

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades

BIBLIOTECA  
DE LA  
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

EVALUACION Y OPTIMIZACION DE UNA TORRE  
DE SULFITACION EN UN INGENIO AZUCARERO

CARLOS ESTUARDO SINIBALDI PALACIOS

Guatemala

1992



EVALUACION Y OPTIMIZACION DE UNA TORRE  
DE SULFITACION EN UN INGENIO AZUCARERO

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades



EVALUACION Y OPTIMIZACION DE UNA TORRE  
DE SULFITACION EN UN INGENIO AZUCARERO

CARLOS ESTUARDO SINIBALDI PALACIOS

Trabajo de investigación presentado para optar  
al grado académico de Licenciatura en  
Ingeniería Química

Guatemala

1992

Vo. Bo.:

(f)

Ingeniero Oscar Gil  
Asesor

Tribunal:

(f)

Ingeniero Oscar Gil Girón



(f)

Ingeniero Eduardo Calderón



(f)

Ingeniero Arturo Estrada

Fecha de aprobación: 9 de Noviembre de 1992.

## DEDICATORIA

A Dios

A mis padres

Carlos Enrique Sinibaldi Estrada

Sonia Luz Palacios de Sinibaldi

A mis hermanos

José Alejandro,

Luis Emilio y

Aldo Enrique

A mis abuelos

Octavio Javier Palacios F.

Marta Villatoro de Palacios

Enriqueta Estrada vda. de Sinibaldi

A mis familiares

A mis maestros

A mis compañeros y amigos

#### AGRADECIMIENTO

Agradezco a la empresa Ingenio Concepción S. A., a su personal técnico, operativo y en especial al Laboratorio de Control de Calidad, por los consejos y facilidades prestadas para la elaboración de este trabajo. Al Ing. Oscar Gil Girón por su asesoría y a todas aquellas personas que desinteresadamente colaboraron para su realización.

## CONTENIDO

	Página
RESUMEN	ix
I. INTRODUCCION	1
II. OBJETIVOS	3
III. MARCO TEORICO	4
IV. METODOLOGIA	
A. Torre de sulfitación	
1. Metodología experimental	12
2. Control de combustión de azufre	13
3. Tasa de flujo de jugo diluido	14
4. Análisis de dióxido de azufre y oxígeno en los gases	14
B. Muestreo	
1. Jugo diluido y sulfitado	15
2. Gases que entran y salen de la torre	16
C. Metodos de análisis de laboratorio	
1. Análisis de jugo	16
2. Análisis de azufre	18
D. Modelo de cálculos	
1. Torre de sulfitación	19
2. Análisis de laboratorio	20

E.	Equipo utilizado	
1.	Torre de sulfitación	23
2.	Análisis de laboratorio	24
F.	Diagramas	
1.	Representación en bloque	26
2.	Diagrama de flujo	27
V.	RESULTADOS Y DISCUSION	28
VI.	CONCLUSIONES	42
VII.	RECOMENDACIONES	44
VIII.	BIBLIOGRAFIA	47
	APENDICES	
A.	Cálculos	50
B.	Datos, resultados y gráficas	54
C.	Figuras y vistas	65

## LISTA DE GRAFICAS

GRAFICA	Página
GRAFICA No.1: Dif. Variables vrs Flujo (S:60lb/h;R1)	30
GRAFICA No.2: Dif. Variables vrs Flujo (S:60lb/h;R2)	30
GRAFICA No.3: Dif. Variables vrs Flujo (S:70lb/h;R1)	31
GRAFICA No.4: Dif. Variables vrs Flujo (S:70lb/h;R2)	31
GRAFICA No.5: Cambio en Pureza vrs Flujo de jugo (R1)	33
GRAFICA No.6: Cambio en Pureza vrs Flujo de jugo (R2)	33
GRAFICA No.7: Cambio en Sulf. vrs Flujo de Jugo (R1)	34
GRAFICA No.8: Cambio en Sulf. vrs Flujo de Jugo (R2)	34
GRAFICA No.9: % de Absorción SO <sub>2</sub> vrs Flujo (R1)	35
GRAFICA No.10: % de Absorción SO <sub>2</sub> vrs Flujo (R2)	35
GRAFICA No.11: Comportamiento Hidráulico de la Torre	38
GRAFICA No.12: Dif. Variables vrs Flujo (S:80lb/h;R1)	61
GRAFICA No.13: Dif. Variables vrs Flujo (S:80lb/h;R2)	61
GRAFICA No.14: Dif. Variables vrs Flujo (S:90lb/h;R1)	62

GRAFICA No.15: Dif. Variables vrs Flujo (S:90lb/h;R2)	62
GRAFICA No.16: Flujo de Jugo Diluido (Fecha: 08/03/92)	63
GRAFICA No.17: Flujo de Jugo Diluido (Fecha: 07/03/92)	64

#### LISTA DE TABLAS

TABLA	Página
DATOS	
TABLA No.1: Tasa de Combustión: 60lb/h	55
TABLA No.2: Tasa de Combustión: 70lb/h	55
TABLA No.3: Tasa de Combustión: 80lb/h	56
TABLA No.4: Tasa de Combustión: 90lb/h	56
TABLA No.5: Datos Generales Promedio Torre de Sulfitación	57
RESULTADOS	
TABLA No.6: Tasa de Combustión: 60lb/h	58
TABLA No.7: Tasa de Combustión: 70lb/h	58
TABLA No.8: Tasa de Combustión: 80lb/h	59
TABLA No.9: Tasa de Combustión: 90lb/h	59

TABLA No.10: % $SO_2$ Teórico para cada Tasa de Combustión de Azufre	60
---	----

#### LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Página
FIGURA No.1: Horno de Azufre de Construcción Usual	9
FIGURA No.2: Representación en Bloque	26
FIGURA No.3: Esquema Simplificado de la Fabricación de Azúcar	27
FIGURA No.4: Vista Frontal	66
FIGURA No.5: Vista Lateral	67
FIGURA No.6: Detalle de Platos Distribuidores	68
FIGURA No.7: Detalle de Rejillas (bandejas)	68
VISTA No.1: Exterior Inferior	69
VISTA No.2: Interior	69
VISTA No.3: Exterior Superior	70
VISTA No.4: Superior	70

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es la evaluación y optimización de la operación de una torre de sulfitación en un ingenio azucarero. Para desarrollarlo se hizo variar cuatro tasas de combustión de azufre a diferentes flujos de jugo, tomándose como indicadores de éxito, propiedades características del jugo (pureza, acidez, pH, sulfitos y transmitancia) y composición del gas (porcentaje de oxígeno y de dióxido de azufre).

De los resultados obtenidos se deduce que el cambio entre pureza y contenido de sulfitos para el jugo diluido y sulfitado sigue el mismo patrón: aumenta con el flujo de jugo. Para acidez, pH y transmitancia, no se obtuvo un patrón de comportamiento definido y su variación fue insignificante.

Se encontró que la tasa de combustión de azufre óptima para la torre de sulfitación se encuentra entre 70 y 80 lb/h, para valores de flujo de jugo diluido mayores de 5 Ton/min, con una relación líquido/gas de 236. Esta condición óptima corresponde a la mayor purificación del jugo, clarificación y absorción de dióxido de azufre (emisión mínima en los gases).

A flujos mayores de 5 Ton/min se obtuvo una constancia en la absorción de dióxido de azufre, indicador de la capacidad

máxima de diseño de la torre.

Adicionalmente se estudió el horno de combustión de azufre por las repercusiones de éste en el proceso.

## I. INTRODUCCION

El procedimiento de sulfitación es de uso generalizado en la fabricación de azúcar blanca para la clarificación y purificación del jugo de caña. En el proceso, se pone en contacto el jugo diluido de caña con el gas de dióxido de azufre, con el fin de transformar sustancias colorantes del jugo para facilitar la elaboración de azúcar blanca.

El presente trabajo consistió en un estudio de evaluación y optimización de la operación de una torre de sulfitación en un ingenio azucarero guatemalteco. La información que se presenta es representativa de la zafra 91/92 (enero-mayo de 1992).

Para la evaluación y optimización se hizo variar el flujo de jugo diluido entrando a la torre, a diferentes tasas de combustión de azufre. Los indicadores de éxito fueron indirectos, ya que se refieren a propiedades del jugo diluido y sulfitado (pureza, acidez, pH, sulfitos y transmitancia) y a composiciones del gas que entra y sale de la torre (%  $O_2$  y  $SO_2$ ). Asimismo, se midieron otras propiedades del arreglo de sulfitación para caracterizar la torre y comparar con valores indicados en la bibliografía.

La importancia del trabajo radica en que la sulfitación tiene repercusiones importantes en etapas posteriores del proceso (p. ej. defecación, cocción de las masas, entre

otras) y, finalmente, en la calidad del azúcar (color y pureza). En la industria azucarera, sin embargo, no se le ha dado la importancia que merece, ya sea por falta de interés por la contaminación industrial (emisión de gases de dióxido de azufre), por carecer de medios técnicos de control, por descuido y/o desconocimiento.

Igualmente importante es el factor económico, ya que la sulfitación, además que es un rubro importante en la producción de azúcar blanca, también influye en el consumo de otros productos químicos (p. ej. cal, utilizada en la alcalinización del jugo, etapa posterior a la sulfitación).

Lo interesante del proceso radica en la complejidad de las reacciones involucradas, al número y diversidad de las variables consideradas y a la variabilidad con que éstas se presentan.

## II. OBJETIVOS

### A. Objetivo General

1. Determinar las condiciones óptimas de operación de la torre de sulfitación, usando como criterio propiedades del jugo y composición de gases.

### B. Objetivos Especificos

1. Controlar las tasas de combustión de azufre, variando la caída de presión total de la torre.
2. Establecer la tasa de combustión de azufre óptima, para cada flujo de jugo.
3. Determinar si existe un flujo óptimo para la columna.
4. Determinar la dependencia del escape (emisión) de dióxido de azufre, con base en la tasa de combustión de azufre y flujo de jugo diluido, con el objetivo de hacer mínima la emisión para una calidad dada de azúcar.

### III. MARCO TEORICO

El procedimiento de sulfitación ha sido empleado por años en la clarificación del jugo de caña, particularmente en la producción de azúcar blanca para consumo directo. Se utiliza sin embargo, en menor proporción, para la producción de azúcar cruda.

Los procesos de sulfitación están sujetos a muchas modificaciones. Las variaciones pueden incluir las siguientes:

1. Modificaciones en la secuencia de adición de cal y dióxido de azufre ( $SO_2$ ) (encalando primero, sulfitando primero, adición simultánea de cal y gas, procedimientos fraccionados).
2. Modificaciones de temperatura (sulfitando en frío o caliente, calentamiento en etapas).
3. Adición de reactivos (batch, continuos, con adición ya sea manual o automática). (1)

Aunque estas variables permiten muchas combinaciones, en Guatemala y Centroamérica se aplica más comúnmente la sulfitación continua, en frío, antes de alcalinizar (sulfodecalcación). En esta última modalidad, el gas de dióxido de azufre se hace pasar en contracorriente con el jugo frío, utilizando una torre de platos o columna de sulfitación, hecha de madera (cedro o similar), en la que el

gas es succionado desde el fondo de la torre a través de cortinas de jugo, por medio de un eyector de vapor. (2)

Las condiciones de contacto del gas deben ser tales que la acidez varíe de 3.0-4.0 ml. OH- 0.1N para 10 ml de jugo, el pH de 3.8-4.3. Seguido se hace una alcalinización a un pH de 6.8 a 7.2 y se calienta a una temperatura de 100 a 105°C, para después efectuar una decantación. Una sulfodefecación es aconsejable cuando la caña contiene muchos azúcares reductores o ha formado dextranas. (3)

#### A. Acción del anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>) sobre el jugo.

Las principales propiedades y acciones del dióxido de azufre sobre el jugo se presentan a continuación.

##### 1. Acción purificante.

Al aplicar el anhídrido sulfuroso se forman masas voluminosas de flóculos que sedimentan por convección debido a diferencia de densidades. Los precipitados formados son, principalmente, materia orgánica. (4)

##### 2. Acción decolorante.

Se debe principalmente a su propiedad reductora, basada en la liberación de hidrógeno. (4)

Zerban indica que el efecto decolorante obtenido es probablemente el resultado de la reacción del dióxido de azufre con los azúcares reductores, bloqueando la función carbonilo, esencial para la formación de caramelo y

melanoidina. La decoloración del jugo es temporal, pues el jugo sulfitado expuesto al aire se oscurece por oxidación. Asimismo previene o disminuye la formación de color en etapas posteriores del proceso, evaporación y cristalización. (2)

3. Acción fluidificante.

El ácido sulfuroso reduce la viscosidad del jugo por la precipitación de ciertos coloides y fraccionamiento de algunas sales de cal, mejorando la decantación y la calidad del jugo para evaporación y cocimiento, produciendo de esa forma, masas más agotadas. (2)

Nota: El dióxido de azufre es comúnmente conocido como ácido sulfuroso, pero realmente es su anhídrido.

4. Acción preservativa.

Siendo el anhídrido sulfuroso un fuerte antiséptico, evita el desenvolvimiento de microorganismos perjudiciales. (4)

5. Acción precipitante.

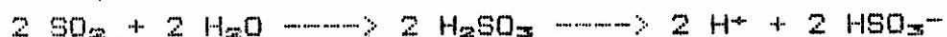
Precipita algunos coloides que son:

- a) Hidrofóbicos: por destrucción del equilibrio eléctrico que los mantiene en suspensión. Son de naturaleza inorgánica: compuestos de ácido silícico, hidróxido de aluminio y de hierro. Importante, pues muchos de ellos son colorantes. (5)

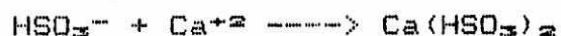
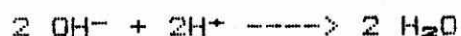
- b) Hidrofílicos: por eliminación de moléculas de agua o por acción del calor. Son orgánicos como la hemicelulosa, sustancias nitrogenadas, amido, etc. (4)
- c) Adsorción: materia sólida con gran área superficial como el fosfato de calcio, precipitados de sílica, hierro y aluminio, adsorben los coloides producidos en la purificación del jugo. (4)

La acción precipitante ocurre por la reacción entre el anhídrido sulfuroso y la cal, dando formación de una sal poco soluble en medio neutro o alcalino, sulfito de calcio ( $\text{CaSO}_3$ ). (3)

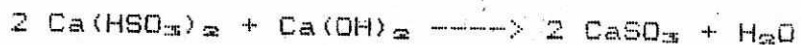
Las reacciones que ocurren durante el proceso son las siguientes: cuando el gas se burbujea en el jugo, reacciona con agua, formando ácido sulfuroso ( $\text{HSO}_3^-$ ).



Con la adición de cal se adicionan iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{OH}^-$ , que a pH bajo, da la formación de bisulfito de calcio ( $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$ , que es soluble.



Al continuar la operación de neutralización, se obtiene sulfito de calcio, que precipita.



Una inadecuada neutralización del  $\text{SO}_2$  por la cal producirá bisulfito, que en etapas posteriores de concentración se descompondrá dando  $\text{CaSO}_3$ , el cual se incrustará en los evaporadores.

Cuanto más alta sea la concentración del ión  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{SO}_3^{-2}$ , más completa será la precipitación de  $\text{CaSO}_3$  después del cocimiento.

#### 6. Acción inversiva.

El anhídrido sulfuroso puede producir una inversión de la sacarosa en glucosa y levulosa.

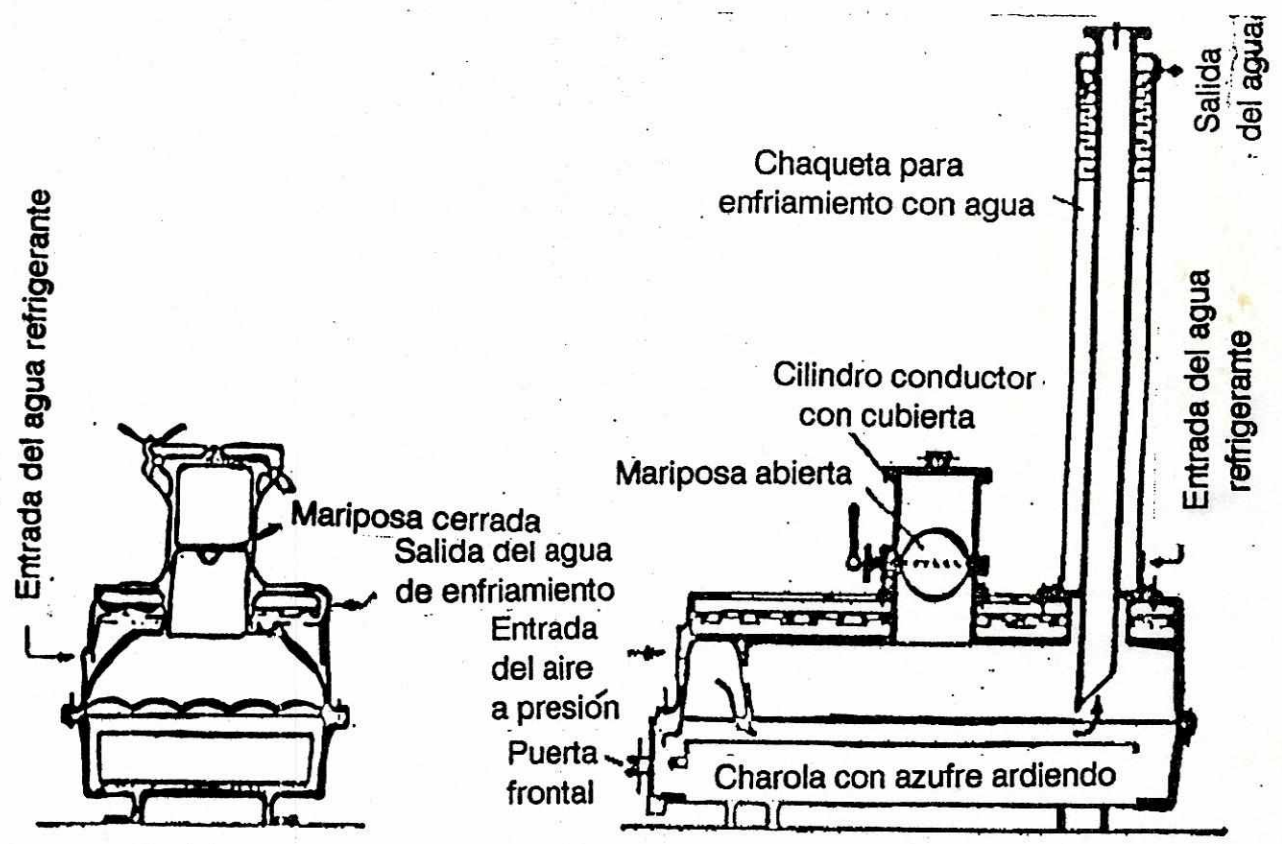


La intensidad de la inversión es función del pH, tiempo y temperatura. Basado en esto, se recomienda la sulfitación a baja temperatura, rápidamente. Para un pH de 3.8 a 4.0, se debe efectuar la sulfitación entre 20 a 30 °C. (3)

#### B. Obtención de dióxido de azufre.

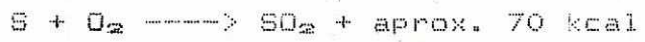
Generalmente el gas de  $\text{SO}_2$  se genera quemando azufre (S) comercial en una corriente de aire. La combustión se realiza mayormente en hornos fijos, intermitentes (Figura 1). El azufre funde a 119 °C a un líquido amarillo claro; a medida que aumenta la temperatura, el líquido cambia a un color rojo

DESCRIP. (6)



(Figura No. 1: Horno de azufre de construcción usual)

Químicamente, la combustión del azufre en aire se representa por:



Si el aire necesario para la oxidación fuera el estequiométrico, resultaría un gas con 21% SO<sub>2</sub> (vol). En

hornos comunes, sin embargo, se requiere un exceso considerable de aire, por lo que el gas producido contiene sólo 6 a 14 %  $\text{SO}_2$ , la parte restante siendo oxígeno y nitrógeno. (2)

Por las características exotérmicas de la reacción, se necesita que los hornos y tuberías se enfrién continuamente por camisas de agua, a fin de bajar la temperatura y en lo posible, la sublimación excesiva (paso directo sólido-gas) y evaporación (líquido-gas) a la que tende el azufre, pues aunque este proceso debe realizarse para poder efectuar la combustión, no debe ser excesivo, a fin de lograr que todo el material se queme y no se deposite posteriormente. La sublimación del azufre en las tuberías de gas  $\text{SO}_2$  es causada por una combustión incompleta del vapor de azufre en el horno. (5)

La formación de pequeñas cantidades de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) no se puede evitar en hornos comunes. Se debe a la reacción:



La formación del  $\text{SO}_3$  se promueve por una gran concentración de  $\text{O}_2$ , por una relativa alta temperatura del gas y por catalizadores, p. ej., óxido de hierro. Es conveniente que el aire empleado tenga una humedad baja que evite la deposición de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ( $\text{SO}_3$  + humedad del

aire), en las tuberías y equipo, recomendándose el uso de cal viva como agente desecante, aunque la cantidad y frecuencia del cambio dependerá de las condiciones existentes. A temperaturas bajo 200 °C, la tasa de reacción es tan lenta, que practicamente no se forma  $SO_3$ .

Algunas desventajas del  $SO_3$  son:

1. Cualquier  $SO_3$  que entra al jugo se transforma a sulfato de calcio ( $CaSO_4$ ), aumentando el contenido de sales de calcio, que tienden a depositarse posteriormente como incrustaciones, en las superficies de intercambio de calor.
2. Corrosión de partes de hierro por formación de  $H_2SO_4$ .
3. Cualquier  $SO_3$  producido es un consumo inútil de azufre. Una conversión a  $SO_3$  de 1.5% de todo el azufre quemado se considera bajo para hornos comunes de azufre.

Según Hugot (5), la temperatura del horno debe estar entre 320 a 350 °C, quedando un gas a la salida de 250 a 300 °C, posteriormente, este gas debe enfriarse a 100-200 °C.

#### IV. METODOLOGIA

##### A. Torre de Sulfitación

###### 1. Metodología experimental.

La tasa de flujo se hizo variar de 3.29 a 5.99 Ton/min. A cada flujo de jugo se hizo variar la tasa de combustión de azufre de 60 a 90 lb/h. A cada tasa de combustión de azufre se mantuvo constante la caída de presión total a lo largo de la torre; ésta varió de 1 a 1.75 pulgadas de agua.

Para cada combinación de flujo de jugo y tasa de combustión de azufre, se realizaron los siguientes análisis tanto al jugo diluido como al sulfitado: °Brix, °Pol, acidez, pH, sulfitos y transmitancia. Al mismo tiempo, se realizó para cada juego de condiciones, análisis de dióxido de azufre para el gas entrante y saliente de la torre. Análisis periódicos de oxígeno fueron también realizados.

Se determinaron de igual manera valores promedio característicos de operación a cada tasa de combustión de azufre, entre éstos: velocidad del

gas saliendo de la torre y temperatura del gas (en la cámara de combustión del horno, a la entrada y salida de la torre). Igualmente, se midió el flujo y temperatura del agua que entra y sale de la chaqueta de enfriamiento de los gases provenientes del horno quemador de azufre. Es de hacer notar que el agua de salida de ésta enfriaba también la cámara de combustión del horno.

Finalmente, se realizaron análisis de control de calidad representativos a dos diferentes calidades de azufre utilizados a lo largo de toda la zafra. Sin embargo, no se hizo distinción respecto del uso de un determinado azufre para un juego específico de condiciones.

## 2. Control de combustión de azufre.

La variable medida fue la caída de presión total a lo largo de la torre, indicada por la diferencia en las lecturas de dos manómetros diferenciales, localizados a la entrada y salida de la torre. La variable manipulada fue el flujo de vapor al eyector, el cual controla el flujo de aire, que determina a su vez la tasa de combustión de azufre. Empíricamente, por observación visual, se determinó la caída de presión total a la cual se quemaba por completo una cantidad dada de azufre y se

mantuvo constante para cada tasa de combustión.

3. Tasa de flujo de jugo diluido.

La tasa de flujo de jugo estuvo determinada por la tasa de molienda de caña y la cantidad de agua de maceración agregada en los molinos. Esta variación fue amortiguada por un tanque intermedio de 1000 galones. La tasa de flujo de jugo se midió en un medidor de flujo magnético, el cual se calibró periódicamente. El valor de flujo de jugo fue computado a través de una gráfica circular de 24 horas. (Ver sección de cálculos).

4. Análisis de dióxido de azufre y oxígeno en los gases.

Se utilizó el mismo método para dióxido de azufre y oxígeno: absorción del gas, por un fluido absorbente, químicamente selectivo. Para oxígeno, se utilizó la solución original del analizador. Para dióxido de azufre se utilizó el analizador de  $\text{CO}_2$ , con solución de soda cáustica al 36%, la cual se reemplazó cada 25 muestras aproximadamente. El equipo se calibró antes de cada medición igualándolo a la atmósfera. La muestra se succionó colocando el medidor contracorriente al flujo de gases, asegurando sellar posibles fugas, ya que la torre se encontraba al vacío. Finalmente, se hizo

reaccionar el gas con el fluido absorbente. El porcentaje de oxígeno o dióxido de azufre se leyó directamente en su escala y correspondió al cambio volumétrico obtenido.

## B. Muestreo

### 1. Jugo diluido y sulfitado.

El muestreo fue desarrollado por dos operadores, los cuales recolectaron la muestra en un recipiente de acero inoxidable. La diferencia de tiempo entre la recolección de ambas, no fue mayor de tres minutos. La muestra de jugo diluido se obtuvo de la misma línea de éste, antes de entrar a la torre. La muestra de jugo sulfitado se obtuvo del tanque receptor de éste, en la parte baja de la torre (Ver Vista No.1, Apéndice C). En la recolección de ambas muestras se tuvo el cuidado de drenar suficientemente la línea, así como de enjuagar el recipiente colector, con el fin de asegurar representatividad e integridad de la muestra. La tasa de muestreo fue de cada cuatro horas. Finalmente, los análisis se comenzaron en menos de treinta minutos, luego de llevada la muestra al laboratorio, para evitar

posible degradación de la misma.

2. Gases que entran y salen de la torre.

El muestreo de gases se desarrolló al mismo tiempo que el de ambos jugos, siendo menos periódico el análisis de oxígeno. El gas entrante se midió en la tubería de gases, justo antes de ingresar a la torre. El gas saliente se midió debajo del eyector de vapor (Ver Vista No.4, Apéndice C). En ambos casos, se tuvo el cuidado de sellar fugas de aire. Debido a limitaciones de equipo y a duración del análisis (aproximadamente tres minutos), la diferencia de tiempo entre la medición de ambos gases no fue mayor de diez minutos.

C. Métodos de análisis de laboratorio

1. Análisis de jugo.

a. Grados Brix del jugo.

En el refractómetro digital se colocó aproximadamente cinco gotas de la muestra homogenizada. Se obtuvo directamente la lectura de grados Brix y el valor de la temperatura y se corrigió el grado Brix por temperatura.

b. Grados Pol.

Se tomó una muestra de jugo, a la cual se le agregó 0.5 g de subacetato de plomo. Se agitó y se dejó clarificar. Se filtró por gravedad y el filtrado obtenido se leyó en el polarímetro, en el que se utilizó un tubo de 20 cm de largo. Se corrigió de acuerdo a la lectura polarimétrica obtenida. Con esto se obtuvo la sacarosa del jugo.

c. Acidez total.

Se midió 10 mL de la muestra en un Erlenmeyer. Se agregó 25 mL de agua destilada y 4 gotas de fenolftaleína. Se valoró con una solución de hidróxido de sodio 0.1 N. El valor de la acidez es igual al volumen del titulante gastado, en mililitros.

d. Sulfitos en jugo.

A 50 mL de la muestra se le agregó 2 mL de ácido clorhídrico 1.0 N y 1 mL de solución de almidón al 0.1%. La mezcla resultante se tituló con una solución N/126 de yoduro-yodato de potasio hasta el punto final (color azul). Las partes por millón de sulfitos se obtienen multiplicando el volumen (en mililitros) de titulante gastado, por diez. (Nota: ver cálculos de análisis en

sección de cálculos)

d. Transmitancia del jugo.

La muestra se filtró por gravedad, utilizando para esto papel filtro Gauge 226. Se pesó 26.0 g de jugo filtrado y se agregó 26.0 g de agua destilada, luego se agitó. A esta solución se le leyó la transmitancia a 640 nm, calibrando previamente con agua destilada.

2. Análisis de Azufre

a. Residuos de ignición.

Se tomó una muestra de 1.0000 g de azufre en un crisol llevado a masa constante. Se calentó hasta quemarlo y se enfrió. El residuo se disolvió con 1 mL de ácido sulfúrico concentrado y se calentó fuertemente hasta la desaparición de humos blancos. Luego, con cuidado se calcinó en una mufla a una temperatura aproximada de 800 °C. Se dejó enfriar y se pesó el residuo con una exactitud de 0.0001 g.

b. Acidez como porcentaje de ácido sulfúrico.

En un beaker de 400 mL se pesó 100.0 g de muestra de azufre y se mojó con 50 mL de metanol neutro. Se

agregó 200 mL de agua destilada fresca. Se colocó en una estufa y se dejó hervir fuertemente, con agitación cada 15 min. Se filtró en un embudo Buchner y se lavó. El filtrado se tituló con una solución de hidróxido de sodio 0.1 N a un pH de 7.0 con el uso de un potenciómetro. Se corrigió con un blanco titulado en las mismas condiciones.

3. Análisis de dióxido de azufre (OPCIONAL).

a. Método Iodométrico

Se colecta el gas burbujeándolo en una solución de yoduro-yodato. El dióxido de azufre y el ácido sulfhídrico reaccionan con el yodo. El yodo en exceso se titula con solución estándar de tiosulfato de sodio.

D. Modelo de cálculos.

1. Torre de sulfitación.

a. Flujo de jugo: variación leve.

Se tomó el valor de flujo que se observa directamente.

Ejemplo: ver Gráfica No. 16 del 08/03/92 en Apéndice B.

Hora : 02:00 pm

Flujo: 4.5254 Ton/min.

b. Flujo de jugo: variación discreta.

Se observó el mayor y menor valor de flujo para una misma hora. Los dos valores anteriores se promediaron aritméticamente.

Ejemplo: Ver Gráfica No.17 del 07/03/92 en Apéndice B.

Hora : 01:00 am

Máximo: 5.7596 Ton/min

Mínimo: 4.9368 Ton/min

$$\text{Flujo} = \frac{\text{Máximo} + \text{Mínimo}}{2} = 5.3482$$

Flujo = 5.3482 Ton/min

2. Análisis de laboratorio.

a. Análisis de jugo.

i. Corrección de grados Brix.

Los grados Brix observados en el refractómetro se corrigieron por temperatura de

acuerdo a la siguiente ecuación:

$$^{\circ}\text{Brix corr} = ^{\circ}\text{Brix obs.} + (T - 20) \times 0.0062 \quad (T = ^{\circ}\text{C})$$

Nota: La anterior ecuación es válida para los rangos:

- $^{\circ}\text{Brix}$ : 10.1 - 20.0
- Temperatura: 20 - 30  $^{\circ}\text{C}$

(En general, los datos caen en ambos rangos).

ii. Corrección de grados pol.

Los grados pol se corrigieron con base en la lectura polarimétrica obtenida, aplicando el factor de corrección de la siguiente tabla.

Grados Pol	Factor de corrección
<46.6	0.2470
46.7-50.6	0.24646
50.7-53.2	0.245641
53.3-55.0	0.245078
55.1-57.8	0.24479
57.9-59.9	0.243985
60.0-66.9	0.24298
67.0-68.9	0.24198
69.0-71.9	0.2415
72.0-75.9	0.2405
>76.1	0.2395

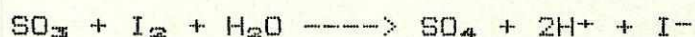
$$^{\circ}\text{Pol corr.} = \text{lect. pol.} \times \text{fact. corr.}$$

## iii. Cálculo de pureza.

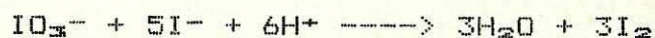
$$\text{Pureza} = \frac{^{\circ}\text{Pol corr.}}{^{\circ}\text{Brix corr.}} \times 100$$

## iv. Determinación de sulfitos.

Reacción química de análisis:



Se utiliza una solución de yoduro-yodato de potasio, la cual es :



El  $\text{SO}_3^{-2}$  se determina como  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  (P.Eq.=P.F./2 = 126.04).

Volumen de muestra a titular: 50mL

Titulante: solución N/126  $\text{I}^-/\text{IO}_3^-$  = 0.00794 N.

ppm  $\text{SO}_3^{-2}$  = mL  $\text{I}^-/\text{IO}_3^-$  x 10 (\*)

$$(*) \text{ ppmSO}_3^{-2} = \text{mL } \text{I}^-/\text{IO}_3^- \times \frac{0.0794 \text{ meq } \text{I}^-/\text{IO}_3^-}{\text{mL}} \times$$

$$\frac{126.04\text{g } \text{SO}_3^{-2}}{2000\text{meq } \text{I}^-/\text{IO}_3^-} \times \frac{1000\text{mg}}{1\text{g}} \times \frac{1000\text{mL}}{50 \text{ mL}} \times \frac{1}{1\text{L}}$$

E. Equipo utilizado.

1. Torre de sulfitación.

a. Medidor de flujo magnético (jugo)

Marca: Fischer & Porter

Modelo: 10D 1465 CE 17 PD 224

Diámetro: 6 plg

Variabilidad: 100:1

Precisión:  $\pm 1\%$

b. Registrador: 2 Plumas

Marca: Fischer & Porter

Modelo: 1340 Circular Chart

c. Anemómetro

Marca: Kurz

Rango: 0-6000 Pie/min

Tiempo de lectura: 4-8 seg

Precisión:  $\pm 2\%$

d. Analizador de gases (Fyrite)

Marca: Bacharach

Modelo: 11-7034

Rango: O<sub>2</sub>: 0-21%; CO<sub>2</sub>: 0-20%

e. Termómetros bimetálicos

Marca: ASHCROFT Industrial Thermometers

Rango: 50-350 °F (5x3x1/2 plg)

200-700 °F (5x4x1/2 plg)

2. Análisis de laboratorio

a. Análisis de jugo

i. Refractómetro digital

Marca: ATAGO

Modelo: RX-1000

ii. Polarímetro

Marca: Rudolph Autopol

Modelo: IIS

iii. Polarímetro

Marca: Beckman Instruments, Inc.

Modelo: A 1088

Rango: 0-14

Precisión: ±0.1

## iv. Balanza

Marca: AND digital

Modelo: EK-120A

Capacidad: 120g

Precisión:  $\pm 0.01g$ 

BIBLIOTECA  
DE LA  
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

## b. Análisis de azufre

## i. Balanza analítica

Marca: Mettler

Modelo: H80

Capacidad: 160g

Precisión:  $\pm 0.1mg$ 

## ii. Mufla

Marca: Thermolyne

Modelo: 10500

Rango: 0-1200 °C.

## F. Diagramas

### 1. Representación en bloque: torre de sulfitación

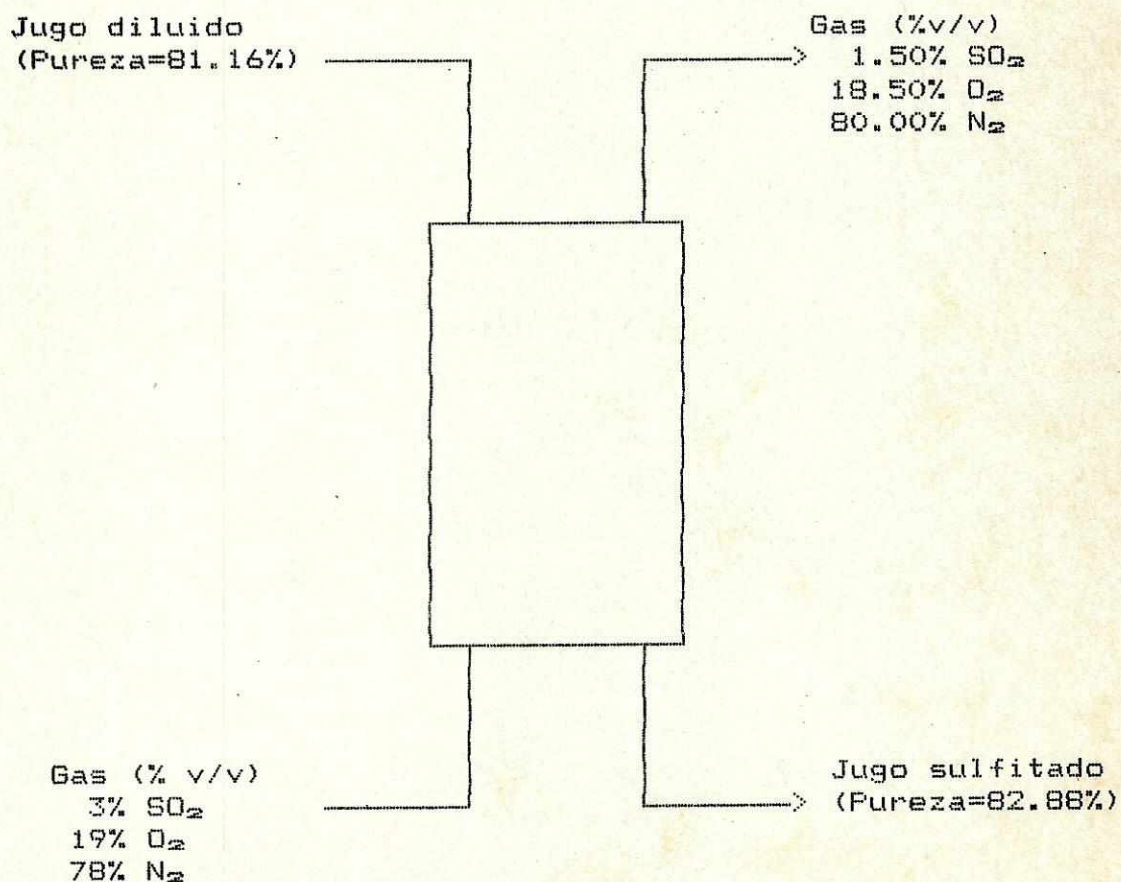
Ejemplo: Tasa de combustión: 60 lb/h S

Rango de pureza: R1

Flujo de jugo diluido: 3.29 Ton/min

(Ver tabla No.1)

Flujo volumétrico gases que salen: 216 pie<sup>3</sup>/min

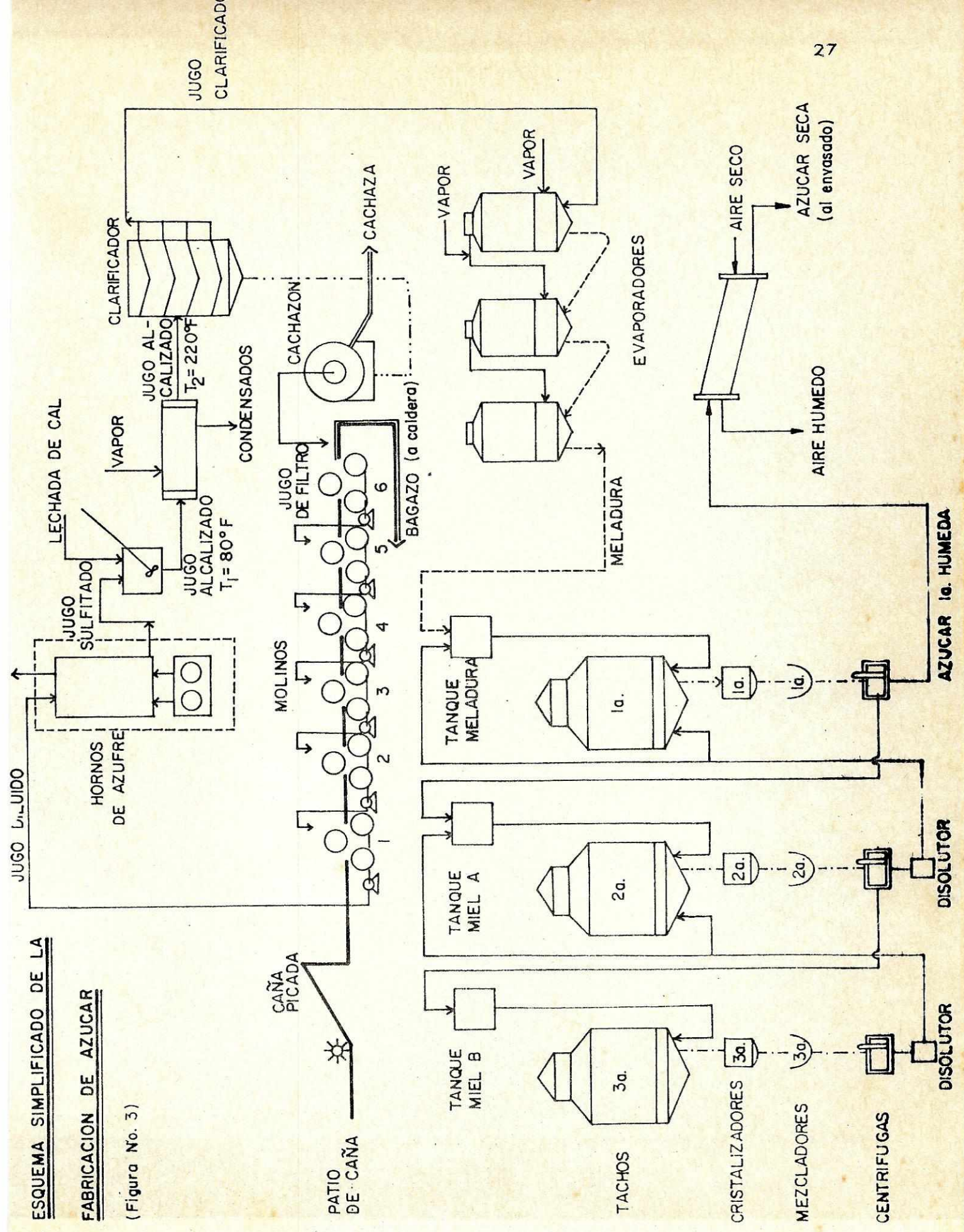


(Figura No.2)

Nota: Para fines prácticos, la concentración de SO<sub>3</sub> se puede despreciar, como se muestra en cálculos.

**ESQUEMA SIMPLIFICADO DE LA FABRICACION DE AZUCAR**

(Figura No. 3)



## V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Primeramente, se debe mencionar que debido al amplio rango de variación de calidades de jugo diluido que entra a la torre (referido a pureza), de aproximadamente 76 a 88%, fue necesario, para fines de cómputo, dividirlo en dos, llamados R1 y R2. Esta división permitió el estudio del efecto de la sulfitación a diferentes calidades de jugo.

Cabe notar que los resultados de los análisis son promedio de por lo menos tres muestras, por lo que tienen representatividad de lo ocurrido durante la zafra.

De los resultados de los análisis obtenidos se observa que el pH del jugo diluido se mantiene constante, alrededor de 5.4, mientras que la acidez del jugo no (varía de 1.0 a 1.9), lo que indica molienda de caña, ya sea de diferente maduración o de caña en descomposición, debido a su atraso después de cortada. Igualmente, la transmitancia del jugo diluido, varió de 1 a 4% (Ver tablas No. 1-4, Apéndice B).

Para la determinación de las condiciones óptimas de operación de la torre, se graficó la diferencia (cambio) en el valor de las variables (pureza, acidez, pH, sulfitos y transmitancia) para el jugo diluido y sulfitado, vrs. la tasa de flujo de jugo diluido que entra a la torre, para una tasa de combustión de azufre y un rango de purezas dado.

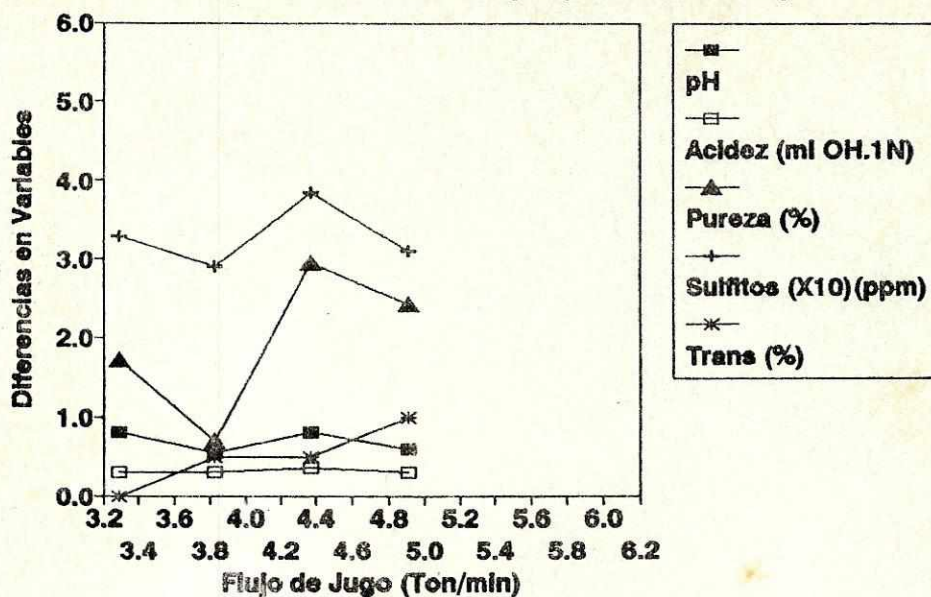
Al examinar las gráficas No. 1-4 para 60 y 70 lb/h de combustión de azufre, puede observarse que el cambio en pureza sigue generalmente el mismo patrón para ambas calidades de jugo y tiende a aumentar con mayores flujos de éste. Se observa al mismo tiempo un comportamiento muy parecido entre el cambio de pureza y contenido de sulfitos, lo que posiblemente indicaría una dependencia entre ambos y, por consiguiente, en la eficiencia de operación de la torre de sulfitación.

Parece existir un óptimo de operación común para la torre en particular (basado en los cambios similares para pureza y sulfitos), para ambas tasas de combustión, alrededor de 4.4 Ton/min. Para 70 lb/h de combustión de azufre, se observa, asimismo, otro máximo, para flujos de jugo mayores, alrededor de 6 Ton/min.

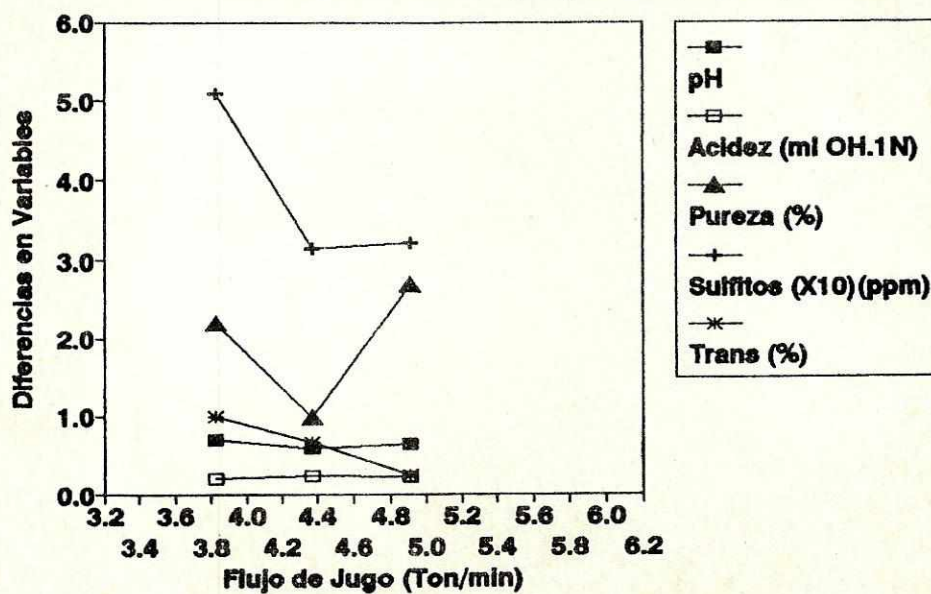
Ahora bien, para las tres variables restantes: pH, acidez y transmitancia; no se obtuvo una variación significativa, siendo su cambio correspondiente, ligero y constante. Cabe notar, sin embargo, que la dispersión de los datos excluye la certeza de alguna tendencia.

Se graficó además el cambio en dos de las variables más significativas (pureza y sulfitos) vrs. flujo de jugo diluido para las cuatro tasas de combustión de azufre y ambos rangos de pureza.

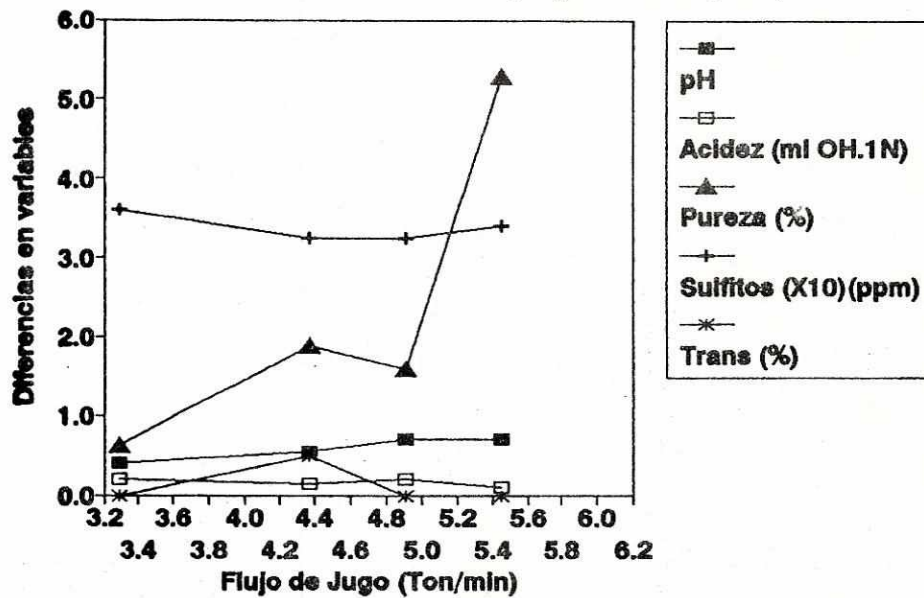
**Grafica No. 1**  
**Dif. Variables vrs Flujo (S:60lb/h; R1)**



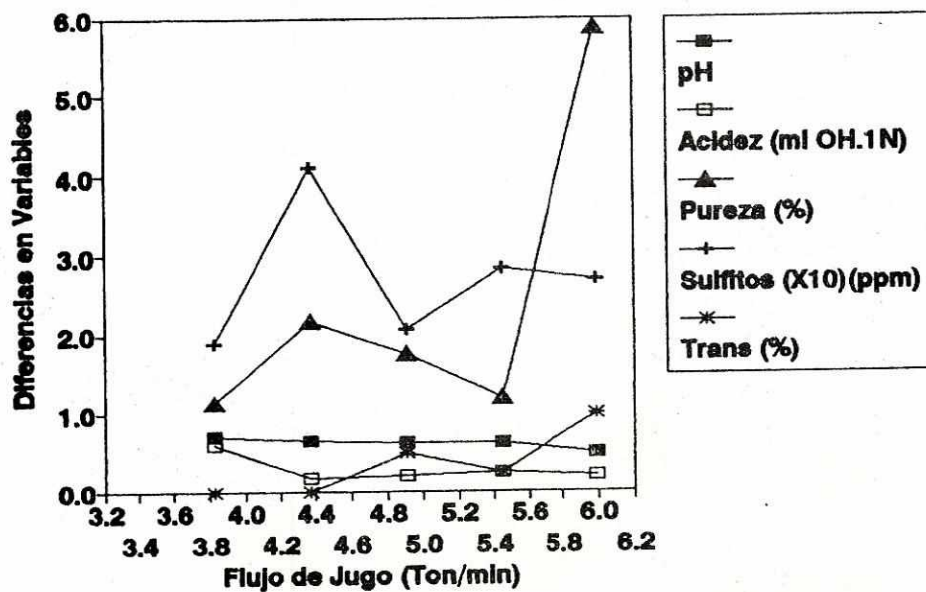
**Grafica No. 2**  
**Dif. Variables vrs Flujo (S:60lb/h; R2)**



**Grafica No. 3**  
**Dif. Variables vrs Flujo (S:70lb/h; R1)**



**Grafica No. 4**  
**Dif. Variables vrs Flujo (S:70lb/h; R2)**

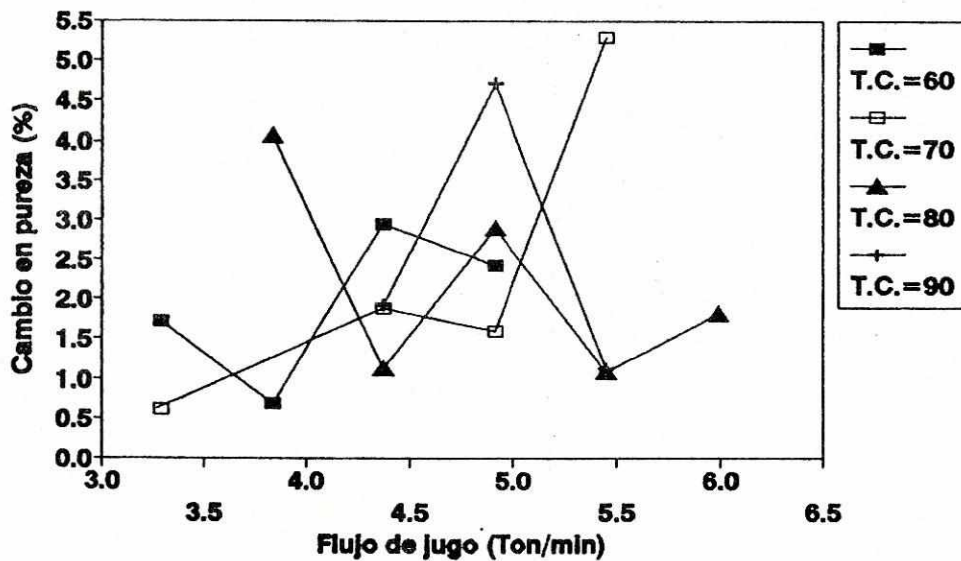


Se eligió el cambio de pureza de jugo (sulfitado menos diluido) como una variable representativa para la evaluación, debido a la acción purificante de la sulfitación sobre el jugo (corto plazo). Adicionalmente se eligió el contenido de sulfitos, por su importancia en la clarificación del jugo (largo plazo), ya que entre más alta es su concentración, más completa es la precipitación de sulfito de calcio después del cocimiento.

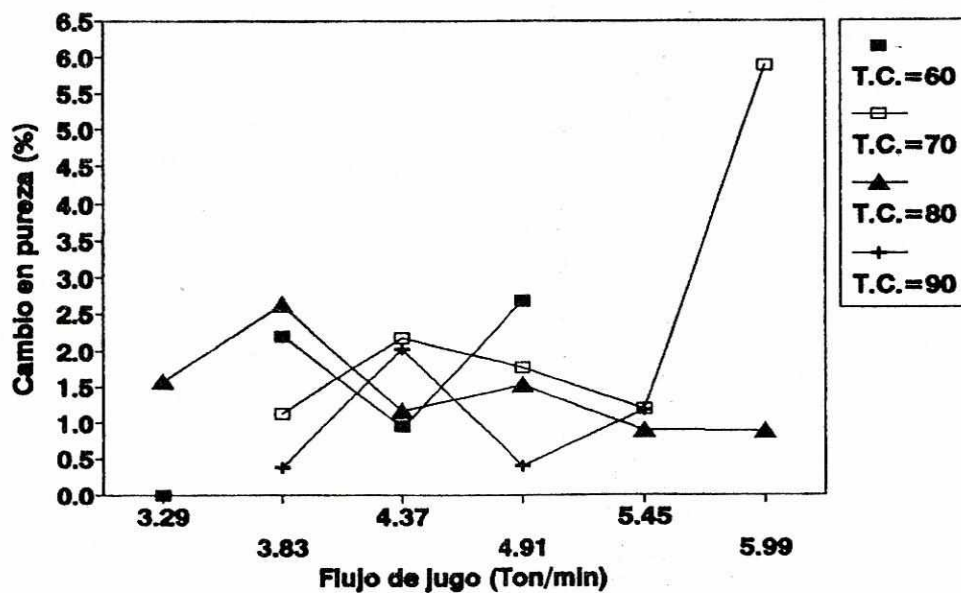
Después de analizar las gráficas No. 5-8 para el cambio en pureza y sulfitos, a ambas calidades de jugo, se deduce que desde el punto de vista tanto de purificación como de clarificación, sería aconsejable trabajar con tasas de combustión de azufre entre 70 y 80 lb/h, a flujos mayores de 5 Ton/min.

También se graficó el porcentaje de absorción de  $\text{SO}_2$  vs. flujo, para las dos calidades de jugo (Ver Gráficas No. 9 y 10). De los resultados obtenidos se observa que al aumentar la tasa de combustión de azufre para un flujo determinado, generalmente se aumenta el porcentaje de absorción de dióxido de azufre, hasta un máximo alrededor de 90%. Para ambas calidades de jugo, el máximo de absorción se alcanza a flujos mayores de 5.0 Ton/min, luego de lo cual se mantiene constante. Esto a su vez, concuerda con el máximo cambio en pureza y sulfitos, discutido anteriormente. Para mantener

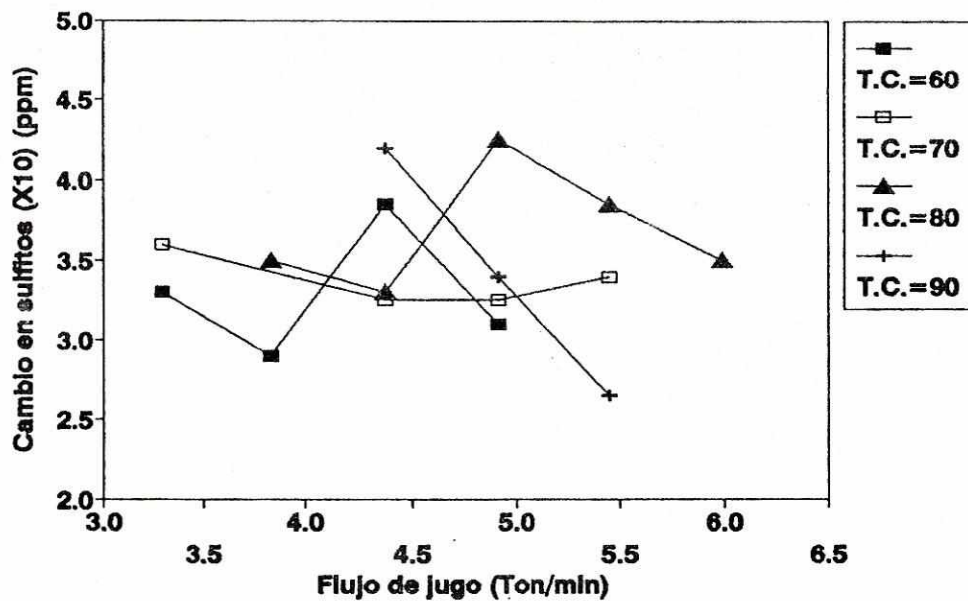
**Grafica No. 5**  
**Cambio en pureza vrs flujo de jugo (R1)**



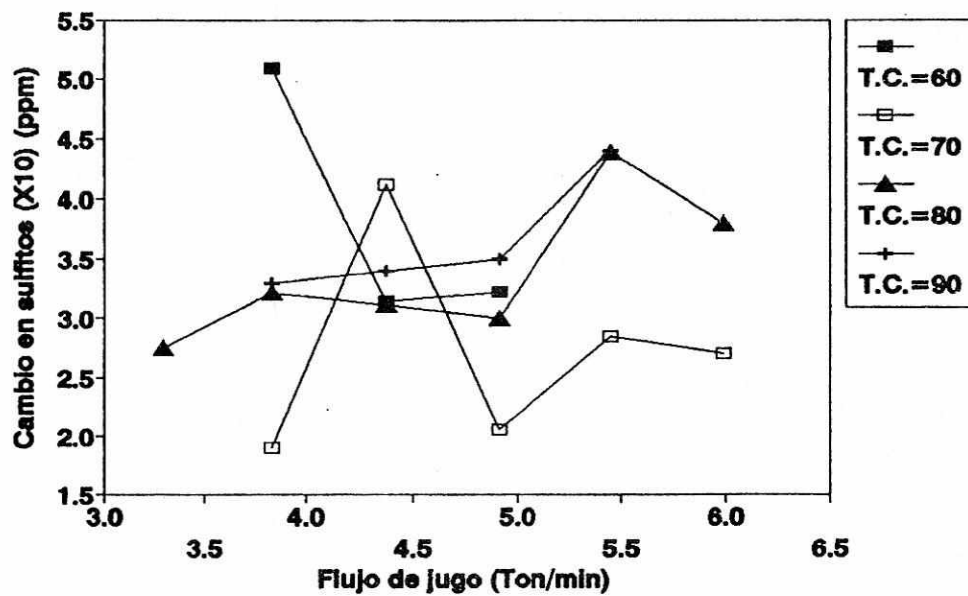
**Grafica No. 6**  
**Cambio en pureza vrs flujo de jugo (R2)**



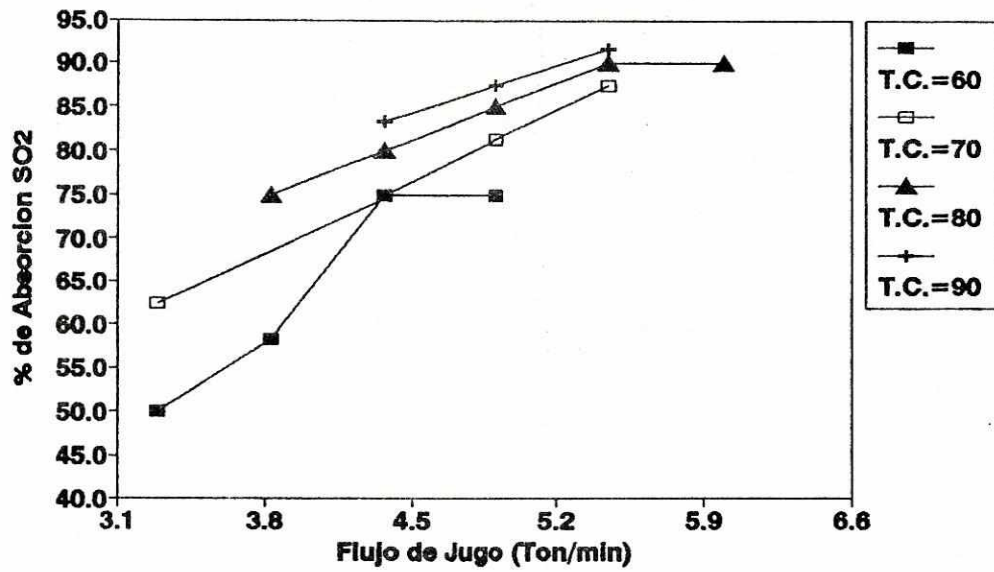
**Grafica No. 7**  
**Cambio en sulf. vrs flujo de jugo (R1)**



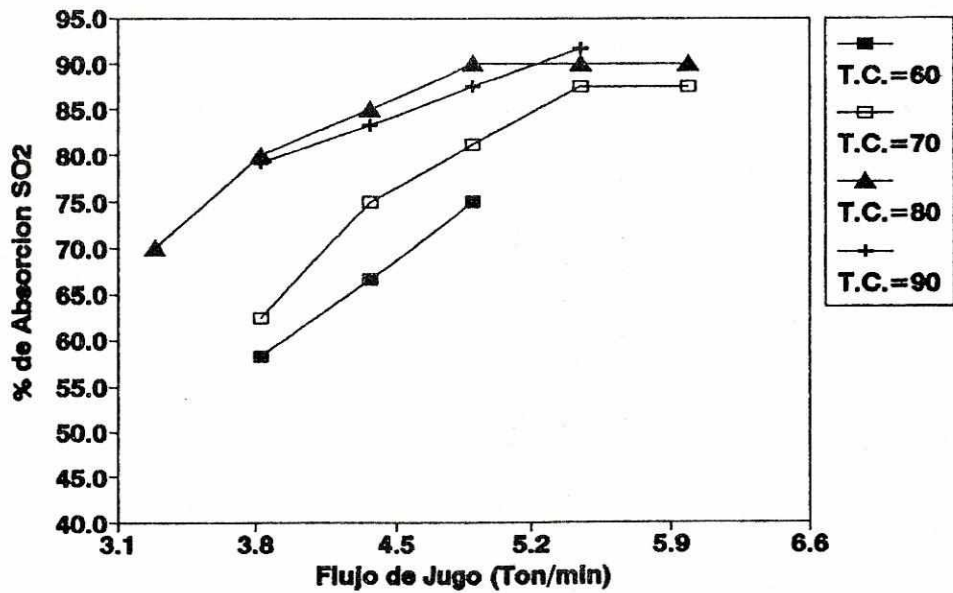
**Grafica No. 8**  
**Cambio en sulf. vrs flujo de jugo (R2)**



**Grafica No. 9**  
**% de Absorción SO<sub>2</sub> vrs Flujo (R1)**



**Grafica No. 10**  
**% de Absorción SO<sub>2</sub> vrs Flujo (R2)**



este flujo, se puede recircular cierto porcentaje de jugo sulfitado a la torre, lo cual al mismo tiempo dará uniformidad. Igualmente, la tasa de combustión de azufre óptima se encuentra entre 70 y 80 lb/h. Bajo estas condiciones, la emisión de gases ( $\text{SO}_2$ ) será también mínima.

La existencia de un máximo constante en el porcentaje de absorción de  $\text{SO}_2$  indica una limitación de diseño de la torre de sulfitación, la cual se podría corregir aumentando el área empacada o modificando el sistema de rejillas (platos), y mejorando la distribución del jugo dentro de la columna. Adicionalmente se obtendría la menor emisión de  $\text{SO}_2$ , aconsejable.

Después de analizar los resultados arrojados por los cálculos de la torre, se encontró que el horno está siendo operado inadecuadamente. El porcentaje de oxígeno en exceso fue aproximadamente nueve veces mayor al requerido según la literatura (100% de oxígeno en exceso). Esto hizo que la concentración de  $\text{SO}_2$  resultante (haciendo contacto con el jugo diluido) fuera de 2-3%, en lugar del 7-14% esperado. La baja en concentración se puede deber también al tipo de horno de combustión de azufre utilizado (discontinuo), el cual necesitaba ser cargado intermitentemente cada media hora. Antes de ser cargado, el suministro de aire se tenía que cerrar, con lo cual las condiciones de un buen proceso de

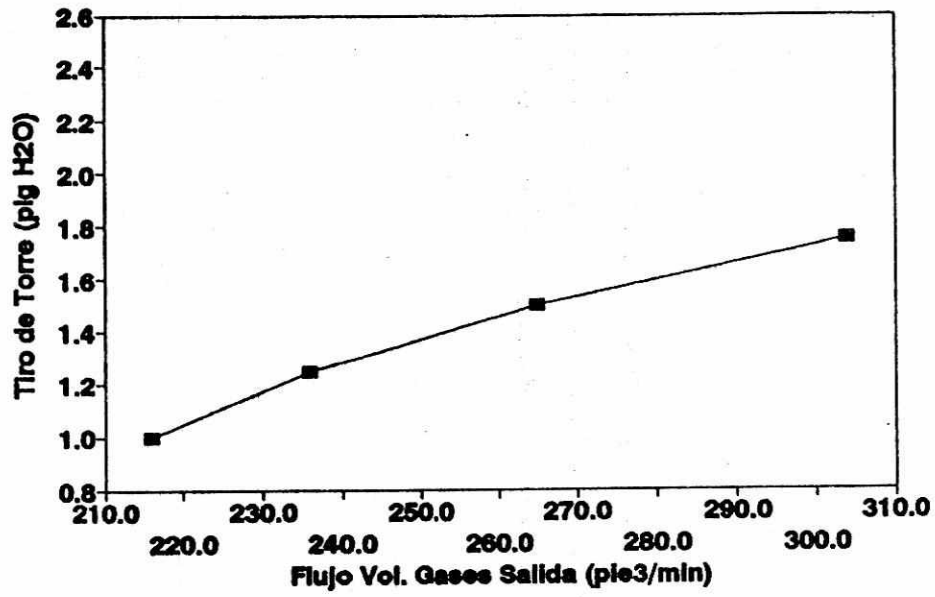
combustión son seriamente interferidas, por interrumpirse el suministro de aire y por colocar azufre frío al horno. Esta alimentación intermitente tiene, consecuentemente, la desventaja de variar marcadamente la concentración del gas, a no ser que el azufre sea colocado fundido, lo cual indicaría la necesidad de una modificación a la unidad o el cambio por otro horno de mayor eficiencia (por ejemplo, un rotativo).

Fruto de esta mala combustión (bajo %SO<sub>2</sub>), el pH y la acidez del jugo sulfitado obtenido (4.7-5.0; 1.3-2.3 ml OH<sup>-</sup> 0.1N) se encuentra muy alejado de los valores esperados por la teoría (<4; 3.0-4.0 ml OH<sup>-</sup> 0.1N), lo cual indica otro problema del arreglo de sulfitación.

Al observar el comportamiento hidráulico de la torre (Ver gráfica No. 11), se observa una linealidad entre el tiro de la torre y el flujo volumétrico de los gases de salida, lo cual indica muy poca probabilidad de inundación en la columna. Asimismo se confirma que controlando el tiro total a lo largo de la torre (flujo de aire de suministro al horno), se controla mejor la combustión de azufre.

Se observa una dispersión en los resultados, posiblemente debido al efecto de acanalamiento "channeling", promovido principalmente por el empaque fijo de la torre (rejillas) y al gran tamaño (ancho y alto) de la misma (Ver Figuras No. 4-7, Apéndice C). El efecto de acanalamiento se observa

**Grafica No. 11**  
**Comportamiento Hidraulico de la Torre**



especialmente a pequeños valores de flujo de jugo, independiente de su distribución y produce zonas secas en el empaque interno de la torre, lo que ocasiona un pobre contacto. Al aumentarse el flujo de jugo, la fracción mojada del empaque también aumenta, hasta un valor de flujo crítico (5 Ton/min), en el cual toda la superficie empacada se moja, volviéndose efectiva.

La disminución del porcentaje de oxígeno (Ver Tabla No. 10, Apéndice B) puede deberse, ya sea a la absorción por parte del jugo o por la dilución debida al vapor de agua generado.

Al comparar la temperatura del gas del horno y de los gases que entran a la torre (Ver Tabla No. 10, Apéndice B), con la esperada por la literatura, se observa que los datos están entre los rangos aceptables.

Entre las fuentes de error caben considerar las siguientes:

1. Variación del flujo: aunque se utilizó el mismo patrón para calcular del flujo promedio y así evitar errores en observación, las variaciones, como se ven en las gráficas circulares (Ver Gráficas No. 16 y 17, Apéndice B), fueron cíclicas. Estas variaciones se debieron a que las operaciones en la columna son cambiadas periódicamente para acomodar cambios en

- operaciones corriente arriba o abajo.
2. Medición del flujo de jugo: aunque el medidor de flujo magnético se calibró periódicamente, la conversión a flujo másico se hizo con base en un factor promedio de densidad de jugo. El error consistiría en la fluctuación de la densidad del jugo, con lo cual variaría el factor anteriormente mencionado. Este error, sin embargo, se puede hacer mínimo corrigiendo el valor de la densidad día a día, con el valor de densidad promedio del día anterior.
  3. Variabilidad en el cambio de concentración de los gases: especialmente  $\text{SO}_2$ , por las razones descritas anteriormente.
  4. Análisis de las propiedades de jugo: debidas principalmente a la incertidumbre de los aparatos utilizados y en muchos casos, de la observación visual del analista.
  5. Análisis del porcentaje de  $\text{SO}_2$  y  $\text{O}_2$  en los gases: es importante el estado de la solución absorbente al igual que tomar en cuenta la incertidumbre del aparato. El análisis de  $\text{SO}_2$  no es selectivo para  $\text{SO}_3$  y  $\text{CO}_2$ . Sin embargo, para este último se normalizó contra el aire atmosférico.
  6. Muestreo: es importante hacer notar que en procesos

continuos y con flujos grandes el muestreo se dificulta, puesto que la representatividad de la muestra del proceso, no necesariamente es todo lo que se puede desear.

## VI. CONCLUSION

Con base en el presente estudio se puede concluir que:

- A. Existe en general un comportamiento muy similar entre la diferencia (cambio) en pureza y contenido de sulfitos, para el jugo diluido y sulfitado, lo que indica una dependencia entre ambas y, por consiguiente, en la eficiencia de operación de la torre de sulfitación.
- B. En general, para pH, acidez y transmitancia, no se obtuvo una variación significativa, siendo su cambio muy ligero y constante.
- C. Se prefirió el cambio en pureza y sulfitos más que el cambio en pH, acidez y transmitancia, para la evaluación y optimización de la operación de la torre de sulfitación.
- D. Generalmente, la mejoría en la pureza y sulfitos para los jugos de alta calidad es menor que en los jugos de baja calidad, posiblemente debido a saturación, al aumentar el contenido de sacarosa.
- E. La tasa de combustión de azufre óptima (desde el punto de vista de purificación del jugo, clarificación y absorción de  $SO_2$ ), para la torre de sulfitación, a ambas calidades de jugo diluido, está alrededor de 70 a 80 lb/h, para flujos mayores de 5 Ton/min.

- F. La absorción máxima de dióxido de azufre (emisión mínima en los gases) se mantiene constante (aproximadamente 90%) al aumentar el flujo de jugo óptimo (5 Ton/min), lo que indica una limitación de capacidad en el diseño de la torre de sulfitación.
- G. La dispersión en los resultados se atribuye al efecto de acanalamiento "channeling", promovido principalmente por el empaque fijo de la torre (rejillas) y al gran tamaño (ancho y alto) de la misma. Se favorece asimismo con bajos flujos de jugo diluido.
- H. El horno quemador de azufre está siendo operado ineficientemente. El trabajar con demasiado oxígeno en exceso resulta en una sub-utilización del azufre, independientemente de la tasa de combustión usada.
- I. El monitoreo constante del porcentaje de oxígeno en exceso y dióxido de azufre en los gases de combustión y exhaustos es muy importante para el control del horno y en consecuencia, para el arreglo de sulfitación.
- J. La tasa de combustión de azufre se puede controlar fácil y rápidamente, manipulando el tiro total a lo largo de la torre.
- K. Química y tecnológicamente, el proceso de sulfitación ofrece aún muchos aspectos para mejorar o innovar.

## VII. RECOMENDACIONES

- A. Una manera de hacer óptima la torre a las condiciones actuales de operación, puede ser trabajarla a una tasa de combustión de azufre entre 70-80 lb/h, para altos flujos de jugo diluido (mayores de 5 Ton/min), con una relación líquido/gas de 236.
- B. Para mantener el flujo de jugo diluido en valores mayores a 5 Ton/min, se recomienda reciclar cierto porcentaje de jugo sulfitado, lo cual al mismo tiempo dará uniformidad en los resultados.
- C. Monitorear constantemente el porcentaje de dióxido de azufre, trióxido de azufre y oxígeno (en exceso), en la corriente de gases entrantes a la torre, para corregir la combustión a niveles óptimos.
- D. Colocar redistribuidores de jugo cada 8 pies en el área empacada, para evitar el efecto de acanalamiento "channeling", pronunciado en torres altas, como la estudiada.
- E. Cambiar el empaque existente (fijo) por otro, de mayor área superficial o aumentar la altura de transferencia.
- F. Crear una segunda torre para los gases exhaustos, de menor tamaño.
- G. Construir un alimentador continuo para el horno,

precalentando el azufre con los gases de combustión de éste.

- H. Utilizar un ventilador, ya sea con amortiguador o velocidad variable, en sustitución al eyector de vapor existente, para controlar el flujo de aire al horno (i.e. L/G) y así mantener una presión (tiro) constante en la torre.
- I. Instrumentar en lo posible (a través de controles automáticos) el proceso de sulfitación. Para esto, se pueden utilizar analizadores en línea. Las variables a medir serían: flujo de jugo diluido, porcentaje de oxígeno, porcentaje de dióxido de azufre que entra y sale de la torre y pH del jugo sulfitado, por su facilidad de medición (el pH del jugo diluido no requiere medición, se puede considerar constante). Las variables a manipular serían: tasa de azufre a quemar y el tiro a lo largo de la torre, el cual a su vez, determina la tasa de combustión real.
- J. Preferir la acidez por valoración más que el pH, para la evaluación de la torre de sulfitación, ya que interesa conocer la acidez total y por el pH conocemos la actual, o de ionización. Además, usando el pH puede que dos jugos similares no reaccionen igual, debido al efecto amortiguador "buffering" por acción de algunas impurezas.

El valor de pH está influenciado también por la temperatura de la muestra.

- K. Realizar el análisis de transmitancia a similares condiciones de pH para ambos jugos, diluido y sulfitado, asegurándose siempre de filtrar.
- L. Realizar adicionalmente análisis de azúcares reductores, tanto para el jugo diluido como para el sulfitado, con el fin de analizar la posible pérdida de azúcar por inversión.
- M. Instruir, tecnificar al operador y supervisor en el control del proceso de sulfitación.

## VII BIBLIOGRAFIA

1. Chen, J. Meade-Chen Cane Sugar Handbook. 9th. ed.  
1985 New York, John Wiley & Sons, Inc.
2. Honig, P. Principles of Sugar Technology. 1st. ed.  
1953 New York, Elsevier Publishing Co. 767 pp.
3. Klussmann, J. Efectos de la sulfitación en la clarificación del jugo de caña. ATAGUA (Guatemala); 15: 19-31.
4. Delgado, A. & M. Cesar. Cálculo acucareiro.  
1975 Piracicaba, Depto. de Tecnologia Rural. ESALQ/USP. 162 pp.
5. Hugot, E. Handbook of Cane Sugar Engineering.  
1960 Netherlands, Elsevier Publishing Co. 872 pp.
6. Tromp. L. A. Machinery and Equipment of the Cane Sugar Factory. London, Norman Rodger. 644 pp.
7. Payne, J. Unit Operations in Cane Sugar Production.  
1982. Netherlands, Elsevier Publishing.
8. Porta, A. Fabricación del azúcar. 1a. ed.  
1955 Madrid, Editorial Salvat.
9. Spencer, G. Spencer-Meade Cane Sugar Handbook. 9th. ed.  
1964 New York, John Wiley & Sons, Inc. 108 pp.
10. Monzón, O. Quantificación de los procedimientos de sulfitación y alcalinización en función de calidades de jugo, consumos de azufre y cal y producción de azúcar. ATAGUA (Guatemala); 14: 431-449.
11. Viego, S. Experiencia en la purificación de jugos para la elaboración de azúcar blanca por sulfitación. ATAGUA (Guatemala); Memoria del Segundo Congreso Centroamericano de Técnicos Azucareros.
12. Tejada, J. Pérdidas en la fabricación de azúcar, causa y control. ATAGUA (Guatemala); 6: 15-17.

13. Lam, L. Clarificación en la Industria Azucarera. Teoría y Equipo. USAC, Facultad de Ingeniería, Guatemala.  
1977
14. The United States Pharmacopeia. United States  
1984 Pharmacopeial Convention, Inc., USA.
15. Perry, R., D. Green. Perry's Chemical Engineer's Handbook. 6a. Ed. Mac Graw-Hill, New York.  
1984
16. Mc. Cabe, W., J. Smith. Operaciones Básicas de Ingeniería Química. Ed. Reverté, Madrid. 1048 pp.  
1981
17. Treybal, R. Operaciones de transferencia de masa. 2a. Ed.  
1988 Mac Graw-Hill, Mexico. 858 pp.
18. Peters, M. Plant Design & Economics for Chemical Engineering. 3a. Ed. Mac Graw-Hill, New York.  
1980
19. Himmelblau, D. Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química. 1a. Ed. Continental, Mexico. 583 pp.  
1977

APENDICE

## APENDICE A

### Modelo de Cálculos

#### 1. Porcentaje de absorción de SO<sub>2</sub>.

$$\% \text{ Absorción SO}_2 = \frac{\% \text{SO}_2(\text{entra}) - \% \text{SO}_2(\text{sale})}{\% \text{SO}_2(\text{entra})} \times 100$$

Ejemplo: 60 lb/h S para R1; Flujo = 3.29 Ton/min

$$\% \text{ Absorción SO}_2 = \frac{3.00 - 1.50}{3.00} \times 100 = 50.00 \%$$

#### 2. Balance de masa (para horno).

Ejemplo: Tasa de combustión de azufre = 60 lb/h

Base: 1h

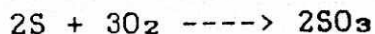
Pureza del azufre comercial = 99% (Ver Tabla No.50)

Azufre aprovechable = 60 x 0.99 = 59.40 lb S

Conversión a SO<sub>3</sub> = 3% del azufre puro = 1.78 lb S

Azufre aprovechable  
(convertible a SO<sub>2</sub>) = 59.40 - 1.78 = 57.62 lb S.

Reacciones de combustión:



$$v\text{SO}_2 = 57.62 \text{ lb S} \times \frac{11 \text{ lbm S}}{32.06 \text{ lb S}} \times \frac{11 \text{ lbm SO}_2}{11 \text{ lbm S}} = 1.80 \text{ lbm SO}_2$$

$$v\text{SO}_3 = 1.78 \text{ lb S} \times \frac{11 \text{ lbm S}}{32.06 \text{ lb S}} \times \frac{21 \text{ lbm SO}_3}{21 \text{ lbm S}} = 0.06 \text{ lbm SO}_3$$

Oxígeno en exceso = % O<sub>2</sub> = 19% (Ver Tabla No. 5)

$$\%O_2 = \frac{vO_2}{vO_2 + vSO_2 + vSO_3 + [vO_2 + vSO_2 + 3/2x(vSO_3)]x0.79/0.21}$$

donde vX = lbm X = libra mol de X. Se asume gas ideal, por lo que la base molar es igual a la volumétrica.

Resolviendo para vO<sub>2</sub>

$$vO_2 = \frac{\%O_2 [(1+).79/0.21)xvSO_2 + (1+1.50x0.79/0.21)xvSO_3]}{[1 - (1 + 0.79/0.21) x \%O_2]}$$

Substituyendo valores, se obtiene

$$vO_2 = 17.84 \text{ lbm } O_2$$

$$\%SO_2(v/v) = \frac{vSO_2}{vO_2 + vSO_2 + vSO_3 + [vO_2 + vSO_2 + 3/2x(vSO_3)]x0.79/0.21} \times 100$$

Substituyendo valores,

$$\%SO_2 = 1.92$$

3. Porcentaje de error respecto a medición de SO<sub>2</sub>

$$\% \text{ Error} = \frac{|\%SO_2(\text{teórico}) - \%SO_2(\text{real})|}{\%SO_2(\text{teórico})} \times 100$$

Ejemplo: 60 lb/h S

$$\% \text{ Error} = \frac{|1.91 - 3.00|}{1.91} \times 100 = 57.10\%$$

4. Porcentaje de absorción de O<sub>2</sub>

$$\% \text{ absorción de O}_2 = \frac{\% \text{ O}_2(\text{entra}) - \% \text{ O}_2(\text{sale})}{\% \text{ O}_2(\text{entra})} \times 100$$

Ejemplo: 60 lb/h S

$$\% \text{ absorción de O}_2 = \frac{19.00 - 18.50}{19.00} \times 100 = 2.63 \%$$

## 5. Cálculo de relación líquido-gas (L/G) para la torre:

L = Flujo total de líquido para torres de platos, mol/UT  
 G = Flujo total de gas para torres de platos, mol/UT

Condiciones óptimas para la torre:

Tasa de combustión de azufre: 70-80 lb/h

Flujo de jugo diluido: ≥ 5 Ton/min.

(236 + 264) Pie<sup>3</sup>/minFlujo de gases promedio:  $\frac{\quad}{2}$ 

(Ver Tabla No. 5)

Cálculo de L:

P.M. sacarosa (C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>): 342.30 lb/lbmComposición promedio del jugo diluido: 15% sacarosa  
85% agua

Peso molecular promedio del jugo diluido:

$$\text{P.M. prom.} = 0.85 \times (18.02 \text{ lb/lbm}) + 0.15 \times (342.30 \text{ lb/lbm}) \\ = 66.66 \text{ lb/lbm}$$

$$L = \frac{5 \text{ Ton}}{\text{min}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ Ton}} \times \frac{2.2046 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} \times \frac{1 \text{ lbm jugo}}{66.66 \text{ lb}} = 165.36 \frac{\text{lbm jugo dil}}{\text{min}}$$

Cálculo de G:

Composición promedio de dióxido de azufre en la torre

Composición de SO<sub>2</sub> entrada:(4.0 + 5.0)% SO<sub>2</sub>

$$\text{SO}_2 \text{ prom. ent.} = \frac{\quad}{2} = 4.5\%$$

Composición de SO<sub>2</sub> salida = 0.5% (Ver Tablas No.2y3)  
 (4.5+0.5)%SO<sub>2</sub>

Composición promedio (ent.-sal.) =  $\frac{(4.5+0.5)\%SO_2}{2} = 2.5\%SO_2$

Densidad promedio del gas:

Densidad del aire: 0.0808 lb/pie<sup>3</sup>

Densidad del SO<sub>2</sub>: 0.1828 lb/pie<sup>3</sup>

(Tabla 3-78, Perry & Green)

Densidad promedio = 0.975 x (0.0808 lb/pie<sup>3</sup>) + 0.025  
 x (0.1828 lb/pie<sup>3</sup>) = 0.08335 lb/pie<sup>3</sup>

Peso molecular promedio del gas:

P.M.prom. = 0.975 x (29.0 lb/lbm) + 0.025  
 x (64.06 lb/lbm) = 29.88 lb/lbm

$$G = \frac{250 \text{ pie}^3}{\text{min}} \times \frac{0.08335 \text{ lb}}{\text{pie}^3} \times \frac{\text{lbm}}{29.88 \text{ lb}} = 0.70 \text{ lbm gas/min}$$

Relación L/G

Substituyendo:

$$L/G = 236.22$$

APENDICE B

DATOS

RESULTADOS

GRAFICAS

## DATOS

Tabla No. 1  
Tasa de Combustion: 60 lb/hr

Rango pureza	Flujo de jugo (Ton/mhr)	Jugo Diluido					Jugo Sulfitado					% SO <sub>2</sub> (v/v)	
		Pureza (%)	Acidez (ml OH.1N)	pH	Sulfitos (X10)(ppm)	Transa. (%)	Pureza (%)	Acidez (ml OH.1N)	pH	Sulfitos (X10)(ppm)	Transa. (%)	Ent	Sal
R1	[ a ]												
	[78.44	3.29	81.18	1.30	5.50	0.40	82.88	1.80	4.70	3.70	2.00	3.00	1.50
	a	3.83	81.27	1.40	5.40	0.30	81.98	1.70	4.85	3.20	1.50	3.00	1.25
R2	[82.33]	4.37	80.71	1.40	5.45	0.40	83.66	1.75	4.86	4.25	2.50	3.00	0.75
	a	4.91	77.41	1.30	5.40	0.40	79.83	1.80	4.80	3.50	3.00	3.00	1.25
	[82.34	3.83	83.45	1.80	5.50	0.80	85.65	1.80	4.80	5.70	2.00	3.00	1.00
a	4.37	85.07	1.53	5.47	0.43	86.05	1.77	4.87	3.57	2.00	3.00	1.00	
[88.22]	4.81	84.80	1.52	5.45	0.45	87.29	1.75	4.80	3.67	2.00	3.00	0.75	

Tabla No. 2  
Tasa de Combustion: 70 lb/hr

Rango pureza	Flujo de jugo (Ton/mhr)	Jugo Diluido					Jugo Sulfitado					% SO <sub>2</sub> (v/v)	
		Pureza (%)	Acidez (ml OH.1N)	pH	Sulfitos (X10)(ppm)	Transa. (%)	Pureza (%)	Acidez (ml OH.1N)	pH	Sulfitos (X10)(ppm)	Transa. (%)	Ent	Sal
R1	[78.44	3.29	81.85	1.80	5.40	0.30	82.57	1.80	5.00	3.80	2.00	4.00	1.50
	a	4.37	80.46	1.70	5.45	0.50	82.34	1.85	4.80	3.75	2.00	4.00	1.00
	[82.33]	4.91	80.41	1.50	5.40	0.45	82.01	1.70	4.70	3.70	2.00	4.00	0.75
R2	a	5.45	78.31	1.80	5.40	0.50	84.80	1.70	4.70	3.80	3.00	4.00	0.50
	[82.34	3.83	85.75	1.10	5.50	0.40	86.98	1.70	4.80	2.30	2.00	4.00	1.50
	a	4.37	85.63	1.51	5.42	0.52	87.81	1.88	4.77	4.64	1.79	4.00	1.00
[88.22]	5.45	85.14	1.52	5.47	0.37	86.34	1.75	4.78	2.58	2.00	4.00	0.75	
a	5.99	86.17	1.30	5.40	0.60	82.04	1.50	4.90	3.30	1.00	4.00	0.50	

Tabla No. 3  
Tasa de Combustion: 80 lb/hr

Rango pureza	Flujo de Jugo (Ton/min)	Jugo Diluido					Jugo Sulfitado					% SO <sub>2</sub> (v/v)	
		Pureza (%)	Acidez (ml OH.1N)	pH	Sulfitos (X10)(ppm)	Traza (%)	Pureza (%)	Acidez (ml OH.1N)	pH	Sulfitos (X10)(ppm)	Traza (%)	Ent.	Sal.
R1	3.83	78.83	1.70	5.50	0.80	2.00	84.00	1.80	4.70	4.10	3.00	5.00	1.25
	4.37	80.36	1.00	5.50	1.00	3.00	81.50	1.30	5.00	4.30	3.00	5.00	1.00
	4.81	80.04	1.53	5.50	0.83	2.17	82.84	1.63	4.85	5.08	4.00	5.00	0.75
	5.45	80.44	1.70	5.40	0.55	1.00	81.53	1.85	4.85	4.20	2.00	5.00	0.50
	5.98	78.10	1.80	5.30	1.40	4.00	80.82	2.30	4.80	4.60	7.00	5.00	0.50
R2	3.28	84.85	1.40	5.45	0.70	2.00	86.53	1.60	4.80	3.45	2.00	5.00	1.50
	3.83	84.57	1.58	5.45	0.50	1.83	87.20	1.70	4.81	3.71	1.83	5.00	1.00
	4.37	84.64	1.47	5.44	0.85	1.80	85.61	1.77	4.85	3.78	2.12	5.00	0.75
	4.81	84.77	1.47	5.48	0.88	1.88	86.29	1.73	4.85	3.68	2.21	5.00	0.50
	5.45	84.28	1.57	5.43	0.87	2.54	85.18	1.64	4.78	5.05	2.54	5.00	0.50
	5.98	88.40	1.80	5.55	0.85	3.50	87.25	1.80	4.85	4.75	4.00	5.00	0.50

Tabla No. 4  
Tasa de Combustion: 90 lb/hr

Rango pureza	Flujo de Jugo (Ton/min)	Jugo Diluido					Jugo Sulfitado					% SO <sub>2</sub> (v/v)	
		Pureza (%)	Acidez (ml OH.1N)	pH	Sulfitos (X10)(ppm)	Traza (%)	Pureza (%)	Acidez (ml OH.1N)	pH	Sulfitos (X10)(ppm)	Traza (%)	Ent.	Sal.
R1	4.37	80.51	1.80	5.40	0.40	3.00	82.44	1.70	4.80	4.60	3.00	6.00	1.00
	4.81	78.58	1.80	5.50	0.70	2.50	84.31	1.90	4.85	4.10	2.00	6.00	0.75
	5.45	78.51	1.45	5.45	0.65	1.50	78.65	1.50	5.00	3.30	2.60	6.00	0.50
R2	3.83	83.88	1.45	5.45	0.35	1.00	84.07	1.65	4.80	3.65	2.00	6.00	1.25
	4.37	83.05	1.50	5.40	0.40	1.00	85.07	1.80	4.80	3.80	2.00	6.00	1.00
	4.81	84.95	1.85	5.50	0.85	2.00	85.38	1.85	4.80	4.35	3.00	6.00	0.75
	5.45	84.88	1.80	5.40	0.70	3.00	88.14	1.80	4.80	5.10	3.00	6.00	0.50

Tabla No. 5  
 Datos Generales Promedio Torre de Sulfitacion.

Análisis de Azufre		Tasa de combustión de azufre (lb/hr)	Calda de presión (psig H <sub>2</sub> O)	Torre		Flujo agua enf./horno (G/min)	Temperatura				% O <sub>2</sub> (V/V)				
% de residuos	% Acidez como H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			Flujo vol. gases salida (pie <sup>3</sup> /min)	Flujo agua		Jugo	Gases torre		Agua enfriamiento		Torre			
							Dil (F)	Sulf. (F)	Horno (F)	Ert. (F)	Sal (F)	Ert. (F)	Sal (F)	Ert.	Sal
A1	0.68	80	1.00	218.00	8.50	80.6	80.6	80.6	250.00	75.00	82.00	75.00	82.00	18.00	18.50
A2	0.05	80	1.25	238.00	8.50	80.6	80.6	80.6	280.00	75.00	86.00	75.00	86.00	18.00	18.00
		90	1.75	304.00	8.50	80.6	80.6	84.2	290.00	100.00	100.00	75.00	80.00	18.00	17.00

A1: Azufre de Mexico

A2: Azufre de Venezuela

## RESULTADOS

Tabla No. 6  
Tasa de Combustion: 60 lb/hr

Rango pureza	Flujo de Jugo (Ton/min)	Diferencias Absolutas en Variables						% Absorcion SO <sub>2</sub>
		Pureza (%)	Adólez (ml OH.1N)	pH	Sulfitos (X10 <sup>3</sup> /ppm)	Trans. (%)	% SO <sub>2</sub> (v/v)	
R1 [ 76.44 a 82.33 ]	3.28	1.72	0.30	0.80	3.30	0.00	1.50	50.00
	3.63	0.66	0.30	0.55	2.80	0.50	1.75	58.33
	4.37	2.85	0.35	0.80	3.85	0.50	2.25	75.00
R2 [ 82.34 a 88.22 ]	4.91	2.42	0.30	0.60	2.10	1.00	2.25	75.00
	3.63	2.20	0.20	0.70	5.10	1.00	1.75	58.33
	4.37	0.88	0.24	0.60	3.14	0.67	2.00	68.67
	4.91	2.69	0.23	0.65	5.22	0.25	2.25	75.00

Tabla No. 7  
Tasa de Combustion: 70 lb/hr

Rango pureza	Flujo de Jugo (Ton/min)	Diferencias Absolutas en Variables						% Absorcion SO <sub>2</sub>
		Pureza (%)	Adólez (ml OH.1N)	pH	Sulfitos (X10 <sup>3</sup> /ppm)	Trans. (%)	% SO <sub>2</sub> (v/v)	
R1 [ 76.44 a 82.33 ]	3.28	0.62	0.20	0.40	3.60	0.00	2.50	62.50
	4.37	1.88	0.15	0.55	2.25	0.50	3.00	75.00
	4.91	1.60	0.20	0.70	3.25	0.00	3.25	81.25
R2 [ 82.34 a 88.22 ]	5.45	5.29	0.10	0.70	3.40	0.00	3.50	87.50
	3.83	1.14	0.60	0.70	1.80	0.00	2.50	62.50
	4.37	2.18	0.17	0.65	4.12	0.00	3.00	75.00
	4.91	1.77	0.20	0.62	2.08	0.50	3.25	81.25
	5.45	1.20	0.25	0.62	2.85	0.25	3.50	87.50
	5.88	5.87	0.20	0.50	2.70	1.00	3.50	87.50

Tabla No. 8  
Tasa de Combustion: 80 lb/hr

Rango pureza	Flujo de jugo (Ton/mtr)	Diferencias Absolutas en Variables						% Absorcion SO2
		Pureza (%)	Acidez (ml OH.1N)	pH	Sulfitos (X10)(ppm)	Trans. (%)	% SO2 (v/v)	
R1	[ a ]	3.83	0.10	0.80	3.50	1.00	3.75	75.00
		4.37	0.30	0.50	3.30	0.00	4	80.00
		4.91	0.10	0.65	4.25	1.83	4.25	85.00
		5.45	0.25	0.55	3.65	1.00	4.5	90.00
		5.99	0.40	0.70	3.50	3.00	4.5	90.00
		3.29	0.20	0.65	2.75	0.00	3.5	70.00
R2	[ a ]	3.83	0.12	0.65	3.21	0.00	4	80.00
		4.37	0.30	0.59	3.11	0.32	4.25	85.00
		4.91	0.28	0.54	3.00	0.32	4.5	90.00
		5.45	0.07	0.65	4.38	0.00	4.5	90.00
		5.99	0.85	0.20	3.60	0.50	4.5	90.00

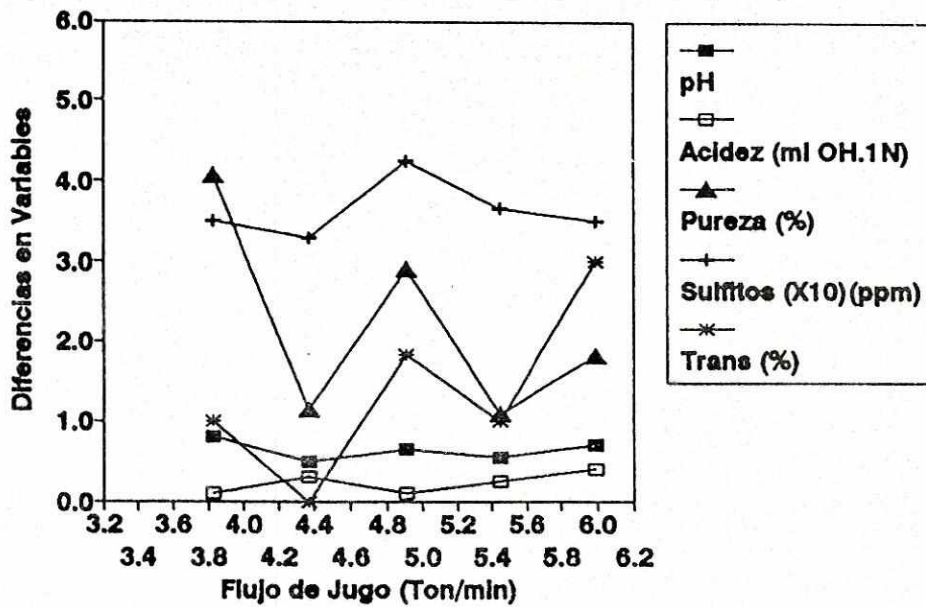
Tabla No. 9  
Tasa de Combustion: 90 lb/hr

Rango pureza	Flujo de jugo (Ton/mtr)	Diferencias Absolutas en Variables						% Absorcion SO2
		Pureza (%)	Acidez (ml OH.1N)	pH	Sulfitos (X10)(ppm)	Trans. (%)	% SO2 (v/v)	
R1	[ a ]	1.83	0.10	0.50	4.20	0.00	5.00	83.33
		4.37	0.10	0.65	3.40	0.50	5.25	87.50
		4.91	0.05	0.45	2.65	1.00	5.50	91.67
		5.45	0.20	0.65	3.30	1.00	4.75	78.17
		3.83	0.38	0.20	3.40	1.00	5.00	83.33
		4.37	2.02	0.30	3.40	1.00	5.25	87.50
R2	[ a ]	0.41	0.20	0.80	3.50	1.00	5.25	87.50
		5.45	1.18	0.10	4.40	0.00	5.50	91.67

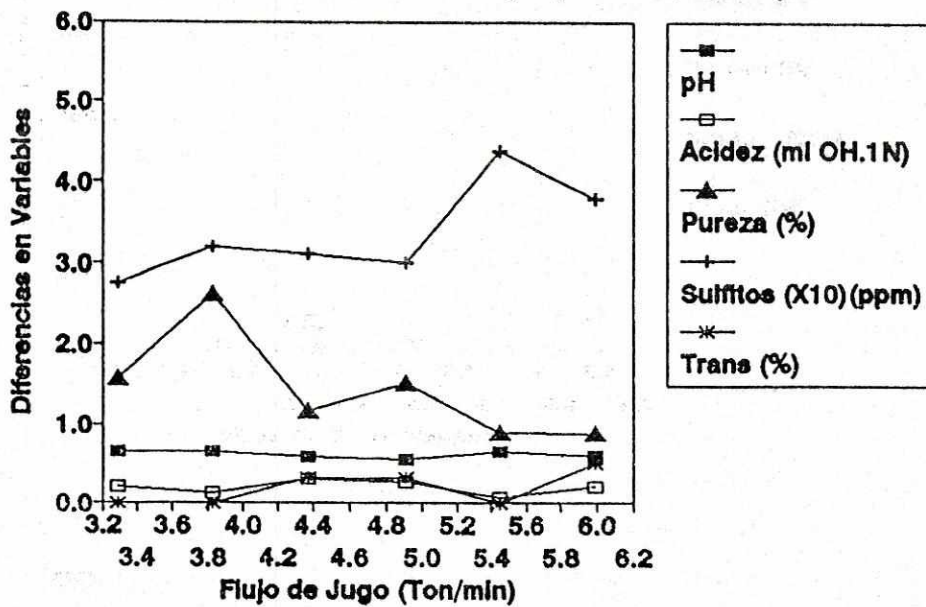
Tabla No. 10  
% SO<sub>2</sub> Teorico Para Cada Tasa de Combustion de Azufre

Tasa de combustion de azufre (lb/h)	% SO <sub>2</sub> teorico (v/v)	% error respecto a medicion de SO <sub>2</sub>	% absorcion de O <sub>2</sub> (v/v)
60	1.92	57.10	2.00
70	2.40	68.70	2.70
80	2.80	72.40	2.80
90	3.36	78.90	2.90

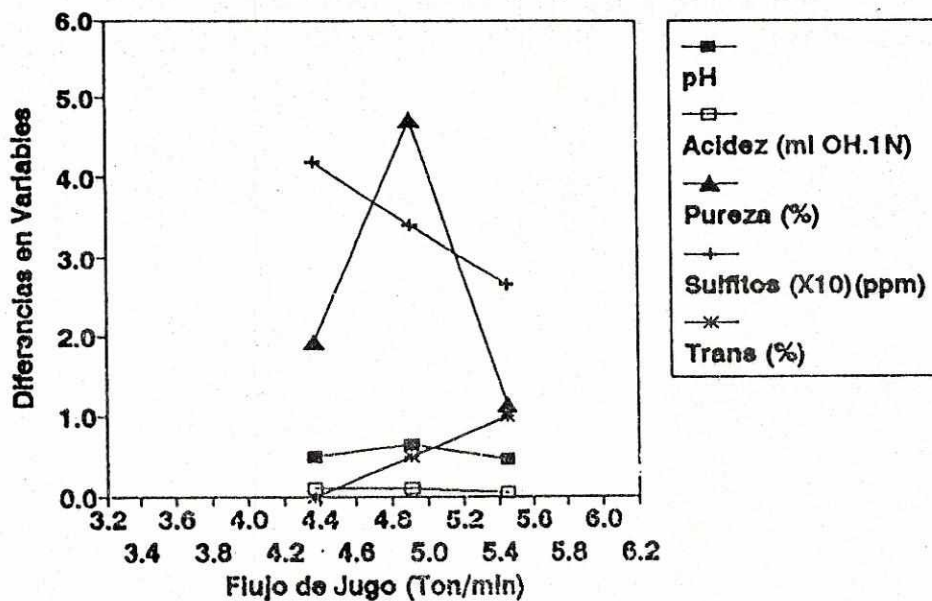
**Grafica No. 12**  
**Dif. Variables vrs Flujo (S:80lb/h; R1)**



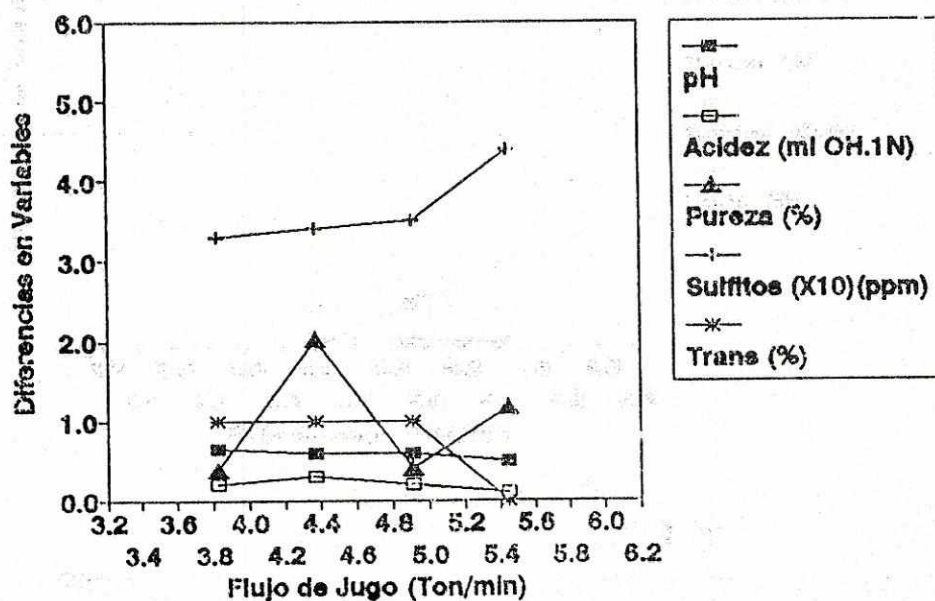
**Grafica No. 13**  
**Dif. Variables vrs Flujo (S:80lb/h; R2)**



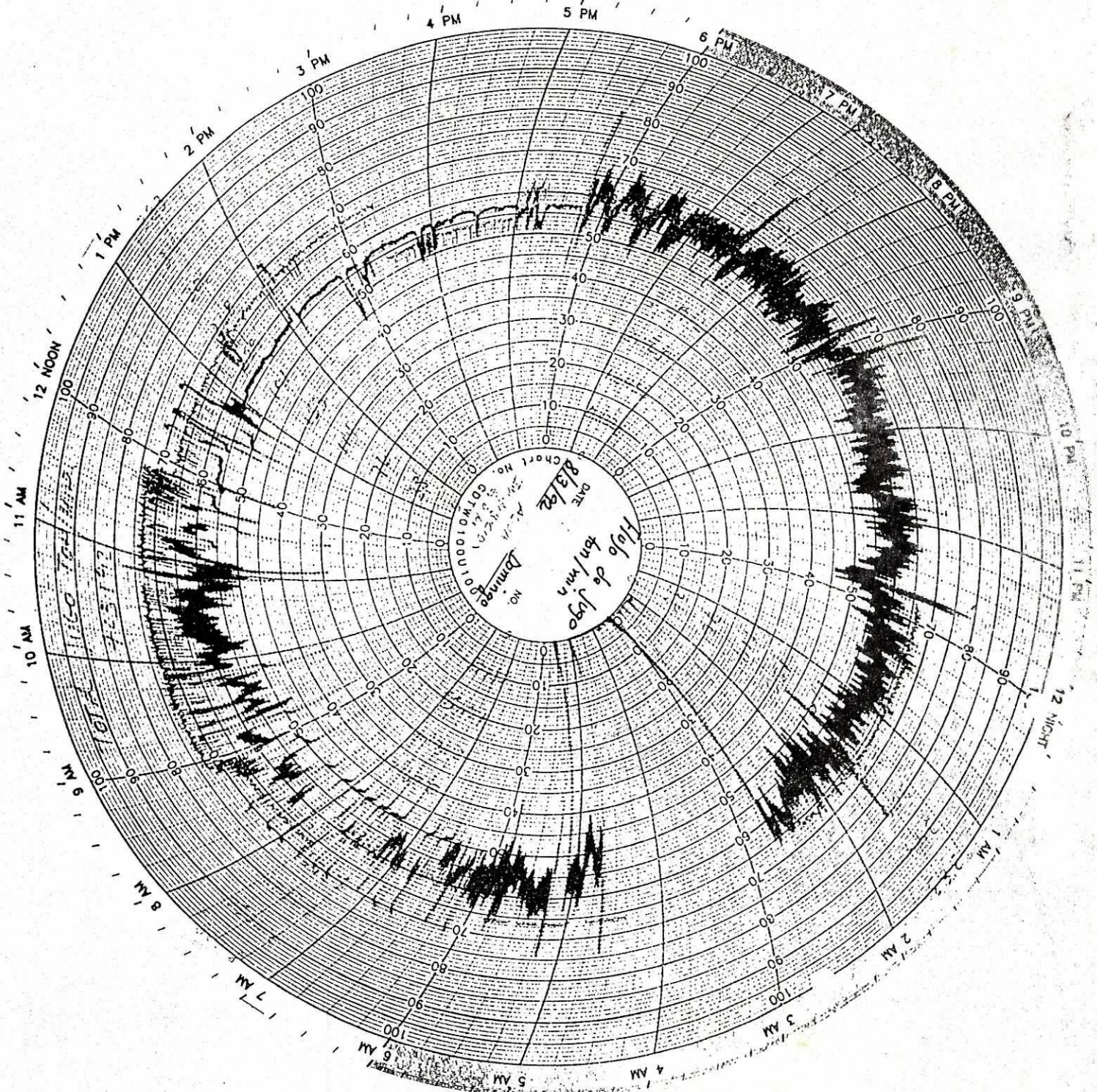
**Grafica No. 14**  
**Dif. Variables vrs Flujo (S:90lb/h; R1)**



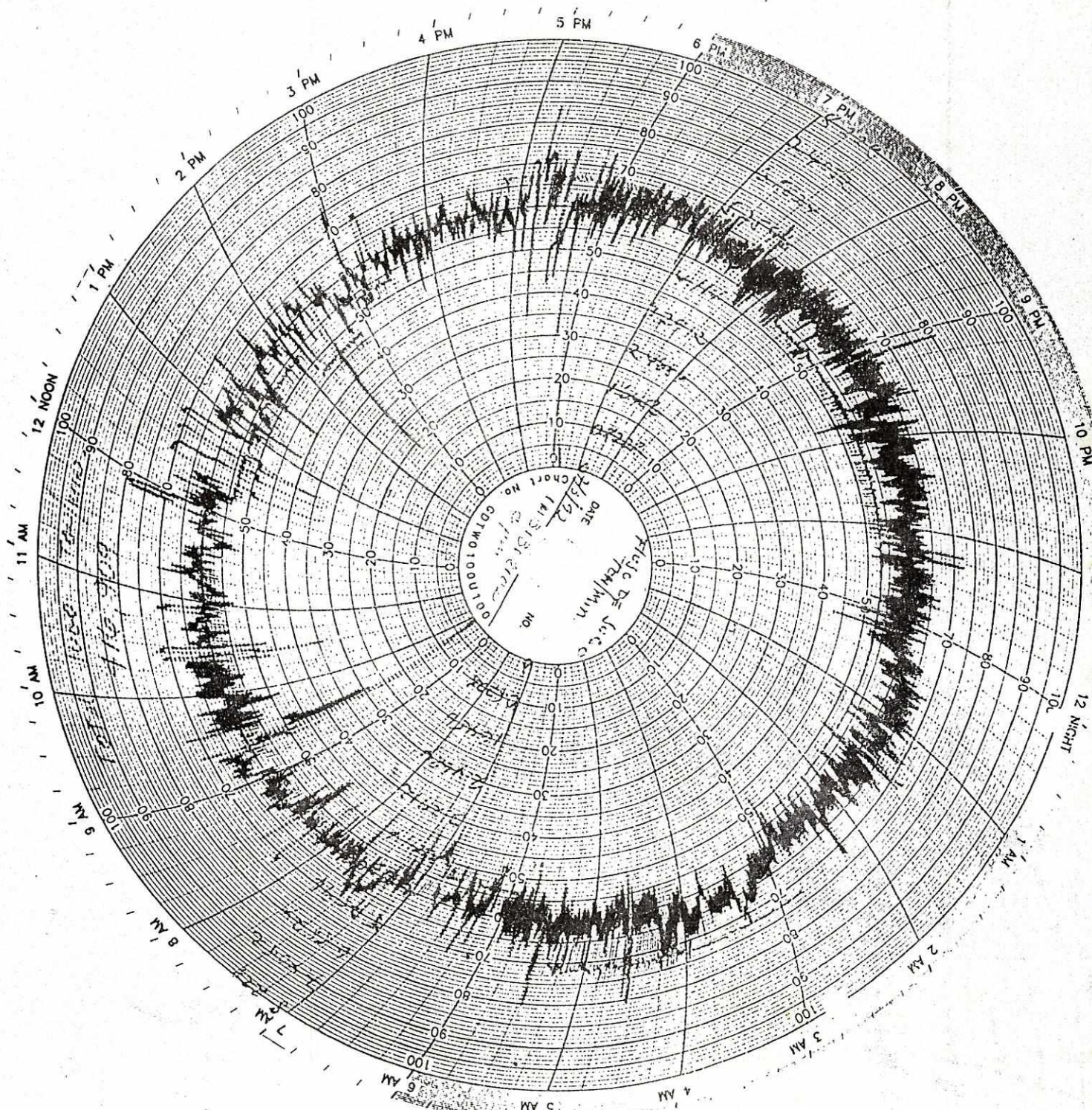
**Grafica No. 15**  
**Dif. Variables vrs Flujo (S:90lb/h; R2)**



Gráfica No. 16: Flujo de Jugo Diluido  
(Fecha: 08/03/92)



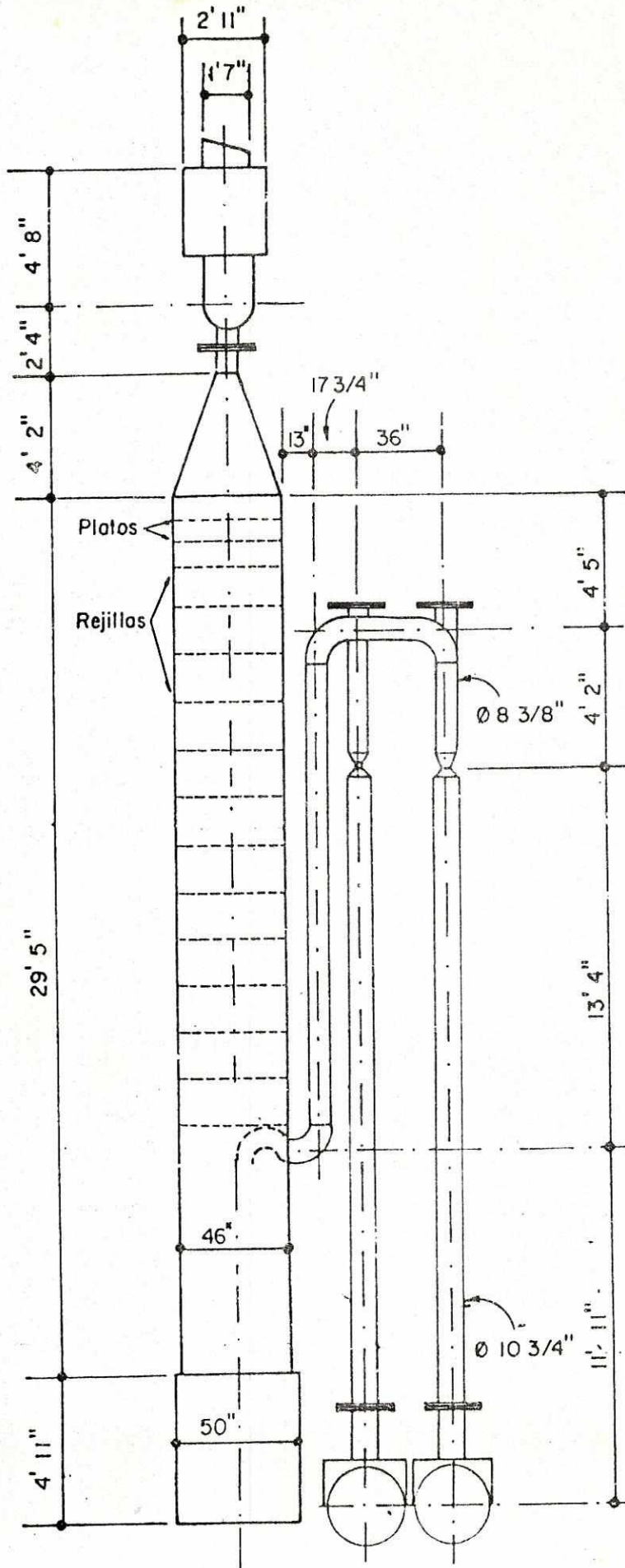
Gráfica No. 17: Flujo de Jugo Diluido  
(Fecha: 07/03/92)



APENDICE C

FIGURAS

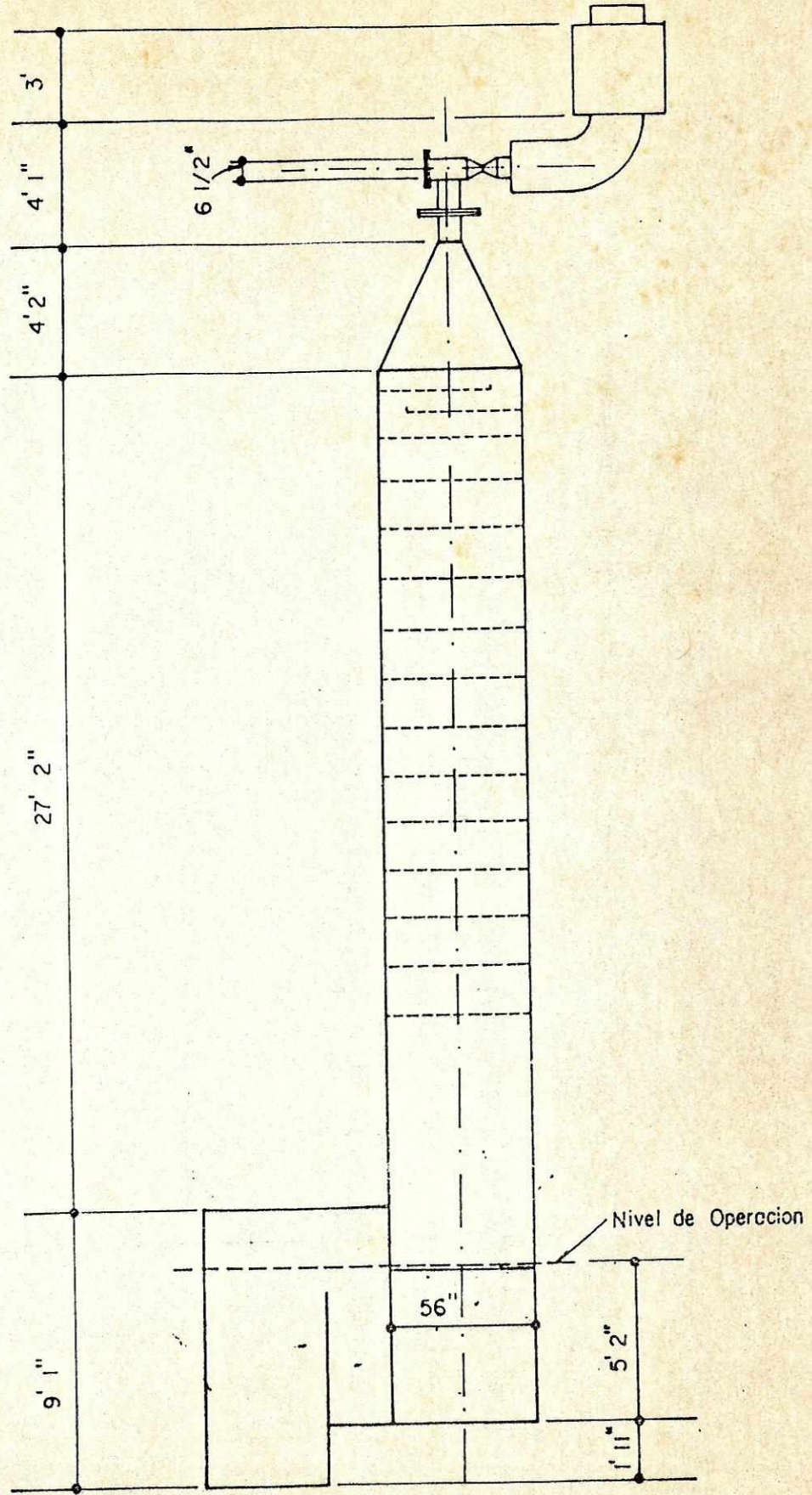
VISTAS



VISTA FRONTAL

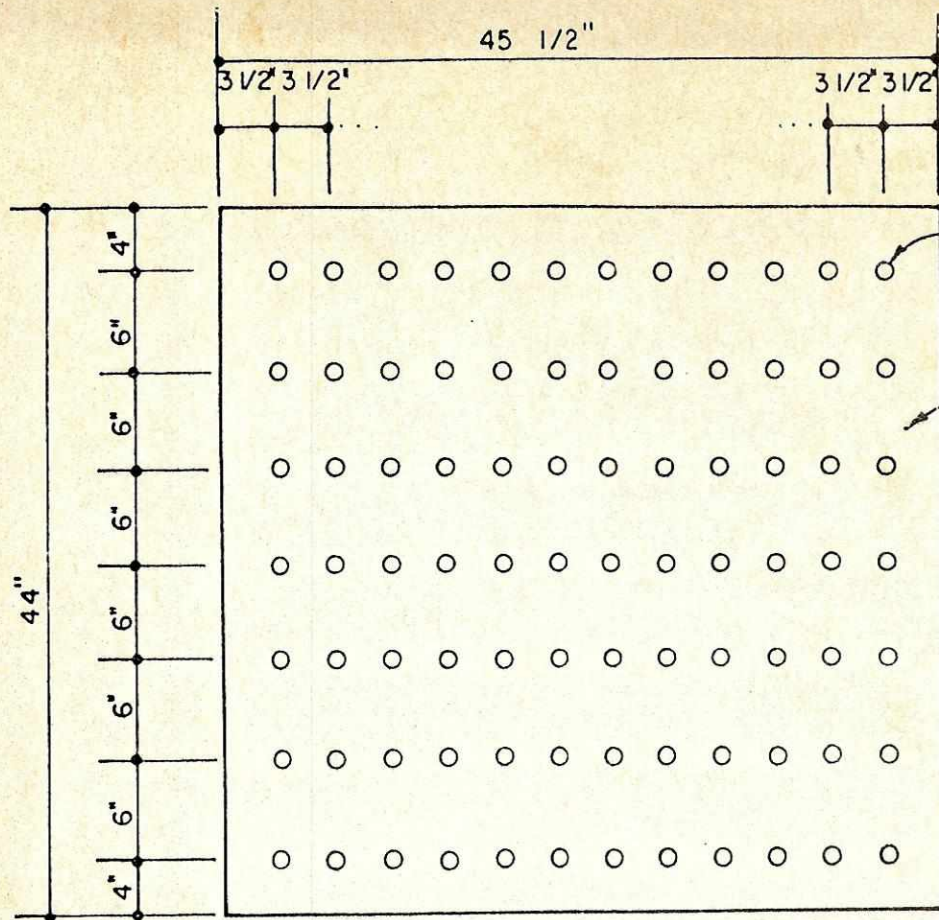
Escala  $\frac{3}{16}" = 1'$

(Figura No. 4)



VISTA LATERAL  
Escala 3/16" = 1'

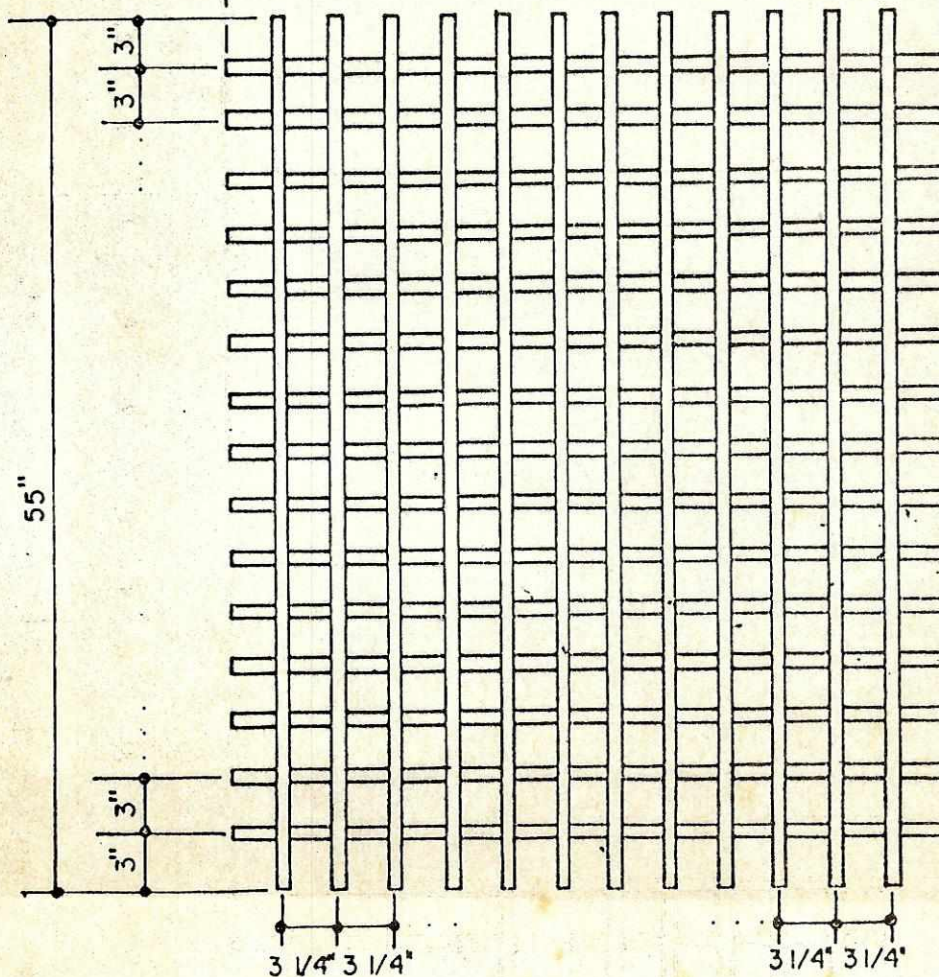
(Figura No. 5)



DETALLE DE PLATOS  
DISTRIBUIDORES

Escala 1" = 1'

(Figura No. 6)



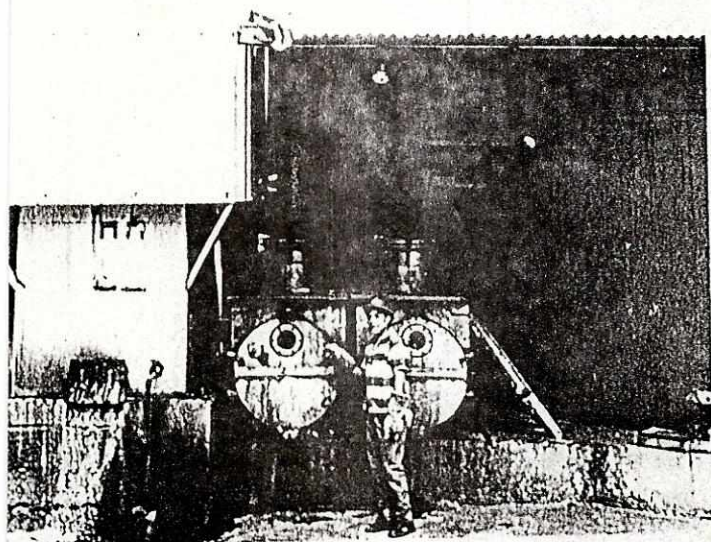
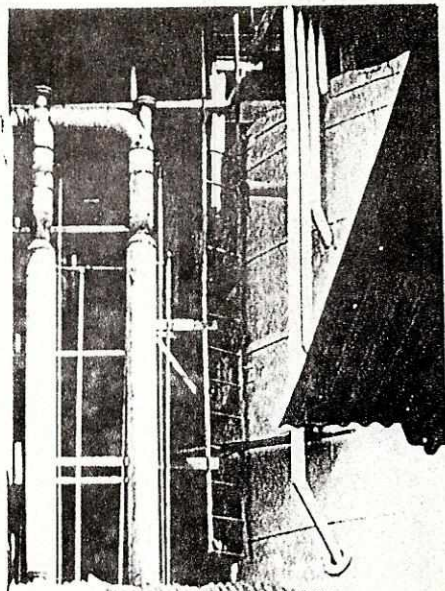
DETALLE DE REJILLAS

(Bandejas)

Escala 1" = 1'

(Figura No. 7)

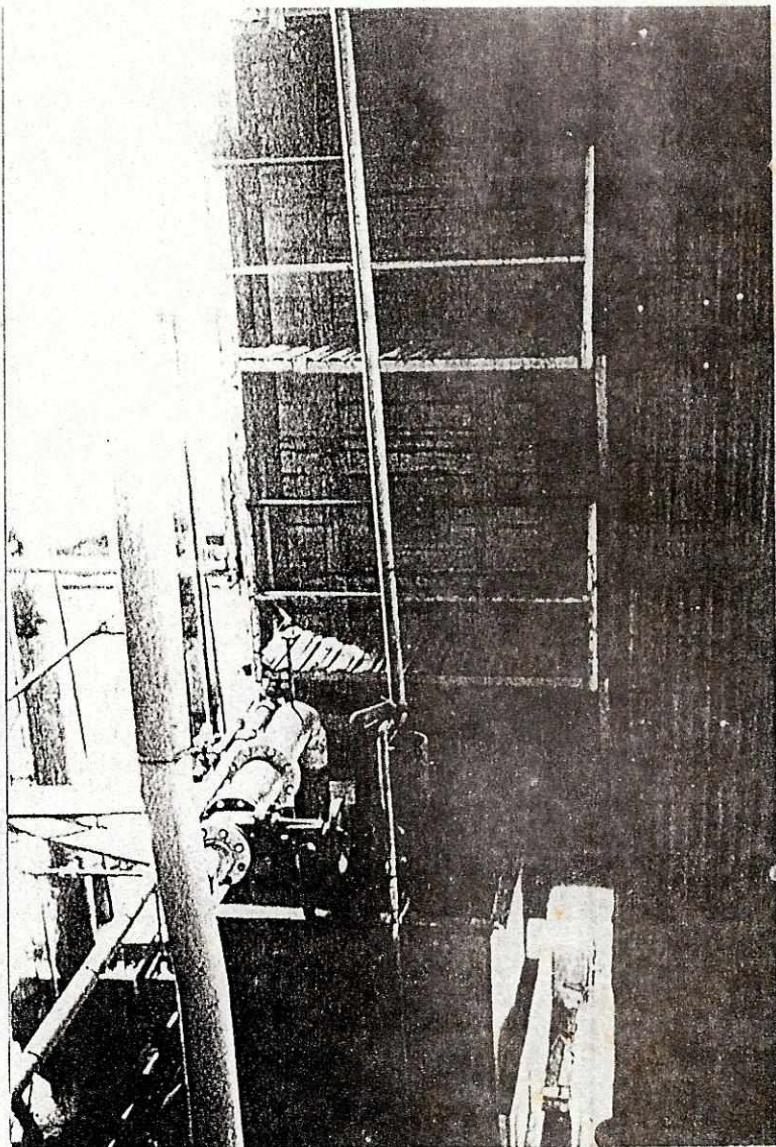
## VISTAS DE LA TORRE DE SULFITACION



## VISTA 1: EXTERIOR INFERIOR

Aspecto de:

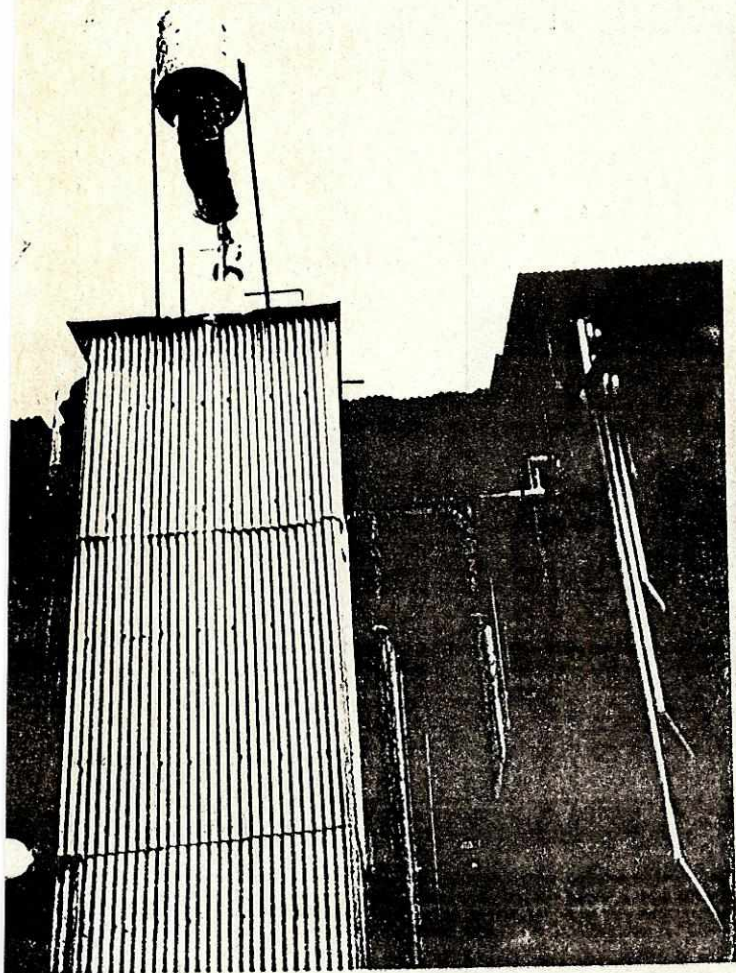
- Hornos quemadores de azufre.
- Sistema de enfriamiento de gases.
- Medidores de presión de torre.



## VISTA 2: INTERIOR

Aspecto de:

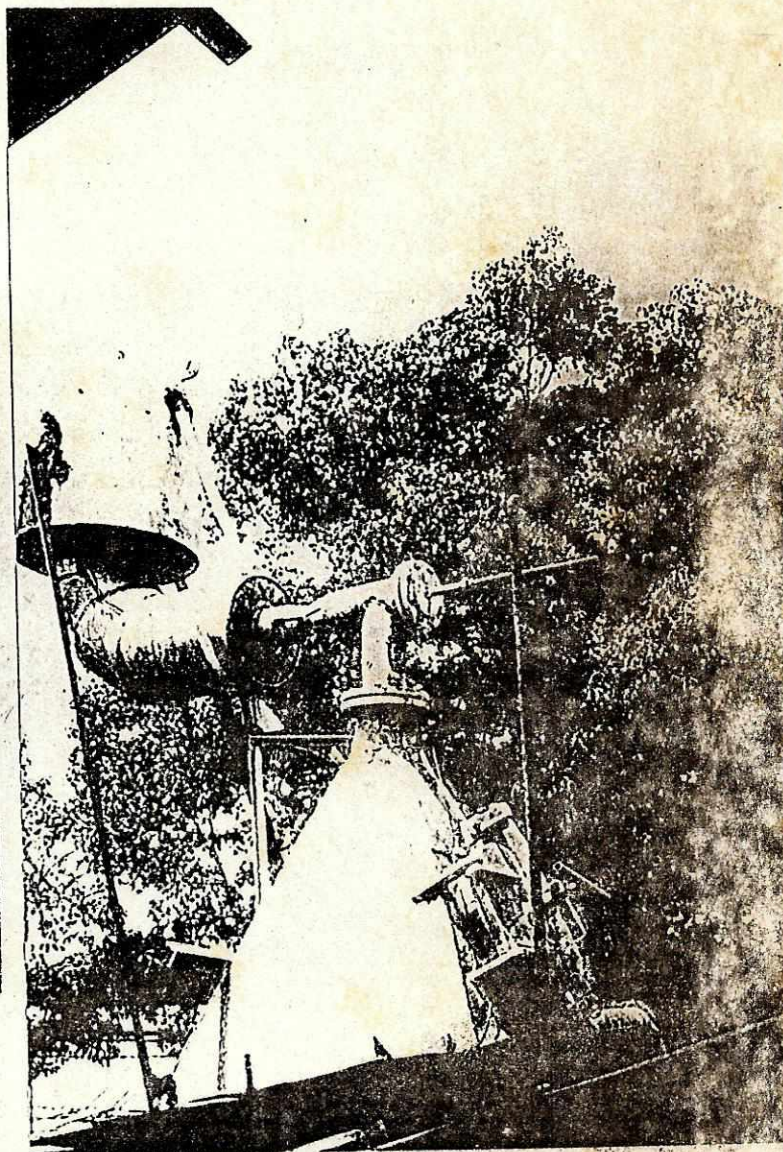
- Columna de madera.
- Tanque receptor de jugo sulfitado.
- Enfriamiento de hornos.



VISTA 3: EXTERIOR SUPERIOR

Muestra:

- Silenciador de gases exhaustos.
- Entrada de jugo diluido.



VISTA 4: SUPERIOR

Detalle de:

- Eyector de vapor.
- Copla de medición de presión.
- Copla de medición general.