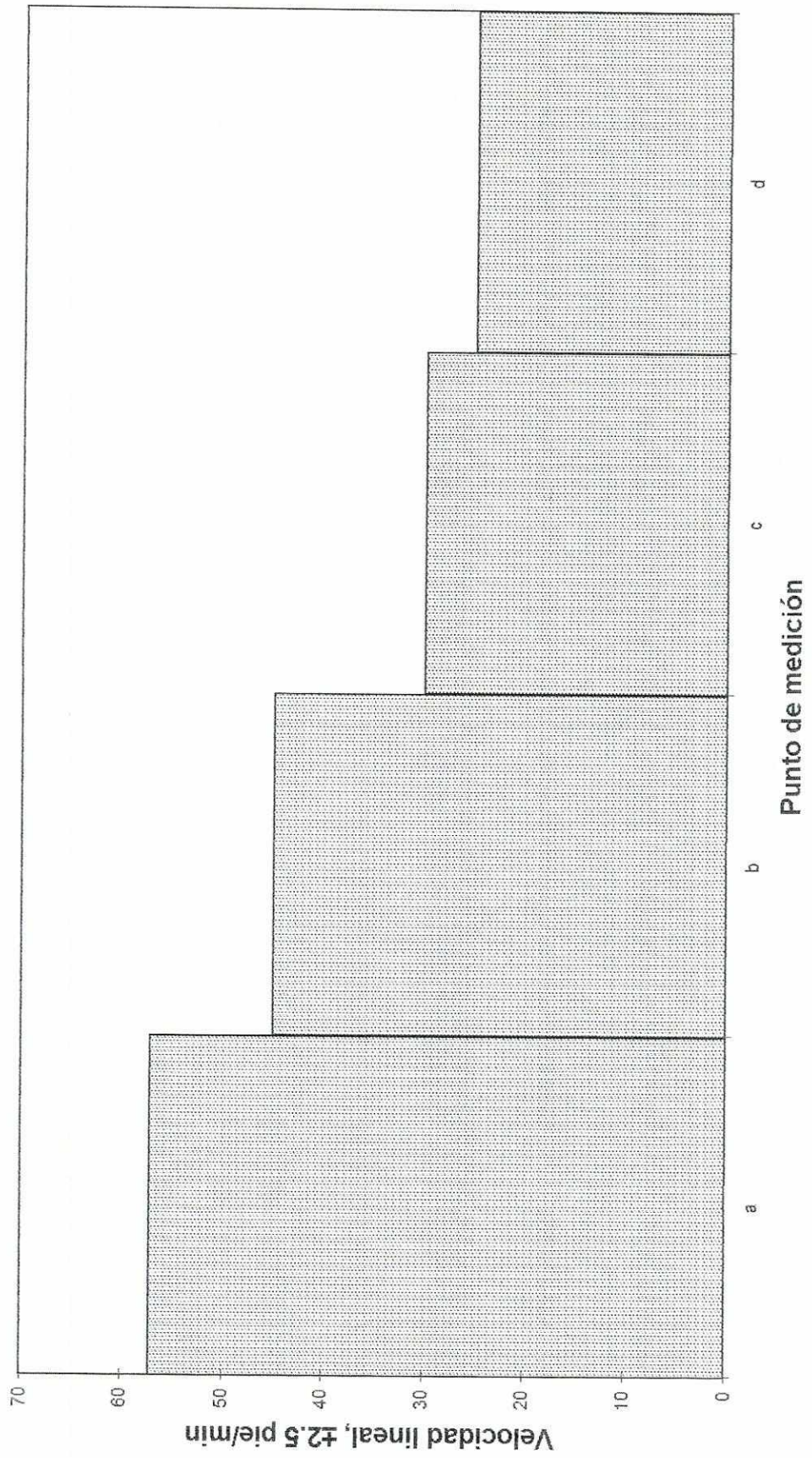
Gráfica 7: Coeficiente de variación



Gráfica 8: Perfil de temperatura en la entrada de aire del secador rotatorio



Gráfica 9: Velocidad lineal del aire que entra al secador rotatorio



VIII. DISCUSION DE RESULTADOS

La optimización de las actuales condiciones de secado debe anteceder al diseño de la etapa de acondicionamiento del azúcar refino, para el mejor aprovechamiento de los recursos del ingenio. Sin embargo, antes de optimizar una etapa, se debe estar familiarizado con las variables de proceso involucradas. Esto se logra mediante un estudio detallado. El estudio del secado del azúcar refino, se puede dividir en dos partes: el análisis del azúcar refino, y el análisis del aire durante el secado.

Antes de ingresar al secador rotatorio, el azúcar refino pasa por una etapa de centrifugación. Las centrífugas son alimentadas por cuatro diferentes masas cocidas, cuyas características se muestran en la tabla VII-2 (pag. 21). Es evidente que la pureza disminuye conforme aumenta el color de la masa y del azúcar. El pH, pol y °Brix son prácticamente los mismos para todas las masas. La masa cocida "A" proviene del licor filtrado. La masa cocida "B", del jarabe de primera (que se obtiene de la centrifugación de la masa cocida A). La masa cocida "C", del jarabe de segunda (que viene de la masa cocida B). El jarabe de la masa cocida "D" se recicla junto a la meladura. Son comunes las mezclas de azúcares provenientes de estas masas para formar el azúcar refino, teniendo presente los límites de color especificados por las normas de ICUMSA.

Los valores para el porcentaje de humedad del azúcar refino (base húmeda) que sale de las centrífugas, no son constantes según las tablas A.1-A.4 (pag. 41, 42). Sin embargo, estos valores pueden agruparse en un rango de 0.05 a 2.32 % (m/m). Se encontró que los cuatro azúcares que entran al secador tienen porcentajes de humedad (base húmeda) significativamente diferentes (pag. 64). Además, se probó que la variación de los porcentajes de humedad en cada centrífuga, no es significativamente más grande que la variación debida al error aleatorio de la medición (pag. 64).

La temperatura de salida de cada centrífuga, es prácticamente la misma para todos los azúcares (pag. 65). Así, todo el azúcar que entra al secador rotatorio, tiene la misma temperatura. Esto se debe a que el agua de lavado usado en las centrífugas, siempre se mantiene a una temperatura estable y controlada.

Los tiempos de lavado que se utilizan para cada masa, se especifican en las tablas A.1, A.2, A.3 y A.4 (pag. 41, 42). Este tiempo especifica la cantidad de flujo de jarabe que sale de las centrífugas y que se utiliza para formar la masa siguiente.

El azúcar que sale de las centrífugas, es transportado por un tornillo sin fin hacia un elevador, el cual descarga a otro tornillo que alimenta al secador rotatorio. La humedad del azúcar refino que entra al secador, es prácticamente la misma humedad lograda en la etapa de centrifugación.

En el apéndice G (pag. 64) se demostró estadísticamente que la humedad del azúcar refino que entra al secador (H_o) no varía significativamente entre las centrífugas usadas. Esto es evidente en la gráfica 1 (pag. 22). No existe un patrón común para H_o en los distintos azúcares, sin embargo es evidente que el azúcar "A" (i.e. el azúcar de la masa cocida A) presenta en general, el menor valor de H_o en cada centrífuga, y el azúcar "D", el mayor H_o . El azúcar B y C tiene valores limitados por el H_o de los azúcares A y D.

La gráfica 2 (pag. 23) muestra la variación de H_o de cada azúcar (para cada centrífuga). Se demostró en el apéndice G (pag. 64) que si existe una diferencia significativa entre los valores de H_o para cada azúcar. La gráfica 2 permite observar que el azúcar "A" presenta los valores más pequeños de H_o , y el azúcar "D", los más altos. Es evidente que los valores para los azúcares B y C son muy similares entre sí. El mayor contenido de humedad del azúcar "D" (base húmeda) está relacionado con el ciclo de producción que la origina.

La humedad por tamaño de mesh, se analizó para el azúcar de cada tipo de masa. Esta gráfica permite observar la homogeneidad del secado del azúcar en el secador rotatorio que se usa. Estos resultados se presentan en la gráfica 3 (pag. 24). Se encontró que las partículas más pequeñas, presentan el mayor porcentaje de humedad (base húmeda). Esto se debe a su mayor área superficial, la cual les permite tener un mayor contacto con el agua. Además es evidente que el secado no es homogéneo para todos los granos de azúcar. Esta es la razón principal para el aterronamiento posterior del azúcar empacada, ya que existe un gradiente de humedad que induce un desplazamiento o migración del agua hacia las partículas más secas. La homogeneidad en el secado puede mejorarse aumentando el tiempo de residencia dentro del secador, sin embargo esta variable está determinada por restricciones del flujo másico del azúcar a producir, la velocidad de rotación y el tamaño del secador rotatorio.

El porcentaje de humedad final del azúcar óptima para un secador/enfriador rotatorio (base húmeda), es de 0.03% (tabla F.1, pag. 62) para evitar el aterronamiento del azúcar refino. Solamente el azúcar proveniente de las masas A y C alcanzan este valor para un mesh 20 (azúcar A), 40 y 60 (azúcar B). Sin embargo, el mayor porcentaje másico retenido para el azúcar de todas las masas, se encuentra en un mesh de 40 y 60 (gráfica 4, pag. 25). Así, la mayor humedad expuesta por las partículas menores a un mesh de 60 no afecta significativamente la humedad promedio del azúcar refino "A": 0.04% (pag. 45). La gráfica 3, también muestra la mayor humedad del azúcar "D", lo cual se debe a que ésta ingresa con la mayor humedad al secador rotatorio.

El azúcar refino "A" se obtiene a partir del azúcar de la masa cocida A, B y C. Para poder obtener un batch de la masa cocida "D", se necesitan 8 masas cocidas "A", 4 de "B" y 2 de "C". Es evidente que las características del azúcar refino "A" tenderán hacia las del azúcar "A", por su mayor contribución másica. La gráfica 4 (pag. 25) muestra esta tendencia con respecto a la distribución del

tamaño de partícula. La granulometría del azúcar es importante, porque afecta su porcentaje de humedad (ver gráfica 3). Las partículas más pequeñas presentan una mayor humedad comparadas con los granos grandes. Así, se determinó la distribución del tamaño de partícula, para cuantificar el efecto ponderado de los resultados obtenidos en la gráfica 3. Las partículas más pequeñas (menores a un mesh de 80) no sobrepasan un 10% del total (ver gráfica 5), por lo que su alta humedad no afecta significativamente el valor promedio de humedad del azúcar refino tipo "A". Es evidente que el mayor porcentaje de partículas pertenece a un mesh de 40 y 60, lo cual implica que el porcentaje de humedad de éstas, es el que determina principalmente el porcentaje de humedad del azúcar refino "A" (ver gráfica 3). Las curvas del azúcar B y C son similares, mientras que la curva para el azúcar "D" presenta una granulometría totalmente diferente, ya que la mayoría del grano se encuentra entre un mesh de 20 y 40. Este tamaño de grano dificulta la difusión de las moléculas del agua, y no permite un secado menor a 0.08% de humedad (gráfica 4, pag. 25).

La gráfica 5 (pag. 26) presenta la misma información de la gráfica 4, pero muestra claramente la similitud entre las curvas de los azúcares A, B y C, y del azúcar refino "A". La representatividad y validez de estos resultados, se observan en la gráfica 6 (pag. 27). La curva de predicción, se construyó a partir de las curvas del azúcar A, B y C de la gráfica, y los flujos volumétricos de cada masa cocida. La curva de los datos promedio, se construyó a partir de la base de datos del ingenio. La desviación observada para un mesh de 80 y 100 es despreciable, ya que su contribución en la granulometría del azúcar refino es muy pequeña (gráfica 4).

El coeficiente de variación (CV) es una medida de la homogeneidad del tamaño de partícula, y la proporcionalidad entre estas dos variables es inversa. La gráfica 7 (pag. 28) presenta a CV en función de los diferentes tipos de azúcar analizados. La mayor homogeneidad la presenta el azúcar A, D y el azúcar refino "A". La similitud entre el azúcar "A" y del azúcar refino "A" ya ha sido explicada.

Las diferencias de CV mostradas por el azúcar B y C se deben a que son corrientes derivadas.

La temperatura del aire que sale del intercambiador de calor, varía entre 110°C y 130°C, y presenta su punto más caliente en el centro de la entrada del secador rotatorio (gráfica 8, pag. 29). La velocidad lineal del aire no es homogénea en las entradas al intercambiador de calor (gráfica 9, pag. 30), y tiene una gran variación entre las mediciones puntuales realizadas (tabla A.20, pag. 54). Esto se debe a la distorsión causada por el flujo a contracorriente del azúcar, que impide una succión homogénea del ventilador.

La humedad relativa del aire que entra al secador rotatorio es de 43 % e ingresa a 95°C. Existen pérdidas por radiación y conducción entre el intercambiador de calor y la entrada al secador, ya que el aire disminuye su temperatura entre 15°C y 35°C (tabla VII-1, pag. 21).

El azúcar disminuye dentro del secador rotatorio, de 0.95 % a 0.04 % de humedad, en base húmeda (tabla VII-1, pag. 21). La humedad de entrada, se encuentra dentro del rango común reportado. Sin embargo, el porcentaje de humedad final debería ser 0.03 % para evitar problemas de aterramiento en el azúcar. Además la diferencia de temperatura entre el aire que entra y el azúcar que sale del secador, es de 39°C (tabla VII-1, pag. 21), y el valor recomendado es de 15°C (tabla F.1, pag. 62). Así, es evidente que no se está aprovechando toda la capacidad de secado del aire. Esto puede deberse a una dosificación deficiente de la corriente de alimentación del secador, o bien a un tiempo de residencia inadecuado. Se observó durante la investigación, que el flujo másico de azúcar no era constante. Esto se debió a los siguientes factores:

1. Problemas mecánicos en el equipo.
2. Problemas con el suministro de vapor de caldera (para calentar el aire que se utiliza en el secador).

IX. CONCLUSIONES

1. El porcentaje de humedad del azúcar refinado (base húmeda) que entra al secador rotatorio, varía en un rango de 0.05 a 2.32 % (m/m).
2. Los azúcares A, B, C y D tienen porcentajes de humedad (base húmeda) significativamente diferentes.
3. El secado no es homogéneo para todos los granos de azúcar. Se encontró que las partículas más pequeñas presentan el mayor porcentaje de humedad (base húmeda).
4. El azúcar proveniente de la masa cocida "A" tiene el menor porcentaje de humedad (base húmeda), y el azúcar de la masa cocida "D", el mayor.
5. Las características del azúcar refinado "A" tenderán hacia las del azúcar de la masa cocida "A", por su mayor contribución másica.
6. El porcentaje de humedad (m/m) de las partículas de un mesh de 40 y 60, es el que determina principalmente el porcentaje de humedad del azúcar refinado tipo "A".
7. El porcentaje de humedad del azúcar (base húmeda) disminuye dentro del secador rotatorio de 0.95 % a 0.04 %.
8. La humedad relativa del aire que entra al secador rotatorio, es de 43 % e ingresa a 95 °C.
9. No se está aprovechando toda la capacidad de secado del aire.

X. RECOMENDACIONES

1. Se debe realizar un estudio del tiempo de residencia dentro del secador rotatorio, con respecto al tipo de masa que se esté procesando. Esto permitirá la obtención de valores óptimos para diferentes condiciones del proceso.
2. Se debe realizar el control de las siguientes variables, para verificar el mejoramiento del secado del azúcar refino:
 - La humedad final del azúcar de cada masa cocida.
 - La homogeneidad en el secado de todos los granos del azúcar.
 - La diferencia de temperatura entre el aire que entra al secador rotatorio, y el azúcar que sale del mismo.
3. Se debe aprovechar la capacidad de secado del aire, mediante la manipulación del tiempo de residencia dentro del secador rotatorio. Además se debe aumentar esta capacidad, por medio del acondicionamiento del aire de secado.
4. Si las condiciones económicas lo permiten, se debe cambiar el secador rotatorio, por un secador de lecho fluidizado. Este equipo permite un secado más homogéneo y logra porcentajes de humedad en base húmeda hasta de 0.025 %. Sin embargo, requiere de condiciones de flujo de alimentación constantes y controladas, las cuales no se presentan en la actualidad. Se adjuntan en el apéndice E y F (pag. 61 y 62), datos típicos para un secador de lecho fluidizado para un flujo másico similar al manejado en la refinería durante la zafra '96-'97.
5. Se deben atender las anteriores recomendaciones, antes de diseñar la etapa de acondicionamiento del azúcar refino, para el mejor aprovechamiento de los recursos disponibles.

XI. BIBLIOGRAFIA

1. Austin, G. 1988. **Manual de procesos químicos en la industria**. McGraw-Hill, 5a. edición, México D.F.
2. Bosse, E. 1991. **Fluidized-bed drying and cooling of crystal sugar**. International Sugar Journal 1115: 229-231,237.
3. Cook, E. 1996. **Process calculations for partial-recycle dryers**. Chemical Engineering 4: 82-89.
4. Cook, E., H. DuMont. 1991. **Process Drying Practice**. McGraw-Hill, New York.
5. Cook, E., H. DuMont. 1988. **New ideas to improve dryer performance**. Chemical Engineering 7: 71-78.
6. Herrera, R. 1982. **Controles de proceso para ingenios azucareros**. Tesis USAC, Guatemala.
7. Kirk & Othmer. 1969. **Enciclopedia de tecnología química**. Unión Tipográfica de Editores Hispanoamericanos, México D.F.
8. McCabe, W., J. Smith, y P. Harriott. 1993. **Operaciones básicas de ingeniería química**. McGraw-Hill, 4a. edición, México D.F.
9. Meade, G., Chen, J. 1985. **Cane Sugar Handbook**. John Wiley & Sons, 11a. edición, New York.
10. Miller, J.C. y J.N. Miller. 1993. **Estadística para química analítica**. Addison-Wesley Iberoamericana, 2a. edición, Welmington, Delaware, U.S.A.
11. Perry, R. Y D. Green. 1984. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. McGraw-Hill International, 6a. Edición, U.S.A.
12. Schneider, F. 1979. **Sugar Analysis: Official and tentative methods recommended by the International Commission for uniform methods of Sugar Analysis (ICUMSA)**. ICUMSA, New York.
13. Shaw, F. 1994. **Fresh options in drying**. Chemical Engineering 7: 76-84.
14. Shearon, W. 1951. **Cane Sugar Refining**. Industrial and Engineering Chemistry 3: 552-563.
15. Treybal, R. 1993. **Operaciones de transferencia de masa**. McGraw-Hill, 2a. edición, México D.F.

XII. APENDICE

A. Datos originales

1. H_0 y T_0 de las cuatro masas cocidas.
2. Humedad del azúcar refino que sale del secador rotatorio, de cada tamaño de partícula.
3. Humedad del azúcar refino que sale del secador rotatorio (tipo A).
4. Distribución de tamaño de partícula del azúcar refino, para cada tipo de masa cocida.
5. Distribución de tamaño de partícula del azúcar refino A.
6. Temperatura del azúcar refino que sale del secador rotatorio.
7. Temperatura del azúcar refino que sale del enfriador rotatorio.
8. Perfil de temperatura en la entrada de aire del secador rotatorio.
9. T_{bh} , T_{bs} , T_1 y T_2 en el secador rotatorio.
10. Velocidad lineal del aire que entra al secador rotatorio.
11. Velocidad lineal del aire que entra al enfriador rotatorio.
12. T_{bs} y T_{bh} en la entrada del aire a la enfriadora.
13. Datos importantes del secado del azúcar refino.

B. Especificaciones del equipo usado.

C. Análisis de varianza de dos factores.

D. Método horno convencional para determinar la humedad de azúcar.

E. Datos típicos para un secador/enfriador de lecho fluidizado y resultados de operación de una unidad a escala industrial.

F. Comparación de los parámetros esenciales de un secador/enfriador rotatorio vs. lecho fluidizado.

G. Cálculos.

NOMENCLATURA

- T = TEMPERATURA
- T_1 = TIEMPO DEL PRIMER LAVADO, S
- T_s = TIEMPO DE SECADO, S
- C-i = CENTRIFUGA No. i, i = 1, 2, 3, 4 y 5
- CV = COEFICIENTE DE VARIACION
- C-i = MUESTRA No. i
- H = PORCENTAJE DE HUMEDAD (M/M), EN BASE HUMEDA
- H_0 = PORCENTAJE DE HUMEDAD DEL AZUCAR QUE ENTRA AL SECADOR
(M/M), EN BASE HUMEDA
- T_0 = TEMPERATURA DE LA MASA COCIDA QUE SALE DE LAS CENTRIFUGAS
- T_{bh} = TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO
- T_{bs} = TEMPERATURA DE BULBO SECO
- T_1 = TEMPERATURA A LA ENTRADA DEL AIRE EN EL SECADOR ROTATORIO
- T_2 = TEMPERATURA A LA SALIDA DEL AIRE EN EL SECADOR ROTATORIO
- P = PROMEDIO

Tabla A.1: H_o y T_o del azúcar de la masa cocida A

Muestra	C-1		C-2		C-3		C-4		C-5	
	$T_o, \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	H_o
1	65.0	0.68	40.0	0.09	62.0	1.00	60.0	0.37	50.0	0.12
2	65.5	0.66	41.0	0.42	64.0	0.79	60.0	0.44	51.0	0.06
3	66.0	0.90	43.0	0.12	66.0	0.55	60.5	0.48	51.0	0.05
4	66.5	0.56	42.0	0.63	64.0	0.51	61.0	1.06	50.0	0.16
5	63.0	0.59	41.0	0.09	64.0	0.70	53.0	0.35	55.0	0.06
6	64.0	0.79	41.5	0.59	61.0	0.55	58.0	0.59	57.0	0.12
7	65.0	0.61	43.0	0.18	64.0	0.57	61.0	0.87	51.0	0.08
8	64.0	0.60	43.0	0.30	66.0	0.48	61.0	1.14	53.0	0.05
romedio	64.9	0.67	41.8	0.30	63.9	0.64	59.3	0.66	52.3	0.09
TI	3		3		3		3		3	
Ts	45		45		45		45		25	

Tabla A.2: H_o y T_o del azúcar de la masa cocida B

Muestra	C-1		C-2		C-3		C-4		C-5	
	$T_o, \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	H_o
1	60.0	1.02	57.0	0.37	45.0	0.61	64.0	1.09	50.0	0.62
2	64.0	1.05	58.0	0.50	47.0	0.70	65.0	1.07	51.0	0.60
3	48.0	0.84	62.0	0.98	52.0	0.21	61.0	1.01	50.0	0.46
4	45.0	0.82	62.5	0.98	50.0	0.30	62.0	1.00	52.0	0.48
5	60.0	1.04	59.0	0.73	50.0	0.45	62.0	0.77	48.0	0.73
6	61.0	1.18	60.0	0.62	50.0	0.38	62.0	1.05	50.0	0.63
7	59.0	1.17	62.0	0.81	64.0	0.99	63.0	1.29	45.0	0.67
8	58.0	1.24	60.0	0.69	65.0	0.85	63.0	1.17	45.0	0.75
romedio	56.9	1.05	60.1	0.71	52.9	0.56	62.8	1.06	48.9	0.62
TI	3		3		4		3		3	
Ts	45		45		45		45		25	

Tabla A.3: H_o y T_o del azúcar de la masa cocida C

Muestra	C-1		C-2		C-3		C-4		C-5	
	$T_o, \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$	H_o
1	55.0	0.39	62.0	0.54	62.0	0.41	63.0	1.25	56.0	0.19
2	55.0	0.53	62.0	0.73	62.0	0.38	66.0	1.40	54.0	0.16
3	40.0	0.42	55.0	0.62	62.0	1.35	65.0	0.85	56.0	1.05
4	40.0	0.47	57.0	0.71	63.0	1.40	66.0	1.22	55.0	0.99
5	53.0	0.69	63.0	0.57	55.0	1.04	62.0	1.43	58.0	0.90
6	53.0	0.76	63.0	0.69	55.0	1.90	62.0	1.62	58.0	1.16
7	55.0	0.61	65.0	0.54	59.0	1.21	61.0	1.80	56.0	0.81
8	55.0	0.78	66.0	0.57	58.0	1.05	62.0	1.67	54.0	0.79
romedio	50.8	0.58	61.6	0.62	59.5	1.09	63.4	1.41	55.9	0.76
TI	3		3		3		4		4	
Ts	45		45		45		45		45	

Tabla A.4: H_o y T_o del azúcar de la masa cocida D

Muestra	C-1		C-2		C-3		C-4		C-5	
	$T_o, \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$	H_o	$T_o, \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$	H_o
1	44.0	0.96	48.0	1.29	57.0	1.72	50.0	1.62	55.0	2.28
2	48.0	0.94	52.0	1.58	55.0	1.87	48.0	2.00	54.0	2.19
3	52.0	1.31	51.0	1.99	56.0	1.91	53.0	1.85	55.0	2.27
4	48.0	0.94	50.0	1.36	52.0	1.64	50.0	1.81	56.0	2.00
5	50.0	0.89	52.0	1.54	54.0	1.68	52.0	1.70	55.0	2.10
6	54.0	0.97	46.0	1.44	56.0	1.71	49.0	1.60	54.0	2.32
7	50.0	1.04	49.0	1.37	55.0	1.80	51.0	1.36	54.0	1.97
8	51.0	1.14	51.0	1.68	53.0	1.71	50.0	1.57	56.0	2.17
romedio	49.6	1.02	49.9	1.53	54.8	1.76	50.4	1.69	54.9	2.16
TI	1		1		1		1		1	
Ts	45		45		45		45		25	

Tabla A.5: H de cada mesh del azúcar de la masa cocida A

Mesh	H			Promedio
	m-1	m-2	m-3	
20	0.02	0.04	0.04	0.03
30	0.04	0.04	0.04	0.04
40	0.05	0.04	0.06	0.05
60	0.06	0.04	0.05	0.05
80	0.04	0.02	0.06	0.04
100	0.04	0.06	0.04	0.05
Fondo	0.06	0.06	0.06	0.06

Tabla A.6: H de cada mesh del azúcar de la masa cocida B

Mesh	H			Promedio
	m-1	m-2	m-3	
20	0.06	0.07	0.06	0.07
30	0.05	0.05	0.06	0.05
40	0.03	0.03	0.02	0.03
60	0.02	0.02	0.03	0.02
80	0.04	0.03	0.03	0.03
100	0.04	0.06	0.06	0.05
Fondo	0.03	0.15	0.14	0.10

Tabla A.7: H de cada mesh del azúcar de la masa cocida C

Mesh	H			Promedio
	m-1	m-2	m-3	
20	0.06	0.04	0.06	0.05
30	0.08	0.06	0.06	0.07
40	0.04	0.04	0.06	0.05
60	0.06	0.05	0.04	0.05
80	0.06	0.06	0.04	0.05
100	0.06	0.02	0.06	0.05
Fondo	0.06	0.06	0.06	0.06

Tabla A.8: H de cada mesh del azúcar de la masa cocida D

Mesh	H			Promedio
	m-1	m-2	m-3	
20	0.10	0.09	0.08	0.09
30	0.10	0.06	0.08	0.08
40	0.08	0.08	0.08	0.08
60	0.08	0.08	0.09	0.08
80	0.08	0.10	0.08	0.09
100	0.08	0.10	0.10	0.09
Fondo	0.10	0.09	0.10	0.10

Tabla A.9: H del azúcar refino tipo A

Muestra	H	Muestra	H	Muestra	H	Muestra	H	Muestra	H
1	0.04	41	0.03	81	0.05	121	0.06	161	0.04
2	0.05	42	0.04	82	0.04	122	0.03	162	0.05
3	0.06	43	0.03	83	0.03	123	0.05	163	0.03
4	0.05	44	0.04	84	0.04	124	0.04	164	0.03
5	0.04	45	0.04	85	0.03	125	0.04	165	0.05
6	0.04	46	0.05	86	0.05	126	0.05	166	0.04
7	0.04	47	0.04	87	0.03	127	0.06	167	0.04
8	0.03	48	0.04	88	0.03	128	0.04	168	0.03
9	0.05	49	0.04	89	0.05	129	0.05	169	0.05
10	0.04	50	0.04	90	0.04	130	0.03	170	0.04
11	0.06	51	0.04	91	0.05	131	0.03	171	0.05
12	0.05	52	0.04	92	0.03	132	0.05	172	0.05
13	0.04	53	0.03	93	0.02	133	0.03	173	0.03
14	0.04	54	0.05	94	0.04	134	0.03	174	0.03
15	0.04	55	0.04	95	0.04	135	0.03	175	0.04
16	0.04	56	0.04	96	0.03	136	0.04	176	0.05
17	0.05	57	0.04	97	0.04	137	0.03	177	0.04
18	0.04	58	0.05	98	0.03	138	0.03	178	0.04
19	0.04	59	0.06	99	0.04	139	0.04	179	0.04
20	0.04	60	0.06	100	0.05	140	0.03	180	0.03
21	0.05	61	0.06	101	0.03	141	0.05	181	0.04
22	0.04	62	0.07	102	0.04	142	0.03	182	0.05
23	0.04	63	0.05	103	0.03	143	0.03	183	0.04
24	0.04	64	0.05	104	0.03	144	0.04	184	0.04
25	0.04	65	0.06	105	0.04	145	0.04	185	0.04
26	0.03	66	0.06	106	0.04	146	0.04	186	0.04
27	0.04	67	0.05	107	0.03	147	0.04	187	0.04
28	0.04	68	0.07	108	0.05	148	0.05	188	0.06
29	0.03	69	0.06	109	0.03	149	0.04	189	0.05
30	0.05	70	0.07	110	0.04	150	0.03	190	0.04
31	0.04	71	0.06	111	0.05	151	0.04	191	0.05
32	0.04	72	0.08	112	0.04	152	0.04	192	0.04
33	0.04	73	0.05	113	0.03	153	0.03	193	0.03
34	0.04	74	0.05	114	0.05	154	0.05	194	0.04
35	0.05	75	0.03	115	0.04	155	0.04	195	0.03
36	0.05	76	0.03	116	0.05	156	0.04	196	0.03
37	0.04	77	0.03	117	0.04	157	0.03	197	0.03
38	0.04	78	0.05	118	0.03	158	0.05	198	0.04
39	0.05	79	0.04	119	0.04	159	0.04	199	0.03
40	0.04	80	0.05	120	0.05	160	0.05	200	0.04

Muestra	H	Muestra	H	Muestra	H	Muestra	H	Muestra	H
201	0.04	241	0.05	281	0.05	321	0.05	361	0.06
202	0.03	242	0.05	282	0.03	322	0.04	362	0.04
203	0.03	243	0.04	283	0.04	323	0.04	363	0.05
204	0.04	244	0.03	284	0.04	324	0.06	364	0.04
205	0.04	245	0.04	285	0.04	325	0.05	365	0.04
206	0.04	246	0.04	286	0.05	326	0.04	366	0.03
207	0.03	247	0.04	287	0.03	327	0.05	367	0.04
208	0.04	248	0.03	288	0.05	328	0.03	368	0.04
209	0.04	249	0.05	289	0.05	329	0.05	369	0.03
210	0.03	250	0.03	290	0.04	330	0.03	370	0.05
211	0.04	251	0.04	291	0.05	331	0.05	371	0.04
212	0.04	252	0.04	292	0.04	332	0.06	372	0.04
213	0.03	253	0.04	293	0.03	333	0.03	373	0.05
214	0.05	254	0.05	294	0.05	334	0.03	374	0.04
215	0.03	255	0.04	295	0.04	335	0.04	375	0.03
216	0.06	256	0.03	296	0.04	336	0.04	376	0.04
217	0.04	257	0.05	297	0.04	337	0.04	377	0.04
218	0.04	258	0.03	298	0.03	338	0.05	378	0.03
219	0.03	259	0.03	299	0.04	339	0.03	379	0.04
220	0.04	260	0.05	300	0.05	340	0.05	380	0.04
221	0.05	261	0.05	301	0.04	341	0.04	381	0.04
222	0.03	262	0.04	302	0.05	342	0.05	382	0.05
223	0.04	263	0.03	303	0.03	343	0.04	383	0.04
224	0.03	264	0.04	304	0.04	344	0.03	384	0.04
225	0.04	265	0.03	305	0.04	345	0.04	385	0.03
226	0.04	266	0.04	306	0.03	346	0.05	386	0.04
227	0.03	267	0.03	307	0.04	347	0.06	387	0.04
228	0.04	268	0.03	308	0.04	348	0.04	388	0.04
229	0.04	269	0.04	309	0.04	349	0.03	389	0.05
230	0.04	270	0.04	310	0.03	350	0.03	390	0.04
231	0.03	271	0.03	311	0.04	351	0.04	391	0.03
232	0.03	272	0.04	312	0.03	352	0.04	392	0.04
233	0.04	273	0.05	313	0.04	353	0.03	393	0.04
234	0.05	274	0.03	314	0.03	354	0.04	394	0.04
235	0.04	275	0.04	315	0.04	355	0.04	395	0.05
236	0.04	276	0.04	316	0.03	356	0.04	396	0.03
237	0.04	277	0.03	317	0.04	357	0.03	397	0.04
238	0.05	278	0.04	318	0.05	358	0.04	398	0.05
239	0.04	279	0.03	319	0.03	359	0.04	399	0.04
240	0.04	280	0.04	320	0.03	360	0.05	400	0.04

H PROMEDIO = 0.0407, S = 0.0087

Tabla A.10: Especificación ASTME-II

Mesh	μm	pulg.
20	850	0.0331
30	600	0.0234
40	425	0.0165
60	250	0.0098
80	180	0.0070
100	150	0.0059

Tabla A.11: Distribución del tamaño de partícula del azúcar refino de la masa cocida A

Mesh	PORCENTAJE MASICO RETENIDO, $\pm 0.1\%$			
	m-1	m-2	m-3	Promedio
20	2.3	2.6	2.3	2.4
30	15.2	16.6	15.2	15.7
40	35.2	35.4	34.4	35.0
60	37.8	37.1	37.9	37.6
80	5.7	5.3	6.1	5.7
100	1.7	1.0	1.2	1.3
Fondo	2.1	2.0	2.9	2.3
Σ	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabla A.12: Distribución del tamaño de partícula del azúcar refino de la masa cocida B

mesh	PORCENTAJE MASICO RETENIDO, $\pm 0.1\%$			
	m-1	m-2	m-3	Promedio
20	6.6	10.0	8.7	8.4
30	25.7	26.6	26.5	26.3
40	25.9	24.5	25.1	25.2
60	29.5	27.9	28.2	28.5
80	7.4	7.6	7.6	7.5
100	0.1	0.1	0.1	0.1
Fondo	4.8	3.3	3.8	4.0
Σ	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabla A.13: Distribución del tamaño de partícula del azúcar refino de la masa cocida C

Mesh	PORCENTAJE MASICO RETENIDO, $\pm 0.1\%$			
	m-1	m-2	m-3	Promedio
20	7.2	10.0	11.3	9.5
30	19.4	23.5	27.6	23.5
40	19.7	20.0	18.8	19.5
60	31.6	28.8	25.9	28.8
80	12.4	10.9	10.6	11.3
100	0.2	1.3	0.3	0.6
Fondo	9.5	5.5	5.5	6.8
Σ	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabla A.14: Distribución del tamaño de partícula del azúcar refino de la masa cocida D

Mesh	PORCENTAJE MASICO RETENIDO, $\pm 0.1\%$			
	m-1	m-2	m-3	Promedio
20	24.5	18.0	19.9	20.8
30	33.1	28.9	30.7	30.9
40	22.5	24.3	24.6	23.8
60	17.4	23.3	20.7	20.5
80	1.7	3.9	2.9	2.8
100	0.2	0.2	0.2	0.2
Fondo	0.6	1.4	1.0	1.0
Σ	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabla A.15: Distribución del tamaño de partícula del azúcar refinado tipo A

Muestra	PORCENTAJE MASICO RETENIDO, $\pm 0.1\%$							Σ
	Mesh No. 20	Mesh No. 30	Mesh No. 40	Mesh No. 60	Mesh No. 80	Mesh No. 100	Fondo	
1	4.2	19.6	31.8	34.8	6.9	1.7	0.9	99.9
2	8.6	24.9	32.8	28.5	3.9	0.8	0.3	99.8
3	2.3	12.6	31.1	42.9	8.1	1.9	0.8	99.7
4	3.7	17.1	28.9	38.3	8.8	2.0	1.0	99.8
5	10.9	27.3	30.0	26.5	3.9	0.8	0.3	99.7
6	4.3	19.1	30.3	35.5	7.3	2.1	1.1	99.7
7	5.2	19.3	31.7	34.7	6.6	1.5	0.7	99.7
8	6.5	25.2	34.0	28.7	4.3	0.8	0.3	99.8
9	1.6	13.5	33.2	39.7	8.1	2.4	1.3	99.8
10	6.0	22.6	31.1	32.4	5.6	1.4	0.6	99.7
11	4.3	18.7	35.9	33.6	5.4	1.3	0.6	99.8
12	3.2	16.5	36.1	37.5	5.0	1.0	0.7	100.0
13	5.9	24.7	31.5	30.6	5.6	1.2	0.4	99.9
14	5.7	22.9	29.8	32.6	6.5	1.6	0.7	99.8
15	6.4	24.8	27.6	31.6	6.9	1.7	0.8	99.8
16	2.8	20.1	36.1	34.2	5.0	1.0	0.6	99.8
17	4.1	20.6	35.7	33.0	4.7	1.1	0.5	99.7
18	4.9	21.8	34.0	31.9	5.3	1.2	0.6	99.7
19	4.2	19.0	31.1	35.6	6.9	1.7	1.2	99.7
20	8.2	20.3	32.4	23.8	11.2	3.8	0.2	99.9
21	9.4	23.7	28.8	29.3	6.1	1.5	0.9	99.7
22	5.3	20.9	29.3	34.5	7.3	1.8	0.8	99.9
23	2.9	17.4	30.3	37.2	7.9	2.2	1.9	99.8
24	4.8	23.3	32.6	31.2	5.8	1.3	0.8	99.8
25	2.9	15.8	32.2	39.1	7.3	1.6	0.8	99.7
26	4.8	27.5	36.4	26.1	3.5	0.9	0.5	99.7
27	1.2	15.3	30.6	38.7	9.1	3.2	1.7	99.8
28	1.7	12.1	29.1	44.1	9.2	2.3	1.3	99.8
29	4.0	14.4	28.8	38.6	9.5	2.6	1.9	99.8
30	2.1	17.9	27.8	40.5	9.0	1.7	0.8	99.8
31	8.4	20.8	27.9	33.7	6.7	1.7	0.7	99.9
32	6.3	16.6	22.8	40.7	8.5	3.0	1.9	99.8
33	9.3	28.6	26.7	26.6	5.4	3.1	0.2	99.9
34	4.6	18.6	29.0	37.9	7.5	1.5	0.8	99.9
35	5.0	17.1	28.1	38.1	8.0	1.8	1.6	99.7
36	4.8	16.5	29.3	37.2	8.6	2.0	1.4	99.8
37	3.4	14.2	26.1	41.4	10.2	2.3	2.2	99.8
38	2.5	12.6	22.4	40.7	14.6	4.0	3.0	99.8
39	2.9	13.7	24.3	40.4	13.8	3.2	1.6	99.9
40	8.1	20.4	28.0	33.2	7.1	1.6	1.5	99.9
41	4.6	22.8	34.2	28.6	6.4	1.7	1.3	99.6

42	3.6	19.7	31.1	35.4	6.7	1.8	1.6	99.9
43	0.5	9.3	32.0	45.0	9.4	1.9	1.6	99.7
44	2.2	14.7	30.1	41.4	8.3	1.8	1.4	99.9
45	0.8	10.5	33.4	42.7	8.5	2.1	1.8	99.8
46	9.1	20.2	24.0	30.6	10.6	3.3	2.0	99.8
47	3.3	22.3	30.1	34.8	7.4	1.3	0.4	99.6
48	6.4	22.1	26.9	35.6	5.9	1.6	1.4	99.9
49	4.6	19.2	30.7	35.5	6.8	1.6	1.3	99.7
50	3.2	18.4	34.5	37.4	4.2	1.3	0.8	99.8
51	6.1	23.4	26.7	31.7	8.2	2.1	1.6	99.8
52	7.6	24.2	28.2	30.2	6.6	1.7	1.3	99.8
53	7.6	27.1	29.3	28.3	5.4	1.2	0.8	99.7
54	1.6	16.1	33.9	38.2	7.2	1.9	0.9	99.8
55	7.0	23.3	27.7	32.1	6.7	1.5	1.4	99.7
56	9.0	30.8	29.6	25.5	4.0	0.7	0.3	99.9
57	9.8	25.2	25.3	29.4	7.4	1.7	1.0	99.8
58	7.7	25.5	31.7	28.3	4.6	1.0	0.9	99.7
59	5.3	23.0	30.2	32.1	6.6	1.5	1.2	99.9
60	0.9	14.4	30.4	41.2	8.7	2.7	1.4	99.7
61	4.8	21.8	29.9	32.3	7.2	2.1	1.6	99.7
62	5.2	22.4	32.2	27.7	8.5	2.0	1.9	99.9
63	7.7	23.4	27.9	30.4	6.9	2.0	1.6	99.9
64	8.2	25.2	28.3	29.0	6.4	1.3	1.4	99.8
65	6.1	18.2	27.1	36.2	8.6	2.0	1.6	99.8
66	3.2	15.6	30.6	38.7	8.1	2.0	1.7	99.9
67	6.4	10.9	27.3	31.9	18.3	5.0	0.1	99.9
68	4.8	16.3	29.9	36.3	7.2	3.7	1.6	99.8
69	1.5	22.8	36.8	32.8	4.0	1.0	0.8	99.7
70	2.1	20.7	35.8	33.6	5.0	2.0	0.6	99.8
P	5.0	19.8	30.3	34.4	7.3	1.9	1.1	99.8

Tabla A.16: Temperatura del azúcar refino que sale del secador rotatorio

Muestra	T, $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$			
	Masa A	Masa B	Masa C	Masa D
1	51.0	50.0	50.0	52.0
2	52.0	52.0	52.0	52.0
3	51.0	52.0	52.0	52.0
4	50.0	52.0	52.0	52.0
5	51.0	52.0	50.0	54.0
6	51.0	52.0	52.0	54.0
7	52.0	50.0	54.0	52.0
8	52.0	50.0	55.0	50.0
9	52.0	52.0	56.0	54.0
10	52.0	52.0	55.0	52.0
11	51.0	52.0	49.0	54.0
12	52.0	52.0	50.0	54.0
13	52.0	51.0	50.0	53.5
14	51.0	52.0	50.0	54.0
15	52.0	52.0	52.0	54.0
P	51.5	51.5	51.9	52.9

Tabla A.17: Temperatura del azúcar refino que sale del enfriador rotatorio

Muestra	T, $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$			
	Masa A	Masa B	Masa C	Masa D
1	46.0	48.0	46.0	48.0
2	47.0	50.0	50.0	48.0
3	48.0	50.0	50.0	50.0
4	48.0	50.0	49.0	52.0
5	50.0	49.0	48.0	50.0
6	50.0	49.0	50.0	49.0
7	50.0	48.0	50.0	50.0
8	50.0	48.0	50.0	46.0
9	50.0	50.0	52.0	50.0
10	50.0	50.0	51.0	52.0
11	50.0	50.0	49.0	50.0
12	48.0	49.0	46.0	50.0
13	50.0	48.0	46.0	48.0
14	50.0	48.0	48.0	49.0
15	50.0	49.0	47.0	50.0
P	49.1	49.1	48.8	49.5

Tabla A.18: Perfil de temperatura en la entrada de aire del secador rotatorio

d, ±0.05 cm	T, ± 0.5°C					
	1	2	3	4	5	P
0.00	110.0	110.0	112.0	110.0	110.0	110.4
10.00	110.0	110.0	112.0	110.0	110.0	110.4
20.00	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0
30.00	110.0	110.0	110.0	110.0	115.0	111.0
40.00	120.0	110.0	110.0	115.0	115.0	114.0
50.00	120.0	120.0	110.0	115.0	120.0	117.0
60.00	125.0	120.0	115.0	120.0	120.0	120.0
70.00	125.0	130.0	115.0	120.0	125.0	123.0
80.00	130.0	130.0	125.0	130.0	125.0	128.0
90.00	130.0	130.0	125.0	130.0	130.0	129.0
100.00	130.0	130.0	125.0	130.0	130.0	129.0
110.00	130.0	130.0	125.0	130.0	130.0	129.0
120.00	125.0	130.0	125.0	130.0	125.0	127.0
130.00	125.0	125.0	120.0	125.0	125.0	124.0
140.00	125.0	125.0	120.0	125.0	125.0	124.0
150.00	125.0	126.0	120.0	120.0	125.0	123.2
160.00	125.0	125.0	115.0	120.0	125.0	122.0
170.00	125.0	125.0	115.0	120.0	125.0	122.0
180.00	125.0	125.0	115.0	115.0	125.0	121.0
190.00	125.0	125.0	115.0	115.0	125.0	121.0
P	122.5	122.3	117.0	120.0	122.0	120.8

Tabla A.19: T_{bs} , T_{bh} , T_1 y T_2 en el secador rotatorio

Medición	Punto ⁴	Temperatura del aire			
		T_{bh}	T_{bs}	T_1	T_2
		±0.5°F	±0.5°F	±1°F	±0.1°F
1	a	76.5	92.0	220	121.0
2	b	78.0	91.0		
3	c	81.5	100.0		
4	d	75.0	92.5		
5	a	77.0	94.5		
6	b	77.5	97.0		
7	c	77.5	96.5		
8	d	76.0	92.5	220	122.0
9	a	73.0	91.0	220	126.5
10	b	74.5	95.0		
11	c	74.0	93.5		

⁴ El punto "a" corresponde al perfil izquierdo del intercambiador de calor por donde el aire entra al secador rotatorio. El punto "b" y "c" corresponden a la parte frontal y el punto "d" al perfil derecho del mismo. Esta nomenclatura no es aplicable para T_1 y T_2 .

12	d	74.0	94.5		
13	a	73.5	94.0		
14	b	76.5	96.5		
15	c	75.5	95.0		
16	d	76.0	96.0	220	123.5
17	a	76.5	97.0	220	123.0
18	b	83.0	103.5		
19	c	85.5	103.0		
20	d	84.0	104.0	220	121.0
21	a	77.5	100.0	220	111.7
22	b	81.0	102.0		
23	c	86.0	105.0		
24	d	83.0	104.0	220	123.4
25	a	74.5	91.5	219	142.0
26	b	77.0	95.5		
27	c	77.0	95.5		
28	d	76.5	97.5	218	160.9
29	a	83.0	99.5		124.8
30	b	83.0	106.0		
31	c	86.0	105.0		
32	d	80.0	104.5		121.5
33	a	82.5	104.0		
34	b	84.0	106.0		
35	c	81.0	101.0		
36	d	82.0	103.5		
37	a	85.5	103.0		120.9
38	b	89.0	107.0		
39	c	88.0	108.0		
40	d	87.5	107.0		118.5
41	a	77.5	95.0	219	118.0
42	b	93.0	100.0		
43	c	81.5	101.0		
44	d	82.5	101.0	218	115.1
45	a	85.0	102.0	219	120.1
46	b	84.5	102.0		
47	c	81.5	99.0		
48	d	83.0	102.0	220	119.4
49	a	77.0	92.0	220	111.1
50	b	79.0	99.0		
51	c	81.5	101.5		
52	d	80.0	100.0	220	136.3
53	a	77.0	94.0	218	118.0
54	b	82.5	101.0		
55	c	82.0	101.0		
56	d	82.5	101.0	218	118.0
57	a	83.0	97.0	220	117.0
58	b	82.5	100.0		

59	c	84.0	101.0		
60	d	83.5	101.0	220	117.0
61	a	84.5	102.0	220	117.0
62	b	86.0	104.5		
63	c	85.0	104.0		
64	d	86.5	103.0	220	117.0
65	a	77.0	101.0	216	117.1
66	b	80.0	103.0		
67	c	80.0	105.5		
68	d	80.0	106.0	216	117.7
69	a	86.0	105.0	220	121.6
70	b	87.5	107.0		
71	c	87.0	108.0		
72	d	86.0	108.0	220	121.6
73	a	81.5	99.0	201	124.0
74	b	79.0	101.0		
75	c	79.0	103.5		
76	d	80.0	103.0	202	124.0
77	a	80.0	98.0	180	131.1
78	b	83.0	111.5		
79	c	85.0	112.0		
80	d	86.0	114.0	180	133.1
81	a	85.0	110.0	181	133.5
82	b	88.0	111.0		
83	c	88.0	111.0		
84	d	87.0	114.0	182	133.7
85	a	83.5	110.0	177	132.4
86	b	90.0	112.5		
87	c	89.0	112.0		
88	d	85.5	112.0	177	133.8
89	a	86.5	114.0	177	133.8
90	b	90.0	118.0		
91	c	88.0	115.0		
92	d	90.0	116.5	177	133.8
93	a	87.0	104.0	163	135.2
94	b	86.5	108.0		
95	c	90.0	113.0		
96	d	90.0	111.5	166	135.2
97	a	90.5	111.0	166	135.2
98	b	92.5	114.0		
99	c	93.0	114.0		
100	d	90.5	111.5	164	135.2
101	a	91.5	110.0	164	135.2
102	b	92.0	115.0		
103	c	92.0	117.0		
104	d	90.5	113.0	164	138.6
105	a	88.5	106.0	205	117.5

106	b	90.5	110.0		
107	c	91.5	110.0		
108	d	91.5	111.0	207	121.0
109	a	91.0	112.0	207	121.0
110	b	87.0	108.0		
111	c	88.5	110.0		
112	d	95.0	111.5	207	121.0
P		84.2	104.8	203	125.4

Tabla A.20: Velocidad lineal del aire que entra al secador rotatorio

Punto	Velocidad	Punto	Velocidad	Punto	Velocidad	Punto	Velocidad
	±2.5 pie/min		±2.5 pie/min		±2.5 pie/min		±2.5 pie/min
a	50.0	b	25.0	c	20.0	d	20.0
a	55.0	b	30.0	c	25.0	d	40.0
a	60.0	b	35.0	c	25.0	d	20.0
a	70.0	b	50.0	c	30.0	d	10.0
a	40.0	b	40.0	c	30.0	d	20.0
a	80.0	b	35.0	c	20.0	d	20.0
a	60.0	b	70.0	c	50.0	d	25.0
a	60.0	b	60.0	c	50.0	d	40.0
a	40.0	b	60.0	c	20.0	d	30.0
P	57.2		45.0		30.0		25.0

Tabla A.21: Velocidad lineal del aire que entra al enfriador rotatorio

Punto ⁵	Velocidad	Punto	Velocidad	Punto	Velocidad	Punto	Velocidad
	±25 pie/min		±25 pie/min		±25 pie/min		±25 pie/min
x	450	x	250	y	450	y	400
x	400	x	250	y	500	y	1000
x	450	x	100	y	550	y	400
x	550	x	500	y	500	y	450
x	600	x	150	y	450	y	700
x	200	x	250	y	650	y	450
x	250	x	250	y	700	y	450
x	250	x	250	y	600	y	500
x	270	x	250	y	450	y	200
x	170	x	400	y	450	y	800
P	359		265		530		535

⁵ El punto "x" abarca 2/3 del área total de la abertura donde entra el aire a la enfriadora, a partir del extremo izquierdo. El punto "y" abarca el área restante.

Tabla A.22: T_{bs} , y T_{bh} en la entrada del aire a la enfriadora

Medición	T_{bh} $\pm 0.5^{\circ}\text{F}$	T_{bs} $\pm 0.5^{\circ}\text{F}$
1	77.0	95.0
2	77.0	96.0
3	77.0	96.0
4	77.0	95.0
5	77.0	93.0
6	77.0	93.5
7	77.0	96.5
8	77.0	94.0
9	76.5	86.0
10	76.0	89.0
11	76.0	88.0
12	76.0	87.0
13	75.0	88.0
14	77.0	96.0
15	77.0	97.0
16	77.0	88.0
17	77.0	93.0
18	76.5	93.0
19	76.5	93.0
20	77.0	94.5
21	77.0	94.5
22	75.5	89.0
23	75.0	89.0
24	74.0	87.0
25	75.0	88.0
26	75.0	90.0
27	78.0	95.0
28	77.0	93.0
29	77.0	95.0
30	77.0	95.0
31	80.0	96.0
32	79.0	96.0
33	80.0	96.0
34	80.0	96.0
35	80.0	96.0
P	76.9	92.8

Tabla A.23: Datos importantes del secado del azúcar refinado

Variable	Magnitud
Flujo másico de azúcar refinado en el secador rotatorio.	16,844 Kg/h ⁶
Presión de vapor de agua de la caldera.	220 psi
Velocidad de rotación del secador rotatorio.	7.67 r.p.m.
Diámetro del secador rotatorio	6 pies, 5 3/4"
Largo del secador rotatorio	36 pies

⁶ Fuente: Reportes del laboratorio de control de calidad del Ingenio Concepción S.A., correspondientes a 30 días de la zafra 96-97.

Especificaciones del equipo usado

1. Balanza Analítica Mettler AT261 Delta Range Fact. Incertidumbre: 0.1 mg.
2. Balanza Ohaus Precision Advanced. Modelo GT 4000, Serie 5723. Incertidumbre: 0.1 g.
3. Halogen Moisture Analyzer. Marca Mettler Toledo. Modelo HR 73. Incertidumbre: 0.01% de humedad (p/p).
4. Horno Precision Vacuum Oven. Rango de temp.: 3-105°C. Incertidumbre: 0.5°C.
5. Hygro-thermometer. Modelo HT-2106. Incertidumbre: 0.1 °F, 1% H.R.⁷
6. Medidor de la velocidad del aire Kurz. Modelo 441. Serie VCE-2002-1.
7. Psicrómetro Bacharach. Rango de temp.: 30°-110°C. Incertidumbre: 0.5°F.
8. Tamiz vibrador científico CSC. Cat. No. 18480 con tamices estandar U.S.A. bajo la especificación ASTM-E-II No. 20, 30, 40, 60, 80, 100 y fondo. Capacidad: 100 g.
9. Equipo automatizado del ingenio azucarero.

⁷ H.R. = Humedad relativa del aire

Análisis de varianza de dos factores

Este tipo de diseño, implica la presencia de dos variables cualitativas independientes: "bloques" y "tratamientos". Por consiguiente, la suma total de los cuadrados de las desviaciones en las mediciones de la respuesta respecto a su media puede dividirse en tres partes: la suma de los cuadrados de los bloques, de los tratamientos y del error. En este método, cada medición x_{ij} ⁸ se clasifica con dos factores, como se muestra en la tabla C.1.

Tabla C.1: Anova de dos factores

CENTRÍFUGA	MASA 1	MASA 2	MASA 3	MASA 4	TOTAL FILA
1	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	$T_{1.}$
2	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	$T_{2.}$
3	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	$T_{3.}$
4	X_{41}	X_{42}	X_{43}	X_{44}	$T_{4.}$
5	X_{51}	X_{52}	X_{53}	X_{54}	$T_{5.}$
TOTALES DE COLUMNA	$T_{.1}$	$T_{.2}$	$T_{.3}$	$T_{.4}$	T

Las fórmulas para la aplicación de este método estadístico, se encuentran en la tabla C.2. "N" representa el número de elementos de la muestra a estudiar⁹, "c" es el número de columnas de datos y "r" es el número de filas de datos (9).

Tabla C.2: Fórmulas para el método anova de dos factores

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD
ENTRE AZÚCARES	$\sum_{j=1}^c T_j^2 / r - T^2 / N$	$c - 1$
ENTRE CENTRÍFUGAS	$\sum_{i=1}^r T_i^2 / c - T^2 / N$	$r - 1$
RESIDUAL	POR DIFERENCIA	POR DIFERENCIA
TOTAL	$\sum_i \sum_j X_{ij}^2 - T^2 / N$	$N - 1$

⁸ Cada x_{ij} es un valor promedio basado en 8 mediciones.

⁹ En este caso: $N = cr = 20$

En este trabajo de investigación, el anova de dos factores se puede utilizar de dos maneras:

1. Para probar si los cuatro azúcares que entran al secador tienen humedades significativamente diferentes.
2. Para probar si la variación de humedades en cada centrífuga, es significativamente más grande que la variación debida al error aleatorio de la medición y, si es así, estimar su varianza.

HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS:

Respecto a los cuatro azúcares, se tiene la siguiente hipótesis nula:
No hay diferencia entre las medias de las humedades del azúcar refinado que provienen de las cuatro diferentes masas.

Respecto a las cinco centrífugas, se tiene la siguiente hipótesis nula:
No hay diferencia entre las medias de las humedades del azúcar refinado que provienen de las cinco centrífugas.

Se aplicará la prueba F para verificar estas hipótesis estadísticas.

Método horno convencional para determinar la humedad de azúcar

1. Materiales y equipo:

- Balanza analítica con precisión de 0.0001 g.
- Cápsula de aluminio o caja de petri.
- Desecadora con sílica con indicador de humedad.
- Espátula.
- Horno convencional.

2. Procedimiento:

- Colocar en un horno convencional el recipiente a utilizar (cápsula de aluminio o caja petri).
- Calentar el horno a 105°C durante 30 minutos.
- Sacar el recipiente y colocarlo en una desecadora hasta que se enfrie (15 minutos).
- Pesar el recipiente (tara) y anotar el resultado.
- Pesar en el recipiente entre 25 y 25.1 gramos de muestra. Anotar la masa de la muestra pesada. La "masa inicial" es la suma de la tara, más la masa de la muestra.
- Calentar 3 horas este recipiente en el horno a 105°C.
- Sacar el recipiente del horno y colocarlo en una desecadora hasta que se enfrie (15 minutos).
- Pesar en balanza analítica. Anotar la masa del recipiente, debiendo denominarle "masa final".

3. Cálculos:

$$\% \text{ humedad} = \frac{(\text{masa inicial} - \text{masa final})}{\text{masa muestra}} \times 100$$

Secador/enfriador de lecho fluidizado

Tabla E.1: Datos típicos para un secador/enfriador de lecho fluidizado¹⁰

VARIABLE	MAGNITUD
Humedad de entrada del azúcar	mayor de 1.5%
Temperatura de entrada del azúcar	aprox. 60°C
Humedad final del azúcar	0.025%
Temperatura del azúcar enfriada	8-10 K sobre la temp. de entrada del aire frío
Vapor y consumo de potencia por tonelada de azúcar:	
• Vapor	20.0 Kg/ton
• Potencia	4.0 kWh/ton
Tiempo de retención	10 min
Area de tamizaje requerida	aprox. 0.5 m ² por tonelada de azúcar
Pérdida de presión:	
• del secador	3500 Pa
• del plato de distribución	1000 Pa
Velocidad del aire	1.1-1.3 m/s
Flujo de aire	2500 m ³ /ton
Altura del lecho	400/300 mm

Tabla E.2: Resultados de operación de una unidad a escala industrial¹¹

VARIABLE	MAGNITUD
Capacidad del secador	20000 Kg/h
Humedad del azúcar húmeda	1.2 %
Temperatura del azúcar húmeda	70°C
Temperatura del aire de secado	90°C
Temperatura del aire de enfriamiento	15°C
Humedad relativa del aire	60 %
Humedad del azúcar seca	0.025 %
Temperatura del azúcar seca	25°C
Polvo	0.4 %
Consumo de vapor	19.8 Kg/ton azúcar
Consumo de electricidad	3.8 kWh/ton azúcar

¹⁰ Bosse, E. 1991. **Fluidized-bed drying and cooling of crystal sugar.** International Sugar Journal 1115: 230.

¹¹ Ibid., 231.

Secador rotatorio vrs. Lecho fluidizado

Tabla F.1: Comparación de los parámetros esenciales de un secador/enfriador rotatorio vrs. lecho fluidizado¹²

PARÁMETRO	LECHO FLUIDIZADO	ROTATORIO
Humedad final, %	< 0.025	0.03
Diferencia de temp. entre el aire _{entra} y el azúcar _{sale}	T = 8 - 10 K	T = 15 K
Espacio de piso requerido	22 m ²	75 m ²
Altura	6.30 m	5.50 m
Polvo, %	< 0.5	< 2
Consumo total de energía		
• Electricidad	4.0 kWh/ton	3.1 kWh/ton
• Vapor	20.0 kg/ton	23 kg/ton
Peso del secador	36 ton	77.5 ton
Capacidad	25000 kg/h	25000 kg/h
Precio	58%	100%

¹² Bosse, E. 1991. **Fluidized-bed drying and cooling of crystal sugar.** International Sugar Journal 1115: 231.

G. CALCULOS

1. ANALISIS DE VARIANZA DE DOS FACTORES PARA H_0
2. ANALISIS DE VARIANZA DE DOS FACTORES PARA T_0
3. T_0 PROMEDIO
4. HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE QUE ENTRA AL SECADOR ROTATORIO
5. FLUJO MASICO DEL AIRE
6. FLUJO MASICO DEL AGUA QUE SE EVAPORA
7. FLUJO MASICO DEL AGUA QUE ENTRA AL SECADOR CON EL AZUCAR
8. FLUJO MASICO DE LA CORRIENTE DE ALIMENTACION
9. PREDICCION DEL PORCENTAJE MASICO ACUMULADO (AZUCAR REFINO A)
10. COEFICIENTE DE VARIACION
11. CONSTRUCCION DE GRAFICAS

1. ANALISIS DE VARIANZA DE DOS FACTORES PARA H₀.

De las tablas A.1, A.2, A.3 y A.4 (pag. 41, 42), se obtuvieron los H₀ promedio para cada azúcar y centrífuga que se presentan en la tabla G.1.

Tabla G.1: Datos del ANOVA de dos factores para H₀

Centrífuga	Azúcar				T _{i.}	T _{i.} ²
	A	B	C	D		
1	0.67	1.05	0.58	1.02	3.32	11.0224
2	0.30	0.71	0.62	1.53	3.16	9.9856
3	0.64	0.56	1.09	1.76	4.05	16.4025
4	0.66	1.06	1.41	1.69	4.82	23.2324
5	0.09	0.62	0.76	2.16	3.63	13.1769
T _{.j}	2.36	4.00	4.46	8.16	18.98	
T _{.j} ²	5.57	16.0	19.8916	66.5856		

Se tiene:

$$\begin{aligned}
 r &= 5 \\
 c &= 4 \\
 N &= 20 \\
 T &= 18.98 \\
 \sum_j T_{.j}^2 &= 108.0468 \\
 \sum_i T_{i.}^2 &= 73.8198 \\
 \sum_i \sum_j x_{ij}^2 &= 23.2956
 \end{aligned}$$

Tabla G.2: Cuadrados medios para cada fuente de variación

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F observado
Entre azúcares	3	3.59734	1.199113333	11.5734
Entre centrífugas	4	0.44293	0.1107325	1.06875
Residual	12	1.24331	0.103609166	
Total	19	5.28358		

Los valores críticos de F para P = 0.05 correspondientes a los grados de libertad de esta investigación son:

$$F_{3,12} = 3.490, F_{4,12} = 3.259 \text{ (Miller y Miller, 1993)}$$

Son evidentes las siguientes observaciones:

- El valor de F observado para la variación entre azúcares (11.5734) es mayor que el valor crítico de F correspondiente (3.490).
- El valor de F observado para la variación entre centrífugas (1.06875) es menor que el valor crítico de F correspondiente (3.259).

Por consiguiente, se tienen las siguientes conclusiones:

1. **Hay diferencia significativa entre los valores de H₀ de cada azúcar.**
2. **No hay diferencia significativa entre los valores de H₀ de cada centrífuga.**

2. ANALISIS DE VARIANZA DE DOS FACTORES PARA T_o .

De las tablas A.1, A.2, A.3 y A.4 (pag. 41, 42), se obtuvieron los T_o promedio para cada azúcar y centrífuga que se presentan en la tabla G.3.

Tabla G.3: Datos del ANOVA de dos factores para T_o

Centrífuga	Azúcar				T_i	T_i^2
	A	B	C	D		
1	64.9	56.9	50.8	49.6	222.2	49372.84
2	41.8	60.1	61.6	49.9	213.4	45539.56
3	63.9	52.9	59.5	54.8	231.1	53407.21
4	59.3	62.8	63.4	50.4	235.9	55648.81
5	52.3	48.9	55.9	54.9	212	44944
T_j	282.2	281.6	291.2	259.6	1114.6	
T_j^2	79636.84	79298.56	84797.44	67392.16		

Se tiene:

$$\begin{aligned}
 r &= 5 \\
 c &= 4 \\
 N &= 20 \\
 T &= 1114.6 \\
 \sum_j T_j^2 &= 311125 \\
 \sum_i T_i^2 &= 248912.42 \\
 \sum_i \sum_j x_{ij}^2 &= 62844.52
 \end{aligned}$$

Tabla G.4 : Cuadrados medios para cada fuente de variación

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F observado
Entre azúcares	3	108.342	36.114	0.658
Entre centrífugas	4	111.447	27.86175	0.853
Residual	12	508.073	42.339416667	
Total	19	727.862		

Los valores críticos de F para $P = 0.05$ correspondientes a los grados de libertad de esta investigación son:

$$F_{3,12} = 3.490, F_{4,12} = 3.259 \text{ (Miller y Miller, 1993)}$$

Son evidentes las siguientes observaciones:

- El valor de $F_{\text{observado}}$ para la variación entre azúcares (0.658) es menor que el valor crítico de F correspondiente (3.490).
- El valor de $F_{\text{observado}}$ para la variación entre centrífugas (0.853) es menor que el valor crítico de F correspondiente (3.259).

Por consiguiente, se tienen las siguientes conclusiones:

1. **No hay diferencia significativa entre los valores de T_o de cada azúcar.**
2. **No hay diferencia significativa entre los valores de H_o de cada centrífuga.**

3. T_o PROMEDIO

Se obtuvo el promedio aritmético de las temperaturas de las tablas A.1, A.2, A.3 y A.4, en Excel. El resultado fue de 56 °C.

4. HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE QUE ENTRA AL SECADOR ROTATORIO.

Se utilizaron los datos promedio de la tabla A.19 (pag. 51), para T_{bh} y T_{bs}. A partir de estos valores, y con la figura 12.2 del Perry's Chemical Engineers' Handbook, 6ª. ed., se encontró la magnitud de la humedad relativa del aire. Así,

$$\text{Humedad relativa del aire} = 43.0 \%$$

5. FLUJO MASICO DEL AIRE.

- De la tabla A.20 (pag. 54) se obtuvo el promedio de la velocidad lineal del aire que entra al secador rotatorio: $v = 39.3 \text{ ft/min}$

- Considerando al aire como un gas ideal, se calcula su densidad así:

$$\begin{aligned} \rho &= (\text{presión})(\text{peso molecular})/(\text{temperatura})(R) \\ &= (1.013 \times 10^5 \text{ Pa})(29 \text{ g/mol})(1 \text{ Kg}/1000 \text{ g})/(8.314 \text{ J/Kmol})(120.8 + 273.15) \text{ K} \\ &= 0.90 \text{ Kg/m}^3 \end{aligned}$$

- Area:

$$\begin{aligned} \text{De tabla VII-1: diámetro} &= 6.5 \text{ ft} = 1.98 \text{ m} \\ \text{Area} &= (\pi/4)d^2 = (\pi/4)(1.98 \text{ m})^2 = 3.084 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Flujo másico del aire:

$$\begin{aligned} \text{flujo másico} &= (\text{velocidad})(\text{densidad})(\text{área}) \\ &= (39.3 \text{ ft/min})(60 \text{ min}/1 \text{ h})(1 \text{ m}/3.28 \text{ ft})(3.084 \text{ m}^2)(0.90 \text{ Kg/m}^3) \\ &= 1995 \text{ Kg/h} \end{aligned}$$

6. FLUJO MASICO DEL AGUA QUE SE EVAPORA.

- La humedad del azúcar que sale del secador es de 0.04 % (tabla VII-1, pag. 21). El flujo másico de azúcar que sale del secador es de 16844 Kg/h (tabla A.23, pag. 56). Por consiguiente, el flujo másico es:

$$\begin{aligned} \text{flujo másico} &= (99.96 \text{ Kg azúcar seca}/100 \text{ Kg azúcar húmeda})(16844 \text{ Kg azúcar húmeda}/\text{h}) \\ &= 16837.2624 \text{ Kg azúcar seca}/\text{h} \end{aligned}$$

- Para el producto se tiene:

$$\text{Kg agua}/\text{Kg azúcar seca} = 0.04\%/(1-0.04\%) = 4.0016 \times 10^{-4}$$

- Para la alimentación se tiene:

$$\text{Kg agua}/\text{Kg azúcar seca} = 0.95\%/(1-0.95\%) = 9.5911 \times 10^{-3}$$

- Flujo másico del agua que se evapora:

$$\begin{aligned}\text{Flujo másico} &= [(9.5911 \times 10^{-3} - 4.0016 \times 10^{-4}) \text{ Kg agua/Kg azúcar seca}] (16837.2624 \text{ Kg azúcar seca/h}) \\ &= \mathbf{154.75 \text{ Kg agua/h}}\end{aligned}$$

7. FLUJO MASICO DEL AGUA QUE ENTRA AL SECADOR ROTATORIO CON EL AZUCAR.

$$\begin{aligned}\text{Flujo másico} &= (16837.2624 \text{ Kg azúcar seca/h}) (9.5911 \times 10^{-3} \text{ Kg agua/Kg azúcar seca}) \\ &= \mathbf{161.50 \text{ Kg agua/h}}\end{aligned}$$

8. FLUJO MASICO DE LA CORRIENTE DE ALIMENTACION.

$$\begin{aligned}F &= \text{Flujo másico de la corriente de alimentación} \\ F &= (161.50 \text{ Kg agua/h} + 16837.2624 \text{ Kg azúcar seca/h}) \\ &= \mathbf{16998.75 \text{ Kg azúcar húmeda/h}}\end{aligned}$$

9. PREDICCIÓN DEL PORCENTAJE MASICO ACUMULADO.

Se usarán los datos de las tablas A.11, A.12, A.13 y A.14. Se obtendrá un promedio ponderado para el porcentaje másico de cada mesh. El valor de este porcentaje, se multiplicará por un factor de corrección, que será el porcentaje ponderado volumétrico que cada masa aporta al azúcar refinado tipo A. Se debe recordar que solamente las masas cocidas A, B y C componen este tipo de azúcar. El ciclo de producción del azúcar refinado, se compone de: 8 batch de masas cocidas A, 4 de masas cocidas B, 2 de masas cocidas C y 1 de D. Además:

1. El volumen de cada batch de la masa cocida A y B es de 1200 pie³.
2. El volumen de cada batch de la masa cocida C y D es de 1000 pie³.

$$\text{Volumen ciclo de azúcar refinado A} = [8(1200) + 4(1200) + 2(1000)] \text{ pie}^3 = 16400 \text{ pie}^3$$

Así, los factores de corrección son los siguientes:

1. Masa cocida A:

$$\text{Factor de corrección} = (8)(1200)/16400 = 0.58536585$$

2. Masa cocida B:

$$\text{Factor de corrección} = (4)(1200)/16400 = 0.29268293$$

3. Masa cocida C:

$$\text{Factor de corrección} = (2)(1000)/16400 = 0.12195122$$

Multiplicando estos factores, por los datos de su respectiva masa, se obtuvieron los porcentajes másicos acumulados de la tabla G.5.

Tabla G.5: Predicción de la distribución del tamaño de partícula del azúcar refinado A

Mesh	Porcentaje másico retenido	Porcentaje acumulado
20	5.02	5.02
30	19.75	24.77
40	30.24	55.01
60	33.86	88.87
80	6.91	95.78
100	0.86	96.64
Fondo	3.35	99.99

10. COEFICIENTE DE VARIACION (CV)..

Se utilizó la relación:

$$CV = 100 (a_{16} - a_{84}) / (2 a_{50})$$

donde:

a_{16} = abertura donde se acumula un porcentaje másico del 16 %

a_{84} = abertura donde se acumula un porcentaje másico del 84 %

a_{50} = abertura donde se acumula un porcentaje másico del 50 %

Se utilizaron los datos de las tablas A.11, A.12, A.13, A.14 y A.15. Los resultados se presentan en la gráfica 7.

11. CONSTRUCCION DE LAS GRAFICAS.

A continuación, se especifica la información usada para la construcción de las gráficas presentadas en la sección de resultados.

Tabla G.6: Construcción de gráficas

Gráfica	Información usada
1	Tabla G
2	Tabla G
3	Tablas A.5, A.6, A.7 y A.8
4	Tablas A.11, A.12, A.13, A.14 y A.15
5	Tablas A.11, A.12, A.13, A.14 y A.15
6	Tablas A.5 y G.5
7	Tablas A.11, A.12, A.13, A.14 y A.15
8	Tabla A.8
9	Tabla A.20

