

870118

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA

INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA DE CIENCIAS QUIMICAS



TITULO C. H.
FALLA DE ORIGEN

DISEÑO TERMODINAMICO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA JUGO DE CAÑA SULFITADO Y ALCALIZADO
(CON DETERMINACION DE PROPIEDADES FISICAS DEL JUGO)

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A

IDALIA SAHYLI VILLAR BERNAL

ASESOR: IQ. ALBERTO LANCASTER JONES V.

GUADALAJARA, JAL.

1991



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 está 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.

C O N T E N I D O

PRÓLOGO	1
I) INTRODUCCIÓN	3
II) GENERALIDADES	5
III) CONCEPTOS TEÓRICOS:	
a) MECÁNICA DE FLUIDOS	13
b) TRANSFERENCIA DE CALOR	17
IV) EQUIPO Y TÉCNICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL JUGO DE CAÑA SULFITADO Y ALCALIZADO:	
a) BRUX	34
b) VISCOSIDAD	35
c) CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	39
V) TABLAS Y GRÁFICAS DE PROPIEDADES:	
a) BRUX	53
b) VISCOSIDAD	55
c) CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	57
VI) DISEÑO TERMODINÁMICO DEL CALENTADOR DE JUGO DE CAÑA SULFITADO Y ALCALIZADO.	62
RESUMEN	71
CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	75
APÉNDICE:	
TABLAS DE PROPIEDADES DE SOLUCIONES DE SACAROSA:	
a) BRUX	78
b) DENSIDAD	80

PRÓLOGO

Al recibir la oportunidad de relacionarme con la fabricación del azúcar de caña, nació en mi la inquietud de investigar sobre el diseño termodinámico de los intercambiadores de calor que se utilizan en esa industria.

Al iniciar el proceso de investigación me enfrenté con el problema de que el equipo de industrias azucareras se encuentra diseñado y adecuado según la experiencia y el realizar un diseño termodinámico de la forma tradicional constituía un problema, ya que la bibliografía consultada sólo reportaba datos acerca de soluciones puras de sacarosa o en su defecto, datos muy particulares acerca de industrias azucareras del extranjero y era conveniente asegurarme de las propiedades físicas del jugo de caña alcalizado y sulfitado, que es el que recibe el calentamiento en un ingenio de mi interés.

Partiendo de la base de que las propiedades físicas de las soluciones puras de sacarosa y las del jugo de caña con cal y azufre, no eran las mismas, decidí obtenerlas experimentalmente; para lo cual contaba con el equipo adecuado, no así para medir la conductividad térmica del jugo, así que tuve la necesidad de diseñar y construir un aparato, basándome en un modelo que brindaba muy poca información al respecto; y después de obtener la información necesaria, había que continuar con el objetivo de este --

trabajo, diseñar termodinámicamente un intercambiador de calor para jugo de caña alcalizado y sulfitado.

Por su invaluable cooperación para llevar a cabo este trabajo, deseo expresar mi más profundo agradecimiento al:

- +Sr. Miguel Toriz Rodríguez, analista en el laboratorio del Ingenio "El Molino" S.A. de Tepic, Hay., porque incondicionalmente me mostró sus amplios conocimientos en la fabricación del azúcar de caña.
- +Ing. Roberto Braun, Jefe del Depto. de Física de la UAG, por sus sabios consejos en la construcción del dispositivo que mide conductividad térmica de líquidos.
- +IQ Rodolfo Casillas Vargas, Jefe del Depto. de Química de la UAG, por su apoyo y orientación en la construcción y justificación de dicho dispositivo.
- +IQ Alberto Lancaster Jones, experto en la fabricación de azúcar de caña, por hacerme el honor de ser mi asesor de tesis.
- +IQ Ma. Dolores Ortiz Castellanos, por todas sus observaciones para mejorar este trabajo.
- +GRACIAS a todo el personal del Depto. de Física de la UAG, por su amable colaboración.

I

I N T R O D U C C I Ó N

La industria azucarera en México, constituye - una fuente económica muy importante, por lo que es vital- que el proceso aplicado para la obtención del azúcar de - caña, aproveche al máximo la materia prima.

Este tipo de industrias se caracterizan porque- la mayor parte de sus equipos están adecuados según la ex - periencia, la cual se acepta como ley natural; aunque de- be reconocerse que un número considerable de datos obteni - dos de dicha experiencia no se han probado para que ten - gan validez general.

El estudio de esta tesis se reduce al diseño -- termodinámico de un intercambiador de calor para jugo de- caña sulfitado y alcalizado. Al añadir al jugo la cal y - el azufre, es importante en el proceso el calentamiento - ya que al aplicar calor, se producirán grumos o coágulos- bien formados de asentamiento rápido, que en el momento - de hacer la separación de lodos y jugo, ésta se realizará en forma efectiva, produciendo un jugo claro y brillante, el cual continuará su paso para llegar finalmente al pro- ducto deseado, el azúcar, con excelente calidad.

El principal problema al que se enfrenta una - persona que desea realizar el diseño de algún equipo para industrias azucareras, de la forma tradicional, es la au-

sencia de datos exactos sobre las propiedades físicas del jugo de caña, porque la información que se encuentra es - para soluciones puras de sacarosa y en un rango limitado de temperaturas, o en su defecto datos muy particulares - acerca del jugo en industrias azucareras del extranjero y no hay que olvidar que dependiendo de las características del suelo en que se siembra la caña, los cuidados que recibe ésta en su crecimiento, el tipo particular de ella y su corte y tratamiento industrial, son las características que tendrá; y todos estos factores, entre otros, cambiarán de zafra en zafra, aunque en general presente aproximadamente el mismo comportamiento.

Generalmente la caña de azúcar está constituida por: 74.5% de agua, 14% de azúcares, 10% de fibra y 0.5% de cenizas.

Por lo anterior se consideró oportuno determinar las propiedades físicas del jugo sulfitado y alcalizado, como: brix, viscosidad y conductividad térmica y compararlos con los reportados en la bibliografía para soluciones puras de sacarosa.

Es digno de mencionar que para obtener los datos de conductividad térmica del jugo, se tuvo la necesidad de diseñar y construir un aparato (con sus accesorios) que los proporcionara, tomando como objetivos principales su eficiencia y bajo costo.

II

G E N E R A L I D A D E S

El equipo de transferencia de calor se define - por las funciones que realiza en un proceso, algunos de - estos equipos son: calentadores, condensadores, hervidores, evaporadores, etc.

En los ingenios azucareros antiguamente se realizaba el calentamiento del jugo por fuego directo, después se pasó al calentamiento por medio de vapor. El paso inicial entre estos dos sucesos fue la adaptación de una chaqueta de vapor a un tanque, probablemente en un intento de obtener un incremento en la superficie de calentamiento se introdujo el uso de tubos dentro de un cuerpo entonces se vió la importancia que tienen las velocidades del jugo y el vapor, conjuntamente con la necesidad de -- eliminar los gases incondensables y los condensados.

Actualmente se lleva a cabo el calentamiento - del jugo casi exclusivamente por medio de calentadores - multitubulares de paso múltiple y a una velocidad relativamente alta, de tipo horizontal y vertical.

La real importancia del calentamiento del jugo es que al manejar el proceso se obtenga un coágulo bien - formado de asentamiento rápido, con la producción de un - jugo claro. Lo importante es cómo se forma el flóculo, - en éste influyen la calidad y los constituyentes del jugo y secundariamente la secuencia cal-azufre-calor, que se -

emplea.

La calidad del jugo se define como la forma en que éste responde a un proceso de clarificación, aunque no se ha tenido claramente detectada la causa de esta variación en la calidad, básicamente la razón es la relación fisicoquímica de los diferentes constituyentes del jugo, además de la variedad, el grado de madurez, las cualidades del suelo y las condiciones de humedad de la caña

Al añadir la lechada de cal para producir una reacción alcalina, algunos coloides se precipitan formando lo que podría llamarse un flóculo de calcio, este precipitado principalmente está constituido de fosfato de calcio y de hidróxidos de hierro y aluminio. Al calentar el jugo las reacciones que se producen se aceleran y por efecto de la deshidratación posteriormente puede tenerse lugar una precipitación de coloides. El efecto práctico es que la precipitación consolida, y con menos probabilidad puede formarse una nata. Si se formara, atraparía la materia en suspensión y no la dejaría precipitar, y por lo tanto no se puede llevar a cabo la clarificación.

El jugo de caña se sulfita para cambiar la reacción o para corregir la composición de los no azúcares -- por medio de reacciones de precipitación, que tienen lugar a valores de PH bajos o para precipitar sales de calcio, como sulfitos de calcio y así quitarle el color obscuro al jugo. Se alcaliza para estabilizar el PH y no --

producir flóculos; se fosfata para obtener un precipitado voluminoso, que para el proceso actual, se fosfata con -- fertilizante desde que se siembra la caña. Finalmente se calienta para obtener una mejor reacción entre las sustancias agregadas y el jugo, y después obtener un buen resultado en el clarificador, donde se separa el jugo limpio - de los lodos.

Los calentadores deben trabajar a lo sumo 48 horas, pero en este caso sólo lo hará en períodos de 8 horas. Después se limpian con un chorro de vapor directo - y luego se pasa agua para que no le queden residuos de jugo. Cuando los intercambiadores no se encuentren limpios se pasará a través de ellos una solución de sosa a baja - concentración.

Un resumen general del proceso de fabricación - del azúcar de caña es:

- 1) La caña llega en camiones que se pesan en la entrada de la fábrica y se descarga la caña en el patio, en forma de tercios, los cuales contienen aproximadamente 3500 - Kg. de caña, cada uno.
- 2) Por medio de grúas se transportan los tercios a las mesas y de las mesas pasan a los conductores.
- 3) Los conductores llevan la caña a unas cuchillas en las cuales se pica la caña en pequeños trozos, éstos pasan a la desfibradora donde se desmenuzan en fibras cargadas de jugo.
- 4) Las fibras pasan al primer molino que tiene dos mazas - profundamente ranuradas que extraen entre el 40 y el -- 70% de jugo, el cual se llama jugo desmenuzado.
- 5) Siguen las fibras por tres molinos más, que constan de - tras mazas cada uno, en donde se recogerá el jugo mez - clado. En el tercer molino tiene adaptada una salida - de agua, que servirá para realizar la maceración, que - consiste en agregar agua para obtener una mayor extrac - ción de sacarosa.
- 6) El bagacillo restante pasa al cuarto y al quinto molino y aquí finalmente se obtiene el jugo residual.
- 7) El jugo obtenido de todos los molinos se pasa a un de - cantador donde se le separa el máximo de impurezas que - contenga, también éste pasa a través de unos filtros pa - ra quitarle de nuevo otra cantidad considerable de im - purezas.

- 8) El jugo obtenido de los filtros pasa a las básculas para ser pesado y este jugo se manda a lo que se le llama fábrica, ya que a toda la parte antes mencionada se le llama batey.
- 9) El jugo recibido en la fábrica, se pasa en contracorriente en el sulfitador, en el cual se quema azufre y se produce SO_2 .
- 10) El jugo sulfitado cae en un tanque llamado encaladora, el cual tiene en su parte inferior forma cónica y por el centro de éste se descarga el jugo. Además cuenta con un tubo adaptado a la pared, que llega hasta el fondo del tanque, por el cual saldrá el agua de cal para mezclarse con el jugo sulfitado; después se abre la válvula para que el jugo después de 15 minutos de contacto pase a los intercambiadores de calor.
- 11) Entra el jugo al intercambiador de calor, a $28^{\circ}C$ y sale de él a $110^{\circ}C$ y de aquí pasa el jugo caliente al tanque flash.
- 12) En el tanque flash se desprenderá vapor de agua del jugo, de tal forma que disminuirá su turbulencia, para que al entrar al clarificador, no produzca alteración entre el lodo y el jugo que se encuentra clarificándose.
- 13) Del tanque flash pasa al clarificador, donde podrán asentarse todas las partículas indeseables hasta el fondo de éste, con ayuda de un coagulante llamado Separan AP-30 y así el jugo limpio se quedará en la parte superior del clarificador.

- 14) El jugo clarificado pasa al cuádruple efecto, donde se le evaporará agua y quedará un material denso llamado meladura.
- 15) Los lodos pasarán a un filtro que trabaja a vacío y -- aquí se separará el jugo que puede contener el lodo y éste se bombea de nuevo a los tanques encaladores. -- Los lodos libres casi por completo de jugo se revolventarán con bagacillo que resultó del quinto molino y se formará una torta llamada cachaza la cual transportarán por medio de bandas, a camiones que la llevarán a procesar a otra industria para hacer alimento para el ganado.
- 16) La meladura obtenida del cuádruple efecto se pasará a unos tanques llamados tachos de primera y tercera, donde se siembra semilla para obtener la cristalización del azúcar. En los tachos de primera se agrega hidrosulfito de sodio para clarificar y quitar la goma que contienen los cristales de azúcar.
- 17) La masa de los tachos de primera se pasa a las centrifugas de primera donde se separará de la masa, el cristal. La miel restante se pasa a los tachos de tercera y ésta a las centrifugas de tercera; la miel obtenida de ahí se llama miel incristalizable que se pasa a la fábrica de alcohol y los cristales de las centrifugas de primera y tercera se pasan a un cilindro rotatorio, denominado secador o granulador.
- 18) El cilindro rotatorio trabaja con aire calentado por vapor y tiene la función de secar el azúcar, gira éste

y pequeños martillos que tiene adaptados alrededor, - golpean constantemente para que no se pegue el azúcar a las paredes.

- 19) El azúcar ya seca pasa a las máquinas envasadoras donde se carga en sacos de polipropileno y después éstos son llevados al almacén de donde se distribuyen al público.

DIAGRAMA DE FLUJO
FABRICACION DE AZUCAR DE CAÑA

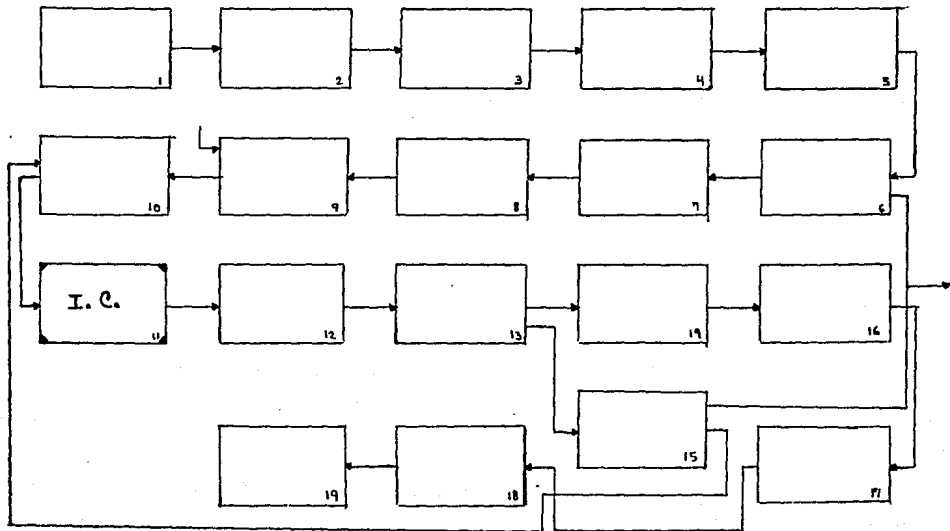
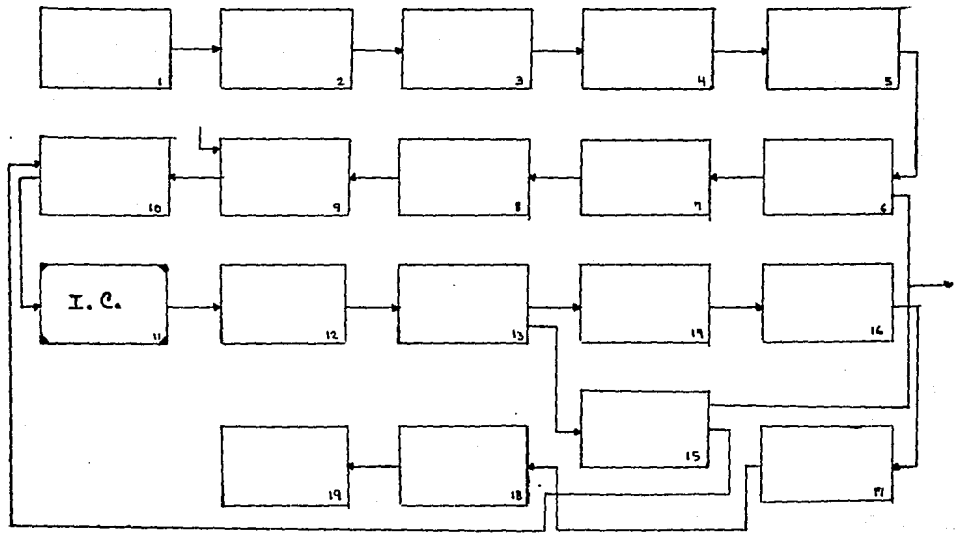


DIAGRAMA DE FLUJO
FABRICACION DE AZÚCAR DE CAÑA



III

CONCEPTOS TEÓRICOS

a) MECÁNICA DE FLUIDOS.-

Un fluido es una sustancia que sufre una deformación continua cuando se somete a un esfuerzo cortante.- Esta parte de la ciencia nos involucra con términos y conceptos fundamentales sobre los cuales descansa el diseño termodinámico de un intercambiador de calor y otros equipos.

Trata de velocidades de flujo, viscosidad, flujos laminares y turbulentos, estados estacionarios, etc.- A continuación se definen estos parámetros y su influencia en la transmisión de calor.

VELOCIDAD: Es un factor importante, ya que el aumento de la velocidad del movimiento relativo de una solución corrosiva (como lo es el jugo) y una superficie metálica tiende a acelerar la corrosión. Este efecto se debe al índice más alto, al que los productos químicos corrosivos, incluyendo las sustancias oxidantes (aire) llegan a la superficie que corroe. Cuanto mayor sea la velocidad, más delgadas serán las películas a través de las cuales deben penetrar las sustancias corrosivas y por las cuales se tienen que difundir los productos solubles de corrosión, además si se han formado pequeñas capas de productos insolubles de corrosión en la superficie metálica, las altas velocidades evitan la formación o la retiran si se han formado.

Además la velocidad influye definitivamente en que el flujo a través de los tubos sea laminar o turbulento y en caso de una tubería que maneja fluidos son sólidos en suspensión (jugo de caña), la velocidad utilizada debe ser suficiente para evitar que los sólidos se sedimenten y no muy alta por lo antes mencionado, la corrosión. El efecto de la velocidad sobre el coeficiente de transmisión de calor es muy considerable y por experiencia se recomiendan velocidades entre 1 y 2 m/s, pues si la velocidad es menor a 1 m/s, el equipo se ensucia rápidamente y la temperatura del jugo baja con rapidez y si la velocidad es mayor a 2 m/s, el paso del jugo por el intercambiador provoca una pérdida de carga, que se hace insostenible.

GRADOS BRIX: El grado brix es un porcentaje de sólidos totales (sacarosa, azúcares reductores y sales orgánicas e inorgánicas) solubles en una solución azucarada. Se determina por medio de un aerómetro graduado en dicha escala o bien por medio de un refractómetro. En caso de usar un refractómetro se hacen las determinaciones a 20°C y en el caso de un aerómetro lo normal es corregir la lectura con tablas como la que se muestra en el Apéndice A.- Para obtener la densidad de dichas soluciones en base a los grados brix que se obtengan, se determina también por las tablas adjuntas al final de este trabajo en el Apéndice B.

VISCOSIDAD: La resistencia que ofrece un fluido a las deformaciones continuas debido a un esfuerzo cortante se llama consistencia, para gases y líquidos Newtonianos la consistencia es constante y se llama viscosidad. La viscosidad se puede considerar como una conductividad térmica de momento o como cantidad de movimiento análoga a la conductividad térmica en la transferencia de calor por conducción y al coeficiente de difusión en la transferencia de masa por difusión.

La influencia de la viscosidad es definitiva, ya que los líquidos viscosos tienden a incrementar los caballos de fuerza que se requieren en la bomba para reducir la eficiencia de la misma, por el aumento de fricción en las líneas de la tubería, que es la presión que se requiere para vencer la resistencia al flujo de la tubería y los accesorios.

La viscosidad de las soluciones de sacarosa aumenta primero lentamente con la concentración. Para soluciones azucaradas el PH no aumenta apreciablemente a la viscosidad cuando es inferior a 7, en la región alcalina aumenta en forma aproximadamente logarítmica, sólo se hace notable el aumento con los valores de PH mayores a 11 para jugos claros. La viscosidad es un factor que disminuye exponencialmente con el aumento de temperatura.

Los cambios en la temperatura y la densidad afectan

tan profundamente la viscosidad de las soluciones azucaradas; por otra parte es complejo el efecto de las impurezas sobre la viscosidad. Para una misma concentración total de sólidos, las soluciones que contienen azúcar invertido tienen una viscosidad menor que las de sacarosa pura. El efecto de las sales minerales para que es variable; en general las sales de potasio y sodio del jugo, reducen la viscosidad de éste y las sales de calcio la incrementan.

REYNOLDS: Es una cantidad adimensional en donde es proporcional la fuerza de inercia a la fuerza viscosa en un sistema de flujo. En otras palabras, es una medida de intensidad de corriente que pasa fluyendo por un objeto calentado. Es un índice de estabilidad de la turbulencia en un fluido en movimiento.

Su valor depende de la geometría del canal, la velocidad con que se maneja el fluido, la densidad de éste y la longitud del canal. Para tuberías circulares el valor de transición de flujo laminar a turbulento se encuentra entre 2000 y 3000. Si el número de Reynolds de un sistema excede a su número de transición, sucede que el movimiento no es laminar en toda la longitud del canal, sino que se genera turbulencia en la zona inicial de inestabilidad que se extiende rápidamente por todo el fluido produciendo con ello una perturbación en el patrón general de flujo.

El número de Reynolds está definido por:

$$Re = \frac{D_o v \rho}{\mu} \quad (3a-1)$$

para tuberías.

b) TRANSFERENCIA DE CALOR:

La transferencia de calor es la ciencia que busca predecir la transferencia de energía que tiene lugar entre cuerpos como resultado de la diferencia de temperaturas. La termodinámica enseña que la transferencia de energía se define como CALOR. Hay tres tipos de transferencia de calor básicamente: CONDUCCIÓN, CONVECCIÓN Y RADIACIÓN. Los tres tipos pueden darse al mismo tiempo o en combinación de dos.

Existe transferencia de calor con cambio de fase que implica la transferencia simultánea de masas con transferencia de calor. Esta parte es muy importante ya que en este trabajo se utiliza vapor bajo estas condiciones.

La ecuación general a utilizar para el diseño termodinámico del intercambiador propuesto es:

$$Q = U A \Delta T_m F \quad (3b-1)$$

algunos de estos conceptos básicos relacionados con la transmisión de calor se mencionan a continuación.

CONDUCCIÓN.- Es la transferencia de calor de una

parte de un cuerpo a otra del mismo cuerpo, o bien de un cuerpo a otro cuerpo, que esté en contacto físico con él sin desplazamiento apreciable de las partículas del cuerpo.

CONVECCIÓN.- Es la transferencia de calor de un punto a otro dentro de un fluido, un gas o líquido mediante la mezcla de una porción de fluido contra otra. - Existe la convección natural y la forzada. En la primera se encuentra que el movimiento del fluido se debe totalmente a la diferencia de densidades como resultado de la diferencia de temperaturas y en la forzada el movimiento se produce por medio mecánico, que es el que interviene en el diseño termodinámico de un intercambiador de calor.

RADIACIÓN.- Es la transferencia de calor de un cuerpo a otro que no se encuentra en contacto con él, sino que se lleva a cabo por medio del movimiento ondulatorio a través del espacio.

COEFICIENTE DE PELÍCULA.- La velocidad de transferencia de calor total obtenida de un intercambiador es la resultante de un número de coeficientes laminares independientes, que comprenden:

- a) coeficiente del lado del vapor
- b) la capa de suciedad y erosión del mismo lado del vapor

d) la película de incrustación del lado del jugo.

e) coeficiente del lado del jugo

Tratando algunos de los puntos anteriores, se puede decir que en varios estudios de investigación se ha dado una atención muy especial al mantenimiento del lado del vapor de los tubos de calentamiento para que estén libres de depósitos. Muy a menudo en la práctica no se le da la atención debida a este punto. Cuando se utiliza el vapor de escape de las máquinas de émbolo como medio de calefacción, el depósito está compuesto principalmente de aceite lubricante y de sus productos de degradación; cuando se utiliza vapor del primer vaso del cuádruple efecto, el problema se vuelve más difícil y por lo que se conoce, todavía no se ha encontrado una solución práctica para separar la incrustación así formada, con facilidad y eficiencia. Por otro lado, el uso de vapor como medio de calentamiento produce dificultades porque el condensado caliente es muy corrosivo y debe evitarse que éste se acumule dentro del intercambiador.

Si se trata ahora el jugo, en general no presenta problema la incrustación del calentador del lado de éste, como la incrustación de un evaporador del mismo lado, ya que aunque hay un cambio de temperatura, no hay cambio en la concentración y un examen cuidadoso de los tubos de un calentador después de que se ha sacado de servicio pa-

ra darle limpieza, revela algunas veces que en un paso, - los tubos están perfectamente limpios y que en el otro lado están comparativamente incrustados. Esto se debe a - que en promedio la temperatura de uno, al siguiente paso, difieren, como también son diferentes características de precipitación y de posición de los constituyentes del jugo.

En el calentador de jugos, el análisis de incrustación en el lado del jugo generalmente muestra que hay una proporción relativamente alta de materia orgánica. Esto se debe a que en la estructura de incrustación están incluidas partículas de proteína precipitada, de bagacillo, etc.

Los constituyentes son los que determinan el método de ataque, llegando a ser necesaria una limpieza química con sosa cáustica en solución a baja concentración. Se ha tenido la experiencia de que en algunos casos sólo es necesario abrir las compuertas del calentador y abrirlo suficiente la válvula del vapor para obtener una efectiva separación de la incrustación. Al desprenderse ésta puede ser luego extraída con agua utilizando manguera.

Por lo anterior en las industrias azucareras tienen 2 ó 4 calentadores, para cubrir la demanda de calentamiento de jugo, ya que cada 8 horas de uso se les tiene que hacer limpieza general.

Los recubrimientos de impurezas e incrustaciones representan una resistencia adicional al flujo de calor, dando como resultado una disminución en el funcionamiento. El efecto total por lo común se representa como un factor de suciedad o resistencia de suciedad que debe incluirse junto a las otras resistencias térmicas que forman el coeficiente de transferencia de calor, el cual se representa como una ecuación del tipo:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{io}} + \frac{1}{h} + R_t + R_v + R_j} \quad (3b-3)$$

La resistencia térmica ejercida por la capa de suciedad y erosión del lado del vapor puede variar de acuerdo con el estado de la superficie.

La conductancia térmica de las paredes varía con el espesor del metal y la conductividad térmica de éste. La conductancia térmica en el lado del líquido probablemente será el coeficiente laminar más bajo, salvo cuando la superficie se ha desincrustado recientemente, de ahí que sea el factor regulador dominante.

Los coeficientes de transferencia de calor asociados con la condensación del vapor son muy altos.

Para obtener el valor de la resistencia que pre-

senta el tubo al paso del calor, se utilizará la ecuación:

$$Rt = \frac{De}{2 k_t} \quad \text{Ln} \quad \frac{De}{De - 2t^*} \quad (3b-4)$$

Por lo que se refiere a la resistencia por suciedad que presenta el jugo, es un factor experimental proporcionado por la industria tratada en este trabajo; aunque existen ecuaciones empíricas para obtener su valor y una de ellas es dividir $.08/v$ (Ref.6) donde v es la velocidad del jugo dentro de los tubos en m/s.

HUGOT (Ref.4) recomienda las siguientes tres fórmulas para el diseño de un intercambiador de calor para jugo de caña:

$$a) \quad M = PC (T - t_o) (1 - e^{-KS/PC}) \quad (3b-5)$$

con la cual se calcula el calor transmitido al jugo

$$b) \quad t = T - (T - t_o) e^{-KS/PC} \quad (3b-6)$$

que indica la temperatura obtenida para el jugo

$$c) \quad S = PC/K \quad \text{Ln} \quad (T - t_o / T - t) \quad (3b-7)$$

la cual representa la superficie de calentamiento del intercambiador.

Además, para la obtención del coeficiente total de transmisión de calor la experiencia de los investigadores en el ramo nos proporcionan varias alternativas:

a) HAUNSRAND:

$$K = 750 \sqrt[3]{V + .007}$$

la cual se dedujo a base de trabajar con tubos limpios, - sin embargo el autor HUGOT (Ref.6), dice que la raíz cúbica es una potencia insuficiente para caracterizar la acción de la velocidad sobre el coeficiente de transmisión de calor.

b) SPEYERER:

$$K = 220 + 3.5 T$$

en el 9o. Congreso ISSCT, propuso para una velocidad de - 1 m/s de circulación del jugo a través del intercambiador la ecuación anterior, donde T es la temperatura del vapor que calienta en °C.

c) HUGOT:

$$K = 57 \sqrt{V + .04}$$

sugiere la ecuación anterior, pero tiene la desventaja de tomar en cuenta sólo el efecto de la transmisión de calor entre el tubo (o la incrustación) y el jugo en el que la velocidad de éste es importante.

d) CRAWFORD Y SHANN:

$$1/K = 0.01 + 1/0.06 v^{0.8}$$

recomendaron la expresión anterior en el 9o. Congreso de ISSCT, la cual se obtuvo de trabajar con tubos limpios - en semanas de 140 horas, y produce un valor alto, comparado con la práctica y no toma en cuenta la influencia - del vapor que calienta. Además el 0.8 es insuficiente - para la práctica y sólo representa un refinamiento para - determinaciones científicas. Pero haciéndole los ajus - tes necesarios para que sea aplicable a la práctica se - representa como:

$$K = \frac{T}{0.1 + 0.08/V}$$

donde el 0.1 es la resistencia del calor transmitido debido a los factores de suciedad, erosión y las paredes - de los tubos y varía con el paso de los días este valor, por la incrustación de los tubos. El segundo término co rresponde a la resistencia del lado del jugo, debida a - las incrustaciones y en la cual interviene la velocidad - a la que circula éste.

e) PIETER HONING (ref. 5, Tomo III):

Nos dice que es preferible, por lo menos para las fábricas de azúcar de caña actuales, usar la siguiente fórmula que es más representativa de los coeficientes de transmisión de calor que generalmente se tienen en la práctica:

$$K = 0.35 (tv - 32) \sqrt{V} \quad (3b-8)$$

donde tv= la temperatura del vapor de agua usado para el calentamiento del jugo ($^{\circ}F$)

V= velocidad del jugo (pie/s)

Como se observa existen diversas opiniones acerca del coeficiente total de transmisión de calor para intercambiadores de calor de jugo de caña. Por lo anterior resulta interesante comparar el valor del área total de transmisión de calor obtenida por la forma tradicional y la obtenida por las fórmulas propuestas por la experiencia en la fabricación de azúcar de caña.

Los símbolos y nomenclatura utilizados en las ecuaciones: (3b-5) a (3b-7), son los siguientes:

M= cantidad de calor transmitido al jugo (Kcal)

S= superficie de calentamiento del intercambiador (m^2)

P= peso del jugo por calentar (Kg/h)

C= calor específico del jugo ($Kcal/Kg \text{ } ^{\circ}C$)

T = temperatura del vapor que calienta $^{\circ}\text{C}$
 t_0 = " de entrada del jugo frío $^{\circ}\text{C}$
 t = " de salida del jugo caliente $^{\circ}\text{C}$
 K = coeficiente de transmisión de calor $\text{Kcal/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C h}$
 V = velocidad del jugo dentro de los tubos m/s

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA..- La conductividad térmica es una propiedad específica del material que forma el camino de conducción y depende de la velocidad y la distancia a través de la cual se pueden mover las moléculas y de su capacidad para portar calor. Las conductividades térmicas de los metales en particular son altas porque -- los metales contienen un cierto número de electrones libres y éstos son mucho más móviles que los iones positivos de la masa.

Cuando los sistemas están transmitiendo calor -- por mecanismos distintos de los portadores moleculares se puede definir para tales sistemas una conductividad térmica aparente que no depende en lo absoluto de las propiedades moleculares. De este modo un fluido en estado turbulento se puede definir que tiene una conductividad térmica turbulenta y está regulada por la velocidad a la que es transportado el calor por remolinos de la turbulencia y puede ser mayor que la del mismo fluido. Por otro lado cuando los sistemas gas-líquido-sólido están a altas temperaturas el calor es transportado más rápido por radiación que por cualquier otro medio y el progreso del flujo

de calor en estos sistemas puede describirse como una conductividad térmica radiante que aumenta al aumentar la temperatura.

NUMERO DE PRANDTL.- Es una propiedad exclusiva del fluido, que relaciona los espesores de la capa límite-hidrodinámica y térmica, con la ecuación:

$$Pr = \frac{C_p \mu}{K} \quad (3b-9)$$

donde influyen la capacidad calorífica del fluido, su viscosidad y su conductividad térmica.

NUMERO DE NUSSELT.- La razón de transferencia de calor por convección forzada a un fluido incompresible, de flujo turbulento que viaja por una tubería de diámetro uniforme a flujo de masa constante, está influida por la velocidad del fluido, su densidad, calor específico, conductividad térmica y diámetro interno de la tubería y se representa como:

$$Nu = \frac{h_i D_o}{K}$$

después de un estudio minucioso acerca de la relación de las propiedades físicas de los líquidos a diferentes temperaturas y viscosidades y sus efectos en el número de Prandtl de Nusselt, de Renolds, se plantea una ecuación general de la forma:

$$\frac{h_i D_o}{K} = a_1 (Re)^{.8} (Pr)^p \quad (3b-10)$$

y de acuerdo a diferentes investigadores y diversas condiciones a_1 y p , tienen valores determinados. Pero la que proponen Sieder y Tate en 1936, es:

$$a_1 = 0.027 (\mu/\mu_w)^{.14} \quad \text{y} \quad p = 1/3$$

$$+ \frac{h_i D_o}{K} = 0.027 (Re)^{.8} (Pr)^{1/3} (\mu/\mu_w)^{.14} \quad (3b-11)$$

y se utiliza para viscosidades altas y número de Reynolds mayores de 10,000.

Para el vapor que sufre condensación por el lado exterior de los tubos, Nusselt propone:

$$\frac{h D_e}{k} = 0.73 \left[\frac{De^3 \rho^2 g h_{fg}}{k \mu \Delta T N} \right]^{1/4} \quad (3b-12)$$

donde el modo mas común de condensación es la condensación de película y se caracteriza por una delgada capa de líquido que se forma en toda la superficie y tiene lugar en superficies limpias, mojables en contacto con vapores no contaminados. Debe tomarse en cuenta que la condensación es un fenómeno inverso de la ebullición, que ocu -

+ Sieder E.N., and G.E. Tate. Ind. Eng. Chem. 1936, --
pag. 28.

re cuando un vapor saturado se pone en contacto con una superficie a menor temperatura. El líquido recogido sobre la superficie es drenado por la acción de la gravedad o del arrastre de la corriente de vapor. Si el movimiento del condensado es laminar, el calor se transfiere desde la superficie de separación vapor-líquido hasta la superficie por conducción. La rapidez de transferencia de calor depende del espesor de la película. El espesor de la película depende de la rapidez de remoción del condensado.

La ecuación (3b-12) se aplicará para el vapor porque sufre un cambio de fase durante el calentamiento del jugo.

DIFERENCIA DE TEMPERATURA MEDIA LOGARITMICA.-

La diferencia de temperatura entre dos fluidos dentro de un intercambiador de calor variará en general de un punto a otro. La diferencia de temperatura media logarítmica se puede calcular a partir de las temperaturas finales de las dos corrientes, si son válidas las suposiciones siguientes:

- a) todos los elementos de una corriente dada de un fluido tienen el mismo historial al pasar por el intercambiador.
- b) el intercambiador funciona en estado estacionario
- c) el calor específico es constante para cada corriente

- d) el coeficiente general de transmisión de calor es constante.
- e) las pérdidas de calor son despreciables.

Pero cuando existe un cambio de fase, el vapor se condensa y cede su calor latente para calentar el jugo y permanece a la misma temperatura, como se muestra en la Fig. 3b-1.-

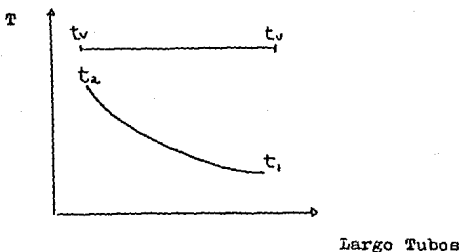


Fig 3b-1.- Diferencia de temperatura media logarítmica, -- con cambio de fase para el vapor

y dicha diferencia de temperatura media logarítmica en forma de ecuación se representa como:

$$\Delta T_m = \frac{(t_v - t_2) - (t_v - t_1)}{\ln \left(\frac{t_v - t_2}{t_v - t_1} \right)} \quad (3b-13)$$

Quando se diseñan termodinámicamente intercambia

dores de calor, diferentes del tipo de doble tubo o sea - que cuando tienen varios pasos, se introduce un factor de corrección F , de temperatura, que siempre será uno, cuando exista un fluido que no cambie su temperatura (como en este caso el vapor), durante un proceso de calentamiento.

SÍMBOLOS Y NOMENCLATURA UTILIZADOS

- A = superficie de transmisión de calor (m^2)
Cp= capacidad calorífica del fluido (Kcal/h Kg $^{\circ}C$)
De= diámetro externo de los tubos (m)
Do= diámetro interno de los tubos (m)
F = factor de corrección de la temperatura
g = gravedad (m/h^2)
h = coeficiente promedio de película del vapor con cambio de fase (Kcal/ h m^2 $^{\circ}C$)
hi= coeficiente de película del fluido que circula por el interior de los tubos (Kcal/ h m^2 $^{\circ}C$)
hio= coeficiente de película corregido, del fluido que circula por el interior de los tubos (Kcal/h m^2 $^{\circ}C$)
Kt= conductividad térmica del metal de los tubos (Kw/m $^{\circ}C$)
K = conductividad térmica del fluido (Kcal/h m $^{\circ}C$)
L = longitud de los tubos (m)
n = número de tubos en el intercambiador
N = número de tubos que están uno encima de otro en una hilera.
Q = cantidad de calor transmitido (Kcal/h)
Rj= resistencia térmica del lado del fluido (m^2 $^{\circ}C$ h/Kcal)
Rt= resistencia térmica del tubo (m^2 $^{\circ}C$ h/Kcal)
Rv= resistencia térmica del vapor (m^2 $^{\circ}C$ h/Kcal)
Re= número de Reynolds (adimensional)
t^{*}= espesor de la pared del tubo (m)
t₁= temperatura del fluido frío ($^{\circ}C$)

- t_2 = temperatura del fluido caliente ($^{\circ}\text{C}$)
 t_v = temperatura del vapor ($^{\circ}\text{C}$)
 U = coeficiente total de transmisión de calor
($\text{Kcal/h m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
 v = velocidad lineal del fluido (m/s)
 ρ = densidad del fluido (kg/m^3)
 μ_w = viscosidad del fluido evaluada a la temperatura de
pared (Kg/m s)
 ΔT_m = diferencia de temperatura media logarítmica

IV

**EQUIPO Y TÉCNICAS PARA LA DETERMINACIÓN
DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL JUGO DE
CAÑA SULFITADO Y ALCALIZADO**

a) B R I X

Las lecturas de brix se realizaron con un aerómetro colocando la muestra de jugo en una probeta de un litro, agitándola y dejando flotar sobre ella el brixómetro y después de 7 minutos de reposo, tomando la lectura correspondiente en el brixómetro.

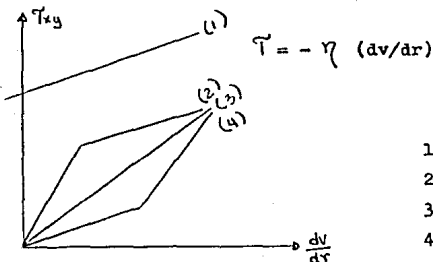
Por el método utilizado en la obtención de datos de brix, es necesario realizar correcciones a las lecturas de éstos, usando la tabla "A" del apéndice. Si la temperatura en cada valor de brix observado, se encuentra entre 0 y 19°C, habrá que restar dicho factor, pero si la temperatura se encuentra entre 21 y 60°C, se suma el factor. A 20°C los valores de brix observados no necesitan corrección.

b) VISCOSIDAD

El manejo de fluidos requiere una atención especial en los diferentes procesos, debido a los cambios que sufren en sus propiedades, por efecto de la variación de temperatura.

De acuerdo con la Ley de Newton de la viscosidad al representar gráficamente el esfuerzo de cizalla τ frente al gradiente de velocidad $(-dv/dr)$, se obtiene una línea recta que pasa por el origen y cuya pendiente es la viscosidad del fluido a cierta temperatura y presión. Como se muestra en la Fig. 4b-1.

Existen materiales industrialmente importantes que no siguen la Ley de Newton, los cuales se llaman fluidos no newtonianos y tienen la ecuación general:



- 1.- plástico de Bingham
- 2.- Seudoplástico
- 3.- Newtoniano
- 4.- dilatante

Fig. 4b-1.- Ley de Newton de la viscosidad. Relación entre el esfuerzo de cizalla y gradiente de velocidad.

disminuye: pseudoplástico	}	al aumentar (dv/dr)
constante: newtoniano		
aumenta: dilatante		

Existen dos tipos de viscosímetros:

De flujo: Saybolt, Engler, Redwood, Admiralty, Ostwald; -
se basan en mediciones de tiempo de descarga de
una columna de fluido conocido.

De torsión: Stormer y Brookfield, se basan en la medición
de la resistencia que opone el fluido a defor-
marse bajo la acción de un rotor que gira.

El equipo utilizado para medir la viscosidad del
jugo es el de Brookfield, que a continuación se describe:

- 1) motor sincrónico de inducción
- 2) disco graduado: lecturas de torque
- 3) controles: interruptor de encendido
selector de velocidades
embrague
nivel de burbuja
regulador interno de voltaje
- 4) flecha de transmisión
- 5) resorte de cobre-berilio
- 6) protector removible de rotores
- 7) rotores de diferentes tamaños y formas

8) vaso para colocar la muestra

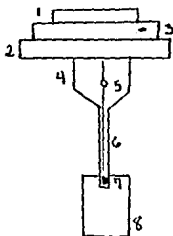


Fig. 4b-2.- Viscosímetro de Brookfield.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

- 1.- Existen cuatro tipos de rotores LV, insertar el rotor escogido, dependiendo de la viscosidad que presenta la muestra, sosteniendo la flecha para que no gire -- (la rosca hacia la izquierda).
- 2.- Introducir el rotor en el fluido de la prueba (colocado en el vaso), hasta que el nivel del fluido esté en la marca de inmersión del eje del rotor.
- 3.- Nivelar el aparato con el nivel de burbuja
- 4.- Oprimir el embrague y encender el rotor
- 5.- Liberar el embrague y dejar girar la carátula hasta que se estabilice en una posición fija.
- 6.- Introducir un termómetro en el vaso que contiene la muestra que es calentada por una estufa eléctrica, pa

ra así conocer la temperatura y realizar la lectura de viscosidad.

A velocidades bajas la lectura se hace directamente, a velocidades altas oprimir el embrague y luego apagar el motor, para obtener la lectura del torque.

Este viscosímetro trabaja a 6, 12, 30 y 60 RPM y trae una tabla con diferentes factores para cada rotor y cada velocidad.

Se construirá una gráfica y si el fluido es newtoniano se obtendrá una recta. La viscosidad se obtiene al multiplicar el torque leído por el factor correspondiente a ese rotor y velocidad.

La viscosidad se obtiene en cps.

c) CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LÍQUIDOS

Cuando se estudia la transferencia de calor, intervienen diversos factores de los materiales, para efectuar los cálculos de balance de energía y aunque algunas de estas propiedades se encuentran en la bibliografía, es importante que un ingeniero esté familiarizado con diferentes métodos para medirlas, ya que con el desarrollo de nuevos productos o en el caso de sustancias especiales, pueda construir aparatos con suficiente exactitud a bajo costo.

La conductividad térmica puede clasificarse como una propiedad de transporte ya que interviene en la transferencia de energía en los fluidos y sólidos.

Keyes y Sandell (Ref. 9) utilizaron el método de cilindros concéntricos para la medición de conductividad térmica del vapor de agua y otros gases; construyendo un dispositivo como el que se muestra en la Fig. 4c-1. El aparato ya mencionado fue construido de plata, con longitud de 12.7 cm., con un diámetro exterior de 3.81 cm. y un espacio anular para el gas de 0.0635 cm.

La relación que Keyes y Sandell utilizaron para calcular la conductividad térmica en el dispositivo fue:

$$K = \frac{q \text{ Ln } (r_2/r_1)}{2 \bar{\eta} L (T_1 - T_2)} \quad (4c-1)$$

donde: K = conductividad térmica del fluido
 q = flujo de calor
 r_2, r_1 = radios exterior e interior del espacio
 T_2, T_1 = temperaturas medidas en los radios anteriores.

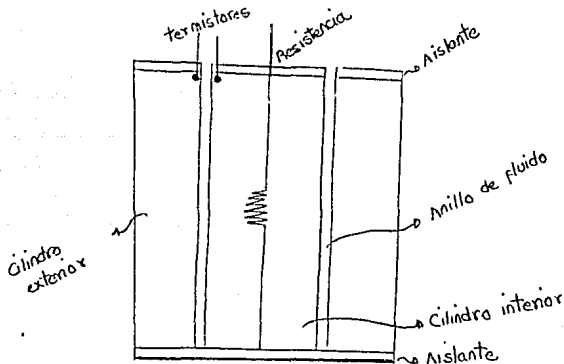


Fig. 4c-1.- Dispositivo de cilindros concéntricos, utilizado en la medición de conductividad térmica de líquidos.

El diseño y construcción del aparato utilizado - en este trabajo se basa en el mismo principio, en donde al mantener el flujo de calor constante y como los radios y - la longitud del dispositivo también son constantes, se puede establecer que la conductividad térmica del fluido es - inversamente proporcional a la diferencia de temperaturas;

dicha relación se encontrará a través de una diferencia de voltajes.

El material utilizado en este dispositivo fue -- acero inoxidable; la longitud del aparato de 7.5 cm., un diámetro exterior e interior de 5.1 cm. y 5 cm. respectivamente.

Los accesorios utilizados fueron:

- 1) Una resistencia eléctricamente aislada con una resistencia de 10 ohms y 120 watts.
- 2) El aislante usado en el montaje de los cilindros, es un plástico llamado Nylamid que tiene múltiples aplicaciones en la industria en general y es un estupendo sustituto de metales suaves para construir partes industriales. Sus características permiten operar en las condiciones más severas de uso como: desgaste y abrasión, - además cuenta con una excelente resistencia química y - mecánica, es ligero, aislante eléctrico y muy económico
- 3) Los termistores utilizados son dispositivos semiconductores extremadamente sensibles y calibrándolos adecuadamente se pueden obtener datos de temperatura con precisión de centésimas de grado o milésimas de éste. Fabricados por Fenwal Electronics.
- 4) El resto de los accesorios que se usaron para la obtención de diferencias de voltajes y con ellos la conductividad térmica del jugo, a diferentes temperaturas fue -

ron:

- Un multímetro digital, modelo 2831, serie 60-08301, de la Compañía BK Precisión Dynascan Corporation; - con el cual se obtuvieron los datos eléctricos necesarios.
- Un multímetro analógico (TMK), modelo 500, que tiene la misma función que el anterior.
- Un variac, que es un autotransformador, el cual se utilizó para regular el calentamiento de la resistencia.
- Un puente de Wheatstone, que se representa en la -- Fig. 4c-2, el cual está constituido por:

R1 = resistencia de multivuelta de 200 Kohms

R2 = " " " " 1000 Kohms

R3 = termistor 3

R4 = termistor 4

E = pila de 9 volts

S = interruptor

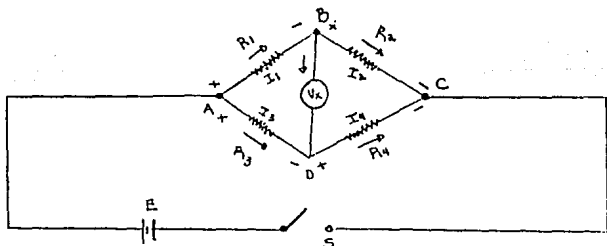


Fig. 4c-2.- Diagrama esquemático del puente de Wheatstone

Donde el termistor 3 es una resistencia variable, mientras que el termistor 4 es desconocida. Cuando se cierra el interruptor, se aplica un voltaje al puente y ajustando el termistor 3, el puente se equilibra de manera que el potencial en el punto B, iguale al del punto D. Esta condición de equilibrio se puede conseguir conectando un multímetro digital (Vx) al circuito, a través de un interruptor que contiene dicho multímetro.

Para utilizar los termistores, primeramente se deben calibrar, para lo cual se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

- a) en un baño de temperatura constante se introduce un tubo de ensayo que contiene aceite ligero en el fondo, en el cual se introducen los dos termistores y un termómetro de precisión.
- b) Al moderar la temperatura y una vez estabilizado el sistema se toman a cada una de éstas, las lecturas de las resistencias presentadas por cada termistor, con un multímetro digital.
- c) Como la ecuación de un termistor es:

$$R = A e^{B/T} \quad (4c-3)$$

R = resistencia en Kohms

A y B = constantes del termistor

T = temperatura en $^{\circ}K$

y expresada la ecuación anterior en forma logarítmica es:

$$\ln R = \ln A + B/T \quad (4c-3)$$

y con los datos obtenidos experimentalmente para cada termistor se procedió a graficar $\ln R$ vs $1/T$, con el objeto de encontrar los parámetros de los termistores, empleando la técnica de mínimos cuadrados.

d) Por lo que la ecuación para el termistor 3 es:

$$\begin{aligned} A &= 1.239 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{K} \\ B &= 4150 \text{ } ^\circ\text{K} \\ \ln R &= 4150 (1/T) - 8.998 \end{aligned} \quad (4c-5)$$

e) La ecuación para el termistor 4 es:

$$\begin{aligned} A &= 1.897 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{K} \\ B &= 4000 \text{ } ^\circ\text{K} \\ \ln R &= 4000 (1/T) - 8.57 \end{aligned} \quad (4c-6)$$

C Á L C U L O S

Para encontrar la relación entre la conductividad térmica y la temperatura, se procedió a obtener una diferencia de voltajes que es directamente proporcional a una diferencia de temperaturas.

- 1) La corriente que pasa a través de la resistencia de -- multivuelta de 200 Kohms y el termistor 3, es igual a la que pasa a través de la resistencia de multivuelta de 1000 Kohms y el termistor 4:

$$I_t = I_1 + I_3 = I_2 + I_4 \quad (4c-7)$$

- 2) como el voltaje es igual al producto de la intensidad de corriente por la resistencia:

$$E = I_3 R_3 + I_4 R_4 = I_1 R_1 + I_2 R_2 \quad (4c-8)$$

cuando el puente se encuentra equilibrado, el voltaje que pasa por los termistores es igual al de las dos resistencias de multivuelta.

- 3) el voltaje que hay en el termistor 3, es igual al de la resistencia de multivuelta de 200 Kohms y el que -- marca el multímetro:

$$I_3 R_3 = I_1 R_1 + V_x \quad (4c-9)$$

$$I_2 R_2 = I_4 R_4 + V_x$$

- 4) obteniendo así una diferencia de corrientes:

$$\Delta I = I_1 - I_2 = I_4 - I_3 \quad (4c-10)$$

5) ahora si, la diferencia de potencial se expresa como:

$$E = I_1 R_1 + I_2 R_2$$

pero despejando I_2 , de la ecuación (4c-10):

$$E = I_1 (R_1) + R_2 (I_1 + I_3 - I_4)$$

$$E = I_3 R_3 + I_4 R_4 = I_3 R_3 + (I_1 + I_3 + I_2) R_4$$

entonces:

$$E = I_1 (R_1 + R_2) - \Delta I R_2$$

$$E = (R_3 + R_4) I_3 + \Delta I R_4 \quad (4c-11)$$

despejando V_x de la ecuación (4c-9):

$$V_x = I_3 R_3 - I_1 R_1$$

sustituyendo (4c-11):

$$V_x = \frac{E - I R_4}{R_3 + R_4} R_3 - R_1 \frac{E + I R_2}{R_1 + R_2}$$

dado que el voltaje de la pila es mucho mayor que el del termistor 4 y el de las resistencias de multivuelta:

$$E \gg \gg \gg \Delta I R_4, \Delta I R_2$$

$$V_x = \frac{E R_3}{R_3 + R_4} - \frac{E R_1}{R_1 + R_2}$$

- 6) al tomarse en cuenta que los dos termistores están juntos:

$$\frac{V_o}{E} = \frac{R_{o3}}{R_{o3} + R_{o4}} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (4c-12)$$

- 7) cuando los termistores se separan:

$$\begin{array}{l} R_{o4} \rightarrow R_4 \\ T_o \rightarrow T \end{array} \quad \frac{V_1}{E} = \frac{R_{o3}}{R_{o3} + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (4c-13)$$

- 8) restando las ecuaciones (4c-12) y (4c-13):

$$\frac{\Delta V}{E} = \frac{V_1 - V_o}{E} = \frac{R_{o3}}{R_{o3} + R_4} - \frac{R_{o3}}{R_{o3} + R_{o4}}$$

realizando pasos algebraicos:

$$\frac{\Delta V}{R_{o3} E} = \frac{1}{R_{o3} + R_4} - \frac{1}{R_{o3} + R_{o4}}$$

$$\frac{\Delta V}{R_{o3} E} = \frac{R_{o3} + R_{o4} - R_{o3} - R_4}{(R_{o3} + R_4)(R_{o3} + R_{o4})}$$

$$\frac{\Delta V}{R_{o3} E} = \frac{R_{o4} - R_4}{(R_{o3} + R_4)(R_{o3} + R_{o4})}$$

- 9) como la ecuación de un termistor es:

$$R = A e^{B/T}$$

y si se considera que $T_4 - T_{o4}$ es pequeña y que $(R_{o3} + R_4)(R_{o3} + R_{o4})$ es aproximadamente constante C_1 , se representa la ecuación (4c-14) como: --

$$\frac{\Delta V}{R_{o3} E} = \frac{A_4 e^{B_4/T_o} - A_4 e^{B_4/T}}{C_1}$$

$$\frac{\Delta V C_1}{R_{o3} E A_4} = e^{B_4/T_o} \left[1 - e^{(B_4/T - B_4/T_o)} \right]$$

$$\frac{\Delta V C_1}{R_{o3} E A_4} = e^{B_4/T_o} \left[1 - e^{\frac{B_4 (T_o - T)}{T T_o}} \right]$$

$$\text{si } |\Delta T| \ll T_o \quad T_o T = T_o^2$$

$$\frac{\Delta V C_1}{R_{o3} E A_4} = e^{B_4/T_o} \left[1 - e^{B_4 \Delta T/T_o^2} \right]$$

10) otra posibilidad, es considerar el término: $B_4 \Delta T/T_o^2$ muy pequeño, entonces se desarrolla como una serie:

$$B_4 \Delta T/T_o^2 \cong 1 + B_4 \Delta T/T_o^2$$

$$\Delta V = - \frac{E R_{03} A_4 e^{B_4/T_0^2}}{C_1} \cdot \frac{B_4 \Delta T}{T_0^2}$$

$$C_2 = - \frac{E R_{03} A_4 e^{B_4/T_0} B_4}{C_1 T_0^2}$$

$$V = C_2 \Delta T$$

POR LO TANTO

$$\underline{\Delta V \propto \Delta T} //$$

La constante C_2 depende de T_0 , entre otras cosas y la diferencia de voltajes es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL JUGO DE CAÑA SULFITADO Y ALCALIZADO.

- 1) En un baño de temperatura constante a 30°C se introduce el dispositivo metálico construido para este trabajo, dentro de una bolsa de polietileno para mantener la temperatura constante, asegurar una transferencia de calor uniforme y aislar el aparato.
- 2) Se inyecta con una jeringa cada líquido de conductividad térmica conocida, en el espacio anular de los cilindros concéntricos, que tiene una dimensión de 0.1 cm., con el fin de evitar la transmisión de calor por convección.
- 3) A cada escala del variac se introducen los dos termistores en los orificios A y B (Fig. 4c-3), los cuales contienen un poco de aceite ligero para asegurar un buen contacto térmico y con ayuda de las resistencias de multivuelta (R_1 , R_2), se ajusta el multímetro digital (V_x), a cero o a un valor muy cercano a éste.
- 4) Con el multímetro analógico se debe asegurar que no -

existe contacto entre los cilindros interior y exterior

- 5) A continuación el termistor 4 (R_4) se cambia de orificio a C (Fig. 4c-3) y se toma la lectura de voltaje -- (que representa una diferencia de temperatura entre los puntos A y C), en el multímetro digital una vez estabilizado el sistema.
- 6) Se maneja finalmente el jugo de caña de manera similar que los anteriores y en base a los resultados obtenidos de diferencias de voltaje y con los datos de dichos líquidos de conductividad térmica conocida, se obtienen -- los valores de la conductividad térmica del jugo de caña alcalizado y sulfitado (Tabla 5c-2)

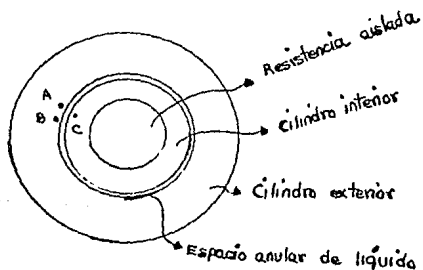


Fig. 4c-3.- Vista superior del dispositivo de cilindros -- concéntricos para la medición de conductividad térmica de líquidos.

SÍMBOLOS Y NOMENCLATURA UTILIZADOS

- I = intensidad de corriente
- R = resistencia al paso de corriente (K Ω)
- E = voltaje de la pila (9 volts)
- S = interruptor
- Vx= voltaje que marca el multímetro (volts)
- T = temperatura ($^{\circ}$ K)
- A = constante del termistor
- B = constante del termistor

Subíndices:

- o = cuando los termistores se encuentran juntos
- 1 = resistencia de multivuelta de 200 K Ω
- 2 = resistencia de multivuelta de 1000 K Ω
- 3 = termistor 3
- 4 = termistor 4

V

TABLAS Y GRÁFICAS DE PROPIEDADES

Tabla 5a-1.- Datos de brix a diferentes temperaturas para el jugo de caña alcalizado y sulfitado, corregidos con la Tabla A del apéndice.

TEMP. °C	BRIX OBSERVADO	FACTOR DE CORRECCIÓN	BRIX CORREGIDO
28	15.0	+0.51	15.51
32	14.6	+0.82	15.42
34	14.3	+1.06	15.36
39	13.8	+1.50	15.30
46	13.2	+1.98	15.18
54	12.1	+3.11	15.21
59	10.3	+3.73	13.76
60	10.8	+3.73	13.81
65	10.1	+3.17	13.27
76	8.1	+3.54	11.64
91	7.0	+4.34	11.34

Fig. 5a-1.- Variación de grados brix corregidos a diferentes temperaturas de jugo de caña alcalizado y sulfitado.

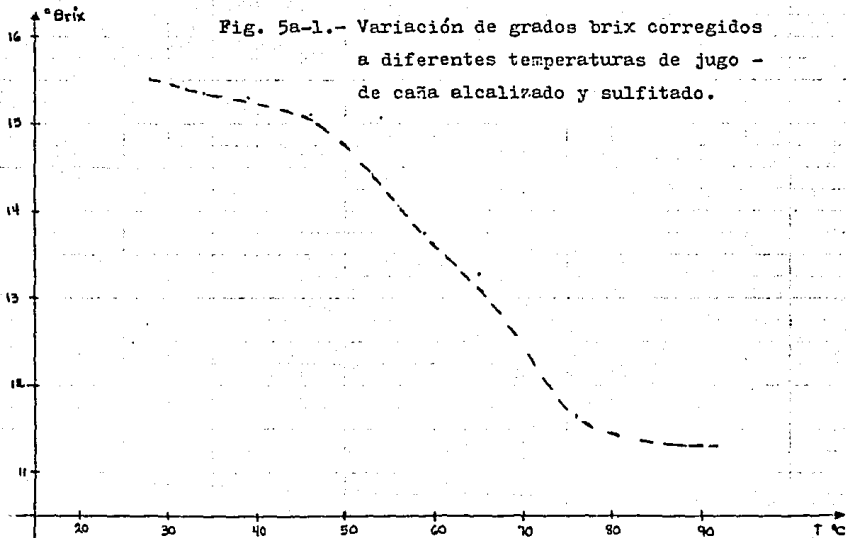


Tabla 5b-1.- Datos de viscosidad obtenidos a diferentes -
temperaturas del jugo de caña alcalizado y -
sulfitado.

TEMPERATURA	VISCOSIDAD
°C	10^{-4} KG/ MS
25	15.3
30	13.4
35	11.9
40	10.7
45	9.6
50	8.5
55	7.8
60	7.1
65	6.6
70	6.1
75	5.6
80	5.3
85	4.9
90	4.5

Fig. 5b-1.-- Variación de la viscosidad a diferentes temperaturas para el jugo de caña sulfitado y alcalizado.

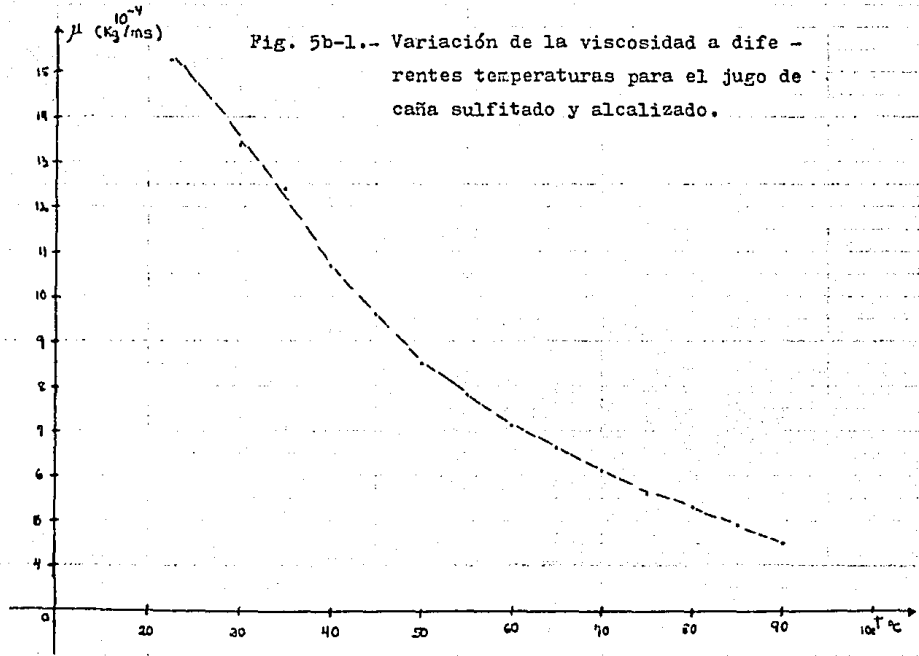


Tabla 5c-1.- Datos de resistencias presentadas por dos --
 termistores a diferentes temperaturas, duran-
 te el proceso de su calibración.

TERMISTOR 3:

TEMPERATURA		$(1/T) \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{K}$	RESISTENCIA KOHMS	Ln R
$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{K}$			
28.5	301.65	3.32	114.8	4.743
31.0	304.15	3.29	102.5	4.629
35.8	308.95	3.24	83.9	4.423
40.5	313.65	3.19	68.3	4.223
45.0	318.15	3.14	56.3	4.031
49.0	322.15	3.10	47.7	3.865

TERMISTOR 4:

28.5	301.65	3.32	114.5	4.741
31.0	304.15	3.29	100.8	4.613
36.0	309.15	3.24	80.8	4.392
40.0	313.65	3.19	67.4	4.211
45.0	318.65	3.14	54.1	3.991
48.5	321.65	3.11	48.0	3.871

Fig. 5c-1.- Datos obtenidos en la calibración de dos termistores. Logaritmo natural de las resistencias presentadas por éstos, contra el inverso de diferentes temperaturas absolutas.

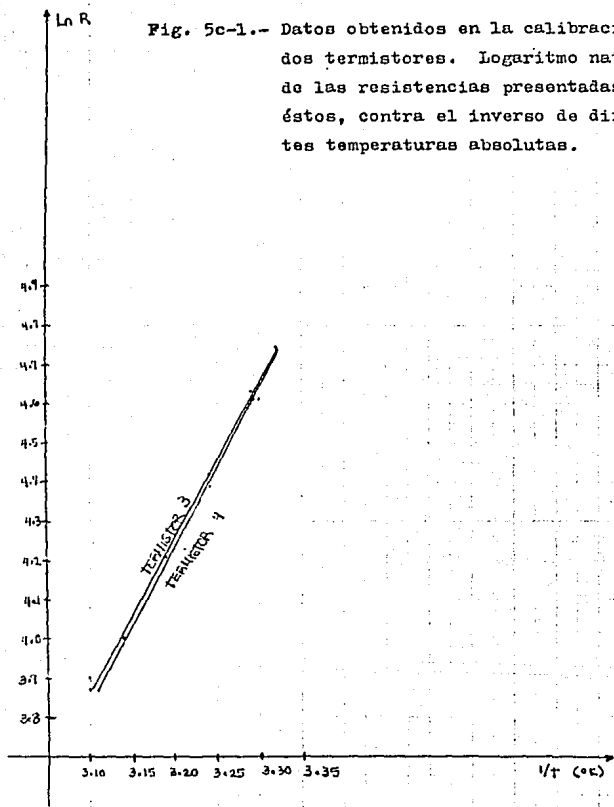
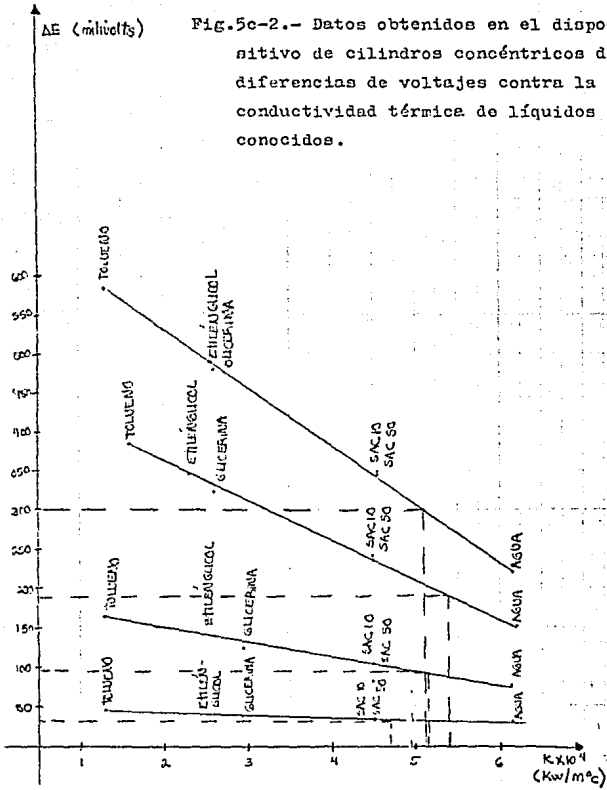


Tabla 5c-2.- Datos obtenidos de voltajes a diferentes temperaturas, en la calibración del dispositivo de cilindros concéntricos, con sustancias líquidas de conductividad térmica conocida.

ESCALA DE VARIAC	TEMP. °C	E ₁ VOLTS	E ₂ VOLTS	ΔE VOLTS	MILI VOLTS	COND.TERMICA K X 10 ⁴ KW/M °C
ETILENGLICOL:						
10	32	-0.002	0.040	0.042	42	2.621
20	33	0.000	0.140	0.140	140	2.622
30	35	0.003	0.347	0.344	344	2.303
35	37	-0.001	0.480	0.481	481	2.627
GLICERINA:						
10	32	-0.001	0.039	0.040	40	2.938
20	33	0.001	0.124	0.123	123	2.938
30	35	-0.002	0.320	0.322	322	2.625
35	37	-0.001	0.463	0.464	464	2.625
SACAROSA 10 GR/100 GRS DISOLUCIÓN:						
10	31	0.005	0.040	0.035	35	4.491
20	32	0.005	0.087	0.082	82	4.500
30	34	0.005	0.244	0.239	239	4.519
35	36	0.005	0.351	0.348	348	4.537
SACAROSA 50 GR/100 GRS DISOLUCIÓN:						
10	31	0.003	0.040	0.037	37	4.491
20	32	0.002	0.108	0.106	106	4.500
30	34	0.003	0.237	0.234	234	4.519
35	36	0.003	0.345	0.342	342	4.537

continúa la tabla 5c-2.-

ESCALA DE VARIAC	TEMP. °C	E ₁ VOLTS	E ₂ VOLTS	ΔE VOLTS	MILI VOLTS	COND.TERMICA K X 10 ⁴ KW/M °C
AGUA:						
10	32	0.003	0.035	0.032	32	6.149
20	33	0.002	0.078	0.076	76	6.165
30	35	0.003	0.155	0.152	152	6.195
35	38	0.003	0.222	0.219	219	6.144
TOLUENO:						
10	32	0.002	0.048	0.046	46	1.312
20	33	0.003	0.167	0.164	164	1.309
30	35	0.003	0.387	0.384	384	1.625
35	37	0.003	0.581	0.578	578	1.295
JUGO DE CAÑA SULFITADO Y ALCALIZADO:						
10	32	-0.006	0.029	0.035	35	4.700
20	33	-0.006	0.084	0.090	90	5.200
30	35	-0.006	0.184	0.190	190	5.400
35	37	-0.006	0.290	0.300	300	5.100



VI

DISEÑO TERMODINÁMICO DEL CALENTADOR DE
JUGO DE CAÑA SULFITADO Y ALCALIZADO.

Se diseñará termodinámicamente un intercambiador de calor, para calentar jugo de caña alcalizado y -- sulfitado. El jugo entrará al intercambiador a 28°C y -- su temperatura de salida será 110°C . Como agente cale -- factor se cuenta con vapor saturado a 120.5°C y 1 atm. -- de presión, el cual sufrirá cambio de fase.

La cantidad de jugo a calentar es 43 776 Kg/h; la velocidad del jugo circulando por el interior de los -- tubos será de 1.83 m/s y la cantidad de vapor para calen -- tar el jugo es 6312.29 Kg/h, que es el que fluirá del la -- do de coraza.

Por experiencia se recomienda una longitud de -- tubos de 17 pies (5.1816 m); un diámetro exterior de tu -- bos de $1\ 3/4"$ (0.04445 m); un diámetro interior de tubos -- de $1\ 5/8"$ (0.041275 m). Contendrá 140 tubos y 14 pasos; -- el arreglo de tubos en forma cuadrada.

El material a utilizar en el diseño y construc -- ción del intercambiador será: Admiralty para los tubos, -- que tiene una conductividad térmica de $0.1211\ \text{Kw/m}^{\circ}\text{C}$, y -- para la coraza: Acero al carbón A-285, grado C.

Se realizará el diseño termodinámico a partir -- del procedimiento utilizado por Kern (Ref. 8) con modifi -- caciones y después se procederá a comparar el área de -- transmisión de calor utilizando ecuaciones empíricas -- (Ref. 5 y 6).

Inicialmente se calculará la temperatura promedio a la que deben ser evaluadas las propiedades físicas del jugo de caña sulfitado y alcalizado. La temperatura del jugo frío será 28°C y la de salida del jugo caliente 110°C:

$$T = \frac{28 + 110}{2} = 69 \text{ } ^\circ\text{C}/$$

El calor que absorbe el jugo es:

$$Q = m_j C_p \Delta T$$

donde la capacidad calorífica del jugo se calculará mediante la ecuación (Ref. 6):

$$C_p = 1 - 0.006 B$$

B = grados brix de la muestra de jugo, evaluados a la temperatura promedio (Fig. 5a-1):

$$C_p = 1 - 0.006(12.75) = 0.9235 \text{ Kcal/kg } ^\circ\text{C}/ (=)$$

$$C_p = 3.8619 \text{ Kw/Kg } ^\circ\text{C}/$$

volviendo a:

$$Q = (43776)(.9235)(110-28) = 3 \text{ 315,025.2 Kcal/h}/(=)$$

$$Q = 3850.78 \text{ Kw}/$$

y la cantidad de calor que cede el vapor:

$$Q = m_v h_{fg}$$

$$Q = (6312.29)(525) = 3 \text{ 313,952.3 Kcal/h}, (=)$$

$$Q = \underline{3849.53 \text{ Kw}}$$

Realizando el Balance de calor:

$$m_j C_p \Delta T = m_v h_{fg}$$

$$3 \ 315,025.2 = 3 \ 313,952.3$$

Si cumple con el Balance de Calor.

La diferencia de temperatura media logarítmica:

$$\Delta T_m = \frac{(120.5 - 28) - (120.5 - 110)}{\ln \frac{120.5 - 28}{120.5 - 110}} = \underline{37.69}$$

Calculando el gasto volumétrico de jugo:

$$G_j = (m_j)(1/\rho) = (43776)(1/1034.13) =$$

$$G_j = \underline{0.0117588 \text{ m}^3/\text{s}}$$

El área de flujo por paso, requerida:

$$A_p = \frac{G_j}{v} = \frac{0.0117588}{1.83} = \underline{6.4256 \times 10^{-3} \text{ m}^2}$$

El área de flujo por paso proporcionada por 140 tubos y -
14 pasos:

$$A_p = \frac{140}{14} (A_{\text{tubo}}) = \frac{140 (\pi)}{14} \left(\frac{.041275}{4} \right)^2$$

$$A_p = \underline{1.338 \times 10^{-2} \text{ m}^2} \quad \text{Si cumple}$$

Velocidad real en los tubos:

$$v = \frac{G}{A_p} = \frac{0.0117588}{1.338 \times 10^{-2}} = 0.79894 \text{ m/s}$$

Para obtener el número de Reynolds se aplicará la ecuación (3a-1):

$$Re = \frac{D_o v \rho}{\mu} = \frac{(0.041275)(0.79894)(1034.13)}{6.2 \times 10^{-4}} =$$

$$Re = \underline{55,002.79}, \quad \text{Flujo turbulento}$$

Para obtener el número de Prandtl se aplicará la ecuación (3b-9):

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{(0.9235)(6.2 \times 10^{-4})}{.43863} = 4.69$$
$$= (4.69)(3600) = 4.85$$

y el factor μ / μ_w , donde μ_w es evaluada a la temperatura de pared entre el jugo y el vapor:

$$T_w = \frac{120.5 + 69}{2} = 94.75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

las viscosidades se deben leer de la Fig. 5b-1:

$$\frac{\mu}{\mu_w} = \frac{6.4 \times 10^{-4}}{4.2 \times 10^{-4}} = 1.524$$

Para obtener el coeficiente de película del jugo, se aplicará la ecuación (3b-11):

$$\frac{h_{iDo}}{K} = (.027)(55,002.78)^{\cdot 8}(4.85)^{1/3}(1.524)^{\cdot 14} =$$

$$\frac{h_{iDo}}{K} = \underline{297.17,}$$

Despejando h_i y obteniendo el valor de K , de la Tabla -- (5c-2):

$$h_i = \frac{(297.17)(.43863)}{.041275} = \underline{3158.09 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C},}$$

$$h_i = \underline{3.67 \text{ Kw/m}^2 \text{ }^\circ\text{C},}$$

para corregir ese factor:

$$h_{i0} = \frac{h_{iDo}}{D_c} = \frac{(3158.09)(.041275)}{.04445} =$$

$$h_{i0} = \underline{2932.51 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h }^\circ\text{C}, (=) \underline{3.4096 \text{ Kw/m}^2 \text{ }^\circ\text{C},}$$

Suponiendo un coeficiente de película del vapor de 5856 -- $\text{Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C} (=) 6.808 \text{ Kw/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

se podrá calcular la temperatura en la superficie:

$$h(tv - T_s) = h_i(T_s - \bar{T}).$$

$$5856(120.5 - T_s) = 3158.09(T_s - 69)$$

$$T_s = 102.5^{\circ}\text{C}$$

para calcular la temperatura a la cual se deben evaluar - las propiedades físicas del vapor:

$$T_{\text{sat}} = t_v - 3/4 (t_v - T_s) =$$

$$T_{\text{sat}} = 120.5 - (3/4)(120.5 - 102.5) =$$

$$T_{\text{sat}} = 107^{\circ}\text{C}$$

Aplicando la ecuación (3b-12) para calcular el coeficiente de película del vapor:

$$h = \frac{(.73)(.587)}{.04445} \left[\frac{(.04445)^3 (958)^2 (1.27 \times 10^8) (525)}{(.587)(.8715)(18.04)(14)} \right]^{1/4}$$

$$h = \underline{4368.04 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}} , = \underline{5.076 \text{ Kw/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}} ,$$

aplicando de nuevo la ecuación, donde se supuso un coeficiente de película del vapor:

$$4368.05 (120.5 - T_s) = 3158.09 (T_s - 69)$$

$$T_s = 99^{\circ}\text{C}$$

la temperatura es muy aproximada a la obtenida con el coeficiente del vapor supuesto, por lo tanto se puede concluir que no se cambiarán los coeficientes.

El coeficiente de resistencia a la transmisión de calor - presentada por el tubo se calculará con la ecuación (3b-4)

$$R_t = \frac{.04445}{(2)(.1211)} \ln \left| \frac{.04445}{.04445 - (2)(.001585)} \right|$$

$$R_t = 0.0135785 \frac{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{Kw} = 1.58 \times 10^{-5} \frac{m^2 \text{ } ^\circ\text{C h}}{Kcal}$$

El factor de suciedad de parte del jugo obtenida por experiencia:

$$R_j = 4.3716 \times 10^{-4} \text{ h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Kcal} =$$

$$R_j = 0.0375987 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Kw}$$

El factor de suciedad de parte del vapor obtenida por experiencia:

$$R_v = 6.14 \times 10^{-5} \text{ h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Kcal} =$$

$$R_v = 0.052808 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Kw}$$

El coeficiente total de transmisión de calor se calculará con la ecuación (3b-3):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{2932.51} + \frac{1}{4368.04} + 1.58 \times 10^{-5} + 4.37 \times 10^{-4} + \frac{6.14 \times 10^{-5}}{=}}$$

$$U = \frac{922.26 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{,} =$$

$$U = \frac{1.072 \text{ Kw/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{,}$$

finalmente para obtener el área de transmisión de calor -- del intercambiador; ecuación (3b-1):

$$A = \frac{3 \ 315 \ 025.2}{(922.26)(37.69)(1)} = \underline{95.36 \text{ m}^2}$$

Recalculando el número de tubos a utilizar en el intercambiador:

$$n = \frac{A}{(A_{\text{tubo/m}})} = \frac{95.36}{(5.1816)(\pi)(.04445)}$$

$$n = \underline{132 \text{ tubos}}$$

los tubos que se requieren son 132 y los propuestos a -- utilizar son 140, por lo tanto es adecuado el intercambiador.

El área en exceso:

$$\frac{140 - 132}{132} = 6.06\%$$

Realizando una comparación con el área de transmisión de calor obtenida de acuerdo a un coeficiente total de -- transmisión de calor basado en la ecuación empírica -- (3b-8):

$$K = 0.35(tv - 32)\sqrt{v} = 0.35(248.9-32)\sqrt{6} =$$

$$K = \underline{185.95 \text{ BTU/h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}, = \underline{907.45 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}},$$

la cual es necesaria se encuentre en estas unidades para que sea aplicable en la ecuación de área de transmisión de calor (3b-7):

$$S = \frac{(43776)(.9235)}{907.45} \ln \left(\frac{120.5 - 28}{120.5 - 110} \right)$$

$$S = \underline{96.93 \text{ m}^2}$$

El área de transmisión de calor real se calculará:

$$A = (\pi)(D_o)(L)(n) =$$

$$A = (3.1416)(.04445)(5.1816)(140) =$$

$$A = \underline{101.3 \text{ m}^2}$$

R E S U M E N

En este trabajo se realizó el diseño termodinámico de un intercambiador de calor, para jugo de caña sulfitado y alcalizado, aplicando el procedimiento utilizado por Kern (Ref. 8) con modificaciones. También se realizó éste mismo aplicando ecuaciones empíricas obtenidas en la fabricación de azúcar de caña (Ref. 5 y 6).

Para conocer el área de transmisión de calor a partir del primer procedimiento, se determinaron las propiedades físicas del jugo de caña sulfitado y alcalizado como son: brix, viscosidad y conductividad térmica; para determinar ésta última se diseñó y construyó un dispositivo metálico de cilindros concéntricos basado en el modelo de Keyes y Sandell (Ref. 9), además un puente de Wheatstone.

A continuación se realiza un resumen de los resultados obtenidos a partir de ambos procedimientos:

1) BASÁNDOSE EN ECUACIONES EMPÍRICAS:

Coefficiente total de transmisión de calor.-

$$U = 1.055 \text{ Kw/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Area total de transmisión de calor.-

$$A = 96.93 \text{ m}^2$$

2) PROCEDIMIENTO DE KERN MODIFICADO:

Calor intercambiado.- $Q = 3870.58 \text{ Kw}$

Coef. total de transmisión de calor.- $U = 1.072 \text{ Kw/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Dif. de temp. media logarítmica.- $\Delta T_m = 37.69$

área de transmisión de calor.- $A = 95.36 \text{ m}^2$

FLUIDO CIRCULANTE	Lado de Coraza	Lado de tubos
	VAPOR SATURADO CON CAMBIO DE FASE.	JUGO DE CAÑA SULFITADO Y ALCALIZADO
Cantidad de fluido (Kg/h)	6312.29	43,776
densidad (Kg/m ³)	958	1034.13
viscosidad (Kg/m h)	.8715	2.232
conductividad térmica (Kw/m ^o C)	6.8×10^{-4}	5.1×10^{-4}
temp. entrada (°C)	120.5	28
temp. salida (°C)	120.5	110
presión de oper. (Kg/cm ² abs)	2 atm	---
No. pasos	1	14
No. tubos	---	140
Velocidad (m/s)	---	1.83
diámetro interno tubos (m)	---	0.041275
diámetro externo tubos (m)	---	0.04445
Longitud de tubos (m)	---	5.1816
arreglo de tubos	---	cuadrado
Factor suciedad (m ² °C/Kw)	.052808	0.0375987
Coef. transmisión c. (Kw/m ² °C)	5.076	3.4096

CONCLUSIONES

Las propiedades físicas del jugo de caña sulfitado y alcalizado son similares a las de soluciones puras de sacarosa, por lo que no es necesario determinarlas en trabajos posteriores al manejar dicho fluido, aunque aquí resultó necesario realizar las pruebas correspondientes - que nos llevaran a una conclusión determinada.

Al diseñar y construir el dispositivo metálico- de cilindros concéntricos para medir conductividad térmica de líquidos, se tenían dos objetivos primordiales, su eficiencia y bajo costo. Respecto a su eficiencia se obtuvieron excelentes resultados, desde la calibración de - los termistores, hasta los datos representados en la figura (5c-2) de diferencias de voltaje contra la conductividad térmica conocida de diferentes líquidos, aquí se esperaba un comportamiento hiperbólico, pero los resultados - nos muestran rectas, ésto se debe a que se tomó un intervalo muy limitado de temperaturas, por lo que dichas rectas representan sólo un pequeño segmento de las hipérbolas. De cualquier forma son excelentes resultados.

Dicho aparato funciona con líquidos medianamente corrosivos y en un intervalo de temperaturas entre 25- y 100°C aproximadamente, ya que después de dicha temperatura es difícil manejarlos, siempre y cuando se acerquen a ésta en su punto de ebullición. Respecto a su costo, - en la fecha de impresión de este trabajo, aproximadamente ascenderá a \$125,000.00

Finalmente, al realizar una comparación entre los resultados obtenidos de coeficiente total de transmisión de calor y área de transmisión de calor, entre las ecuaciones utilizadas por Kern (Ref. 8) y las empíricas (Ref.5 - Tomo III) encontramos que son respectivamente: $U = 1.072 \text{ Kw/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, $A = 95.36 \text{ m}^2$ y $U = 1.055 \text{ Kw/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ $A = 96.93 \text{ m}^2$ y aún comparando éstos con el valor real: $A = 101.3 \text{ m}^2$, podemos concluir que son valores sin diferencia significativa, por lo que recomendamos para el diseño termodinámico de equipo de industrias azucareras que utilicen jugo de caña, la aplicación de ecuaciones obtenidas por experiencia en industrias de éste tipo, ya que son eficaces y sumamente sencillas.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) BROWNE, C.A.; F.W. ZERBAN
 "PHYSICAL AND CHEMICAL"
 (METHODS OF SUGAR ANALYSIS)
 JOHN WILEY AND SONS INC
 3a. EDICION, NEW YORK, 1941
- 2) B.V. KARLEKAR; R.M. DESMOND
 "TRANSFERENCIA DE CALOR"
 INTERAMERICANA
 2a. EDICIÓN
- 3) D.R. PITTS; L.E. SISSOM
 "TRANSFERENCIA DE CALOR"
 EDIT. MC. GRAW HILL
- 4) HOLMAN, J.P.
 "TRANSFERENCIA DE CALOR"
 CECSA
 4a. EDICIÓN, MEXICO, 1980
- 5) HONING, PIETER
 "PRINCIPIOS DE TECNOLOGIA AZUCARERA"
 TOMO I (PROPIEDADES DE LOS AZÚCARES Y NO AZÚCARES Y
 LA PURIFICACIÓN DE LOS JUGOS)
 1a. EDICIÓN, 30 DE JUNIO DE 1969
 TOMO II (CRISTALIZACIÓN)
 1a. EDICIÓN, 20 DE AGOSTO DE 1969
 TOMO III
 1a. EDICIÓN, 20 DE AGOSTO DE 1969
- 6) HUGOT, E.
 "MANUAL PARA INGENIEROS AZUCAREROS"
 CIA. EDIT. CONTINENTAL S.A. DE C.V.
 7a. EDICIÓN, MEXICO, 1984
- 7) JAMES R. WELTY
 "TRANSFERENCIA DE CALOR APLICADA A LA INGENIERIA"
 EDIT. LIMUSA
 2a. REIMPRESIÓN, 1988

- 8) KERN, DONALD Q.
"PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR"
EDIT. CONTINENTAL S.A.
19 IMPRESIÓN, MEXICO, 1984
- 9) KEYES, F.G., Y D.J. SANDELL
"NEW MEASUREMENTS OF HEAT CONDUCTIVITY OF STEAM AND
NITROGEN"
ASME
VOL. 72, PAG. 768, 1928
- 10) LÓPEZ FERRER, F.A.
"MANUAL PRÁCTICO DE FABRICACIÓN DE AZÚCAR DE CAÑA, MIE
LES Y SIROPES, INVERTIDOS (1a. PARTE) CON SU CONTROL -
TÉCNICO Y QUÍMICO"
EDIT. CULTURAL S.A.
LA HABANA CUBA, 1941
- 11) MCADAMS, WILLIAM H.
"HEAT TRANSMISSION"
EDIT. MC GRAW HILL
2a. IMPRESIÓN, NEW YORK, 1942
- 12) SPENCER-MEADE
"CANE SUGAR HAND BOOK"
EDIT. JOHN WILEY AND SONS INC
8a. EDICIÓN, NEW YORK
- 13) SPENCER-MEADE
"A MANUAL FOR CANE SUGAR MANUFACTURERS AND THEIR
CHEMISTS"
EDIT. JOHN WILEY AND SONS INC
NEW YORK
- 14) TROMP, LUCAS ADREAS
"MACHINERY AND EQUIPMENT OF THE CANE SUGAR FACTORY"
IDOL LANE LONDON EC 3
2a. IMPRESIÓN, ENGLAND, 1946
- 15) WEAST, ROBERT C.
"CRC HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS"
56th EDICION 1976
PUBLISHED by CRC PRESS

- 16) VALIENTE, BARDERAS ANTONIO
"PROBLEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR"
EDIT. LIMUSA
1988.

A P É N D I C E

TABLAS DE PROPIEDADES DE SOLUCIONES
DE SACAROSA

a) B R I X

CORRECCIONES DE TEMPERATURA DE LOS SACAROMETROS, PARA NORMAL DE 20°C +

(Esta tabla se ha calculado usando los datos sobre la expansión térmica de las soluciones de azúcar; según Plato, suponiendo que el instrumento esté construido con cristal de Jena 16^{III}. La tabla se ha de usar con precaución, y solamente con resultados aproximados cuando la temperatura difiere mucho de la normal, o de la del aire ambiente)

TEMP. °C	LECTURA OBSERVADA POR 100 DE AZUCAR (BRIX)				
	5	10	15	20	25
Suma al observado por ciento					
21	.05	.06	.06	.06	.07
22	.10	.11	.12	.12	.13
23	.16	.17	.17	.19	.20
24	.22	.23	.24	.26	.27
25	.28	.30	.31	.32	.34
26	.34	.36	.37	.40	.40
27	.41	.42	.44	.46	.48
28	.47	.49	.51	.54	.56
29	.55	.56	.59	.61	.63
30	.62	.63	.66	.68	.70
35	1.01	1.02	1.06	1.10	1.13
40	1.45	1.47	1.51	1.54	1.57
45	1.94	1.96	2.00	2.03	2.05
50	2.48	2.50	2.53	2.56	2.57
55	3.07	3.09	3.12	3.12	3.12
60	3.72	3.73	3.73	3.72	3.70

+ Circular No. 19, 1914. U.S. Bureau of Standards, P.25
; Wiss.Abh. der Kaiserlichen Normal-Eichungs-Kommission,
2,P. 140, 1900.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

b) D E N S I D A D
DE SOLUCIONES ACUOSAS DE SACAROSA

g de sacarosa en 100 gr de solución.	densidad (g/ml) a		
	40°C	50°C	60°C
8	1.02359	1.01918	1.01402
9	1.02761	1.02319	1.01799
10	1.03165	1.02720	1.02198
11	1.03573	1.03126	1.02600
12	1.03982	1.03533	1.03004
13	1.04395	1.03943	1.03413
14	1.04809	1.04356	1.03823
15	1.05229	1.04772	1.04238

(Principios de Tecnología Azucarera, Tomo I. Honing Pieter. 1a. edición, 1969)