

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

---

FACULTAD DE QUIMICA

**ESTUDIO SOBRE SECADO  
DE CEBADA  
EN CASA DE TRABAJO DE SILOS**

T E S I S  
Que para obtener el título de:  
INGENIERO QUIMICO:  
p r e s e n t a .  
ALEJANDRO E. CARRASCO ZANINI RINCON

México, D. F.

1973



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Tesis  
1973  
11.1.55



GUATEMALA

Jurado que revisó y aprobó la presente tesis:

PRESIDENTE: Guillermo Carsolio Pacheco

VOCAL: Guillermo Barraza Ortega

SECRETARIO: Antonio Frías Mendoza

Sitio donde se desarrolló el tema:

Extractos y Maltas, S. A.

Sustentante:

Alejandro E. Carrasco Zanini Rincón

Asesor del tema:

Guillermo Barraza Ortega

A MIS PADRES  
con cariño

A MIS MAESTROS  
con respeto

A OLGA  
por su apoyo

## INDICE

	Página
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
Generalidades sobre secado	3
CAPITULO II	
Operación del secador	23
CAPITULO III	
Eficiencia y costos	64
CAPITULO IV	
Conclusiones	77
BIBLIOGRAFIA	82

## INTRODUCCION

En muchas partes del mundo se pierden grandes cantidades de granos y cereales, debido a los métodos inadecuados de manejo y almacenamiento. Es necesario para mantener las cualidades y condiciones de dichos granos, tomar medidas de precaución y protección contra los agentes de destrucción de ellos tales como el clima, los insectos nocivos, los roedores algunos microorganismos y los hongos.

El valor final del grano dependerá en gran parte de las medidas de protección que se empleen durante su manejo y conservación, las cuales variarán según la clase del grano y las condiciones climáticas del lugar.

La investigación y experiencia en el campo de almacenamiento de granos, muestran que la humedad y la temperatura son dos de los factores más importantes que controlan el correcto manejo de silos y bodegas.

En países altamente desarrollados, el problema de humedad en granos y cereales, se resuelve en los mismos lugares donde se cosecha; pero en algunas regiones de países en desarrollo, donde no existen posibilidades de secar inmediatamente, las cosechas no llegan a los lugares de consumo en las condiciones necesarias para guardarlas con seguridad, y es por ello que existen en estos lugares sistemas de secado, limpieza y clasificación de granos, para lograr este fin.

El presente trabajo se dedicará a analizar la operación del secado de cebada, que se realiza en una casa de trabajo de silos de una fábrica de malta para cerveza, con el objeto de verificar las condiciones actuales de trabajo de un secador continuo existente, y poder determinar su eficiencia y los costos de secado.

## CAPITULO I

### GENERALIDADES

I.O. El término secado se refiere generalmente a la acción de quitar humedad de una sustancia. Por ejemplo un sólido húmedo tal como madera, tela, papel, grano, etcétera, puede ser secado por evaporación del agua, mediante una corriente de gas caliente que acarrea el vapor.

La acción de quitar humedad por medios mecánicos, ya sea por filtración, centrifugación, etcétera, normalmente no se considera como secado; tampoco se consideran como secado las operaciones conocidas con los nombres de deshumedificación y de adsorción, que también implican transferencia de humedad, aunque las ecuaciones referentes a transferencia de masa y de calor, se aplican también en la operación del secado.

El estudio del secado, debería tomar en consideración una gran cantidad de problemas de áreas, de mecánica de flui-

dos, de química superficial, de estructuras y de propiedades físicas de los sólidos, etcétera. En muchos casos estos fenómenos son tan complicados y aún están tan poco estudiados, - que el diseño exhaustivo y cuantitativo de los secadores, es prácticamente imposible. Muchas veces el problema se trata empíricamente con éxito, pero el mecanismo básico de los movimientos en el interior de la estructura, permanece bastante dudoso.

Al secar un sólido húmedo mediante un gas con temperatura y humedad fijas, aparece siempre un patrón general de comportamiento. Al momento de contacto entre el sólido y el medio secante, la temperatura del sólido se ajusta hasta que alcanza un estado estable. En dicho estado estable, una medida de temperatura mostrará que la superficie húmeda del sólido, está a la temperatura de bulbo húmedo del medio secante.- Las temperaturas en el interior del sólido, también tenderán hacia esta temperatura, pero esto no se cumple debido a las imperfecciones en el transporte de masa y calor. Una vez que se alcanza este punto, la proporción de secado y la temperatura son bastante estables y el secado uniforme, llamándose a esto período de velocidad constante. Este continúa hasta que se llega a un contenido crítico de humedad y entonces la tem-

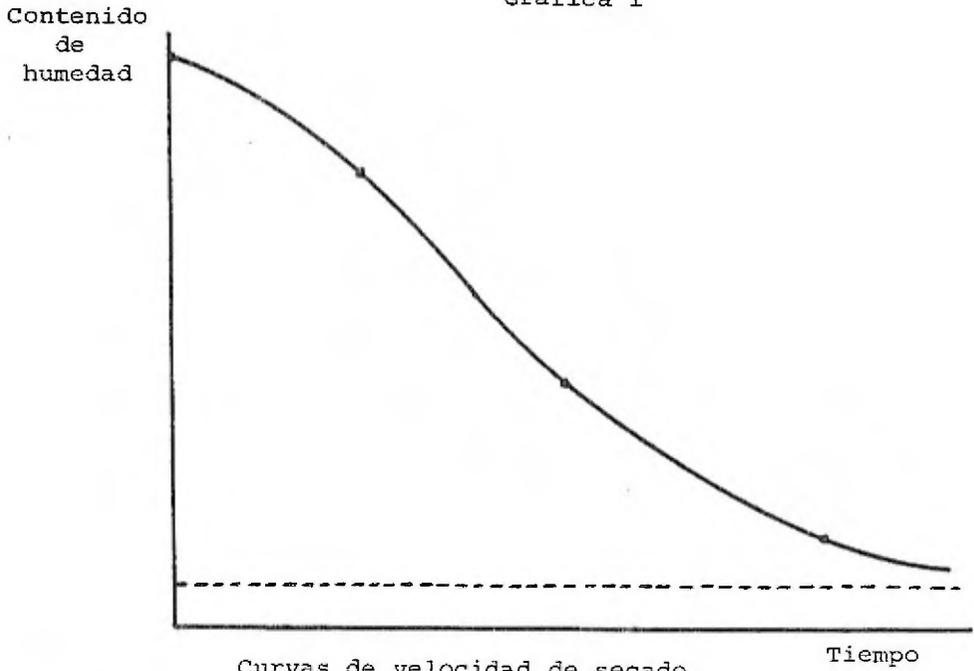
peratura de la superficie del sólido aumenta, disminuyendo rápidamente la velocidad de secado. Este período puede durar más que el anterior aunque sea menor el retiro de humedad. La velocidad de secado se aproxima a cero para una humedad llamada de equilibrio, la cual es la más baja que se puede obtener bajo las condiciones de secado que se estén empleando. (Gráficas 1 y 2)

Para fines de secado, los materiales se pueden dividir en dos clases principales:

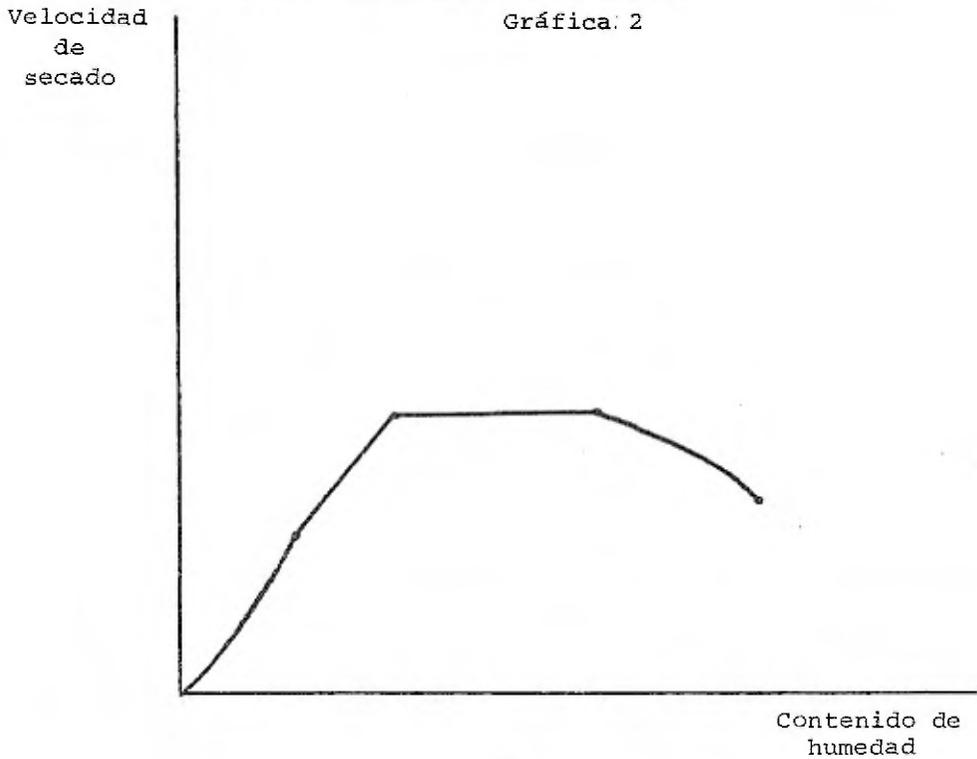
Los sólidos cristalinos o granulares como son: rocas trituradas, cromatos de plomo, dióxido de titanio, fosfatos de sodio, catalizadores, etcétera, los cuales mantienen la humedad en los intersticios o poros superficiales y en los cuales el movimiento de humedad se efectúa por acción de fuerzas capilares de tensión superficial, debidas a la gravitación. En estos casos, los materiales generalmente no se afectan por las condiciones de secado en una amplia gama de temperatura y humedad, aunque por ejemplo en los casos de hidratos, las condiciones de secado sí afectarían al material por secar.

La otra clase abarca la mayor parte de los sólidos orgánicos, amorfos, fibrosos y coloidales, los cuales retienen-

Gráfica 1



Curvas de velocidad de secado  
Gráfica 2



la humedad como una parte integral de la estructura del sólido, o bien la mantienen dentro de las fibras o en el interior de los poros. El movimiento de humedad en estas sustancias, es más lento y probablemente se efectúa por difusión del líquido a través de la estructura del sólido. En estos casos, las curvas de secado se muestran con períodos más cortos de velocidad constante, a diferencia de las sustancias del otro grupo y estos períodos terminan en valores altos de contenido crítico de humedad. En este grupo de sustancias la velocidad de secado depende de la velocidad de difusión del líquido en el sólido. Ejemplos de sustancias de este grupo son: los cereales, el almidón, la sangre, los extractos de soya, los detergentes, etcétera.

La primera clase de materiales, en los procesos de secado, se rige generalmente por un mecanismo de tipo capilar, ya que emplear un mecanismo de difusión molecular para sustancias con una amplia estructura porosa, sería incorrecto. En el segundo grupo de materiales, el secado sí se guía por un mecanismo de difusión molecular, en el cual se puede aplicar la ecuación de Fick, pero alterada con un coeficiente para la difusión de la fase líquida, aplicable para el movimiento a través de la fase sólida. Esta ecuación se desarrolló empíri

camente y con algunas restricciones y suposiciones, por Sherwood y Newman. Su aplicación enfrenta problemas tales como - que el movimiento del líquido por difusión es relativamente - lento y por ello la curva de velocidad de secado puede mos--- trar casi una ausencia de período de velocidad constante; tam--- bién muchos sólidos cambian sus características porosas duran--- te el secado, no pudiendo entonces ser constante el coefi--- ciente de difusión. No obstante en algunos casos de produc--- tos tales como madera o arcilla sí se ha podido aplicar este--- tipo de ecuación.

En los casos en que el mecanismo de secado es de tipo capilar, el movimiento del líquido dentro del sólido se pre--- senta como una fuerza resultante de las diferencias de las ca--- bezas hidrostáticas y de los efectos de tensión superficial.- Esto se debe a la porosidad combinada con la tensión superfi--- cial del líquido, que alcanza un segundo punto crítico de ve--- locidad de secado, aunque experimentalmente es difícil de en--- contrar, ya que frecuentemente en este paso las curvas de se--- cado son bastante suaves.

#### I.1. Humedad en la cebada ✓

La cebada, como todos los granos y semillas, es parte

constitutiva de un organismo viviente que respira utilizando el oxígeno del aire, produciendo bióxido de carbono, agua y energía que se traduce en calor. Este organismo tiene sus actividades vitales reducidas a un mínimo, es decir, se encuentra en un estado de vida latente y por ello a simple vista da la impresión de hallarse sin vida. Por esta razón presenta resistencia a la descomposición por microorganismos, y permite almacenarse en grandes volúmenes, por tiempos variables y sin deterioro o descomposición, siempre que las condiciones ambientales sean favorables para su conservación.

Los factores que más influyen en un correcto almacenamiento son la temperatura y la humedad. Existen, entre otras tres propiedades de las semillas que determinan, en gran parte, su comportamiento ante estos dos factores, y son: la baja conductividad térmica, la capacidad de absorción del agua y la naturaleza porosa del grano.

La cebada y en general todas las semillas, tienen una conductividad térmica muy baja, o sea que una vez producida una zona de calor en cualquier parte de la masa del grano, el calor se transmitirá con mucha lentitud hacia las áreas frías; una concentración de calor genera una alta temperatura, la cual es dañina para la integridad física del germen viviente.

En las semillas almacenadas a granel, las áreas ca---  
lientes por lo general se forman como resultado del alto con-  
tenido de humedad del grano que propicia el incremento del --  
metabolismo, la presencia de insectos y poblaciones de hongos  
y bacterias. La respiración y la producción de calor del gra-  
no, combinadas con las de los insectos y microorganismos, pro-  
ducen en conjunto, la elevación de la temperatura, lo cual --  
afecta en última instancia, al volumen total del grano. Bajo  
estas condiciones de calor excesivo, la muerte y la descompo-  
sición del germen del grano, se producen con cierta rapidez.

Con respecto a la capacidad de absorción del agua por  
la cebada y los granos en general, se puede decir que la pre-  
sencia de agua en la masa de grano, implica la combinación de  
ésta con el material sólido y seco, el cual es variable den--  
tro de determinados límites.

El agua puede estar retenida en los granos de tres ma-  
neras diferentes: el agua libre, retenida en los espacios --  
intergranulares, la cual posee propiedades específicas, sien-  
do las moléculas de las sustancias que la soportan, las que -  
sirven para fijarla en esos sitios; el agua absorbida, que se  
encuentra más asociada con la materia absorbente, existiendo-  
aquí una interrelación entre las moléculas del agua y las de-

las sustancias que constituyen el grano, de tal manera que -- las propiedades de una influyen en las propiedades de las -- otras; y el agua combinada, que como su nombre lo indica se -- encuentra unida químicamente y forma parte integral de las mo -- léculas que constituyen los materiales de reserva o entran en la formación de alguno de los órganos de la semilla.

La presencia del agua en el grano en las tres formas mencionadas antes, hace difícil la determinación con exactitud de la ~~prop~~proporción en que cada una de ellas está representada en el contenido total de agua.

En un sistema bicoloidal, como lo es el de cualquier grano, formado de varias sustancias con estructura organizada, el agua retenida se presenta en los diversos tipos descritos, variando desde agua libre hasta agua combinada en forma química. Cuando los átomos se unen para formar moléculas, se saturan todos los lados de la cadena química; sin embargo, -- las moléculas influyen unas sobre otras, mediante fuerzas variables llamadas fuerzas intermoleculares. El agua combinada, está fuertemente influenciada por las fuerzas intermoleculares del grano. Esto se manifiesta por la formación de líquidos y cristales o agregados complejos, o mediante otros tipos de interacción, entre las moléculas del mismo o diferente tipo.

Cuando el contenido de humedad del grano aumenta, -- también lo hace la temperatura; entonces los insectos, los hongos y las bacterias presentes dentro y fuera de él, se desarrollan rápidamente, porque las condiciones les son favorables, por lo cual es esencial que se utilicen todas las medidas necesarias para mantener el bajo contenido de humedad de los granos y asegurar así su conservación en el almacén.

Siempre que existen diferencias de temperatura en la masa del grano, se presenta el fenómeno de transmisión de calor de las áreas más calientes hacia las más frías. Asimismo, la humedad se transmite del grano más caliente, hacia el más frío, en donde se condensa y cambia el contenido de humedad en este sitio específico. Sin embargo, la interrelación de ambos factores es difícil de analizar con precisión.

En cuanto a la naturaleza porosa de la cebada y los granos en general, se sabe que debido a esa porosidad, se -- presenta el fenómeno de la difusión del aire a través de la masa. Esta difusión, es muy lenta y por sí sola, no es capaz de eliminar cualquier exceso de humedad o de temperatura de la masa del grano, cuando se encuentra éste bajo buenas condi ciones de almacenamiento.

El agua contenida en los granos, actúa como elemento de hidratación de los tejidos; los coloides de las células -- forman una especie de gelatina elástica permitiendo que el -- oxígeno y el bióxido de carbono se difundan con mayor rapidez en la masa individual de la semilla. El fenómeno de difusión de los gases es directamente proporcional a la elasticidad de las sustancias gelatinosas, y como al disminuir el contenido de agua, disminuye también dicha elasticidad, automáticamente decrece el intercambio de los gases de la respiración, por lo que la actividad vital del organismo, o sea el grano, disminuye. En el caso contrario, el aumento de la respiración de -- los granos hace que se genere y libere mayor cantidad de energía que se transforma en calor, aumentando así la temperatura del volumen de grano almacenado.

El llamado "calentamiento espontáneo", de los granos almacenados, se debe al proceso respiratorio realizado por organismos vivientes. El bajo calor específico de los granos impide que los calentamientos que se originan casi siempre en las zonas más húmedas de la masa, se disipen fácilmente, por ello, la temperatura se incrementa en una zona reducida. Este aumento de temperatura acelera la respiración de los granos en esas regiones, y la temperatura sigue aumentando. Por

otra parte, como el alto contenido de humedad, favorece el desarrollo de poblaciones de insectos y microorganismos, su respiración contribuye a aumentar más la temperatura, produciéndose entonces un sucesivo incremento, originándose el fenómeno, con bastante rapidez. Cuando la cebada y los granos y semillas secos, o cuyos contenidos de humedad son adecuados y se encuentran limpios de infestaciones de insectos, la respiración es relativamente baja y está controlada, de tal manera que el fenómeno de calentamiento espontáneo no tiene lugar bajo estas condiciones de almacenamiento, aún en los casos de períodos largos de permanencia en las bodegas.

## I.2. Determinación de la humedad de la cebada

Existen muchos métodos para determinar la humedad de la cebada y de los granos en general. Según los principios en que se basan, se dividen en: métodos de destilación, métodos de horno o estufa, métodos por materiales desecantes, métodos eléctricos y métodos químicos.

I.2.a. Los métodos de destilación se basan en la remoción de la humedad, calentando el grano en aceite, y el volumen o peso del agua del grano, se condensa del vapor desprendido de la muestra. Estos sistemas aunque un poco lentos

son confiables en sus resultados.

I.2.b. En los métodos de horno y estufa la determinación de la humedad se hace secando la muestra, y tomando el peso antes y después del secado. El contenido de humedad se da en base a la pérdida de agua y los hornos empleados pueden ser calentados con aire caliente que circula en la camisa del horno. También se pueden calentar con agua caliente, pero -- son más rápidas las determinaciones en los de aire.

I.2.c. Los métodos que utilizan materiales desecan-- tes consisten en introducir la muestra de grano molido en un espacio cerrado junto con un activo material desecante, de -- tal manera que la humedad del grano molido pase al material - desecante, hasta que se obtenga peso constante de la muestra - en cuestión. El ácido sulfúrico anhidro es uno de los mate-- riales desecantes usados.

I.2.d. Los métodos eléctricos son los más usados -- actualmente y están basados en dos principios físicos conoci-- dos, que son aprovechados en la construcción de aparatos medi dores de la humedad de los granos y las semillas. En gene--- ral, éstos son los métodos más rápidos y confiables y son muy utilizados en las operaciones rutinarias en el manejo de ceba

das y todos los granos en general, pero siempre deben ser calibrados en comparación con los métodos considerados como --- oficiales. Los principios físicos en los cuales se basan, -- son los siguientes: la resistencia eléctrica o conductividad de un material dado depende de su contenido de humedad y las propiedades dieléctricas de un material dependen de su contenido de humedad.

Los aparatos más útiles para determinar la humedad de los granos y semillas, basados en el primer principio físico son: el tipo "Universal"; el tipo "Marconi"; y el tipo "Tag--Heppenstall". De los basados en el otro principio el más --- útil y conocido actualmente es el "Stelinite".

Para el presente trabajo las determinaciones de humedad de las cebadas, se hicieron utilizando los aparatos Universal y Tag-Heppenstall, calibrados mediante un método de estufa.

I.2.e. Por último se tienen los métodos químicos que consisten en agregar un material químico a la muestra de grano o semilla cuyo contenido de humedad se desea determinar. - El material químico se combina o descompone con el agua contenida en la muestra de grano, y la reacción produce un gas que

puede ser medido volumétricamente; dicha reacción disminuye el peso original de la muestra considerada. Es necesario en estos métodos hacer una calibración adecuada, de cuyas curvas pueda determinarse el contenido de humedad. El carburo de calcio es un material que se utiliza en estos métodos y al reaccionar con el agua de la muestra, produce hidróxido de calcio y gas acetileno que se desprende.

### I.3. Secado de cebada

Existen dos métodos para reportar el contenido de humedad de la cebada. Usualmente se expresa en porcentaje en peso, pero hay dos formas de hacerlo. Por ejemplo, si se dice que una cebada tiene un contenido de humedad de 25% en base húmeda, significa que 100 gramos de cebada húmeda contienen 25 de agua; por otra parte se puede decir que una cebada tiene una humedad de 25% base seca y entonces esto significa que 100 gramos de cebada húmeda contienen 80 gramos de materia seca y 20 gramos de agua, ya que 20 es el 25% de 80. Para propósitos comerciales y por costumbre se ha utilizado el método de base húmeda.

El principio básico del secado de cebada es el del equilibrio aire-cebada. La cebada es hidrosfópica y por ello

es capaz de mantener una apreciable cantidad de agua en su interior aún después de largas exposiciones a aire relativamente seco. Si la humedad relativa del aire es aumentada, la cebada tenderá a absorber humedad. De acuerdo a esto, capas -- delgadas de cebada expuestas a aire con una humedad fija, absorberán o liberarán agua, tendiendo siempre a llegar a un equilibrio con el aire.

Experimentalmente se ha visto que para cada clase de grano hay una relación definida entre el contenido de humedad y la humedad relativa del aire. El contenido de humedad de una cebada que está en equilibrio con un aire de humedad relativa dada, se conoce como "humedad de equilibrio", para esa humedad de aire. La humedad de equilibrio sufre cambios ligeros con los cambios de temperatura del aire. La tabla I muestra diversos valores de humedad de equilibrio de la cebada, con distintas humedades relativas de aire.

TABLA I

Humedad relativa del aire	Humedad de equilibrio de la cebada
15%	6.1%
30%	8.5%
45%	10.0%
60%	12.1%
75%	14.4%
90%	19.5%
100%	26.8%

Para comparar esto con un grano de estructura muy diferente se pueden ver en la Tabla II los mismos datos experimentales, con frijol soya.

TABLA II

Humedad relativa del aire	Humedad de equilibrio de la soya
15%	5.0%
30%	6.2%
45%	7.4%
60%	9.7%
75%	13.2%
90%	16.8%
100%	23.5%

Se puede observar que para las mismas humedades relativas de aire, las humedades de equilibrio de la soya son sensiblemente menores, lo cual es debido a la distinta estructura molecular de ambos granos.

El aire y la cebada están en equilibrio cuando la presión de vapor del agua en el grano es igual a la presión de vapor del agua en el aire; estando en este punto de equilibrio el flujo de humedad del grano o hacia él es cero y por lo tanto el porcentaje de humedad permanece constante. Cuando el contenido de humedad de la cebada es mayor que el valor del equilibrio, el agua tiende a pasar del grano al aire, y entonces se produce el secado de cebada. La velocidad a la cual la humedad se separe del grano de cebada dependerá de que tan lejos se encuentre del valor de equilibrio con el aire que la está secando, y al mismo tiempo también dependerá de la temperatura.

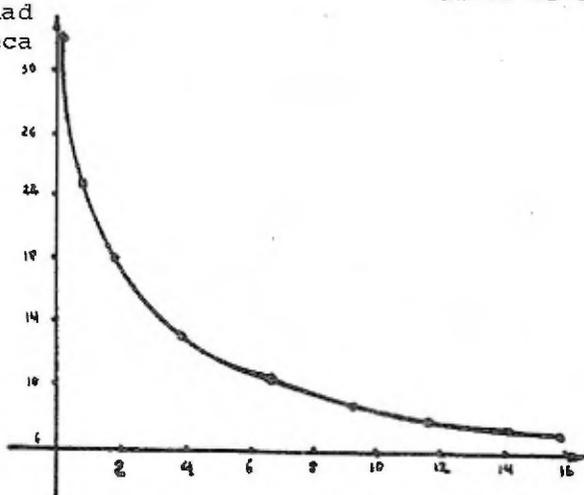
La gráfica número tres, muestra una típica curva de secado de cebada, obtenida al exponer una capa de un grano de espesor a un aire con 30% de humedad relativa y 55 grados centígrados. La cebada se tenía inicialmente con un 30% de humedad en base seca y periódicamente su humedad fue determinada, por diferencias de peso. Se puede ver en la gráfica que al

principio el contenido de humedad se abate rápidamente, y después más y más despacio. Al final del experimento cuando el contenido de humedad ya casi está en el equilibrio con el aire, el secado es tan lento que la curva se vuelve asintótica y es muy difícil detectar los cambios en el peso de la muestra.

Gráfica 3

Curva de secado de cebada

% humedad  
base seca



Tiempo de secado  
en horas

La velocidad de secado, puede variar si se cambia -- cualquiera de los parámetros: humedad del grano, humedad del aire, temperatura, velocidad del aire. Los efectos individuales de cada una de estas variables, combinados, causan una manera particular de secado. Sin embargo, la manera en que ca-

da una de ellas afecta la velocidad del secado, no se conoce lo suficiente como para predecir con exactitud la velocidad de secado para un grupo de condiciones.

Lo anterior se refiere al secado de cebada en muestras de una sola capa de grano, en las cuales cada grano está continuamente en contacto con aire de una temperatura y humedad específicas. En la práctica, con grandes volúmenes, este proceso no se cumple generalmente. El aire con alguna humedad y temperatura fijas, pasa a través de una cantidad de grano absorbiendo cierta cantidad de humedad; al seguirse moviendo, pasa a través de más grano, pero no lo hace ya con sus condiciones iniciales, de tal forma que sólo los primeros granos se secarán a la máxima velocidad. La velocidad a la cual el resto de los granos se secarán, dependerá no sólo de la condición inicial del aire de secado, sino también de la cantidad de grano presente y del volumen de aire circulante. Es por esto que todas las fórmulas propuestas por los experimentadores, aunque son utilizables para fines prácticos, sólo nos dan un valor aproximado de esto.

## CAPITULO II

### OPERACION DEL SECADOR

II.O. La teoría del secado de cebada a que se refiere este tema, comprende dos problemas principales. El primero de ellos es el de la mezcla de aire húmedo con los gases resultantes de la combustión de gas natural, que es el combustible que se utiliza en este tipo de secador. Para atacar este problema se tienen que analizar los parámetros del aire húmedo y de los gases de combustión. El segundo punto importante, es el del secado en sí, y comprende las transferencias de masa y de calor que se efectúan en el secador, sin olvidar -- las propiedades físicas de la cebada.

#### II.1. Aire húmedo. Gases de combustión

El aire en la naturaleza, siempre existe como una mezcla de aire seco, con una determinada cantidad de agua. La mezcla de gas-aire usada en los secadores de cebada, es una -

mezcla de aire húmedo con los productos de la combustión de gas natural. Dentro de los límites de presiones y temperaturas, en los cuales ocurren los procesos de secado de cebada, se puede aplicar con suficiente grado de precisión la ley de los Gases Perfectos.

Los parámetros a considerar en el aire, son principalmente: la humedad absoluta y relativa, la temperatura, la densidad, el contenido de calor del gas húmedo y la capacidad calorífica media.

En la mezcla de aire húmedo con los gases de combustión, para fines de secado, la proporción de estos últimos en la composición total, es entre 5 y 3 por ciento, de acuerdo a las condiciones climáticas del lugar, por lo cual para determinar los parámetros de la mezcla, se considerará como si fuera sólo aire húmedo.

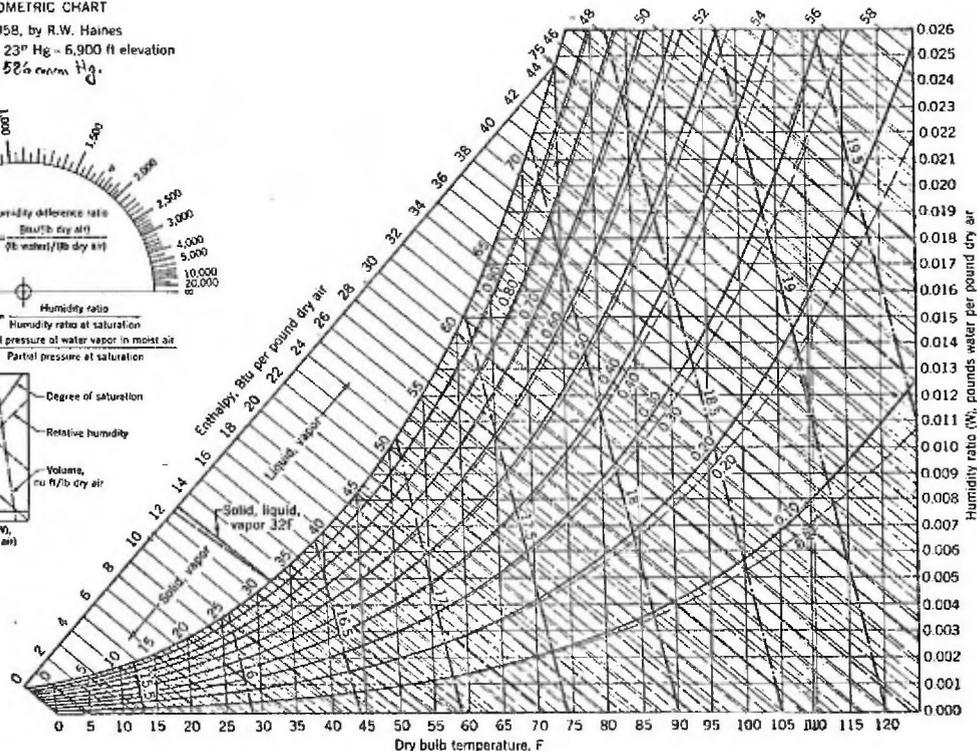
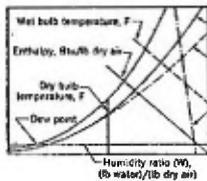
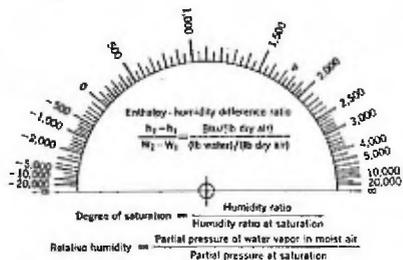
Para la determinación de los parámetros tanto del aire exterior, como de los flujos de aire antes y después del secado, lo más conveniente es usar una tabla psicrométrica a la presión atmosférica del lugar donde se llevan a cabo las experiencias. En el caso presente, la presión atmosférica en la ciudad de México es de 586mm de mercurio igual a 23 pulgadas de mercurio. (Gráfica 4)

PSYCHROMETRIC CHART

Copyright 1958, by R.W. Haines

Atmospheric pressure 23" Hg - 6,900 ft elevation

52.6 mm Hg.



## II.2. Datos para el cálculo del secador de cebada.

1. El secador es del tipo de torre, continuo. Para el tipo de casa de trabajo existente, y analizando el sistema de transporte de materiales de ésta, se vió que es el más adecuado.

2. El secador cuenta con dos pasos, uno de secado de la cebada y otro de enfriamiento de la cebada.

3. La capacidad de secado es de 10 ton/hora. Analizando los volúmenes de recepción de cebadas húmedas, cubre -- con un 15% de exceso la demanda de secado, trabajando un turno de 8 horas.

4. Parámetros del aire exterior. Se acudió a los datos proporcionados por la Oficina de climatología de la Secretaría de Agricultura y Ganadería. De los promedios anuales, para el presente trabajo es lógico trabajar con los datos siguientes:

Temperatura del aire exterior  $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Humedad relativa promedio  $H_0 = 60 \%$

5. El secador trabaja con una mezcla de aire caliente y gases de combustión, a una temperatura  $t_1=50^\circ\text{C}$ . Esta --

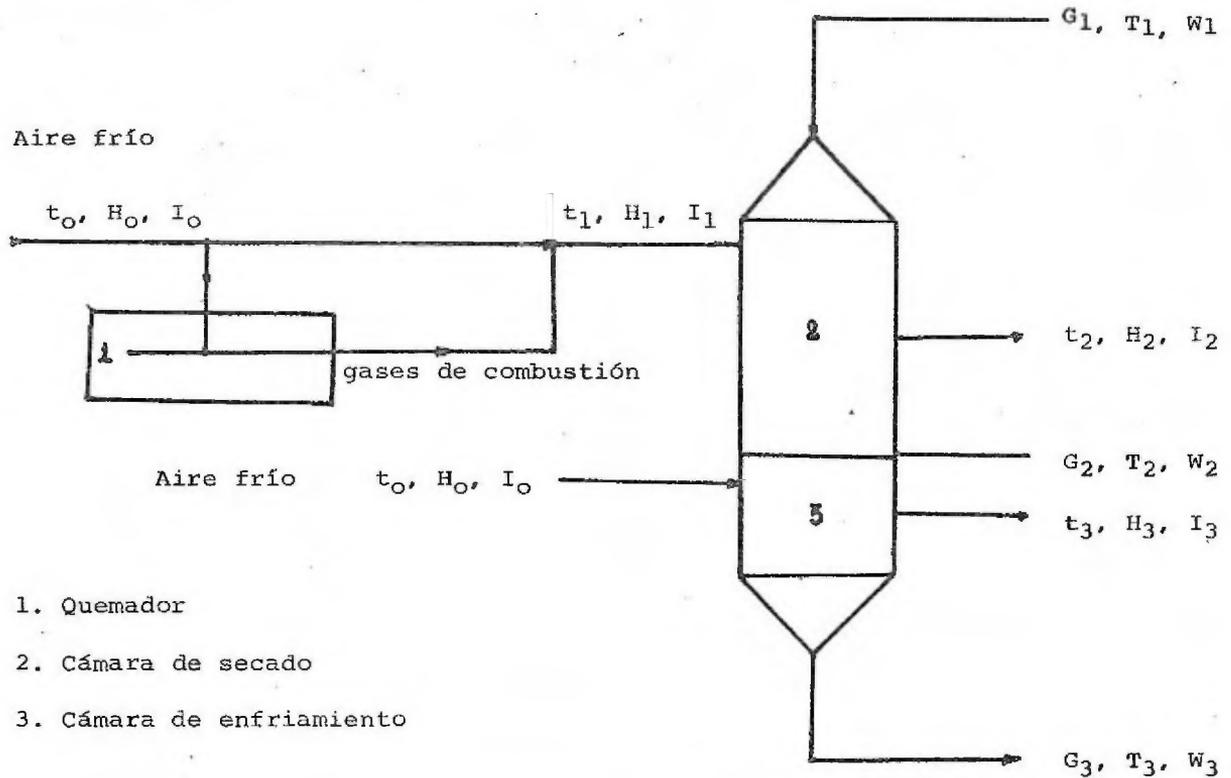
temperatura es la máxima indicada para el secado de cebada, - ya que temperaturas mayores pueden producir daño en el germen de la cebada, el cual es básico en el posterior proceso de -- malteo.

6. Temperatura de la cebada al entrar al secador: --  $T_1 = 20^{\circ}\text{C}$ . Esta temperatura se obtuvo de las temperaturas -- promedio observadas durante la recepción y almacenamiento de -- cebadas.

7. Reducción del contenido de humedad. Los cálculos se harán para una reducción de humedad de  $W_1=16\%$  a  $W_2=12.5\%$  - en la cámara de secado y a  $W_3=12\%$ , en la cámara de enfriamiento. Humedades más elevadas de 16% son difícil encontrar en - cebadas que normalmente son presecadas al sol en el campo, an - tes de llegar a los lugares de almacenamiento. Por la otra - parte 12% es una humedad adecuada para almacenar con seguridad.

8. Temperatura de la cebada al salir de la cámara de secado:  $T_2 = 30^{\circ}\text{C}$

9. Temperatura de la cebada al salir de la cámara de enfriamiento:  $T_3 = 20^{\circ}\text{C}$



1. Quemador
2. Cámara de secado
3. Cámara de enfriamiento

DIAGRAMA DE DATOS

10. Parámetros del aire después de secado:  $t_2 = 24^\circ\text{C}$   
con 80% de humedad.

11. Parámetros del aire después de pasar por la cámara de enfriamiento:  $t_3 = 24^\circ\text{C}$  Humedad =  $0.0160 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg aire seco}}$

12. Combustible: Gas natural proporcionado por Petróleos Mexicanos, con los siguientes datos:

	% en volumen	
Poder calorífico = $9,300 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^3}$ ( $20^\circ\text{C}$ , $1 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$ )	91.97	CH <sub>4</sub>
	7.12	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
	0.91	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>

Densidad relativa:  $D_{(\text{aire} = 1)} = 0.6$

II.3. Cálculos para la mezcla gas-aire en el secador.

II.3.0. Aire necesario para la combustión

Las reacciones que se efectúan en la combustión del gas natural dado son:



Base de cálculo: un mol de gas natural de Pemex

Los moles de oxígeno necesarios para la combustión -- perfecta de un mol de combustible son:

$$0.9197 \times 2 = 1.8394$$

$$0.0712 \times 3.5 = 0.2492$$

$$0.0091 \times 5 = \underline{0.0455}$$

2.1341 Moles de  $O_2$

La composición volumétrica del aire es:

$N_2$  ----- 79 %

$O_2$  ----- 21 %

Por lo tanto para la combustión de un mol de gas natural, se necesitan:

$$\frac{2.1341 \times 100}{21} = 10.162 \text{ Moles de aire/Mol gas nat}$$

El peso molecular del combustible gas natural es:

$$0.9197 \times 16 = 14.7152$$

$$0.0712 \times 30 = 2.1360$$

$$0.0091 \times 44 = \underline{0.4004}$$

17.2516 Kg

Kg mol de gas natural

Y el peso molecular del aire es:

$$\begin{array}{rclcl} 0.79 & \times & 28 & = & 22.12 \\ 0.21 & \times & 32 & = & \underline{6.72} \\ & & & & 28.84 \text{ Kg} \\ & & & & \text{Kg mol de aire} \end{array}$$

El peso del aire necesario para la combustión perfecta del gas natural es:

$$\frac{10.162 \text{ mol de aire}}{\text{mol de gas nat.}} \times \frac{28.84 \text{ Kg aire}}{\text{Kg mol aire}} \times \frac{\text{Kg mol gas nat.}}{17.25 \text{ Kg gas nat.}} =$$

$$L_0 = 16.98 \frac{\text{Kg de aire}}{\text{Kg de gas natural}}$$

Esta es la cantidad teórica de aire seco necesario para la combustión de un kilogramo de gas natural; pero en la práctica para lograr la temperatura de secado, y garantizar una combustión completa es necesario alimentar una cantidad extra de aire al quemador, la cual varía según el tipo de secador. Entonces la cantidad teórica de aire, queda modificada por un factor que normalmente se expresa en porcentaje de exceso de aire.

Para explicar lo anterior, se puede decir que se usan principalmente dos términos para explicar la forma en que se efectúa la combustión:

Combustión perfecta. Es en la que el combustible es quemado sin exceso de aire, de tal forma que los productos de la combustión sólo contienen  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{N}_2$

En este caso los gases de combustión salen a la temperatura de flama del combustible.

Combustión completa. Es en la que todo el combustible es quemado, pero con un exceso de aire para lograr la temperatura de secado requerida, de tal forma que los productos de la combustión contienen  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$

La primera forma es teóricamente ideal, pero rara vez se obtiene; la segunda es fácilmente obtenible con proporciones relativamente altas de exceso de aire.

Desde el punto de vista de operación de un equipo, lo normal es tener una combustión completa con un mínimo de exceso de aire.

II.3.1. Cálculo del calor de combustión del combustible.

	%vol	P.M.	frac.peso	%peso H Comb	calor comb
CH <sub>4</sub>	91.97	x 16	= 1,471.52	= 85.2	x 13,300 = 11,331.60
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	7.12	x 30	= 213.60	= 12.3	x 12,426 = 1,528.40
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.91	x 44	= 40.04	= 2.5	x 12,059 = <u>201.50</u>

Calor de combustión  
del gas natural = 13,061  $\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$

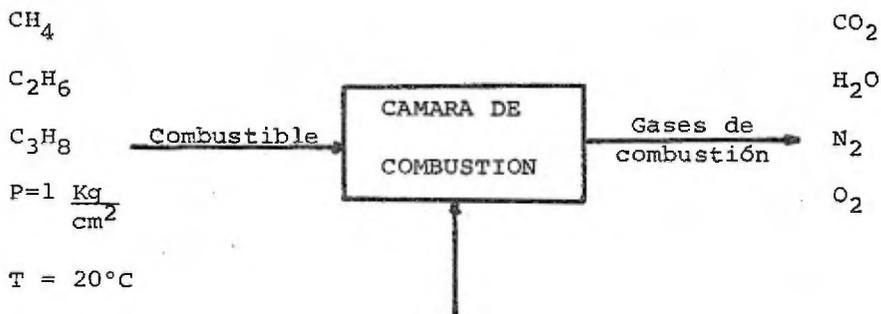
a 0°C y  $14.7 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}$  psía

A las condiciones en las cuales se lleva a cabo la combustión, el poder calorífico es:

$$13,061 \times \frac{293}{273} \times \frac{11.3}{14.7} = 10,749 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg gas nat}}$$

II.3.2. Determinación del factor de exceso de aire.

La determinación del factor de exceso de aire se puede hacer mediante un balance de calor en la cámara de combustión del secador.



Aire  
 químicamente  
 necesario      N<sub>2</sub>  
 +  
 exceso de aire      O<sub>2</sub>  
 P = 586 mm Hg    T = 20°C

En los casos como el presente, en los cuales la cámara de combustión está en la entrada del aire que se usa para el secado, es difícil determinar qué cantidad de aire es debida al exceso en sí, pues queda confundida con la totalidad de aire empleado. Para fines de comprobación se hace el balance de calor, para obtener el exceso de aire teórico y se compara con el exceso real obtenido por medición física.

### II.3.3. Balance para el exceso teórico

$$\text{ENTRADA DE CALOR} = \text{SALIDA DE CALOR}$$

Entrada de calor:

1) El calor de combustión del combustible. (Multipl*u*icado por una eficiencia del quemador que se supone = 0.9, en base a la experiencia en este tipo de quemadores)

2) El calor contenido en el aire que se mezcla con el combustible para la combustión completa: a  $L_o I_o$ , en la que:

$a$  = Factor de exceso de aire

$L_o$  = Cantidad de aire por Kg de gas natural

$I_o$  = Entalpia del aire

Entalpia del aire. (Gráfica IV)

$$I_o = C_h (T - T_o) + H_o \lambda_o$$

$$C_h = \text{Calor húmedo} = 0.2425 \frac{\text{Btu}}{\text{lb } ^\circ\text{F}} = 0.2425 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$$

$T_o$  = Temperatura base (  $0^\circ\text{C}$  )

$T$  = Temperatura del aire =  $20^\circ\text{C} = 68^\circ\text{F} = t_o$

$$H_o = \text{Humedad absoluta} = 0.0117 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg aire seco}}$$

$$\lambda = \text{Calor latente de vaporización a } T_o$$

$$= 1,076 \frac{\text{Btu}}{\text{lb agua}} = 596.5 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg agua}}$$

$$I_o = \frac{0.2425 \text{ Kcal}}{\text{Kg}} \frac{1}{^\circ\text{C}} (20 - 0) ^\circ\text{C} + \frac{0.0117 \text{ Kg agua}}{\text{Kg aire seco}} \times \frac{596.5 \text{ Kcal}}{\text{Kg agua}}$$

$$I_o = 11.803 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg a.s.}}$$

3) El calor que trae el gas natural a su temperatura =  $C_p \text{ gas nat} \times t$

En este caso  $t = 20^\circ\text{C}$  que es la temperatura a la cual viene el gas.

$C_p$  del gas natural. (Datos de Henley, Chemical Engineering Calculations) -----

$$\text{Según la fórmula: } C_p = a + bt + ct^2 + dt^3$$

Para metano:

$$C_p = 3.381 + 0.018044 \times 293 - 0.0000043 \times 293^2$$

$$C_p = 8.219 \frac{\text{cal}}{\text{gmol } ^\circ\text{C}}$$

Para etano:

$$C_p = 2.247 + 0.038201 \times 293 - 0.000011049 \times 293^2$$

$$C_p = 12.492 \frac{\text{cal}}{\text{gmol } ^\circ\text{C}}$$

Para propano:

$$C_p = 2.410 + 0.057195 \times 293 - 0.000017533 \times 293^2$$

$$C_p = 17.633 \frac{\text{cal}}{\text{gmol } ^\circ\text{C}}$$

Por lo tanto el  $C_p$  de la mezcla gaseosa es:

$$C_p = 0.9197 \times 8.219$$

$$+ 0.0712 \times 12.492$$

$$+ 0.0091 \times 17.633 = 8.608 \frac{\text{cal}}{\text{gmol } ^\circ\text{C}}$$

$$8.608 \frac{\text{cal}}{\text{gmol } ^\circ\text{C}} \times \frac{\text{Kcal}}{1000 \text{ cal}} \times \frac{\text{Kg mol}}{17.25 \text{ Kg}} \times \frac{1,000 \text{ gmol}}{\text{Kg mol}} =$$

$$C_p = 0.499 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg gas nat } ^\circ\text{C}} \approx 0.5 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg gas nat } ^\circ\text{C}}$$

La entrada total de calor al quemador es:

$$\text{ENTRADA} = 0.9 \times 10,749 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg gas nat}}$$

$$+ a \times 16.98 \frac{\text{Kg aire seco}}{\text{Kg de gas nat}} \times 11.803 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg aire seco}}$$

$$+ 0.5 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg gas nat } ^\circ\text{C}} \times 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{ENTRADA} = 200.41 a + 9,684.10$$

Salida de calor

1) El calor que se gasta con la mezcla de gases secos de combustión con el aire seco. Según la literatura, el calor específico ( $C_p$ ) de la mezcla gaseosa, se puede considerar igual al del aire, a las temperaturas que se trabaja y -- las bajas proporciones de los gases de combustión con respecto al total de mezcla gaseosa. Este calor es:

$$(a \times L_0 + N) C_{\text{Paire}} \times t_1$$

$a$  = factor de exceso de aire

$N$  = Kilos de  $\text{CO}_2$  o sea de gases de combustión producidos en las reacciones de combustión por cada kilo de gas natural.

Según la estequiometría de las reacciones N es:

$$0.9197 \times 1 = 0.9197$$

$$0.0712 \times 2 = 0.1424$$

$$0.0091 \times 3 = \underline{0.0273}$$

$$\frac{1.0894 \text{ mol de CO}_2}{\text{mol gas nat}}$$

$$N = \frac{1.0894 \text{ mol CO}_2}{\text{mol gas nat}} \times \frac{44 \text{ Kg CO}_2}{\text{Kg mol CO}_2} \times \frac{\text{Kg mol gas nat}}{17.25 \text{ Kg}}$$

$$N = 2.77 \frac{\text{Kg de CO}_2}{\text{Kg gas nat}}$$

$$C_p = \frac{0.24 \text{ Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \quad t_1 = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Este calor es:

$$(16.98 a + 2.77) \frac{\text{Kg gases secos}}{\text{Kg de gas nat}} \times \frac{0.24 \text{ Kcal}}{\text{Kg gases secos } ^\circ\text{C}} \times 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) El calor que se gasta por el vapor de agua presente en la mezcla gaseosa. Este vapor está compuesto en parte por el que trae el aire con humedad =  $H_1$ , y en parte por el vapor de agua producido en las reacciones de combustión.

$$(a \times L_O H_1 + M) I_{\text{vap}} \text{ H}_2\text{O a } 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

M = kilos de agua producidos en las reacciones por ki  
lo de gas natural quemado.

$I_{\text{vap}} \text{ H}_2\text{O a } 50 \text{ }^\circ\text{C} = \text{Contenido de calor del vapor}$

$$I_{\text{vap}} = \lambda_{\text{vap}} \text{ }^\circ\text{C} + \frac{0.44 \text{ Kcal}}{\text{Kg agua } ^\circ\text{C}} \times t_1$$

$$I_{\text{vap}} = 586.5 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg agua}} + \frac{0.44 \text{ Kcal}}{\text{Kg agua } ^\circ\text{C}} \times 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$I_{\text{vap}} = 608.5 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg agua}}$$

Según la estequiometría de las reacciones el valor de

M es:

$$0.9197 \times 2 = 1.8394$$

$$0.0712 \times 3 = 0.2136$$

$$0.0091 \times 4 = \underline{0.0364}$$

$$2.0894 \frac{\text{mol agua}}{\text{mol gas nat}}$$

$$M = \frac{2.0894 \text{ mol agua}}{\text{mol gas nat}} \times \frac{18 \text{ Kg agua}}{\text{Kg mol agua}} \times \frac{\text{Kg mol gas nat}}{17.25 \text{ Kg gas nat}}$$

$$M = \frac{2.18 \text{ Kg agua}}{\text{Kg gas nat}}$$

Este calor es:

$$(a \times \frac{16.98 \text{ Kg a.s.}}{\text{Kg gas nat}} \times \frac{0.0117 \text{ Kg agua}}{\text{Kg aire s}} + 2.17 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg gas nat.}})$$

$$\times \frac{608.5 \text{ Kcal}}{\text{Kg agua}}$$

La salida de calor del quemador es:

$$\text{SALIDA} = 203.76 \text{ a} + 33.24$$

$$+ 120.84 \text{ a} + 1320.44$$

$$\text{SALIDA} = 324.60 \text{ a} + 1353.68$$

$$\text{ENTRADA} = \text{SALIDA}$$

$$200.41 \text{ a} + 9,684.10 = 324.60 \text{ a} + 1,353.68$$

$$\text{a} = \frac{8,330.42}{124.19} =$$

$$\text{a} = 67.07$$

El significado de este factor expresado en % de exceso de aire viene siendo:

$$L = \text{gasto real de aire} = L_0 \times \text{a} = 72.5 \times 16.98$$

$$L = 1,138.9 \frac{\text{Kg aire seco}}{\text{Kg de gas nat}}$$

$$\% \text{ exceso de aire} = \frac{\text{aire real} - \text{aire necesario}}{\text{aire necesario}} \times 100$$

$$\% \text{ exceso de aire} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

$$\% \text{ exceso de aire} = \frac{1,138.98 - 16.98}{16.98} \times 100$$

$$\% \text{ exceso de aire} = 6,607 \%$$

El exceso de aire real con el que está trabajando el-secador se determinó de la siguiente manera:

COMBUSTIBLE: Gas natural con la composición y propie-dades anteriormente dadas.

COMBURENTE: aire a 20 °C y 586 mm Hg

X CONSUMO DE COMBUSTIBLE: Se tomaron mediciones duran-te 10 días, a una presión = 1 Kg/cm<sup>2</sup> y una T = 20 °C, obte---niéndose los siguientes datos:

TABLA III

Día	M <sup>3</sup> /hr
1	27.4
2	34.6
3	32.2
4	28.8
5	26.5
6	24.0
7	37.5
8	28.0
9	31.5
10	<u>30.0</u>
	300.5

CONSUMO PROMEDIO = 30.05  $\frac{m^3}{hr}$  a 1 Kg/cm<sup>2</sup> y 20 °C  
735 mm Hg

Este consumo reducido a las condiciones de alimenta--ción del aire es:

La temperatura es la misma, pero hay que corregir por presión:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

Presión absoluta: combustible = 586 + 735 = 1,321

mm Hg                      aire                      =                      586

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{1,321 \times 30.05}{586} = 67.74 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

#### II.3.4. Consumo de Aire

El consumo de aire se puede dividir en dos: el aire primario, que es el que se introduce premezclado con el combustible al quemador, con el fin de que la ignición del gas se lleve a cabo con mayor facilidad. Y el aire secundario, que es el que se introduce directa o indirectamente al quemador, y que en este caso sirve tanto para ayudar a la combustión completa del gas, como para medio del secado de la cebada.

#### Aire primario

Este aire es forzado mediante un vénturi en cada quemador. Se dispone de cuatro quemadores, y la abertura normal de cada vénturi abarca una área = 10 cm<sup>2</sup>

El gasto en volumen del aire se puede obtener mediante la fórmula:

$$\text{Gasto} = \text{Velocidad} \times \text{área}$$

Por medio de un velómetro, se determinó la velocidad en pies por minuto del aire que penetra por los venturís resultando lo siguiente:

$$\text{Velocidad en cada vénturi} = 1.250 \frac{\text{pies}}{\text{min}}$$

(Promedio)

$$\text{Gasto de aire primario} = 4 \times 10 \text{ cm}^2 \times \frac{\text{pie}^2}{(30.5 \text{ cm})^2}$$

$$\times 1,250 \frac{\text{pies}}{\text{min}} = 53.75 \frac{\text{pies}^3}{\text{min}}$$

Aire secundario

Siguiendo el mismo método, con el velómetro se determinó la velocidad del aire secundario obteniéndose:

$$\text{Velocidad} = 1,900 \frac{\text{pies}}{\text{min}}$$

El área de entrada del aire secundario en el lugar donde se tomó la velocidad es =  $15.83 \text{ pie}^2$

$$\text{Gasto de aire secundario} = 1,900 \times 15.83 = 30,077$$

$$\frac{\text{pie}^3}{\text{min}}$$

Para una hora de operación (considerando las reacciones estequiométricas, y como % mol = % volumen)

67.74 m<sup>3</sup> de gas natural contienen:

$$\begin{array}{rcl} \text{CH}_4 & 0.9197 \times 67.74 = & 62.30 \text{ m}^3 \\ \text{C}_2\text{H}_6 & 0.0712 \times 67.74 = & 4.83 \text{ m}^3 \\ \text{C}_3\text{H}_8 & 0.0091 \times 67.74 = & \frac{0.61 \text{ m}^3}{67.74} \end{array}$$

Oxígeno necesario:

$$2 \times 62.30 + 7.5 \times 4.83 + 5 \times 0.61 = 163.87 \text{ m}^3$$

CO<sub>2</sub> formado:

$$1 \times 62.30 + 2 \times 4.83 + 3 \times 0.61 = 73.79 \text{ m}^3$$

Vapor de agua formado:

$$2 \times 62.30 + 3 \times 4.83 + 4 \times 0.61 = 141.53 \text{ m}^3$$

Aire total:

Aire total = aire primario + aire secundario

$$\text{Aire total} = 53.75 + 30,077 = 30,130.75 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}}$$

$$30,130 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}} \times \frac{\text{m}^3}{35.27 \text{ pie}^3} \times \frac{60 \text{ min}}{\text{hr}} = 51,256 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

Oxígeno total:

$$51,256 \text{ m}^3 \times 0.21 = 10,763.76 \text{ m}^3$$

$$\% \text{ EXCESO AIRE} = \% \text{ exceso } O_2 = \frac{O_2 \text{ total} - O_2 \text{ necesario}}{O_2 \text{ necesario}} \times 100$$

$$\% \text{ EXCESO AIRE} = \frac{10,763.76 - 163.87}{163.87} \times 100 = 6,468 \%$$

Comparando este valor, que es el valor real de exceso de aire, con el obtenido con el balance de calor, se observa que no sobrepasa en mucho, lo que quiere decir, que la combustión se está llevando a cabo completamente, con un exceso de aire adecuado, pero que sirve al mismo tiempo como medio para el secado. La diferencia lógica entre los dos valores es explicable por error en la medición de la velocidad del aire.

#### II.3.5 Cálculos de calor y de masa en la torre de secado

✓ Determinación de la humedad evaporada

$G_s$  = Peso en Kg/hr de materia seca de cebada

$G_1$  = Peso en Kg/hr de cebada entrando al secador = 10,000

$G_2$  = Peso en Kg/hr de cebada saliendo de la cámara de secado

W = Peso en Kg/hr de agua evaporada del grano en la cámara -  
de secado

W<sub>1</sub> = % de humedad de la cebada al entrar al secador = 16

W<sub>2</sub> = % de humedad de la cebada al salir de la cámara de seca-  
do = 12.5

$$G_1 = G_2 + W$$

$$G_s \text{ entrada} = \frac{100 - W_1}{100} \times G_1$$

$$G_s \text{ salida} = \frac{100 - W_2}{100} \times G_2$$

$$G_s \text{ entrada} = G_s \text{ salida} = \text{constante} = 8,400 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}}$$

$$G_2 = G_1 \frac{100 - W_1}{100 - W_2}$$

Por lo tanto:

$$W = G_1 - G_1 \frac{100 - W_1}{100 - W_2} = G_1 \left( 1 - \frac{100 - W_1}{100 - W_2} \right)$$

$$= G_1 \frac{(W_1 - W_2)}{100 - W_2} = G_2 \frac{(W_1 - W_2)}{100 - W_1}$$

Si se tiene una entrada de cebada húmeda al secador -

de 10,000 Kg/hr =  $G_1$  , una  $W_1 = 16$  y una  $W_2 = 12.5$ :

$$W = 10,000 \frac{16.0 - 12.5}{100 - 12.5} = 400 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}}$$

De aquí que el peso de la cebada al salir de la cámara de secado será:

$$G_2 = G_1 - W = 10,000 - 400 = 9,600 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}}$$

Determinación del gasto de aire en el secado

Para la determinación de la demanda de aire para el secado, es necesario hacer un balance de materia en el secador: (balance de agua)

1) Entrada de humedad

a) La humedad que trae el grano =  $\frac{G_1 \times W_1}{100} \frac{\text{Kg}}{\text{hr}}$

b) La humedad que trae la mezcla de gases de combustión - aire a la temperatura de secado:

$$L = \frac{\text{Kg aire seco}}{\text{hr}}$$

$H_1$  = Humedad absoluta del aire al entrar al secador -  
en  $\frac{\text{Kg de agua}}{\text{Kg aire seco}}$

Para  $H_1$  : Temperatura de bulbo seco =  $50^\circ\text{C} = 122^\circ\text{F}$

T de bulbo húmedo =  $23.5^\circ\text{C} = 74.3^\circ\text{F}$

$$H_1 = 0.0122$$

Esta humedad será:  $L \times H_1$

2) Salida de humedad

a) La que trae el grano a la salida =  $\frac{G_2 \times W_2}{100} \frac{\text{Kg}}{\text{hr}}$

b) La humedad que trae el aire a la salida de la cámara de secado =  $L \times H_2$

$H_2$  = Humedad absoluta del aire al salir de la cámara de secado en  $\frac{\text{Kg de agua}}{\text{Kg de aire seco}}$

Para  $H_2$  : Temperatura de bulbo seco =  $24^\circ\text{C} = 75.2^\circ\text{F}$

Temperatura de bulbo húm =  $21.5 = 70.7^\circ\text{F}$

$$H_2 = 0.0209$$

ENTRADA = SALIDA

$$\frac{G_1 W_1}{100} + L H_1 = \frac{G_2 W_2}{100} + L H_2$$

$$\frac{G_1 W_1}{100} - \frac{G_2 W_2}{100} = L (H_2 - H_1)$$

Humedad perdida por el grano = Humedad ganada por el aire

$$W = L (H_2 - H_1)$$

$$L = \frac{W}{H_2 - H_1}$$

$$L = \frac{400}{0.0209 - 0.0122} = 45,977 \frac{\text{Kg aire seco}}{\text{hr}}$$

$$L = 45,977 \frac{\text{kg a.s.}}{\text{hr}} \times 2.2 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} = 101,149 \frac{\text{lb aire seco}}{\text{hora}}$$

Como el aire que se está empleando, es un aire a 20°C o sea 68°F y 60% de humedad relativa, en la tabla IV se puede obtener el volumen húmedo para relacionarlo con el dato anterior:

$$\text{Volumen húmedo} = 17.62 \frac{\text{pie}^3}{\text{lb aire seco}}$$

Por lo tanto el gasto de aire en las condiciones en que se tiene será:

$$L = 101,149 \frac{\text{lb aire seco}}{\text{hr}} \times \frac{17.62 \text{ pie}^3}{\text{lb aire s}} \times \frac{\text{hora}}{60 \text{ min}}$$

$$L = 29,636.65 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}} \text{ aire a } 20^\circ\text{C } 60\% \text{ H.R.}$$

Este valor concuerda con bastante aproximación con el obtenido con anterioridad.

## Determinación del gasto de calor en el secado

Haciendo un balance de calor en la cámara de secado - se tiene lo siguiente:

Entrada de calor

1) El calor que trae el aire, o sea:

$$L \times I_1 = L \times I_0 + Q_1$$

$Q_1$  = Calor transmitido al aire que entra a la cámara de secado, por el calentamiento con el gas natural.

2) El calor que trae el grano, que en este caso es - la cebada que se va a secar. Este calor se compone del calor que trae la cebada completamente seca, y del calor que trae - el agua de la cebada húmeda.

Este calor será:  $G_1 C_{p1} t_1$  e incluye el calor del - agua que es:  $W C_{p_{H_2O}} t_1$

$$\text{Como: } G_1 = G_2 + W$$

$$G_1 C_{p1} t_1 = G_2 C_{p2} t_1 + W C_{p_{H_2O}} t_1$$

$C_{p1}$  y  $C_{p2}$  = calor específico de la cebada a las humedades  $W_1$  y  $W_2$

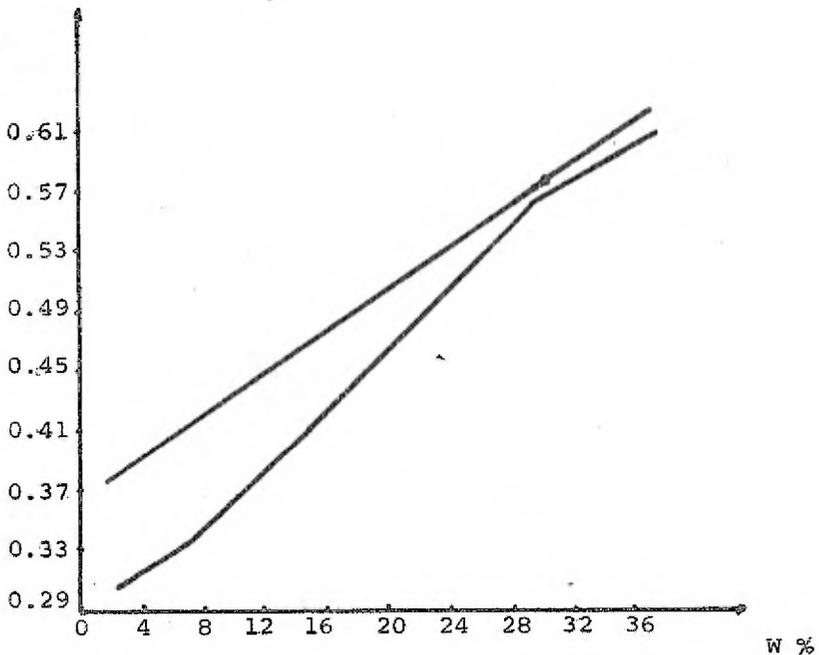
$$C_p \text{ agua} = \frac{1 \text{ Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$$

$$Cp_1 = 0.47 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$$

$$Cp_2 = 0.45 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$$

Para estos valores de calores específicos de la cebada a distintas humedades, se usó la gráfica de R. W. Disney - que estudia la dependencia de los contenidos de humedad, contra el calor específico, la cual concuerda con la mayoría de las investigaciones hechas, y que se reproduce a continuación.

$\frac{Cp}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$



Salida de calor

1) El calor con que sale el aire usado =  $L \times I_2$

Para  $I_2$  :  $t$  de bulbo húmedo =  $21.5^\circ\text{C} = 70.7^\circ\text{F}$

$t_2$  de bulbo seco =  $24^\circ\text{C} = 75.2^\circ\text{F}$

$$H_2 = 0.0209 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg aire seco}}$$

$T_0$  = Temperatura base ( $0^\circ\text{C}$ )

$$\lambda_0 = 596.5 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg agua}}$$

$$C_h = \text{calor húmedo} = 0.2496 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$$

$$I_2 = 0.2496 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \cdot (24-0)^\circ\text{C} + \frac{0.0209 \text{ Kg Agua}}{\text{Kg aire seco}} \times \frac{596.5 \text{ Kcal}}{\text{Kg agua}} = 18.08$$

2) El calor que trae el grano a la salida de la cámara de secado:  $G_2 \times C_{p2} \ t_2$

3) El calor que se pierde por conducción hacia el medio ambiente, a través de las paredes de la cámara de secado.

La ecuación general para el balance de calor en la cámara de secado queda de la siguiente forma:

ENTRADA = SALIDA

Aire + Gas Nat + Cebada húmeda = Aire Usado + Cebada Seca +  $Q_p$

$$L I_0 + Q_1 + G_2 C_p T_1 + W T_1 = L I_2 + G_2 C_p T_2 + Q_p$$

En esta ecuación  $Q_p$  es el calor perdido hacia el medio ambiente, a través de las paredes de la cámara de secado.

De la ecuación del balance de calor se conocen todos los términos menos  $Q_p$ , que es el que se va a obtener por diferencia:

$$Q_1 = L I_1 - L I_0$$

En la cual  $I_0$  e  $I_1$  son los contenidos de calor del aire antes y después de la cámara de combustión respectivamente.

$$I_0 = 11.803 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg aire seco}}$$

$$I_1 : \text{Temperatura de bulbo seco} = 50^\circ\text{C} = 122^\circ\text{F}$$

$$\text{Temperatura de b. húmedo} = 23.5^\circ\text{C} = 74.3^\circ\text{F}$$

$$H_1 = 0.0122$$

$$C_h = 0.2456 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} = 0.2456 \frac{\text{Btu}}{\text{lb } ^\circ\text{F}}$$

$$I_1 = 0.2456 (50-0) + 596.5 \times 0.0122 = \frac{19.55 \text{ Kcal}}{\text{Kg aire s.}}$$

$$Q_1 = 45,977 (19.55 - 11.803)$$

$$Q_1 = 350,361 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$L I_o = 45,977 \frac{\text{Kg a.s.}}{\text{hr}} \times \frac{11.803 \text{ Kcal}}{\text{Kg aire seco}} = 542,666 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$G_2 C_{p2} T_1 = 9,600 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \times 0.45 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \times 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$= 86,400 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$W T_1 = 400 \frac{\text{Kg de agua}}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \times 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$= 8,000 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$L I_2 = 45,977 \frac{\text{Kg a.s.}}{\text{hr}} \times \frac{18.08 \text{ Kcal}}{\text{Kg aire seco}} = 831,264 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$G_2 C_{p2} T_2 = 9,600 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \times \frac{0.45 \text{ Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \times 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$= 129,600 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

Substituyendo en la fórmula del balance general:

$$Q_p = 542,666 - 831,264 + 86,400 - 129,600 + 8,000 + 350,361$$

$$Q_p = 26,563 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

Este valor del calor perdido a través de las paredes de la cámara de secado, se podría comprobar mediante el cálculo por transmisión de calor, pero al tomar la medición de la diferencia de temperaturas en las paredes, se ve que es imperceptible para un termómetro normal. Como medio de comprobación se incluye el cálculo de esta diferencia de temperaturas:

$$Q_p = F \times k_o \times \frac{1}{s} \Delta T \quad \text{en la que:}$$

$F = 34 \text{ m}^2$  = área por la cual se pierde calor;  $k_o$  = coeficiente de transmisión de calor =  $43.2 \text{ Kcal/hr.m}^2 \text{ }^\circ\text{C/m}$ ;  $\Delta T$  = diferencia de temperaturas;  $s = 1.9 \text{ mm}$  = espesor de la pared.

$$\Delta T = \frac{26,563 \times 0.0019}{34.3 \times 43.2} = 0.034 \text{ }^\circ\text{C}$$

Con lo que se comprueba que la diferencia es muy pequeña.

### II.3.6 Cálculos de calor y de masa en la parte de enfriamiento de la cebada en la torre del secador

#### Determinación de la humedad evaporada

$G_2$  = Peso en Kg/hr de cebada entrando a la cámara de enfriamiento

$G_3$  = Peso en Kg/hr de cebada saliendo de la cámara de enfriamiento

$G_s$  = Peso en Kg/hr de materia seca de cebada = constante

$W_a$  = % de humedad de la cebada al entrar a la cámara de enfriamiento = 12.5%

$W_3$  = % de humedad de la cebada al salir de la cámara de enfriamiento = 12%

La cantidad de humedad evaporada en la cámara de enfriamiento estará dada por:

$$W_e = G_2 \frac{W_2 - W_3}{100 - W_3}$$

$$W_e = 9,600 \frac{12.5 - 12.0}{100 - 12.0} = 54.65 \frac{\text{Kg agua}}{\text{hr}}$$

De aquí que el peso de la cebada al salir de la cámara de enfriamiento será:

$$G_3 = G_2 - W_e = 9,600 - 54.65 = 9,545.35 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}}$$

Determinación del gasto de aire en el enfriamiento. -

Para la determinación de la demanda de aire para la parte del enfriamiento de la cebada en el secador, es necesario hacer un balance de materia en esta parte (balance de agua).

1) Entrada de humedad

a) La humedad que trae el grano  $= \frac{G_2 W_2}{100} \frac{\text{Kg}}{\text{hr}}$

b) La humedad que trae el aire que se usa para en-----  
friar  $= L_e H_e$

$L_e = \frac{\text{Kg aire seco}}{\text{hr}}$  (gasto de aire para enfriar)

$H_e = H_0 = \frac{0.0117 \text{ Kg agua}}{\text{Kg aire seco}}$

2. Salida de humedad

a) La que trae el grano a la salida  $= \frac{G_3 \times W_3}{100} \frac{\text{Kg}}{\text{hr}}$

b) La humedad que trae el aire a la salida de la cá-  
mara de enfriamiento  $= L_e \times H_3$

Experimentalmente se vió que:  $H_3 = 0.0160$

Ya que:  $t_3 = 24^\circ\text{C} = 75.2^\circ\text{F}$  y

$t_3 \text{ b.h.} = 19^\circ\text{C} = 66.2^\circ\text{F}$

De la misma forma que para el balance de agua en la -  
cámara de secado se obtiene

Humedad perdida por el grano = Humedad ganada por el aire

$$W_e = L_e (H_3 - H_e)$$

ENTRADA = SALIDA

$$\frac{G_2 W_2}{100} + L_e H_e = \frac{G_3 W_3}{100} + L_e H_3$$

$$\frac{G_2 W_2}{100} - \frac{G_3 W_3}{100} = L_e (H_3 - H_e)$$

$$L_e = \frac{W_e}{H_3 - H_e}$$

$$L_e = \frac{54.65}{0.016 - 0.0117} = 12,709 \frac{\text{Kg aire seco}}{\text{hr}}$$

$$L_e = 27,959 \frac{\text{lb aire seco}}{\text{hr}}$$

El volumen húmedo del aire a 20°C y 60% es:

$$\text{Volumen húmedo} = 17.62 \frac{\text{pie}^3}{\text{lb a.s.}}$$

Por lo tanto el gasto real del aire usado para enfriamiento será:

$$27,959 \frac{\text{lb a.s.}}{\text{hr}} \times \frac{17.62 \text{ pie}^3}{\text{lb a.s.}} \times \frac{\text{hr}}{60 \text{ min}} = 8,191 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}}$$

de aire a 20°C 60%

Para comprobar este valor, se tomó la medición de la velocidad del aire en el ventilador que maneja el aire frío, obteniéndose lo siguiente:

$$\text{Velocidad en el ducto} = 1700 \frac{\text{pie}}{\text{min}}$$

$$\text{Area del ducto} = 4.83 \text{ pie}^2$$

$$\text{Gasto de aire} = 1,700 \frac{\text{pie}}{\text{min}} \times 4.83 \text{ pie}^2 = 8,211 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}}$$

valor que concuerda razonablemente con el anterior.

Determinación del balance de calor en el enfriamiento

Entrada de calor

1. El calor que trae el aire que entra a la cámara de enfriamiento =  $L_e \times I_o$

2. El calor que trae la cebada, que en este caso es la que se va a enfriar, a la temperatura que entra en la cámara de enfriamiento (30°C). Este calor se compone del calor que trae la cebada completamente seca, y del calor que trae el agua de la cebada húmeda, ya que en la torre de enfriamiento también se va a perder algo de humedad.

Este calor es:  $G_2 C_{p2} T_2$  e incluye el calor del agua-  
que es:  $W_e C_{pH_2O} T_2$

$$\text{Como: } G_2 = G_3 + W_e$$

$$G_2 C_{p2} T_2 = G_3 C_{p3} T_2 + W_e C_{pH_2O} T_2$$

$C_{p3}$  = Calor específico de la cebada a 12% de humedad

$$C_{p3} = 0.45 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \quad (\text{gráfica})$$

Salida de calor

1) El calor con que sale el aire usado de la cámara -  
de enfriamiento =  $L_e \times I_3$

$$I_3 = 0.2473 (24 - 0) + 0.016 \times 596.5 = \frac{15.479 \text{ Kcal}}{\text{Kg aire seco}}$$

2) El calor que trae el grano a la salida de la cámara de enfriamiento =  $G_3 C_{p3} T_3$

$$T_3 = 20^\circ\text{C}$$

3) El calor que se pierde hacia el medio ambiente a través de las paredes de la cámara de enfriamiento. Como ya se vió en el caso anterior, la diferencia de temperaturas del

interior al exterior es tan pequeña que es imperceptible, pero analizando los valores se deduce que la pérdida de calor será menor.

La ecuación general para el balance de calor queda de la siguiente forma:

$$\text{ENTRADA} = \text{SALIDA}$$

$$L_e I_o + G_3 C_{p3} T_2 + W_e T_2 = L_e I_3 + G_3 C_{p3} T_3 + Q_p$$

$$150,004 + 128,862 + 1640 = 196,722 + 81,612 + Q_p$$

$$Q_p = 280,506 - 278,334$$

$$Q_p = 2,172 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

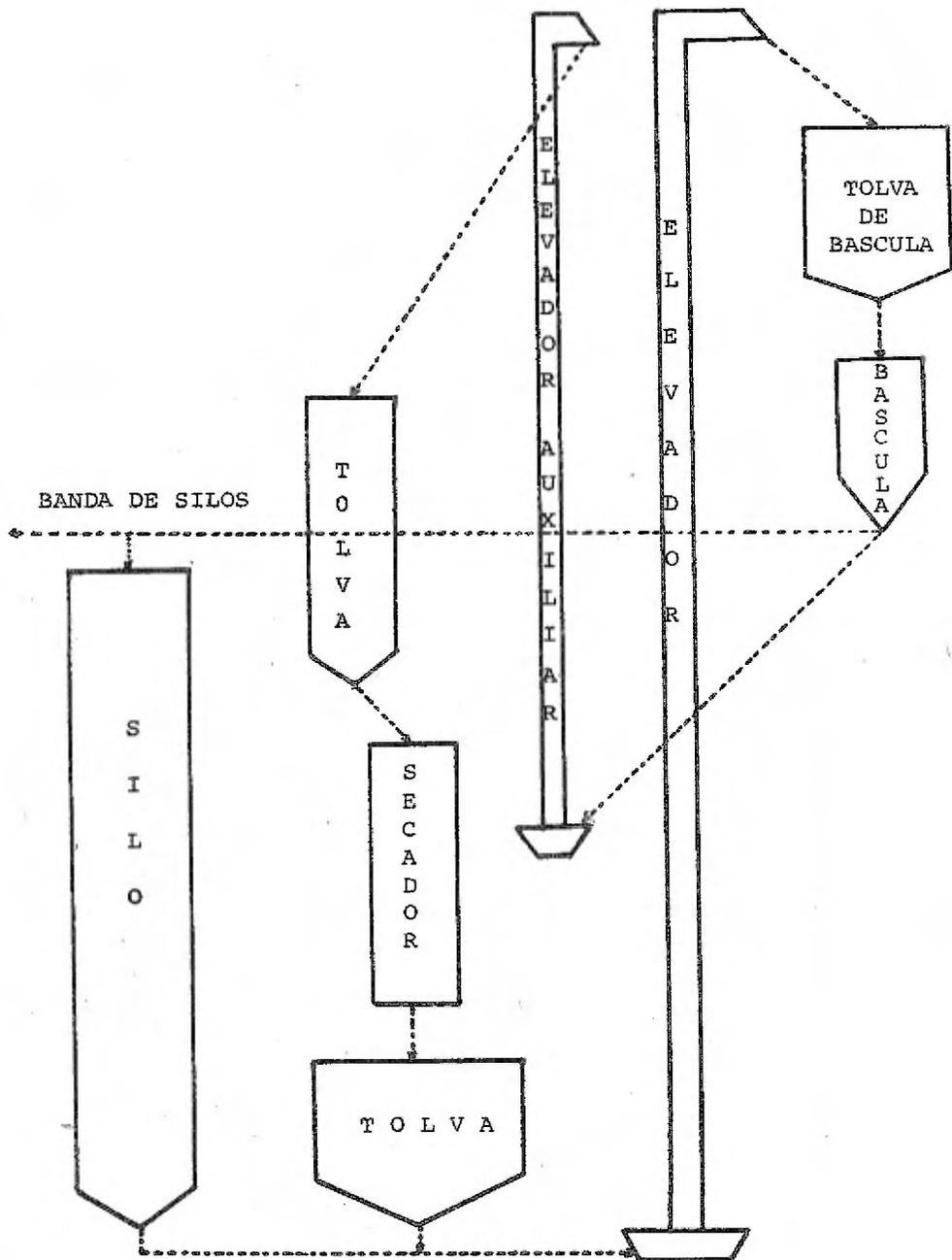


DIAGRAMA DE MOVIMIENTOS DEL SECADOR

## CAPITULO III

### EFICIENCIA Y COSTOS

III.1. Una de las formas que se pueden utilizar para definir la eficiencia de la cámara de secado es mediante la relación del calor realmente usado para evaporar la humedad, al calor total usado para el secado.

Esto da un coeficiente (E), de eficiencia de secado, que a su vez debe quedar modificado por otro factor de eficiencia en el quemador del gas natural.

$$E = \frac{\lambda}{Q_1}$$

Esta ecuación, reportada por A. S. Ginsburg, aproxima bastante bien a la realidad los valores de eficiencias de secado.

$\lambda$  = calor latente de evaporación a la temperatura de secado.

$$Q_1 = L (I_2 - I_o) - WT_1 + G_2 Cp_2 (T_2 - T_1) + QP$$

$$Q_1 = 350,361 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$\lambda = 554.4 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg agua}} \quad (\text{a } 50^\circ\text{C})$$

$$\lambda = 554.4 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg agua}} \times \frac{400 \text{ Kg agua}}{\text{hr}} = 221,760 \frac{\text{Kcal}}{\text{kr}}$$

$$E = \frac{221,760 \text{ Kcal/hr}}{350,361 \text{ Kcal/hr}}$$

$$E = 0.633$$

Este factor de eficiencia debe quedar modificado, como ya se ha dicho por un segundo factor de eficiencia de equipo de combustión del gas.

Este factor de eficiencia, para el caso presente, se obtuvo de los datos de fabricación del equipo:

$$E' = 0.9$$

Por otra parte en base al concepto de eficiencia que se ha considerado, se debe tomar en cuenta, que en la sección de enfriamiento del secador también se está perdiendo humedad, y por ello tendrá repercusión en la eficiencia.

Para este cálculo se considera:

$\lambda$  = Calor latente de evaporación a 30°C

$$\lambda = 526.7 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg agua}}$$

$$E_e = \frac{526.7 \times 54.65}{350,361} = 0.082$$

$$\text{Eficiencia total} = (E + E_e) 0.9$$

$$\text{Eficiencia total} = (0.633 + 0.082) 0.9$$

$$\text{Eficiencia total} = 0.6435$$

$$\% E_t = 64.35$$

### III.2. Estimación de Costos

#### Capital de inversión total

El capital de inversión total es el requerimiento monetario total para la erección de un sistema productivo y su consecuente operación.

El capital total se puede dividir en capital fijo y capital de trabajo. El primero representa la inversión en --

instalaciones y facilidades auxiliares; y el capital de trabajo se refiere a los fundamentos requeridos para la conducción normal de un negocio.

#### Capital Fijo.

El capital fijo se puede definir como el costo total de las instalaciones de proceso, edificios, servicios auxiliares y la ingeniería involucrada en la creación de una nueva planta.

Se puede dividir el capital fijo de inversión de la siguiente forma:

#### CAPITAL FIJO

Costo del equipo (Incluye el equipo de servicio)

+ Costo de la instalación mecánica y eléctrica

+ Costo de la obra civil

+ Costo del terreno

Total = COSTO FISICO

+ Costo de Ingeniería y construcción

= Costo DIRECTO

+ Factor de costos por contingencias

Total = CAPITAL FIJO

En el presente estudio se determina el capital fijo - de inversión y partiendo de aquí se obtienen los costos de -- operación para el secador de cebada estudiado.

Costo del equipo requerido

1	Armadura y conjunto de hierro del secador incluyendo: ducto perforado, desviadores de grano (471), paredes y tolva superior de lámina galvanizada # 14,18 y 20	\$ 158,000.00
1	Conjunto de paredes de lámina # 20 con su estructura soporte y persiana de lámina - del mismo número, para salida del aire	22,000.00
60	Metros cuadrados de manta para retención de pajillas en la persiana del aire de salida	1,200.00
1	Conjunto de ductos cuadrados de lámina -- #18 para el transporte del aire desde los ventiladores a la torre del secador	32,500.00
3	Compuertas reguladoras del paso del aire con sus dispositivos mecánicos para abrir y cerrar	3,600.00
1	Tolva de lámina recogedora de polvo y paja. Capacidad 10 Ton	10,000.00

1 Ventilador centrífugo para el aire caliente con capacidad de 35,000 Pie <sup>3</sup> /min de doble carcaza	28,000.00
1 Ventilador centrífugo para el aire frío - con capacidad de 9,000 pies <sup>3</sup> /min de doble carcaza	16,000.00
1 Motor de 40 HP y 1,160 RPM totalmente cerrado (para ventilador grande)	22,700.00
1 Motor de 10 HP y 970 RPM, totalmente cerrado, para el ventilador del aire frío	7,500.00
1 Mecanismo regulador de la descarga de la cebada seca	4,700.00
1 Motor de 1 HP y 1,725 RPM, para el mecanismo regulador de la descarga de la cebada	1,300.00
1 Reductor de velocidad para el motor del mecanismo regulador de la descarga de la cebada, variable de 8 a 21 RPM	2,200.00
1 Elevador de canjilones para carga y descarga del producto del secador	75,900.00
1 Banda transportadora para distribución del producto seco al lugar de almacenamiento	38,000.00

1	Válvula de seguridad para gas de presión- máxima 70 lb/pulg <sup>2</sup>	570.00
1	Válvula motorizada reguladora de presión- de gas con modutrol	4,500.00
4	Quemadores de gas, con sus respectivos pi- lotos, válvulas solenoides para su apertu- ra y rectificadores de flama	9,000.00
4	Vénturis para entrada de aire secundario- a los quemadores	4,500.00
1	Interruptor de tiempo para control automá- tico de encendido de los pilotos	1,300.00
4	Relevadores para la secuencia de arranque de los 4 pilotos	2,000.00
1	Control de temperatura con elemento sensi- tivo a la entrada del aire en el secador- y con rango de 10 a 100°C	5,200.00
1	Registrador de temperatura	2,300.00
3	Manómetros 0 - 100 lb/pulg <sup>2</sup>	300.00
1	Medidor de consumo de gas	3,500.00
2	Extintores para incendio	1,200.00
	Total	\$ 457,970.00

## Costo de instalación mecánica y eléctrica

Instalación mecánica. Se considera un -  
35% sobre el costo del equipo \$ 160,289.00

### Instalación eléctrica

Arrancador y accesorios para el motor de  
40 HP 5,500.00

Arrancador y accesorios para el motor de  
10 HP 2,800.00

Arrancador y accesorios para el motor de  
1 HP 600.00

Tubería y alambre 2,000.00

2 Lámparas para alumbrado 300.00

1 Apagador a prueba de polvo 120.00

Total \$ 11,320.00

La mano de obra para la instalación -  
eléctrica se calcula al 25% sobre el cos  
to de los materiales 2,830.00

Total instalación eléctrica y mecáni-  
ca \$ 174,439.00

### Costo de la obra civil

El costo de la obra civil comprende  
cimentación corrida para una tolva de --

concreto reforzado con cuatro muros y una losa superior, la cual soporta la torre del secador. Comprende los materiales, la mano de obra calculada al 25%, sobre el costo de los materiales. El volumen de concreto utilizado es de 24 m<sup>3</sup>

76,200.00

Cimentación y anclas de motores y ventiladores

7,450.00

Total

\$ 83,650.00

Costo del terreno

Se tienen 95 m<sup>2</sup> a razón de \$250.00 pesos

m<sup>2</sup>

23,750.00

TOTAL COSTO FISICO

739,809.00

Costo de ingeniería y construcción

Este costo se calcula al 30% sobre el valor del costo físico

221,942.00

221,942.00

TOTAL COSTO DIRECTO

961,751.00

Factor de contingencias

Con el fin de tener una compensación para gastos imprevisibles, como pueden resultar de cambios menores en el proceso, cambios de pre

cios, etcétera, se considera un 10% sobre el-

costo directo \$ 85,541.00

TOTAL CAPITAL FIJO 1.047,292.00

Una vez tenido el capital fijo se procede a calcular el costo de operación de la siguiente manera:

#### COSTO DE OPERACION

Por lo que se refiere al costo de operación, hablando en forma general se puede decir que se puede dividir en:

1) COSTOS VARIABLES. Los cuales comprenden:

- a. Costos Directos
- b. Costos Indirectos

2) COSTOS FIJOS

#### COSTOS VARIABLES

##### Costos directos

- Trabajo o mano de obra de operación	Anual
1 obrero de 85 pesos diarios	\$ 31,025.00
1 obrero de 65 pesos diarios	23,725.00
Total	\$ 54,750.00

Se considera la tercera parte de esto ya que también se dedican a otras labores

	Total de mano de obra	\$ 18,250.00
-	Supervisión	Anual
	Se considera el 20% del tiempo de una persona de \$200.00 diarios	14,600.00
-	Mantenimiento	
	Se considera un 7% sobre el valor del capital fijo, como promedio, para --- equipos de uso normal	70,688.00
-	Refacciones	
	Se considera un 10% sobre el costo -- anual de mantenimiento	7,068.00
-	Combustible	
	Se considera un consumo de gas natu-- ral 240 m <sup>3</sup> diarios y el precio del -- gas es de \$0.11/m <sup>3</sup> . Se operan 150 - días al año	3,960.00
-	Energía eléctrica	
	Se tienen 50 HP x 0.746 Kwatt/HP = 37.3 Kwatt x 8 hr = 298.4 Kwatt-hr x	

x 150 días = 44,760 Kwatt/hr. Se con  
sidera el precio promedio de Kwatt-hr  
= \$0.30 13,428.00

Costos indirectos

Laboratorio

- Se considera el 10% del tiempo de una  
persona de \$100.00 diarios 3,650.00

- Prestaciones

Se considera el 15% sobre el costo de  
la mano de obra 2,737.00

Nota: Se consideran variables la mano  
de obra, supervisión, mantenimiento,-  
refacciones y laboratorio porque va--  
rían con la producción

COSTOS FIJOS

- Depreciación

Se considera el 10% sobre el costo --  
del capital fijo 104,729.00

- Seguros

Se considera un 3% sobre el costo del  
capital fijo 31,418.00

- Impuestos		
Se considera un 2% sobre el costo del capital fijo		20,945.00
- Administración		
Se considera un 5% sobre el costo del capital fijo		52,364.00
	TOTAL	\$ 343,837.00
		año

Si se toma en cuenta que se trabajan 150 días al año, debido a las épocas de las cosechas:

$$150 \text{ días} \times 80 \frac{\text{ton}}{\text{día}} = 12,000 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$$

Por lo tanto el costo por tonelada -- será:

$$\text{Costo} = \frac{343,837}{12,000} = \frac{\$}{\text{ton}} 28.65$$

## CAPITULO IV

### CONCLUSIONES

IV.1. Como resumen de lo estudiado se puede concluir que la humedad escogida como punto de estado final de la cebada después del secado, que es igual a 12%, es el adecuado como se ve en la tabla I, en la cual se tiene una humedad de -- equilibrio de la cebada igual a 12.1% para una humedad relativa del aire de 60%, la cual es un dato promedio para el lugar donde se seca y almacena la cebada. Como comprobación de esto se ha observado en el proceso de almacenamiento, que las - humedades llegan a variar hasta en un 0.5% hacia arriba o hacia abajo, de acuerdo a las variaciones que sufre la humedad-relativa del aire según sea la época del año.

Con respecto a la temperatura de secado, debido a que la cebada se utiliza posteriormente en un proceso de germinación (malteo), en el cual es muy importante que el germen del grano se encuentre completamente sano, se ha escogido una tem

peratura igual a 50°C, misma que se considera la máxima indicada, teniendo en cuenta que sería peligroso que la temperatura en la cámara de secado sobrepasara los 40°C. En algunos casos especiales, en los cuales la humedad inicial de la cebada por secar sobrepasa a 16%, se puede aumentar la temperatura hasta 60°C, en el período inicial del secado, ya que a mayor humedad de la cebada, la temperatura en la cámara de secado tiende a bajar.

Por la misma razón anterior, el secador cuenta con la cámara de enfriamiento, con el fin de que la cebada salga a la temperatura ambiente, y se pueda proceder a almacenarla con seguridad.

Con respecto a la combustión, se concluye que se efectúa de manera completa, y que la cantidad de exceso de aire se confunde con la totalidad de aire empleada en el secado, debido a que la cámara de combustión se encuentra precisamente a la entrada del aire de secado.

Analizando la operación completa del secador, se inicia con un aire con una humedad absoluta de 0.0117 Kg de agua por Kg de aire seco; viene entonces la mezcla con los gases de combustión, después de la cual como se ve en la figura, se

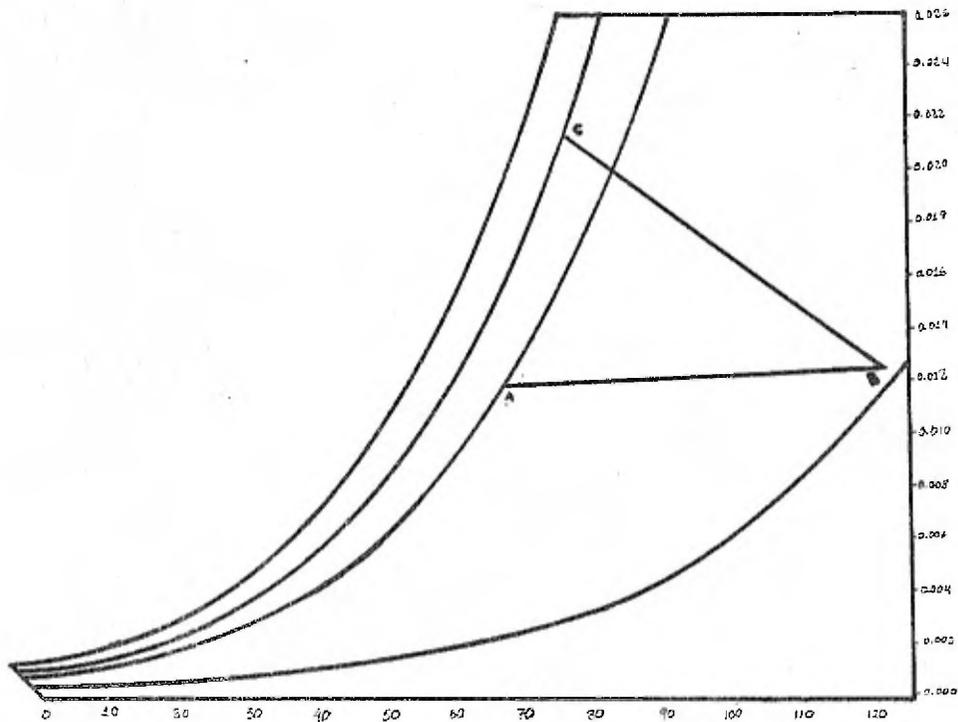
Obtiene un aire con una humedad absoluta un poco mayor, debida a el agua que se produce en la reacción. Después de efectuado el secado, se termina teniendo un aire con una humedad absoluta de 0.0209 la cual se comprueba en el balance de humedad, con la cantidad de agua que está perdiendo la cebada. En cambio las humedades relativas, varían de otra forma, pasando de un 60% inicial a un 10% después de la combustión, y finalizando con un 80%.

En la cámara de enfriamiento, como se observa en la otra figura, el aire al contacto con la cebada caliente, quita un 0.5% más de humedad a ésta, quedando un aire final con un contenido de humedad de 0.016, el cual se comprueba también con el balance de agua respectivo. En este caso la humedad relativa del aire a la entrada y a la salida, permaneció igual.

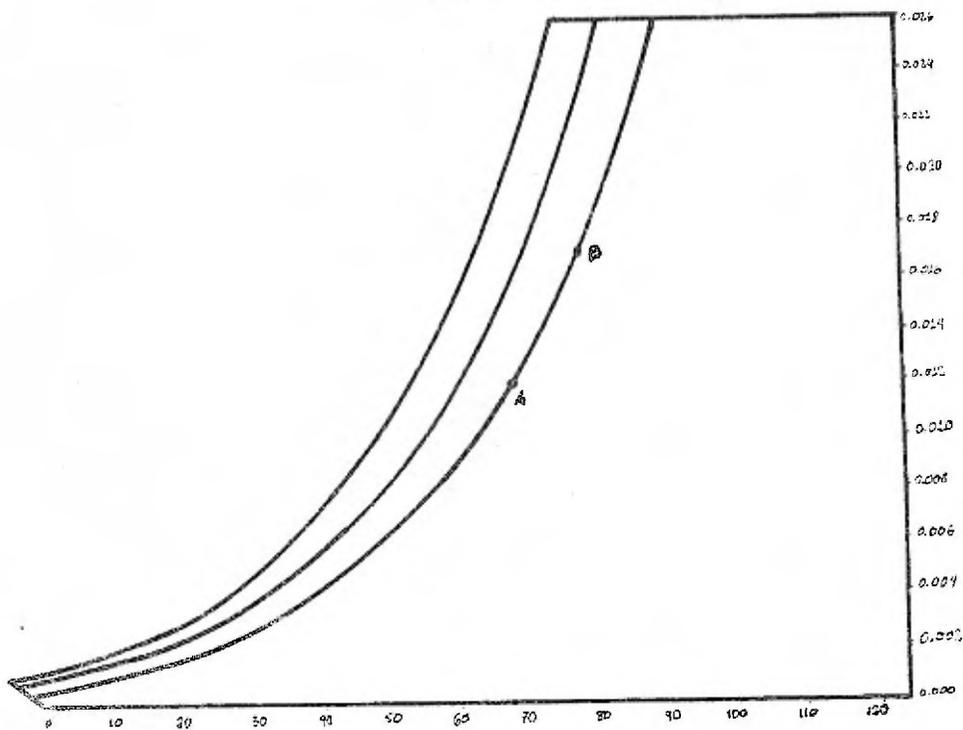
Las variaciones que sufre la temperatura, tanto en la cámara de secado como en la de enfriamiento, son lógicas y --acordes con la operación del secador.

Desde el punto de vista de la eficiencia, se definió como la relación del calor necesario para la evaporación del agua al calor total introducido al secador. La eficiencia





SECCDO



ENFRIAMIENTO

desde luego estará continuamente afectada a favor o en contra por los cambios climatológicos en el momento de la operación.

En el capítulo correspondiente a costos de operación, cabe mencionar que el factor determinante que eleva el costo, es el de los días anuales de operación. Como se ve se operan 150 días al año. Esto es debido a que se tienen temporadas - de cosecha de la cebada, las cuales exigen una determinada capacidad de secado, ya que la cebada no puede permanecer húmeda por mucho tiempo. Una forma de bajar los costos de operación, sería buscar otro tipo de productos que se cosechen en otras temporadas, para aprovechar los tiempos en los cuales - no se está operando.

## BIBLIOGRAFIA

ANDERSON J.A. AND ALCOCK A. W.  
Storage of Cereal Grains and their Products  
American Association of Cereal Chemists  
1954

ARIES AND NEWTON  
Chemical Engineering Cost Estimation  
Mc Graw Hill Co  
1955

FOUST ALAN S.  
Principios de Operaciones Unitarias  
Cía. Editora Continental, S. A.  
1a. Edición  
1961

GERSHOI A. P. AND SAMOCHETOV V.F.  
Grain Drying and Grain Driers  
I. P. S. T. 3a. Edición  
1960

HEATING VENTILATING AIR CONDITIONING GUIDE  
American Society of Heating and Air  
Conditioning Engineers Inc.  
35a. Edición  
1957

PERRY JOHN H.  
Chemical Engineering Hand Book  
Mc Graw Hill Co.  
4a. Edición  
1963

RAMIREZ G. MARCOS  
Almacenamiento y Conservación de Granos  
y Semillas  
Compañía Editorial Continental, S. A.  
1a. Edición  
1966

STROCK C. AND KORAL R.  
Hand Book of Air Conditioning Heating  
and Ventilating  
The Industrial Press  
2a. Edición  
1959

EDITORIAL "JUAREZ"  
Ciprés 134-1  
Tel. 547-70-21