

6
2 ej.



*Universidad Nacional Autónoma
de México*

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

*Efecto del Coeficiente Global de Transferencia de
Calor en la Destrucción de la Vitamina C como
Componente Termolabil en un Alimento del Tipo
Pseudoplástico*

T E S I S

*Que para obtener el Título de
Ingeniero en Alimentos
p r e s e n t a n*

**IDELFONSO CRUZ CAMARERO
PEDRO A. NOGUEZ CUEVAS**



V N A M

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Cuautitlán Izcalli, México.

Octubre 1989



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.

I N D I C E

	pág.
I. RESUMEN	1
II. INTRODUCCION	3
III. OBJETIVO GENERAL	5
1. <i>Objetivos Particulares</i>	6
IV. ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS	7
1. <i>Fluídos No-Newtonianos</i>	7
2. <i>Efectos del Procesamiento Térmico</i>	11
3. <i>Transferencia de Calor y Coeficiente de Transferencia de Calor</i>	18
V. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	24
1. <i>Descripción del Intercambiador de Calor de Placas</i>	24
2. <i>Modificaciones efectuadas en el ICP</i>	25
3. <i>Elaboración del Alimento Pseudoplástico</i>	26
4. <i>Determinación de las propiedades Reológicas y Termofísicas</i>	27
5. <i>Condiciones de Tratamiento Térmico</i>	29
6. <i>Análisis del Contenido de Vitamina C</i>	30

VI.	RESULTADOS	pág. 32
	1. <i>Propiedades Reológicas y Termofísicas</i>	32
	2. <i>Condiciones de Operación del Tratamiento</i> <i>Térmico</i>	37
	3. <i>Análisis de Transferencia de Calor</i>	39
	4. <i>Tiempos de Residencia</i>	63
VII.	APENDICE	71
VIII.	CONCLUSIONES	97
IX.	NOMENCLATURA	99
X.	BIBLIOGRAFIA	102

R E S U M E N

1) RESUMEN.

El presente estudio tiene como finalidad el determinar el efecto que tiene el coeficiente global de transferencia de calor en la destrucción de la Vitamina C, como componente termolábil en un alimento del tipo pseudoplástico.

Para llevar a cabo lo anteriormente planteado, la etapa experimental se divide en dos partes fundamentales:

- 1a. Elaboración de un Néctar de Manzana.*
- 1b. Determinación de las propiedades termofísicas y reológicas del alimento pseudoplástico (Néctar de Manzana) considerando para estas últimas, la aplicabilidad de la Ley de la Potencia.*
- 2a. Tratamiento térmico del alimento pseudoplástico a través del Intercambiador de Calor de Placas (ICP).*

Para tal caso se manejan diferentes gastos (240, 200 y 150 l/h), con los cuales se mantienen en estudio la aplicación de niveles variables de velocidad y por consecuencia diferentes tiempos de residencia del fluido en el interior del equipo.

De acuerdo a las condiciones de operación, se obtienen en forma-

particular los datos de transferencia de calor. Estos resultados al ser analizados estadísticamente, se establece el nivel de consecuencias sobre la destrucción de la Vitamina C; mediante la distribución de tiempos de residencia y la posterior interpretación de estos tiempos por medio del Modelo matemático, el cual está representado por la Ecuación:

$$\left(\frac{C}{C_0} \right) = \frac{1}{2} \left[1 - \delta_{er} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{UL}{DL}} \frac{1 - t/\bar{t}}{\sqrt{t/\bar{t}}} \right) \right]$$

INTRODUCCION

II) INTRODUCCION.

Hay muchos casos en las industrias alimenticias en las que son usados los Intercambiadores de Calor de Placas (1, 5, 6): Cervecerías, Cavas Vinícolas y Fábricas de Levadura, Aceite de Pescado, Jugos de Frutas, Azúcar y Destilerías. Sin embargo, pocos son los estudios que se han publicado sobre el tema, en lo referente al manejo de fluidos No-Newtonianos; dentro de los cuales los más comunmente usados, en el área alimenticia son los fluidos pseudoplásticos.

Como en cualquiera de los Intercambiadores de Calor, en el de Placas, se presentan problemas para el manejo de fluidos con muy alta viscosidad, debido a efectos de distribución de flujo. Aún en este caso el ICP, se puede utilizar con buen éxito para fluidos pseudoplásticos en el intervalo de 10 a 100 Centipoise y manejando una caída de presión razonable de 30 a 40 Psi. (8)

Tomando en cuenta que, los diferentes diseños de canalizaciones de las placas inducen altas velocidades de deformación, reducen la viscosidad efectiva del fluido y por lo tanto mejoran el comportamiento del ICP.

Es conocido de antemano que los ICP tienen la característica de presentar valores muy elevados en sus coeficientes de transferencia -

de calor, comparados con los intercambiadores de tubo y coraza, por ejemplo (2, 3, 4). No obstante, es importante estudiar en qué medida la ventaja anterior afecta las características nutricionales de un alimento; tomando en consideración que muchos de estos componentes (11, 12, 13, 14, 15) se ven seriamente afectados y destruidos por la acción del calor.

**OBJETIVO
GENERAL**

III) OBJETIVO GENERAL.

**DETERMINAR EL EFECTO DEL COEFICIENTE GLOBAL
DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA DESTRUCCION
DE LA VITAMINA C COMO COMPONENTE TERMOLABIL
EN UN ALIMENTO DEL TIPO PSEUDOPLASTICO.**

1. OBJETIVOS PARTICULARES.

- a) *Determinación del Tipo de Flujo desarrollado en las zonas de precalentamiento y calentamiento del sistema ICP.*
- b) *Determinación de la cantidad de Vitamina C destruida.*
- c) *Determinación del Tiempo de residencia.*

ANTECEDENTES
BIBLIOGRAFICOS

IV) ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS.

1. Fluidos No-Newtonianos.

Cuando un fluido se va a transportar a través de un ducto cerrado, es de suma importancia conocer las condiciones en las que ha de hacerlo. Desde el punto de vista de flujo de fluidos, la consistencia que estos presentan, determina la particularidad del flujo (19).

En la mayoría de las veces, el mecanismo que se emplea para medir la consistencia de los fluidos, se expresa en términos de la viscosidad. Sin embargo, se ha observado que en algunos fluidos, la viscosidad varía con la velocidad de flujo y otros factores tales como la temperatura y la concentración (19).

En base a lo anterior y teniendo en cuenta la respuesta que presenta el fluido al someterse a una fuerza o esfuerzo cortante; los fluidos se dividen en Newtonianos y No-Newtonianos.

Conociéndose como fluidos Newtonianos, aquellos fluidos en los cuales se mantiene una viscosidad constante (constante independiente) y/o existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad; mientras que en los fluidos No-Newtonianos esta relación no permanece constante, sino que la viscosidad es una fun -

ción de esfuerzo cortante/gradiente de velocidad de deformación.

Los fluidos No-Newtonianos se dividen a su vez en función del tiempo; entre los cuales se tienen a los del tipo pseudoplástico o independientes del tiempo, categoría dentro de la cual se encuentran la mayor parte de los fluidos No-Newtonianos.

En la Fig. 1, se muestra la curva de flujo pseudoplástico en relación a otros. Esta curva por lo general se representa mediante la aplicación de la Ley de la Potencia (Ecuación de Ostwald-de-Waele), la cual se deriva de la Ley de Newton (19):

$$\tau = K \dot{\gamma} = K \left(\frac{dv}{dx} \right)^n \quad (n < 1) \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

- τ Esfuerzo Cortante.
- n. Índice de Comportamiento al Flujo.
- K. Índice de Consistencia al Flujo.
- $\dot{\gamma}$. Velocidad de Deformación.

Los comportamientos mencionados; es evidente que responderán en su manifestación, al conjunto de propiedades que caracterizan a un fluido y, entre las que destacan por su importancia: Las Reológicas y Termofísicas.

Propiedades Reológicas.

En la mayoría de los estudios de transferencia de calor en fluidos, se han llevado a cabo con fluidos Newtonianos. Sin embargo, en industrias químicas, biológicas y de procesamiento de alimentos, se manejan una amplia diversidad de fluidos No-Newtonianos. Para el análisis de datos en el uso de estos fluidos, es necesario conocer las constantes de las propiedades de flujo o características reológicas (n , K) o bien medirlas experimentalmente. Para este fin, el viscosímetro de Brookfield, Mod. RVT es probablemente uno de los más comúnmente utilizados; Este consta de una serie de agujas, las cuales se introducen y se hacen girar en el seno del fluido de prueba, R.W. Williams (10) efectuó el tratamiento matemático para las agujas No. 2, 3, 4, 5 y 6 de este viscosímetro, para transformar las mediciones de deflexión y velocidad angular, en la relación velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$) y es fuerza cortante (τ).

El uso del modelo de Williams implica el manejo de los siguientes criterios:

- a) La utilización de una geometría de discos; determinada por el número de agujas (2,3,4,5 y 6) exclusivamente.
- b) El uso de discos de espesor muy pequeño y de radio finito, rotando lentamente en el fluido de prueba.
- c) Introducción de los factores de corrección $f(n)$ y $g(n)$, pa-

ra considerar los efectos terminales del disco: el vástago y el borde que une al disco con el vástago.

Propiedades Termofísicas.

Las propiedades termofísicas, son aquellas que se ven influenciadas directamente por la temperatura, y tienen una gran utilidad en problemas referentes a la transferencia de calor.

De las propiedades termofísicas las que tienen un grado de dependencia importante y, que junto con las propiedades reológicas, intervienen en el cálculo de los números adimensionales, son: El Calor Específico, la Conductividad Térmica y la Densidad.

a). Calor Específico:

El calor específico (C_p) de una sustancia se define como la cantidad de energía requerida para aumentar la temperatura en un grado; energía que puede proporcionarse mediante la transferencia de calor de ciertos procesos específicos. De ahí, que el calor específico se tiene que establecer de acuerdo a las condiciones operativas de temperaturas durante el proceso térmico.

b). Conductividad Térmica:

La conductividad térmica (k), es una propiedad natural que tiene una sustancia o material de transmitir el calor.

La conductividad térmica no es constante, sino que presenta una variación lineal con la temperatura.

En los líquidos, la conductividad térmica varía de una manera moderada con la temperatura, por lo tanto, casi siempre puede expresarse como una función lineal (19).

c). *Densidad.*

La densidad es una relación de masa por unidad de volumen. En casi todos los trabajos relacionados con líquidos y sólidos, se puede considerar que la densidad no varía mucho con la temperatura o la presión, pero para valores exactos de esta propiedad, es preferible determinarla o consultar un manual en cualquier momento para conocer la variación de la densidad con la temperatura.

2. *Efectos del Procesamiento Térmico.*

Los procesos térmicos al ser los más generalizados en la industria, ya que por medio de éstos es la forma más segura de eliminar los microorganismos nocivos que se desarrollan en los alimentos. Sin embargo, su abuso ocasiona que se destruyan muchos de los nutrimentos, con la consecuente reducción del valor nutritivo del alimento. Debido a esto el propósito de un proceso térmico, deberá ser el de extender la vida de anaquel de un alimento, asegurando una retención máxima de los nutrientes. Al respecto Ball, C.O. (1923), fue el primero en introdu-

cir un procedimiento matemático, para determinar si un proceso térmico era adecuado, desde entonces ha habido una subsecuente verificación de los procesos, en los que puede observarse que son aproximadamente equivalentes en términos del cumplimiento del primer objetivo, pero resultando muy diferentes en la retención de los nutrientes. Un ejemplo de un proceso térmico, es la Pasteurización, la cual es utilizada para inactivar células vegetativas de microorganismos patógenos o peligrosos para la salud. Ya que en estas condiciones el alimento no es estéril (12), este proceso debe ser usado en conjunción con otra técnica de preservación tales como la fermentación y la refrigeración; o bien utilizarse en productos, tales como jugos de frutas altamente ácidos, en donde el medio no es adecuado para la generación de microorganismos peligrosos para la salud. La base de este proceso debe ser un microorganismo dañino: por ejemplo levaduras en cerveza, mohos y levaduras en jugos de frutas.

En el procesamiento de productos de frutas, por la manipulación y tratamiento térmico del proceso en sí, se produce una gran destrucción de vitaminas, por ser éstas su principal fuente alimenticia (11).

De la mayoría de las vitaminas, principalmente la C, es la que se encuentra en una mayor concentración tanto en la cáscara como en el tejido del fruto. Siendo la vitamina C, la más lábil e inestable por su sensibilidad al calor, algunos investigadores (11) propusieron utilizar el contenido residual a esta vitamina como índice de reten -

ción de nutrimentos; se considera que al resistir la vitamina C (Acido Ascórbico) a los tratamientos térmicos durante el procesamiento de alimentos, el resto de los nutrimentos serán poco afectados.

Siendo el nivel de alteración, una función de las propiedades del producto, además de las características propias del equipo utilizado, - un elemento que integra a ambos en la práctica, lo representa la aplicación de tiempos de residencia.

Es evidente que en general, el conjunto de elementos que conforman el producto al seguir diferentes caminos a lo largo de su estancia en el equipo presentarán diferentes tiempos de residencia durante su recorrido.

Por eso, es muy importante analizar el efecto de la distribución de estos tiempos, sobre el comportamiento de los fluidos.

La distribución de estos tiempos en la corriente del fluido que sale del equipo se le denomina "distribución de edad a la salida", - $E(t)$ ó " distribución del tiempo de residencia del fluido", cuya expresión matemática está dada por:

$$E(t) dt = 1 \dots\dots\dots (2)$$

Este fenómeno puede ser determinado experimentalmente mediante la introducción de un trazador en el flujo entrante al tiempo $t = 0$,

con una concentración inicial C_0 , mantenida constante (22). Después de cierto tiempo, el trazador es detectado a la salida del equipo en una concentración C , que gradualmente aumenta hasta C_0 .

Cuando se presenta gráficamente el valor de C/C_0 como una función de la relación t/\bar{t} , se obtienen los diagramas de la función $F(t)$, la cual representa la proporción del fluido cuyo tiempo de residencia en el equipo es inferior al real. La forma de las curvas $F(t)$ es característica ya sea para el flujo pistón o para un tanque con agitación.

La función $F(t)$ representa además, el aumento en la concentración de trazador en la corriente de salida. Entonces, para cualquier instante t mayor que cero, la porción de trazador que aparece en la corriente de salida tiene una edad inferior a este t ; por consiguiente, se tiene que para cualquier instante t :

$$F(t) = E(t) dt \dots\dots\dots (3)$$

Por lo tanto,

$$\frac{dF(t)}{dt} = E(t) \dots\dots\dots (4)$$

Para la determinación del tiempo de residencia; primero es necesario establecer el volumen del fluido que se encuentra estancado y

que no sale del equipo, a este volumen se le conoce como "volumen - muerto". Este volumen al relacionarlo con la velocidad de flujo (gasto volumétrico), nos dará el tiempo que tardará en vaciarse la zona - térmica o el equipo, conociéndose a este tiempo también como Espacio-tiempo.

$$\frac{\text{Volumen Muerto}}{\text{Gasto Volumétrico}} = \text{Espacio tiempo (seg).}$$

A la relación que existe entre el tiempo de tratamiento térmico y el espacio tiempo, se le conoce como tiempo reducido.

$$\frac{\text{Tiempo de tratamiento térmico}}{\text{espacio tiempo}} = \text{Tiempo reducido.}$$

Al graficar C/Co Vs Tiempo reducido, se obtiene la curva típica de flujo, la cual se puede interpretar mediante la aplicación de alguno de los siguientes modelos matemáticos (22):

- a) Modelo de Tanques con agitación conectados en serie.
- b) Modelo de Dispersión.

En el modelo de tanques con agitación conectados en serie, el reactor real se simula con n reactores ideales con agitación en serie. El volumen total de los tanques es igual al del reactor real. Por lo tanto, para una determinada velocidad de flujo, el tiempo medio de

residencia total es también el mismo. El trabajo consiste en determinar el valor de n para el que mejor concuerde la curva de respuesta del modelo con la curva de respuesta de la unidad real. Usando la siguiente ecuación se puede determinar C/C_0 para cualquier valor de n .

$$\left(\frac{C}{C_0} \right) = 1 - e^{-\frac{nt}{\bar{x}}} \left[1 + \frac{nt}{\bar{x}} + \frac{1}{2!} \left(\frac{nt}{\bar{x}} \right)^2 + \dots + \frac{1}{(n-1)!} \left(\frac{nt}{\bar{x}} \right)^{n-1} \right] \dots (5)$$

En donde:

Si $n = \infty$; entonces se tiene un reactor real con flujo pistón.

Si $n = 1$; entonces se tiene un reactor real, típico de un tanque con agitación.

En el modelo de Dispersión, el reactor real se representa por medio de una unidad de flujo tubular, en la que la dispersión axial ocurre de acuerdo con la difusividad D . Se establece la analogía entre la mezcla de flujo real y la mezcla de un proceso difusional; la desviación de flujo ideal o pistón, se expresa en función de un factor adimensional, el número de Peclet ($No. Pe$), el cual para fluidos que mantienen un patrón ideal adquiere valores tendientes al infinito; en tanto que para fluidos en régimen de mezclado completo, adquiere un valor de cero (23,24). Y en el que para un sistema continuo se aplica la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{C}{C_0} \right) = \frac{1}{2} \left[1 - \delta_{er} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{UL}{DL}} \cdot \frac{1 - \frac{t}{L}}{\sqrt{\frac{t}{L}}} \right) \right] \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

- $\frac{UL}{DL}$ No. de Peclet.
- \bar{z} Espacio tiempo.
- t Tiempo de tratamiento térmico.
- δ_{er} Función error.
- C Concentración de Vitamina C.
- C_0 Concentración inicial de Vitamina C.

δ_{er} se define como (27):

$$\delta_{er}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-x^2} dx \quad \begin{cases} \delta_{er}(\pm \infty) = \pm 1 \\ \delta_{er}(0) = 0 \dots \dots (7) \\ \delta_{er}(-y) = -\delta_{er}(y) \end{cases}$$

La relación que existe entre δ_{er} y la función normal de Probabilidad es (27):

$$f(x) = \int_0^z f(x) dx = \frac{1}{2} \delta_{er} \frac{z}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots (8)$$

3. TRANSFERENCIA DE CALOR Y COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

La transferencia de Calor por Convección Forzada, es el transporte debido al movimiento de masas fluidas, provocado por un agente externo. La expresión matemática para esta transferencia de calor es la siguiente:

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum R} \dots\dots\dots (9)$$

Donde:

- Q Calor Transferido.
- ΔT Diferencia de Temperaturas.
- $\sum R$ Suma resistencias hacia el flujo de calor.

La variable R para la transferencia de calor por convección forzada, debe de determinarse experimentalmente, midiendo la diferencia de temperaturas entre los medios de enfriamiento y calentamiento, así como el calor transferido. Al recíproco de R se le conoce como el coeficiente de película, el cual es una medida del flujo de calor por unidad de superficie y por unidad de diferencia de temperatura.

Los factores que influyen en los coeficientes de película; la geometría del sistema, de las propiedades del fluido, la velocidad -

de flujo y el perfil del flujo, son tan variados que, es fácilmente comprensible porque no hay una derivación racional que permita su cálculo directo.

Por otra parte, no es práctico efectuar un experimento para determinar el coeficiente cada vez que se deba añadir o remover calor de un fluido. En lugar de esto, es deseable establecer un método de correlación mediante el cual y con la ejecución de algunos experimentos básicos, con un amplio rango de variables, obtener relaciones que mantengan su validez para cualesquiera otras combinaciones de variables. El problema inmediato es establecer un Número Adimensional y luego aplicarlo a datos experimentales.

De esta forma es posible expresar los datos de transferencia de calor en función de los siguientes números adimensionales:

- a) Número de Reynolds.
- b) Número de Prandtl.
- c) Número de Nusselt.

El número de Reynolds para fluidos Newtonianos y No-Newtonianos, se define como la medida de la relación de fuerzas inerciales (masa por aceleración) y de fricción (fuerzas viscosas) que se desarrollan durante el movimiento del fluido; considerando para su uso, de la Ley de la Potencia (19).

Por lo tanto,

$$Re = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas de Fricción}}$$

Donde:

Fuerzas Inerciales

$$\text{Fluido Newtoniano} = D_e V \rho$$

$$\text{Fluido No-Newtoniano} = D_e^n V^{2-n} \rho \left(\frac{n}{6n + 2} \right)^n$$

Fuerzas de Fricción

$$\text{Fluido Newtoniano} = \mu$$

$$\text{Fluido No-Newtoniano} = K$$

Por lo tanto,

$$Re = \frac{D_e^n V^{2-n} \rho}{K} \left(\frac{n}{6n + 2} \right)^n \dots \dots \dots (10)$$

De manera similar el número de Prandtl, se define como la relación de calores, entre el producido debido a la fricción y el conducido en el medio.

Por lo tanto,

$$Pr = \frac{\text{Calor producido por Fricción}}{\text{Calor conducido en el medio}}$$

Donde:

Calor producido por Fricción

$$\text{Fluido Newtoniano} = C_p$$

$$\text{Fluido No-Newtoniano} = C_p K \left(\frac{V}{D_e}\right)^{n-1} \left(\frac{6n+2}{n}\right)^n$$

Calor conducido en el medio

$$\text{Fluido Newtoniano} = k$$

$$\text{Fluido No-Newtoniano} = 8k$$

Por lo tanto,

$$Pr = \frac{C_p K}{8k} \left(\frac{V}{D_e}\right)^{n-1} \left(\frac{6n+2}{n}\right)^n \dots\dots\dots (11)$$

Las expresiones 10 y 11 se reducen a los valores Newtonianos cuando $n = 1$ y $K = \mu$.

El número de Nusselt, se define como la relación de calores transmitidos por convección y conducción.

Por lo tanto,

$$Nu = \frac{\text{Calor transmitido por Convección}}{\text{Calor transmitido por Conducción}}$$

Donde:

Calor transmitido por Convección

$$\text{Fluido Newtoniano/No-Newtoniano} = h De$$

Calor transmitido por Conducción

$$\text{Fluido Newtoniano/No-Newtoniano} = k$$

Por lo tanto,

$$Nu = \frac{h De}{k} \dots\dots\dots (12)$$

Por consiguiente, utilizando las expresiones 10, 11 y 12; se conoce el valor de estos números adimensionales.

$$Nu = f(Re, Pr) \dots\dots\dots (13)$$

En donde, para régimen turbulento (20):

$$Nu = \alpha (Re)^p (Pr)^q \dots\dots\dots (14)$$

La constante de proporcionalidad α y los exponentes (p, q); -
se evalúan algebraicamente de acuerdo a los datos obtenidos experimen
talmente.

M E T O D O L O G I A
E X P E R I M E N T A L

V) METODOLOGIA EXPERIMENTAL.

1. Descripción del Intercambiador de Calor de Placas.

El Intercambiador de Calor de Placas (ICP) que se utiliza en el estudio experimental, es un Intercambiador marca Alfa-Laval Modelo P-20 HB; el cual se caracteriza por la utilización de energía eléctrica como medio de calentamiento.

El ICP, consiste básicamente de un paquete de placas metálicas corrugadas, provistas de orificios de paso para los fluidos que van a transferir calor al pasar por canales alternados a contracorriente y paralelo. Este ICP, Fig. 2, consta de cinco zonas de tratamiento térmico; de éstas, la primera en la que entra el fluido alimenticio a través de la de precalentamiento C, en la cual, recibe calor del mismo fluido que va circulando después de haber recorrido las zonas A y B en donde se incrementó su temperatura. En la siguiente zona de calentamiento B, por medio del agua caliente, el fluido alimenticio alcanza su máxima temperatura; la que aproximadamente permanece constante a su paso por la zona conocida como de mantenimiento A. Después en la zona de precalentamiento C, como se hizo mención, el fluido ya caliente le cede su calor al mismo fluido frío que está entrando al ICP. A continuación circula por la zona D, en donde se enfría y por último para completar el proceso ICP, se subenfria en la zona E por medio de agua helada.

2. Modificaciones efectuadas en el ICP.

Dado el interés del estudio en cuestión y para los fines que se persiguen; considerando además la descripción de la sección anterior se hicieron las siguientes modificaciones:

Es conveniente en el caso, utilizar dos de las cinco zonas con las que cuenta el equipo. Esto es, la zona de precalentamiento y calentamiento; no considerando las zonas de mantenimiento, preenfriamiento y enfriamiento.

En la Fig. 3, se muestra la modificación que se realizó referente a la instalación original del ICP. Esta modificación, fue con respecto al paso del fluido a través de la zona de mantenimiento y a la salida del ICP; que en lugar de ser por la zona de enfriamiento lo es a la entrada de la de preenfriamiento o sea que se estarán bloqueando estas últimas zonas. Por último, para poder tener acceso a pruebas experimentales, tanto de la zona de precalentamiento como la de calentamiento se hace la instalación de una válvula de paso entre dichas zonas.

Las modificaciones anteriores, se efectuaron en base al estudio experimental, desde el punto de vista de transferencia de calor.

3. Elaboración del Alimento Pseudoplástico.

Cómo alimento pseudoplástico se utilizó un Néctar de Manzana. Definido como el producto que se obtiene a partir de zumos frescos, naturales y conservados; a los que se les añade un jarabe del mismo grado Brix que el zumo original (17). Para su elaboración, se puede partir tanto del fruto en sí, como de su respectiva pulpa.

A continuación se describe el Método de Elaboración del Néctar de Manzana:

Línea de tratamiento del fruto:

- a) Lavado.
- b) Inspección.
- c) Deshuesado y triturado.
- d) Cocido.
- e) Despulpado.

Línea de producción de jarabe azucarado.

- f) Control de concentración.
- g) Mezcla (Agua 57%/Azúcar 7%).

Línea de producción del Néctar.

- h) Mezcla homogénea (jarabe azucarado/pulpa 36%).
- i) Pasteurización.
- j) Néctar de Manzana (15.2° Brix/I.R. 1.356/pH 3.4).

4. Determinación de las propiedades reológicas y termofísicas.

a) Propiedades Reológicas.

Para la determinación de las propiedades reológicas, se trabajó con el viscosímetro de Brookfield, Modelo RVT (Aguja No.2); y mediante el modelo matemático de Williams (10). En la Fig. 4, se muestra el modelo y los pasos que se siguen para determinar las propiedades reológicas del Néctar de Manzana.

Considerando que durante el tratamiento térmico, el Néctar de Manzana se somete a diferentes cambios de temperaturas; se efectuó una historia térmica del fluido, para así tener las propiedades reológicas en función de la temperatura.

El estudio del comportamiento reológico del Néctar de Manzana, se realizó bajo las siguientes condiciones térmicas: Desde una temperatura de 18° C hasta 72° C, que es la temperatura de pasteurización del Néctar de Manzana (17).

b) Propiedades Termofísicas.

Los valores de las propiedades termofísicas (calor específico, conductividad térmica y densidad) se evaluaron en función de la temperatura, a excepción de la densidad; mediante las siguientes ecuaciones:

Calor Específico (Cp).

Para determinar el calor específico del Néctar de Manzana, Ramaswamy y Tung reportan la siguiente expresión matemática (18):

$$C_p (T) = 0.80304 + 1.7925 \times 10^{-3} T \dots\dots\dots(15)$$

El calor específico del agua es aproximadamente igual a la unidad en los sistemas CGS y Americano de Ingeniería, por lo tanto, los valores numéricos del Cp son casi iguales; de tal manera que sólo se le asigna el valor referido en sus respectivas unidades - (19).

Conductividad Térmica (k).

Para determinar la conductividad térmica del Néctar de Manzana; - en estudios realizados por Ramaswamy y Tung, se reporta la siguiente expresión (18):

$$k (T) = 0.3390 + 2.6800 \times 10^{-3} T \dots\dots\dots(16)$$

Y para el agua, se deduce una ecuación lineal, considerando paralelo las conductividades térmicas reportadas por Geankoplis (19), por lo tanto se tiene que:

$$k (T) = 0.49125 + 1.26 \times 10^{-3} T \dots\dots\dots(17)$$

Densidad (ρ).

La determinación de la densidad, se hace de una manera física; en la cual se mide la masa que ocupa el Néctar en un volumen conocido, aplicando para ello la expresión:

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{m}{V} \dots\dots\dots (18)$$

5. Condiciones del Tratamiento térmico.

Para llevar a cabo el tratamiento térmico, se consideró el arreglo del ICP que se presenta en la Fig. 5, el cual se basa en el diagrama de flujo propuesto en la Fig.3, involucrando sólo las etapas de precalentamiento y calentamiento.

Para efectuar las corridas experimentales a condiciones de régimen permanente, se fijaron las situaciones térmicas de operación para los gastos de 150, 200 y 240 lt/hr. Para lo cual, se hizo previamente una corrida con agua para controlar el gasto a manejar y una temperatura máxima de 72°C requerida en la zona de calentamiento. Esta temperatura máxima de pasteurización (17), se controló con un termopar instalado en el ducto de salida de la zona de calentamiento.

Una vez hecho lo anterior, el Néctar de Manzana se bombeó al ICP, para su tratamiento térmico; durante el cual se anotaron las tempera-

turas de entrada y salida, tanto del Néctar como del medio de calentamiento; efectuadas con los termómetros instalados en las conexiones de entrada y salida de las zonas térmicas, así como también se determinó el gasto que presenta a la salida de éstas.

Dentro de las condiciones de tratamiento térmico, se analizó el manual ilustrativo de operación del ICP (1) y refiriéndose únicamente a las zonas de precalentamiento y calentamiento; considerando el número de placas totales y térmicas que tiene cada zona, así como los orificios de entrada y salida de cada una de éstas, se determinó el arreglo de las placas, flujo en los canales y el número de pasos en cada sección.

6. Análisis del Contenido de Vitamina C.

Para el análisis de la determinación del contenido de vitamina C (Acido Ascórbico) en el Néctar de Manzana, se utilizó el método AOAC (16); el cual se basa en la reducción del 2,6 dicloro-fenol-indofenol, mediante la titulación del Néctar es posible conocer el contenido de vitamina C existente.

Al Néctar de Manzana recién elaborado, se le determinó su contenido de vitamina C; a esta concentración para efectos de cálculo y visualizar más precisamente el estudio de destrucción, por cada 100 ml. de néctar, se le adicionaron 38.85 mg. de vitamina C; para de

este modo tener una cantidad aproximada de 50 mg. por cada 100 ml., - concentración que le corresponde a la de un jugo de naranja [17].

Las determinaciones de vitamina C, se hicieron tomando muestras a intervalos definidos de tiempo, a la salida de cada sección de tratamiento térmico. El análisis de estos resultados se usaron para caracterizar el tipo de flujo que prevalece en el sistema Precalentamiento/Calentamiento del ICP. Se graficó C/Co Vs Tiempo reducido, para obtener la curva típica de flujo; la cual se interpretó mediante la aplicación de los modelos matemáticos:

- a) Modelo de Tanques con agitación conectados en serie.
- b) Modelo de Dispersión.

RESULTADOS

VI). RESULTADOS.

1. Propiedades Reológicas y Termofísicas.

a) Propiedades Reológicas.

Siguiendo la metodología que reporta el Modelo de Williams (10), -
Fig. 4; y de acuerdo a la historia térmica efectuada, las lecturas -
que se obtienen en el viscosímetro, al hacerse las mediciones a las -
muestras de Néctar de Manzana, son las siguientes:

<u>T 18° C</u>		$\delta(n) = 1.56$		$g(n) = 4.39$	
<u>rpm</u>	<u>lectura</u>	t	Ω	\bar{z}	\bar{y}
0.5	5.8	416.84	0.052	7.667	0.229
1.0	7.1	510.27	0.104	9.387	0.459
2.5	10.0	718.70	0.261	13.222	1.148
5.0	13.6	977.43	0.523	17.978	2.298
10.0	19.2	1,379.90	1.047	25.370	4.596
20.0	27.3	1,962.05	2.094	36.097	9.193
50.0	45.1	3,241.33	5.235	59.636	22.985
100.0	70.8	5,088.39	10.471	93.565	45.971

<u>T 30° C</u>		$\delta(n) = 1.53$		$g(n) = 4.52$	
0.5	5.0	359.35	0.052	6.608	0.236
1.0	6.2	445.59	0.104	8.192	0.473
2.5	8.6	618.08	0.261	11.370	1.182
5.0	11.2	808.53	0.523	14.863	2.366
10.0	15.4	1,106.79	1.047	20.345	4.732
20.0	21.5	1,545.20	2.094	28.417	9.466
50.0	35.8	2,572.94	5.235	47.311	23.666
100.0	55.5	3,988.78	10.471	73.373	47.332

<u>T 60° C</u>		$\delta(n) = 1.53$		$g(n) = 4.52$	
0.5	4.2	305.44	0.052	5.617	0.236
1.0	7.0	503.09	0.104	9.250	0.473
2.5	9.9	711.51	0.261	13.085	1.182
5.0	12.8	919.93	0.523	16.916	2.366
10.0	16.9	1,214.60	1.047	22.333	4.732
20.0	23.1	1,660.19	2.094	30.536	9.466
50.0	36.1	2,594.50	5.235	47.721	23.666
100.0	55.7	4,003.15	10.471	73.653	47.332

<u>T 72° C</u>		$\delta(n) = 1.46$		$g(n) = 4.80$	
0.5	6.9	495.90	0.052	9.120	0.251
1.0	12.0	862.44	0.104	15.866	0.502
2.5	17.7	1,272.09	0.261	23.399	1.256
5.0	22.1	1,588.32	0.523	29.211	2.512
10.0	27.7	1,990.79	1.047	36.616	5.026
20.0	36.0	2,587.32	2.094	47.595	10.052
50.0	52.8	3,794.73	5.235	69.812	25.123
100.0	74.5	5,354.31	10.471	98.504	50.265

En la Fig. 6, se muestran dos de las curvas de flujo del comportamiento reológico (pseudoplástico) del Nectar de Manzana, al graficar τ Vs $\dot{\gamma}$. Por lo tanto, de éstas se obtiene que:

T (° C)	n	K
18	0.47	13.34
30	0.45	11.12
60	0.45	11.62
72	0.41	19.06

Por lo tanto, efectuando una regresión de los puntos, se obtuvo una relación lineal, mediante la cual es posible evaluar las propiedades reológicas (n, K), a cualquier temperatura durante el tratamiento térmico:

$$(n) \quad y = 0.4876 - 9.70 \times 10^{-4} T \dots\dots\dots (19)$$

$$(K) \quad y = 14.76 \times 10^{-5} - 1.0076 \times 10^{-6} T \dots\dots\dots (20)$$

Los valores de estas ecuaciones, se dan de acuerdo a las condiciones térmicas obtenidas.

b) Propiedades Termofísicas.

NECTAR DE MANZANA:

Calor Específico.

Mediante la Ec. 15, y las condiciones de temperatura que se -

dan en la parte 1 de esta sección, se tienen los siguientes calores -
específicos:

C_p (T) °C				
C_p (18)	=	803.04	+	1.7925 (18) = 0.83530
C_p (28.5)	=	803.04	+	1.7925 (28.5) = 0.85412
C_p (30)	=	803.04	+	1.7925 (30) = 0.85681
C_p (61)	=	803.04	+	1.7925 (61) = 0.91238
C_p (72)	=	803.04	+	1.7925 (72) = 0.93210

Donde:

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

Conductividad Térmica.

De manera similar y aplicando la Ec.16, se obtienen las siguientes conductividades:

k (T) °C				
k (18)	=	339	+	2.68 (18) = 0.38724
k (28.5)	=	339	+	2.68 (28.5) = 0.41538
k (30)	=	339	+	2.68 (30) = 0.41940
k (61)	=	339	+	2.68 (61) = 0.50248
k (72)	=	339	+	2.68 (72) = 0.53196

Donde:

$$k = \frac{\text{Kcal}}{\text{hr m } ^\circ\text{C}}$$

Los valores obtenidos para el Calor Específico y Conductividad Térmica, son muy parecidos a los resultados experimentales obtenidos por Ramaswamy y Tung; ya que se encontró una variación de aproximadamente el 8.5% en ambos casos.

Densidad.

Con la Ec. 18, se conoce la densidad:

$$\rho = \frac{5.11 \text{ g}}{5 \text{ ml}} = 1.022 \text{ g/cm}^3 \text{ ó } \text{Kg/m}^3.$$

AGUA: •

Calor Específico.

El calor específico reportado para el agua, en el intervalo de temperaturas de operación es (19):

$$C_p \quad 70-80 \text{ } ^\circ\text{C} = 1.04779 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$$

Conductividad Térmica.

Considerando la aplicación de la Ec. 17 y las temperaturas de operación, se tiene que:

k	(T)	°C					
k	(70)	=	491.25	+	1.26	(70)	= 0.57945
k	(71)	=	491.25	+	1.26	(71)	= 0.58071
k	(78)	=	491.25	+	1.26	(78)	= 0.58953
k	(79)	=	491.25	+	1.26	(79)	= 0.59079

Densidad.

La densidad del agua, se maneja con un valor igual a la unidad, y únicamente se le dan sus respectivas unidades, por lo tanto:

$$\rho = 1.0 \text{ Kg/m}^3.$$

2. Condiciones de operación del tratamiento térmico.

Al efectuarse el tratamiento térmico del Néctar de Manzana, para los gastos de 150, 200 y 240 L/h; se tienen las condiciones térmicas que prevalecen en cada zona, tanto del lado frío, como del caliente (medio de calentamiento). Por consiguiente, se tiene que:

Zona de Precalentamiento:

Fluido frío (Néctar)

$$g = 150 \text{ L/h}$$

$$t_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 61 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fluido caliente (Néctar)

$$G = 150 \text{ L/h}$$

$$T_1 = 72 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

Zona de Calentamiento:

Fluido frío (Néctar)

$$g = 150 \text{ L/h}$$

$$t_1 = 61 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 72 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fluido caliente (Agua)

$$G = 160 \text{ L/h}$$

$$T_1 = 78 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 73 \text{ }^\circ\text{C}$$

Zona Precalentamiento:

Fluido frío (Néctar)

$$g = 200 \text{ L/h}$$

$$t_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 49 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fluido caliente (Néctar)

$$G = 200 \text{ L/h}$$

$$T_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 28.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Zona de Calentamiento:

Fluido frío (Néctar)

$$g = 200 \text{ L/h}$$

$$t_1 = 61 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 72 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fluido caliente (Agua)

$$G = 220 \text{ L/h}$$

$$T_1 = 78 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 73 \text{ }^\circ\text{C}$$

Zona de Precalentamiento:

Fluido frío (Néctar)

$$g = 240 \text{ L/h}$$

$$t_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 48 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fluido caliente (Néctar)

$$G = 240 \text{ L/h}$$

$$T_1 = 59.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

Zona de Calentamiento:

Fluido frío (Néctar)

$$g = 240 \text{ L/h}$$

$$t_1 = 61 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 72 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fluido caliente (Agua)

$$G = 250 \text{ L/h}$$

$$T_1 = 79 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 73 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para los tres gastos manejados, puede observarse que, es en la zona de precalentamiento, donde el Néctar de Manzana sufre el mayor incremento de temperatura; esto podría explicarse, en una primera aproximación, tal vez por el tipo de arreglo utilizado en esta zona y quizás también por la diferencia que existe en los tiempos de residencia entre ambas zonas.

3. Análisis de Transferencia de Calor.

A pesar de que durante la etapa experimental no se trabajó en su totalidad con el ICP, se considera válido para efectos de cálculos de transferencia de calor el método que a continuación se propone. Este método, sigue un camino análogo al que se aplica comúnmente en el caso -

de los intercambiadores de calor de tubo y coraza; el cual comprende -
los siguientes pasos:

- a) Balance de Energía.
 - b) Cálculo de la media logarítmica de la diferencia de temperaturas.
 - c) Determinar el arreglo de las placas, flujo en los canales y número de pasos.
 - d) Determinar el factor de corrección (F).
 - e) Calcular el coeficiente de película de transferencia de calor para cada una de las corrientes.
 - f) Cálculo de diámetro equivalente y velocidad.
 - g) Cálculo de números adimensionales (Reynolds, Prandtl y Nusselt) y Análisis de la Ecuación para la transferencia de calor.
-
- a) Balance de Energía.

El análisis térmico, para determinar los coeficientes de película, -
se efectuó a partir de un balance de energía o calor, teniendo en -
cuenta los siguientes criterios:

1. El flujo de los fluidos y de calor en el ICP son constantes.
2. Las pérdidas de calor hacia los alrededores son despreciables.
3. Los fluidos en cuestión (Agua-Néctar de Manzana) no presentan cambios de fase.
4. El coeficiente global de transferencia de calor es constante en

todo el equipo.

Habiendo establecido lo anterior, el cálculo se hizo en base a:

$$Q = M C_p (T_1 - T_2) = m c_p (t_2 - t_1) \dots\dots\dots (21)$$

Por lo tanto, siguiendo esta Ecuación se obtienen los calores, para cada una de las corrientes al hacerlas fluir en las zonas térmicas del equipo; considerando para ello las condiciones de operación tanto del equipo como las del fluido en sí:

Para 150 L/h

Zona de Pre calentamiento: (Néctar-Néctar)

$$Q = \frac{153.3 \text{ Kg}}{h} \cdot \frac{894.45 \text{ Cal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} (72 - 30)^\circ\text{C} = (153.3) (873.84) (61 - 18)$$

$$Q = 5,759.0 = 5,760.26 \text{ Kcal/h}$$

Zona de Calentamiento: (Néctar-Agua)

$$Q = \frac{160.0 \text{ Kg}}{h} \cdot \frac{997.9 \text{ Cal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} (78 - 73)^\circ\text{C} = (153.3) (922.2) (72 - 61)$$

$$Q = 798.32 = 1,555.1 \text{ Kcal/h}$$

depreciando las pérdidas de calor, se considera un promedio entre -
estos calores.

Por lo tanto, tenemos que Q promedio

$$Q = 1,176.7 \text{ Kcal/h}$$

Para 200 l/h

Zona de Precalentamiento: (Néctar-Néctar)

$$Q = \frac{204.4 \text{ Kg}}{h} \frac{882.35 \text{ Cal}}{\text{Kg} \text{ } ^\circ\text{C}} (60 - 28.5) ^\circ\text{C} = (204.4) (863.0) (49-18)$$

$$Q = 5,681.098 = 5,468.820 \text{ Kcal/hr } Q_{\text{prom}} = 5,574.959 \text{ Kcal/hr.}$$

Zona de Calentamiento: (Néctar-Agua)

$$Q = \frac{220.0 \text{ Kg}}{h} \frac{997.9 \text{ Cal}}{\text{Kg} \text{ } ^\circ\text{C}} (78 - 73) ^\circ\text{C} = (204.4) (922.2) (72 - 61)$$

$$Q = 1,097.6 = 2,073.0 \text{ Kcal/h.}$$

Por lo tanto, Q promedio

$$Q = 1,585.3 \text{ Kcal/h.}$$

Para 240 L/h

Zona de Precalentamiento: (Néctar-Néctar)

$$Q = \frac{245.2 \text{ Kg}}{h} \frac{883.250 \text{ Cal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} (59.5 - 30)^\circ\text{C} = (245.2) (862.10) (48 - 18)$$

$$Q = 6,390.98 = 6,344.33 \text{ Kcal/hr} \quad Q_{\text{prom}} = 6,367.6 \text{ Kcal/hr.}$$

Zona de Calentamiento: (Néctar-Agua)

$$Q = \frac{250.0 \text{ Kg}}{h} \frac{997.9 \text{ Cal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} (79 - 73)^\circ\text{C} = (245.2) (922.2) (72 - 61)$$

$$Q = 1,496.8 = 2,488.16 \text{ Kcal/h}$$

Por lo tanto, Q promedio

$$Q = 1,992.5 \text{ Kcal/h}$$

Como puede observarse, para los tres gastos manejados; el calor - transferido por unidad de tiempo, en la zona de precalentamiento - fue mucho mayor al transferido en la zona de calentamiento; debido a las diferencias de temperatura entre los fluidos.

b) Cálculo de la media logarítmica de la diferencia de temperaturas.

La razón por la cual se empleó en los cálculos la media logarítmica de la diferencia de temperaturas, LMTD, es de que, la media aritmética de temperaturas ΔT ($T_i - T_o$) es constante para todas las partes de la superficie de transferencia de calor y únicamente es válida en un punto determinado del equipo; y la LMTD, es referida con respecto a la totalidad del equipo; considerando que los fluidos se están desplazando a través de las zonas del ICP, ya sea que se estén enfriando o calentando, se presentan variaciones tanto de T_i y T_o .

Donde:

ΔT_1 y ΔT_2 , representa la mayor y menor diferencia de temperatura de los medios, en cualquiera de los lados del intercambiador, y donde LMTD será:

$$LMTD = \frac{(T_2 - t_1) - (T_1 - t_2)}{\ln \frac{T_2 - t_1}{T_1 - t_2}} \dots\dots\dots [22]$$

Por lo tanto, de acuerdo a la expresión anterior y considerando las temperaturas de operación de la sección VI.1., se tiene que:

Zona de Precalentamiento:

Para 150 l/h

LMTD = 11.49

Para 200 l/h	LMTD = 10.74
Para 240 l/h	LMTD = 11.76

Zona de Calentamiento:

Para 150 l/h	LMTD = 5.64
Para 200 l/h	LMTD = 5.64
Para 240 l/h	LMTD = 5.88

La LMTD de la sección de precalentamiento, en los tres casos es mayor que la LMTD de calentamiento; Esto debido a la diferencia que existe en las temperaturas de proceso.

c) Determinación del arreglo de las placas, flujo en los canales y el número de pasos, véase Fig. 7:

Zona de Precalentamiento:

No. de placas totales = 14

No. de placas térmicas = 12

Flujo de contracorriente

Lado frío (Néctar)

No. de Pasos = 3

$$\frac{\text{No. de canales}}{\text{Paso}} = \frac{3 + 2 + 2}{3} = \frac{7}{3} = 2.33$$

Por lo tanto,

3 x 2.33 con un arreglo tipo "Z"

Lado caliente (Néctar)

No. de Pasos = 3

$$\frac{\text{No. de canales}}{\text{Paso}} = \frac{2 + 2 + 2}{3} = \frac{6}{3} = 2$$

Por lo tanto,

3 x 2 con un arreglo tipo "Z"

Zona de Calentamiento:

No. de placas totales = 8

No. de placas térmicas = 6

Flujo en paralelo.

Lado frío (Néctar)

No. de Pasos = 1

$$\frac{\text{No. de canales}}{\text{Paso}} = \frac{3}{1} = 3$$

Por lo tanto,

1 x 3 con un arreglo tipo "Z"

Lado caliente (Agua):

No. de Pasos = 1

$$\frac{\text{No. de canales}}{\text{Paso}} = \frac{4}{1} = 4$$

Por lo tanto,

1 x 4 con un arreglo tipo "U".

Al respecto se ha encontrado en equipos similares al estudiado, que un arreglo de flujo a contracorriente tipo "Z" (7) proporciona una distribución de flujo más uniforme que otro tipo de arreglo utilizado, lográndose con ello una transferencia de calor más efectiva.

Teniendo en cuenta, el arreglo así como el flujo que presenta cada zona térmica, se observa que para estos casos es necesario aplicar el factor de corrección (9), debido en primer instancia a la diferencia térmica causada por las placas finales; placas que no contribuyen a la transmisión de flujo térmico, así como las placas "ciegas" que generan un flujo a contracorriente-paralelo.

Para obtener el factor F, fue necesario conocer primero el Número de Unidades de Transferencia de Calor, NTU; con este y el arreglo de los pasos se calcula F en la Fig. 8.

Donde:

NTU. Se define como la elevación de la temperatura de un fluido dividido por la media logarítmica de temperaturas.

$$NTU = \frac{t_1 - t_2}{LMTD} \dots\dots\dots (23)$$

Por lo tanto, considerando la LMTD vista en la sección VI.3.b. se calculó el NTU; con lo cual tenemos que:

Zona de Pre calentamiento:

Para 150 L/h	NTU = 3.4	F = 0.93
Para 200 L/h	NTU = 2.88	F = 0.94
Para 240 L/h	NTU = 2.55	F = 0.96

Zona de Calentamiento:

Para 150 L/h	NTU = 1.95	F = 0.96
Para 200 L/h	NTU = 1.95	F = 0.96
Para 240 L/h	NTU = 1.87	F = 0.96

Debido a la diferencia del número de pasos entre las dos zonas; los valores obtenidos del Factor de corrección para los tres gastos manejados, son menores en la zona de pre calentamiento comparados con los de la zona de calentamiento, por tal razón casi es seguro que - el coeficiente global de transferencia de calor de Pre calentamiento

sea mayor comparado con el obtenido en la zona de calentamiento.

e) Coeficiente de película de transferencia de calor para cada una de las corrientes.

Un método experimental confiable para calcular los coeficientes de película (h_1 y h_2) para cada una de las corrientes, es la que se realiza en la zona de precalentamiento [28]. Esto se debe principalmente a la disposición que presenta el equipo en esta zona; en donde el fluido que entra, es precalentado a su vez por el que está saliendo del mismo o sea que se encuentra fluyendo sobre ambos lados del intercambiador.

Mientras que, para la zona de calentamiento es necesario efectuar corridas experimentales con agua a igual velocidad de flujo sobre ambos lados de las placas. Considerando así, que $h_1 = h_2$, es constante a la velocidad de flujo manejada; uno establece el coeficiente de película para el agua (h_2) en función de la velocidad de flujo.

Por lo tanto, para obtener el valor del coeficiente de película para el Néctar de Manzana (h_1), es necesario calcular primero h_2 . Teniendo h_2 y el coeficiente global de transferencia de calor, U , determinado en la zona de calentamiento para el Néctar de Manzana, se sustituye en la Ec. 30 para así tener el valor de h_1 en esta zona.

Es obvio, que cualquier error en h_2 y U afectará el valor de h_1 - en la zona de calentamiento.

Por consiguiente, para determinar h_2 , es necesario conocer para - la zona de calentamiento, las condiciones térmicas de operación al correr agua a iguales gastos sobre ambos lados del intercambiador - y efectuar el balance de calor de acuerdo a la Ec. 21.

Por lo tanto tenemos que:

Zona de Calentamiento:

$$\begin{aligned}g &= 160 \text{ l/h} \\t_1 &= 22 \text{ }^\circ\text{C} \\t_2 &= 41 \text{ }^\circ\text{C} \\Q &= 2,953.7 \text{ Kcal/h}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}G &= 160 \text{ l/h} \\T_1 &= 61 \text{ }^\circ\text{C} \\T_2 &= 43 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}g &= 220 \text{ l/h} \\t_1 &= 24.5 \text{ }^\circ\text{C} \\t_2 &= 37.5 \text{ }^\circ\text{C} \\Q &= 2,963.7 \text{ Kcal/h}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}G &= 220 \text{ l/h} \\T_1 &= 52 \text{ }^\circ\text{C} \\T_2 &= 38.5 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}g &= 250 \text{ l/h} \\t_1 &= 23 \text{ }^\circ\text{C} \\t_2 &= 42 \text{ }^\circ\text{C} \\Q &= 4,802.393 \text{ Kcal/h}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}G &= 250 \text{ l/h} \\T_1 &= 62.5 \text{ }^\circ\text{C} \\T_2 &= 43 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Ahora relacionando la Ec. 21, con el coeficiente global de transferencia de calor, U , tenemos:

$$Q = U A_x F \Delta T_m \dots\dots\dots (24)$$

Despejando U

$$U = \frac{Q}{A_x F \Delta T_m} \dots\dots\dots (25)$$

Expresando U , en términos de h_2 y despreciando los efectos de incrustación.

$$U = h_1 + h_2 + \frac{kp}{y} \dots\dots\dots (26)$$

$$\text{Si } h_1 = h_2 \text{ y } h_3 = h_1 + h_2$$

Por lo tanto,

$$U = h_3 + \frac{kp}{y} \dots\dots\dots (27)$$

Despejando h_3

$$h_3 = U - \frac{kp}{y} \dots\dots\dots (28)$$

Por lo tanto,

$$h_2 = \frac{h_3}{2} \dots\dots\dots [29]$$

1. Cálculo del Coeficiente de película h_2 (Agua).

Zona de Calentamiento:

Para 160 l/h

$$u = \frac{2,953.70 \text{ Kcal/hr.}}{(0.19 \text{ m}^2) (0.965) (12.4 \text{ }^\circ\text{C})}$$

$$u = 1,299.16 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$h_3 = \frac{1,299.16 \text{ Kcal}}{\text{h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}} - \frac{(0.123 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C/m})}{5 \times 10^{-4} \text{ m}}$$

$$h_3 = 1,053.1 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Por lo tanto,

$$h_2 = \frac{1,053.1 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}}{2}$$

$$h_2 = 526.58 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Para 220 l/h

$$u = 1,995.91 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_3 = 1,749.91 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$h_2 = 874.95 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Para 250 l/h.

$$u = 2,544.40 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_3 = 2,298.4 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_2 = 1,149.2 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

2. Cálculo de Coeficiente de película h_1 (Néctar de Manzana).

Zona de Pre calentamiento:

Para 150 l/h.

$$u = \frac{5,760.26 \text{ Kcal/h}}{(0.37 \text{ m}^2) (0.93) (11.49 \text{ } ^\circ\text{C})}$$

$$u = 1,456.9 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_3 = \frac{1,456.9 \text{ Kcal}}{\text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} - \frac{(0.123 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/m})}{5 \times 10^{-4} \text{ m}}$$

$$h_3 = 1,210.9 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Si } h_3 = h_1 + h_2 ; \quad h_1 = \frac{h_3}{2}$$

Por lo tanto,

$$h_1 = \frac{1,210.9 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{2}$$

$$h_1 = 605.45 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Para 200 l/h.

$$U = 1,493.6 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_3 = 1,247.6 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 623.83 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Para 240 l/h.

$$U = 1,524.3 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_3 = 1,278.3 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 639.19 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Zona de Calentamiento:

Para 150 l/h.

$$U = \frac{1,176.7 \text{ Kcal/h}}{(0.19 \text{ m}^2) (0.96) (5.64 \text{ } ^\circ\text{C})}$$

$$U = 1,143.84 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\text{Si } h_1 = U - h_2 - \frac{kP}{y} \dots\dots\dots (30)$$

Se considera el valor de h_2 , para evaluar h_1 .

$$h_2 \text{ agua} = 526.58 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Por lo tanto,

$$h_1 = \frac{1.143.84 \text{ Kcal}}{h \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}} - \frac{526.58 \text{ Kcal}}{h \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}} - \frac{(0.123 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C/m})}{5 \times 10^{-4} \text{ m}}$$

$$h_1 = 371.26 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Para 200 l/h.

$$U = 1,541.0 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_2 = 874.95 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 420.04 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para 240 l/h.

$$U = 1,848.16 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_2 = 1,149.2 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 452.9 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Debido a las diferencias existentes entre las dos zonas de tratamiento térmico; tales como el tipo de flujo, arreglo, propiedades de los fluidos y velocidad de flujo, los coeficientes de película y por ende el Coeficiente Global de Transferencia de Calor son mayores en la zona de Pre calentamiento.

f) Cálculo de diámetro equivalente en los canales y velocidad de los fluidos en el ICP.

Dado que el flujo en los canales de un ICP es muy complejo y el

completo análisis de su comportamiento, basado en las ecuaciones de movimiento y energía es imposible. De este modo, la geometría para el flujo en los canales se describe utilizando el concepto de diámetro equivalente, D_e , siendo para este caso que:

$$D_e = 4 \times \frac{\text{Volumen del canal de flujo}}{\text{superficie mojada}} \dots\dots\dots (31)$$

$$D_e = 4 \times \frac{\text{Area de flujo}}{\text{Perímetro mojado}} \dots\dots\dots (32)$$

Donde:

$$\text{Perímetro mojado} = P_m = 2 W + 2 b \dots\dots\dots (33)$$

$$\text{Area de Flujo} = A_f = W \times b \dots\dots\dots (34)$$

Por lo tanto,

$$D_e = 4 \frac{W \times b}{2 W} \dots\dots\dots (35)$$

$$D_e = 2 b$$

Tomando en cuenta, el factor de corrección para identificar la geometría de la placa:

$$D_e = \frac{2 b}{\phi} \dots\dots\dots (36)$$

Donde:

Donde:

$$\beta = \frac{\text{Area de la placa con corrugado}}{\text{Area de la placa sin corrugado.}}$$

δ

$$\beta = \frac{\text{Area que desarrolla el fluido}}{\text{Area diseñada}}$$

Para el ICP Marca Alfa-Laval Modelo P-20 HB (21).

$$\beta = 1.20$$

Por lo tanto,

$$De = \frac{2 \times 0.002 \text{ m}}{1.20}$$

$$De = 0.0033 \text{ m.}$$

El concepto de De , no tiene una justificación teórica y en algunas geometrías con flujo laminar puede conducir a errores. A pesar de esto nos permite imitar el flujo entre las placas como si se tratara de un ducto recto.

2. Velocidad de los fluidos en el ICP.

El cálculo de la velocidad, se puede efectuar en base a su definición original:

$$v = \frac{G}{A_f} = \frac{\text{Gasto del fluido frío o caliente}}{\text{Area de flujo}} \dots \dots \dots (37)$$

Donde:

$$A_f = (b \times w) \times N_c \dots \dots \dots (38)$$

b. Espacio entre las placas

w. Ancho de las placas

Nc. Número de canales

Las anteriores dimensiones del ICP para el cálculo tanto del diámetro equivalente como de la velocidad, se dan en la tabla No.5.

El área de flujo se representa en la Fig. 9.

Por lo tanto, tenemos que:

$$150 \text{ l/h} = 4.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{seg. } (G_1)$$

$$200 \text{ l/h} = 5.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{seg. } (G_2)$$

$$240 \text{ l/h} = 6.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{seg. } (G_3)$$

Zona de Pre calentamiento:

Lado frío

$$v_1 = \frac{4.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{seg}}{(0.002 \text{ m}) (0.05 \text{ m}) (2.3)}$$

$$v_1 = 0.178 \text{ m/seg}$$

$$v_2 = 0.239 \text{ m/seg}$$

$$V_3 = 0.287 \text{ m/seg}$$

Lado caliente

$$V_1 = \frac{4.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{seg}}{(0.002 \text{ m}) (0.05 \text{ m}) (2)}$$

$$V_1 = 0.205 \text{ m/seg}$$

$$V_2 = 0.275 \text{ m/seg}$$

$$V_3 = 0.330 \text{ m/seg}$$

Zona de Calentamiento:

Lado frío

$$V_1 = \frac{4.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{seg}}{(0.002 \text{ m}) (0.05 \text{ m}) (3)}$$

$$V_1 = 0.137 \text{ m/seg}$$

$$V_2 = 0.183 \text{ m/seg}$$

$$V_3 = 0.220 \text{ m/seg}$$

Lado caliente

$$V_1 = \frac{4.4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{seg}}{(0.002 \text{ m}) (0.05 \text{ m}) (4)}$$

$$V_1 = 0.110 \text{ m/seg}$$

$$V_2 = 0.152 \text{ m/seg}$$

$$V_3 = 0.172 \text{ m/seg}$$

Como en el ICP no se están considerando las pérdidas de velocidad - debido a la fricción; teóricamente se esperaba que la velocidad - desarrollada por los fluidos al recorrer la etapa de precalentamiento fuera aproximadamente la misma, pero como el número de canales - por paso no es el mismo para el lado frío que para el lado caliente, entonces la velocidad no es igual.

g) Cálculo de Números Adimensionales (Reynolds, Prandtl y Nusselt) y Análisis de la Ecuación para la transferencia de calor.

Los números adimensionales se determinaron mediante las condiciones experimentales que se dan en las tablas 1, 2, 3 y 4; mientras que sus respectivos valores se presentan en las tablas 6 y 7.

Por lo tanto, considerando los resultados de transferencia de calor que se tienen para cada una de las zonas involucradas; tenemos que las ecuaciones 13 y 14 se expresan de la siguiente manera:

Zona de Precalentamiento:

Salida Néctar.

$$4.20 = \alpha (208.11)^P (0.0224)^Q$$

$$4.49 = \alpha (295.11)^P (0.0217)^Q$$

$$4.59 = \alpha (395.12)^P (0.0195)^Q$$

tomando logaritmos de ambos lados,

$$\log Nu = \log \alpha + p \log Re + q \log Pr$$

Por lo tanto,

$$0.6232 = \log \alpha + 2.3182 p - 1.6497 q$$

$$0.6530 = \log \alpha + 2.4699 p - 1.6635 q$$

$$0.6623 = \log \alpha + 2.5967 p - 1.7099 q$$

resolviendo las ecuaciones simultáneamente por el método de sustitución, se tiene que:

$$\log \alpha = 0.8126$$

$$= 6.49$$

$$p = 0.2381$$

$$q = 0.4495$$

Por lo tanto,

$$Nu = 6.49 (Re)^{0.2381} (Pr)^{0.4495}$$

Zona de Calentamiento:

Nectar

$$2.37 = \alpha (142.69)^p (0.0206)^q$$

$$2.68 = \alpha (227.07)^p (0.0173)^q$$

$$2.89 = \alpha (304.00)^p (0.0155)^q$$

tomando logaritmos de ambos lados,

$$0.3747 = \log \alpha + 2.1543 p - 1.6861 q$$

$$0.4281 = \log \alpha + 2.3561 p - 1.7619 q$$

$$0.4616 = \log \alpha + 2.4828 p - 1.8096 q$$

Por lo tanto,

$$\log \alpha = -0.1090$$

$$= 0.77$$

$$p = 0.3026$$

$$q = 0.10$$

Por lo tanto,

$$Nu = 0.77 (Re)^{0.3026} (Pr)^{0.10}$$

La literatura consultada (5, 9, 29, 30, 31) revela que no hay información exacta sobre los coeficientes de película, ya que como éstos son una función de las propiedades físicas de los fluidos, velocidades de flujo y de la geometría del sistema. El análisis teórico de transferencia de calor está limitado sólo a algunas geometrías y manejo de Fluidos Newtonianos.

Las pocas relaciones que existen están basadas en condiciones de operación muy particulares; debido a estas limitaciones, los resul

tados que se obtuvieron no es posible compararlos.

4. Tiempos de Residencia.

Durante el tratamiento térmico, se toman muestras del Néctar de Manzana; considerando para esto, el tiempo en el cual transcurre (tiempo de residencia). Para evaluar este tiempo, es necesario conocer, el contenido de Vitamina C de cada una de las muestras y el volumen "muer-to" que se tienen en las zonas térmicas.

a) Contenido de Vitamina C.

El método de cálculo para la determinación del contenido de Vitamina C (16), establece que:

$$\frac{\text{mg Vit. C}}{100 \text{ ml-Néctar}} = \frac{(\text{título}) \text{ F.T.}}{(\text{volumen tomado para la determinación})} \times 100$$

Donde:

$$\text{Factor de tinción} = \text{F.T.} = \frac{0.5 \text{ mg Vitamina C}}{\text{título (ml Indofenol)}}$$

Por lo tanto,

$$\text{F.T.} = \frac{0.5 \text{ mg Vitamina C}}{4.3 \text{ ml Indofenol}} = \frac{0.1162 \text{ mg Vitamina C}}{\text{ml Indofenol}}$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta el F.T. y que el contenido de Vitamina C, es de 50 mg. por cada 100 ml (sección V.6.); se tiene que:

<i>t</i>	Indofenol	Cont. Vitamina C
(seg)	(ml)	100 ml-Néctar (mg)
<u>Zona de Precaentamiento:</u>		
<u>Para 150 l/h</u>	10	7.6
	20	8.2
	30	8.8
	40	9.3
	50	9.6
<u>Zona de Calentamiento:</u>		
	10	6.2
	20	7.1
	30	7.8
	40	8.3
	50	8.6
<u>Zona de Precaentamiento:</u>		
<u>Para 200 l/h</u>	10	8.0
	20	8.5
	30	9.1
	40	9.6
	50	10.0
<u>Zona de Calentamiento:</u>		
	10	6.8
	20	7.5
	30	8.2
	40	8.8
	50	9.2
<u>Zona de Precaentamiento:</u>		
<u>Para 240 l/h</u>	10	8.2
	20	8.7
	30	9.4
	40	9.8
	50	10.1
<u>Zona de Calentamiento:</u>		
	10	7.5
	20	8.2
	30	8.9
	40	9.3
	50	9.7

t (seg)	Vitamina C (destruida) 100 ml-Nectar (mg)	C (t_i) C_0 (t_0)
--------------	---	----------------------------------

Zona de Precalentamiento:

<u>Para 150 l/h</u>			
10	20.57		0.588
20	18.24		0.635
30	15.92		0.681
40	13.98		0.720
50	12.82		0.743

Zona de Calentamiento:

10	5.42	0.480
20	4.26	0.550
30	3.87	0.604
40	3.88	0.642
50	3.87	0.666

Zona de Precalentamiento:

<u>Para 200 l/h</u>			
10	19.02		0.619
20	17.08		0.658
30	14.76		0.704
40	12.82		0.743
50	11.27		0.774

Zona de Calentamiento:

10	4.65	0.526
20	3.87	0.581
30	3.48	0.635
40	3.10	0.681
50	3.10	0.712

Zona de Precalentamiento:

<u>Para 240 l/h</u>			
10	18.24		0.635
20	16.31		0.673
30	13.60		0.728
40	12.05		0.759
50	10.88		0.782

Zona de Calentamiento:

10	2.71	0.581
20	1.93	0.635
30	1.93	0.689
40	1.93	0.720
50	1.55	0.751

De donde, el contenido de Vitamina C destruida:

Zona de Precalentamiento:

$$\frac{\text{mg Vitamina C}}{100 \text{ ml-Néctar}} = 50 \text{ mg Vitamina C} - \text{mg Vitamina C no destruida}$$

Zona de Calentamiento:

$$\frac{\text{mg Vitamina C}}{100 \text{ ml-Néctar}} = \text{mg Vitamina C no destruida zona de precalentamiento} - \text{mg Vitamina C no destruida}$$

y para determinar la relación C/Co :

$$\frac{\text{Contenido Vitamina C a } t_i}{\text{Contenido Vitamina C a } t_0} = \frac{\text{mg Vitamina C (no destruida)}}{50 \text{ mg}}$$

b) Volumen "muerto"

El conocimiento del volumen "muerto", y su relación con la velocidad de flujo manejada, nos permite conocer el tiempo real en que se va a la zona térmica en cuestión.

Por lo tanto, tenemos que:

$$\text{Volumen "muerto"} = V_m = \frac{\text{Zonas de Precalentamiento}}{0.272 \text{ L}} = \frac{\text{Zonas de Calentamiento}}{0.244 \text{ L}}$$

$$\bar{x} \text{ Espacio tiempo} = \bar{x} = \frac{V_m}{G} \dots\dots\dots (39)$$

Donde:

$$G = 150 \text{ L/h} = 0.0416 \text{ L/seg}$$

$$G = 200 \text{ L/h} = 0.0555 \text{ L/seg}$$

$$G = 240 \text{ L/h} = 0.0666 \text{ L/seg}$$

Por lo tanto, aplicando la Ec 39, se tiene que:

Zona de Pre calentamiento:

$$150 \text{ L/h} \qquad \bar{x} = 6.5385 \text{ seg}$$

$$200 \text{ L/h} \qquad \bar{x} = 4.9009 \text{ seg}$$

$$240 \text{ L/h} \qquad \bar{x} = 4.0841 \text{ seg}$$

Zona de Calentamiento:

$$150 \text{ L/h} \qquad \bar{x} = 5.8654 \text{ seg}$$

$$200 \text{ L/h} \qquad \bar{x} = 4.3964 \text{ seg}$$

$$240 \text{ L/h} \qquad \bar{x} = 3.6637 \text{ seg}$$

Por lo tanto, con lo anterior es posible evaluar el comportamiento de la distribución de tiempos de residencia del Néctar de Manzana, aplicando para ello la Ec. 6; a la cual se proponen valores a la expresión- UL/DL , para encontrar una relación teórica C/Co parecida a las condi -

ciones experimentales obtenidas.

En las tablas 8, 9 y 10 se dan los resultados teóricos y experimentales; mientras que en las Figs. 10, 11, 12 y 13 sus respectivas curvas típicas de flujo del sistema utilizado.

c) Retención de Vitamina C.

Con lo anterior expuesto, se establece el efecto de distribución - de tiempos de residencia, referente a la retención de Vitamina C. Antes que nada, se considera que el tratamiento térmico efectuado en el Néctar de Manzana, es un sistema HTST (pasteurización rápida a altas temperaturas, en tiempos cortos); en el cual sus condiciones óptimas operativas son (17):

$$\begin{aligned} T \text{ pasteurización} &= 72 \text{ }^\circ\text{C} \\ t \text{ residencia} &= 15 \text{ seg} \end{aligned}$$

Bajo estas condiciones, se tiene que el porcentaje de retención de Vitamina C, durante el enlatado comercial del Néctar de Manzana es de - aproximadamente igual al 44% (12).

Por lo tanto, se tiene que determinar el tiempo de residencia paracada zona térmica, mediante las siguientes relaciones:

$$\frac{15 \text{ seg}}{\bar{t}_p + \bar{t}_c} (\bar{t}_p) = 7.90 \text{ seg} \dots\dots\dots (40)$$

$$\frac{15 \text{ seg}}{\bar{t}_p + \bar{t}_c} (\bar{t}_c) = 7.09 \text{ seg} \dots\dots\dots (41)$$

Donde:

\bar{t}_p . tiempo de residencia medio (espacio tiempo)
zona de precalentamiento

\bar{t}_c . tiempo de residencia medio (espacio tiempo)
zona de calentamiento

Para efectos de cálculo, se considera que el tiempo de residencia es de 8 y 7 segundos respectivamente. Por consecuencia, con estos tiempos y la aplicación de la Ec. 6 se conocerá el porcentaje de retención de Vitamina C que se tiene en las zonas de tratamiento térmico.

En las tablas 11 y 12, se dan los porcentajes de retención de Vitamina C bajo las condiciones térmicas de operación y la relación que tiene con el Coeficiente Global de Transferencia de Calor, U, el cual se conoce con la Ec. 26, considerando ya los coeficientes de película involucrados.

A P E N D I C E

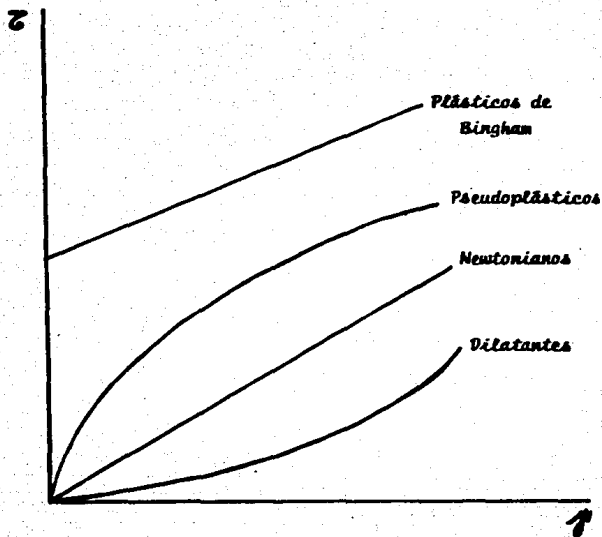


Fig. 1 Comportamiento reológico para fluidos Newtonianos y No-Newtonianos.

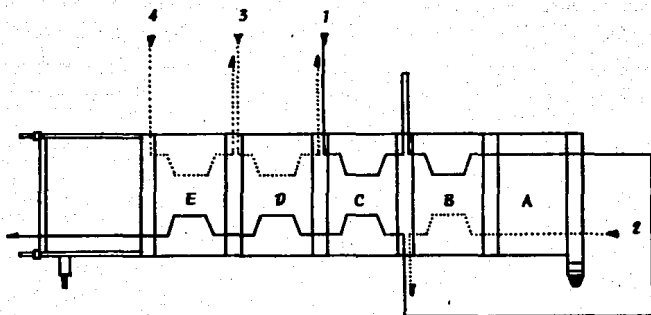


Fig. 2 Diagrama de flujo del ICP

Zonas de tratamiento térmico:

Corrientes:

- A. Mantenimiento
- B. Calentamiento
- C. Precalentamiento
- D. Preenfriamiento
- E. Enfriamiento

- 1. Fluido alimenticio
- 2. Agua caliente
- 3. Agua fría
- 4. Agua helada

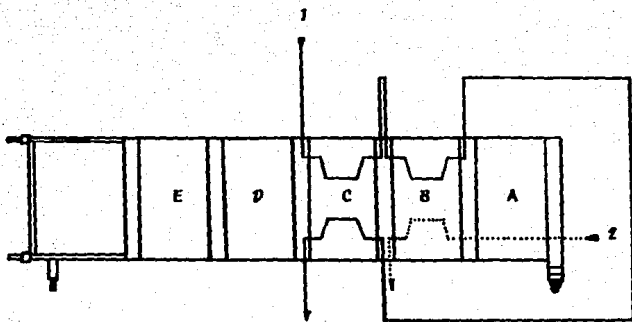
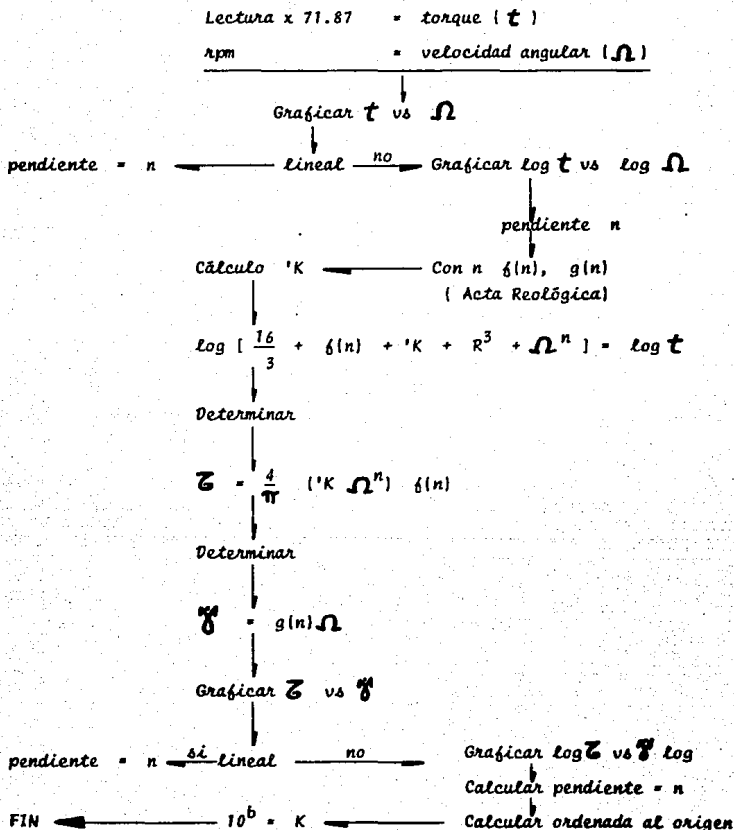


Fig. 3 Modificación al diagrama de flujo del ICP.

1. Néctar de Manzana
2. Agua caliente

Figura 4. Modelo Matemático Williams.



Donde:

- t .- torque (Deflexión).
- Ω .- Velocidad angular.
- τ .- Esfuerzo cortante.
- $\dot{\gamma}$.- Velocidad de deformación.
- R .- Radio de la aguja No.2.
- 'K .- Valor del índice de consistencia desarrollado por Williams.
- $f(n)$ y $g(n)$.- Factores considerados por Williams para corregir los efectos terminales, ocasionados por la aguja No.2 del viscosímetro.
- n .- Índice del comportamiento al flujo.
- K .- Índice de consistencia al flujo.

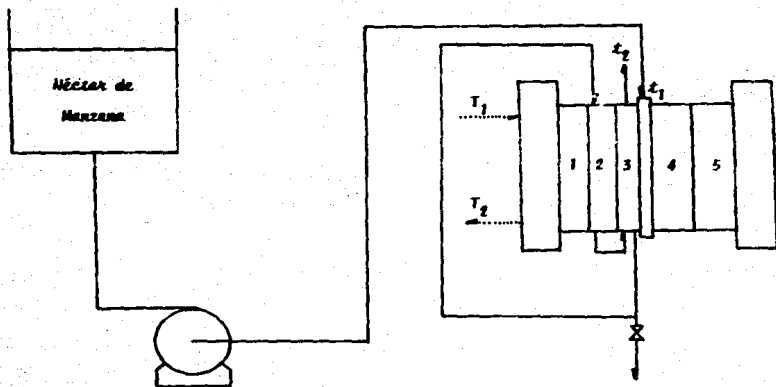


Fig. 5 Arreglo general del ICP para el estudio experimental de la transferencia de calor y de tiempos de residencia.

————— Néctar de Manzana
 - - - - - Agua Caliente

1. Zona de Mantenimiento
2. Zona de Calentamiento
3. Zona de Pre calentamiento
4. Zona de Preenfriamiento
5. Zona de Enfriamiento

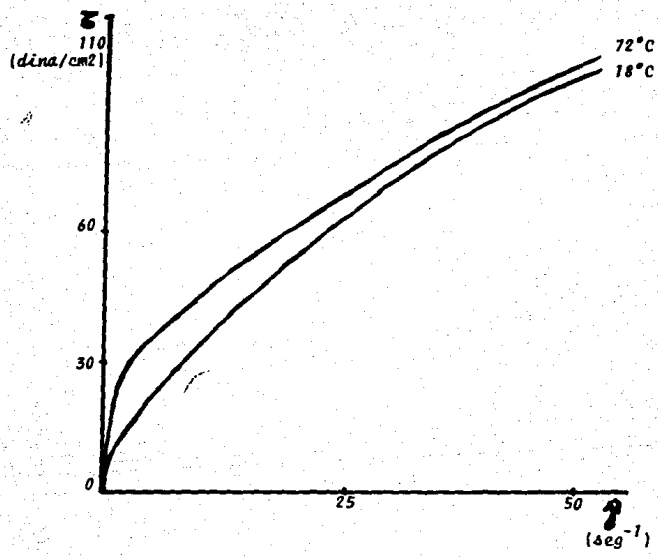


Fig. 6 Comportamiento reológico del Néctar de Manzana.

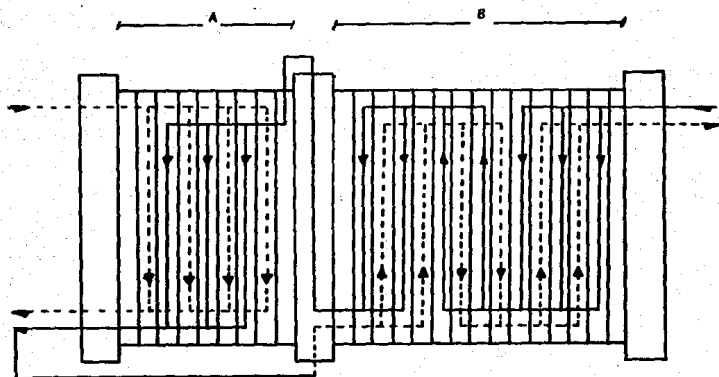




Fig. 7 Arreglo de las placas y flujo en los canales.

- A. Zona de Calentamiento.
- B. Zona de Pre calentamiento.

 Fluido frío
 Fluido caliente

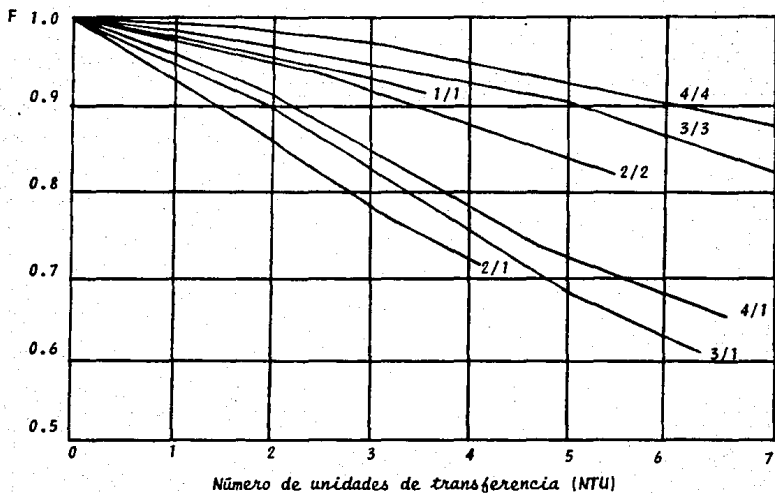


Fig. 8 Factores de corrección $[F]$ de la LMTD.

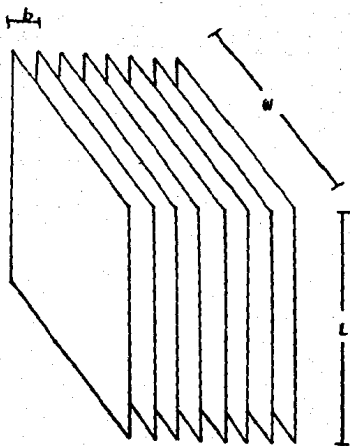


Fig. 9 Representación del área de flujo.

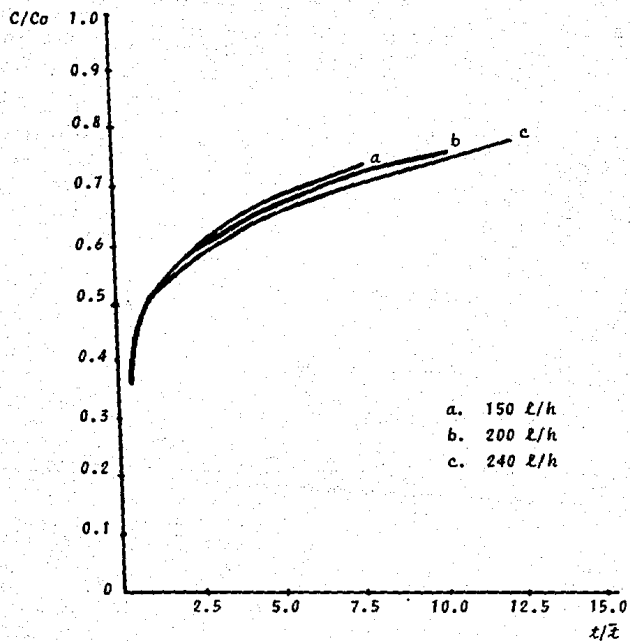


Fig. 10 Representación gráfica del comportamiento teórico C/C_0 vs $t/\bar{\tau}$ en la zona de Pre calentamiento.

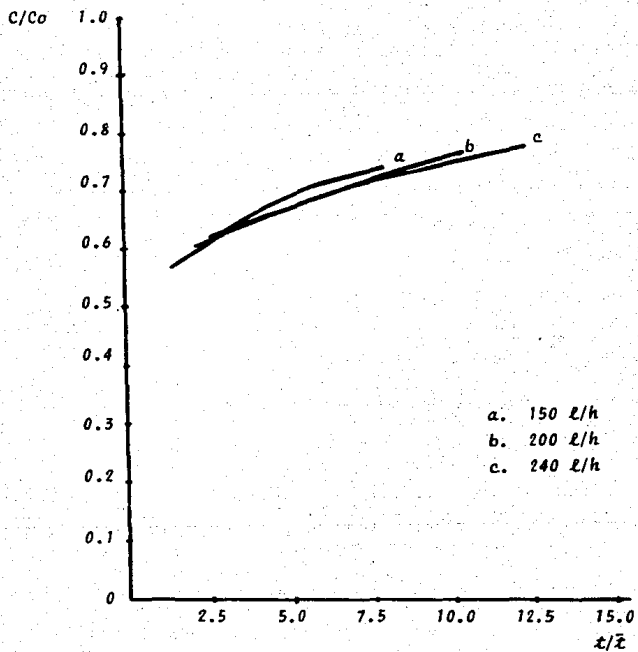


Fig. 11 Representación gráfica del comportamiento experimental C/C_o vs t/\bar{x} en la zona de Precaentamiento.

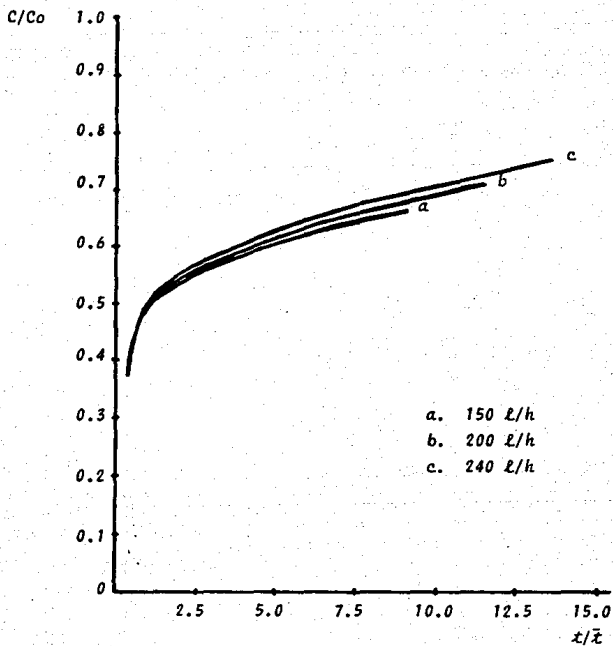


Fig. 12 Representación gráfica del comportamiento técnico C/C_0 vs x/\bar{x} en la zona de Calentamiento.

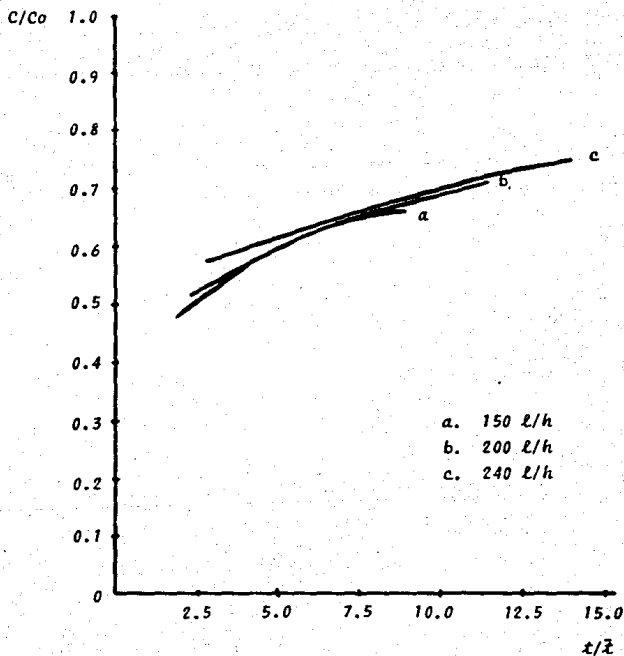


Fig. 13 Representación gráfica del comportamiento experimental C/C_o vs t/\bar{x} en la zona de Calentamiento.

T A B L A 1.

Zona de Pre calentamiento:

Fluido frío (Néctar de Manzana)

(m/seg)	(m ³ /seg)	(Kcal/h m ² °C) h ₁
V ₁ 0.178	G ₁ 0.000041	605.450
V ₂ 0.239	G ₂ 0.000055	623.830
V ₃ 0.287	G ₃ 0.000066	639.190

T A B L A 2.

Zona de Pre calentamiento:

Fluido caliente (Néctar de Manzana)

(m/seg)	(m ³ /seg)	(Kcal/h m ² °C) h ₁
V ₁ 0.205	G ₁ 0.000041	605.450
V ₂ 0.275	G ₂ 0.000055	623.830
V ₃ 0.330	G ₃ 0.000066	639.190

T A B L A 3.

Zona de Calentamiento:

Fluido frío (Néctar de Manzana)

(m/seg)	(m ³ /seg)	(Kcal/h m ² °C) h ₁
V ₁ 0.137	G ₁ 0.000041	371.260
V ₂ 0.183	G ₂ 0.000055	420.045
V ₃ 0.220	G ₃ 0.000066	452.959

T A B L A 4.

Zona de Calentamiento:

Fluido caliente (Agua)

(m/seg)	(m ³ /seg)	(Kcal/h m ² °C)
V ₁ 0.110	G ₁ 0.000044	526.580
V ₂ 0.152	G ₂ 0.000061	874.955
V ₃ 0.172	G ₃ 0.000069	1,149.201

T A B L A 5.

<i>Dimensiones del ICP Alfa-Laval Modelo P-20 HB (21).</i>		
W.	Ancho de la placa (El disponible para el flujo)	0.05 m
b.	Espacio entre dos placas	0.002 m
L.	Longitud de la placa (De orificio a orificio)	0.50 m
A.	Superficie de transferencia de calor por placa	0.03 m ²
y.	Espesor de la placa	0.0005 m

T A B L A 6.

Zona de Pre calentamiento:

Fluido caliente (Néctar de Manzana)

	G_1	G_2	G_3
Fuerzas Inerciales	0.0200	0.0304	0.0405
Fuerzas de fricción	9.621×10^{-5}	1.0301×10^{-4}	1.025×10^{-4}
Calor producido por Fricción	2.358×10^{-5}	2.216×10^{-5}	1.988×10^{-5}
Calor Conducido	0.001050	0.001017	0.001019
Calor transmitido por Convección	1.9979	2.0586	2.1093
Calor transmitido por Conducción	0.47568	0.45769	0.45893
Número de Reynolds	205.79	295.116	395.120
Número de Prandtl	0.0224	0.0217	0.0195
Número de Nusselt	4.20	4.49	4.59

T A B L A 7.

Zona de Calentamiento:

Fluido frío (Néctar de Manzana)

	G_1	G_2	G_3
Fuerzas Inerciales	0.0115	0.0183	0.0245
Fuerzas de Fricción	8.059×10^{-5}	8.059×10^{-5}	8.059×10^{-5}
Calor producido por Fricción	0.0237	0.0199	0.0179
Calor Conducido	1.1488	1.1488	1.1488
Calor transmitido por Convección	1.22515	1.3861	1.4997
Calor transmitido por Conducción	0.51722	0.51722	0.51722
Número de Reynolds	142.69	227.07	304.00
Número de Prandtl	0.0206	0.0173	0.0155
Número de Nusselt	2.37	2.68	2.89

T A B L A 7.

Zona de Calentamiento:

Fluido frío (Néctar de Manzana)

	G_1	G_2	G_3
Fuerzas Inerciales	0.0115	0.0183	0.0245
Fuerzas de Fricción	8.059×10^{-5}	8.059×10^{-5}	8.059×10^{-5}
Calor producido por Fricción	0.0237	0.0199	0.0179
Calor Conducido	1.1488	1.1488	1.1488
Calor transmitido por Convección	1.22515	1.3861	1.4997
Calor transmitido por Conducción	0.51722	0.51722	0.51722
Número de Reynolds	142.69	227.07	304.00
Número de Prandtl	0.0206	0.0173	0.0155
Número de Nusselt	2.37	2.68	2.89

Donde:

$$\text{Fuerzas Inerciales} = m^n (\text{m/seg})^{2-n} (\text{Kg/m}^3)$$

$$\text{Fuerzas de Fricción} = \frac{\text{Kg m seg}^n}{\text{seg}^2 \text{ m}^2}$$

$$\text{Calor producido por Fricción} = \frac{\text{Kcal}}{\text{seg m } ^\circ\text{C}}$$

$$\text{Calor Conducido} = \frac{\text{Kcal}}{\text{seg m } ^\circ\text{C}}$$

$$\text{Calor transmitido por Convección} = \frac{\text{Kcal}}{h \text{ m } ^\circ\text{C}}$$

$$\text{Calor transmitido por Conducción} = \frac{\text{Kcal}}{h \text{ m } ^\circ\text{C}}$$

T A B L A 8.

Zona de Pre calentamiento:

Para 150 L/h

$\bar{x} = 6.5385$

UL/DL = 0.20

t (seg)	t/\bar{x}	<u>Teórico</u>	C/Co <u>Experimental</u>
2	0.305	0.426	
4	0.611	0.474	
6	0.917	0.500	
8	1.223	0.519	
10	1.529	0.555	0.588
20	3.058	0.629	0.635
30	4.588	0.680	0.681
40	6.117	0.720	0.720
50	7.647	0.748	0.743

Zona de Calentamiento:

$\bar{x} = 5.8654$

UL/DL = 0.11

t (seg)	t/\bar{x}	<u>Teórico</u>	C/Co <u>Experimental</u>
2	0.340	0.365	
4	0.681	0.444	
6	1.022	0.491	
8	1.363	0.521	
10	1.704	0.535	0.480
20	3.409	0.573	0.550
30	5.114	0.617	0.604
40	6.819	0.644	0.642
50	8.524	0.666	0.666

T A B L A 9.

Zona de Precalentamiento:

Para 200 l/h $\bar{t} = 4.9009$ UL/DL = 0.18

t (seg)	t/ \bar{t}	C/Co	
		<u>Teórico</u>	<u>Experimental</u>
2	0.408	0.440	
4	0.816	0.493	
6	1.224	0.523	
8	1.632	0.545	
10	2.040	0.573	0.619
20	4.080	0.651	0.658
30	6.121	0.701	0.704
40	8.161	0.740	0.743
50	10.202	0.770	0.774

Zona de Calentamiento:

$\bar{t} = 4.3964$ UL/DL = 0.12

t (seg)	t/ \bar{t}	C/Co	
		<u>Teórico</u>	<u>Experimental</u>
2	0.454	0.409	
4	0.909	0.480	
6	1.364	0.519	
8	1.819	0.549	
10	2.272	0.559	0.526
20	4.549	0.617	0.581
30	6.823	0.657	0.635
40	9.098	0.686	0.681
50	11.372	0.710	0.712

T A B L A 10.

Zona de Pre calentamiento:Para 240 L/h $\bar{x} = 4.0841$

UL/DL = 0.17

t (seg)	t/\bar{x}	C/Co	
		<u>Teórico</u>	<u>Experimental</u>
2	0.489	0.456	
4	0.979	0.506	
6	1.469	0.539	
8	1.958	0.563	
10	2.448	0.589	0.635
20	4.897	0.662	0.673
30	7.345	0.715	0.728
40	9.794	0.753	0.759
50	12.242	0.782	0.782

Zona de Calentamiento: $\bar{x} = 3.6637$

UL/DL = 0.14

t (seg)	t/\bar{x}	C/Co	
		<u>Teórico</u>	<u>Experimental</u>
2	0.545	0.452	
4	1.091	0.503	
6	1.637	0.535	
8	2.183	0.557	
10	2.729	0.583	0.581
20	5.458	0.648	0.635
30	8.188	0.691	0.689
40	10.917	0.724	0.720
50	13.647	0.751	0.751

T A B L A 11.

Gasto Zona Térmica (L/h)	Espacio tiempo (seg)	Tiempo de residencia (seg)	No. de Pecllet	Retención Vitamina C (%)
150 Precalentamiento	6.5385	8	0.2000	52.39
Calentamiento	5.8654	7	0.1176	51.60
200 Precalentamiento	4.9009	8	0.1808	55.96
Calentamiento	4.3964	7	0.1282	54.78
240 Precalentamiento	4.0841	8	0.1724	57.93
Calentamiento	3.6637	7	0.1408	56.75

T A B L A 12.

Gasto Zona Térmica (L/h)	Coefficiente Global de Transferencia de Calor (Kcal/h m ² °C)	Retención Vitamina C (%)
150 Precalentamiento	1,456.90	52.39
Calentamiento	1,143.84	51.60
200 Precalentamiento	1,493.66	55.96
Calentamiento	1,541.00	54.78
240 Precalentamiento	1,524.38	57.93
Calentamiento	1,848.16	56.75

CONCLUSIONS

VIII. CONCLUSIONES.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio; Sobre el Efecto del Coeficiente Global de Transferencia de Calor, en la Destrucción de la Vitamina C como Componente Termolábil en un Alimento del Tipo Pseudoplástico (Néctar de Manzana). Se puede concluir de manera general que:

- a) Como se puede observar en las Figs. 10 y 12, que fueron obtenidas de la Ec. 6, los valores del Número de Peclét (UL/DL) corresponden a un valor cercano a cero (No. Peclét $\rightarrow 0$). Por lo cual, en una aproximación puede decirse que el Néctar de Manzana fluyendo dentro de la sección de tratamiento térmico, sigue un patrón de flujo tendiente a la de un tanque con agitación.

De esta forma, la interrelación entre la desviación del flujo ideal y la destrucción de Vitamina C; aplicando el modelo de dispersión estará dado por la Ec. 6.

$$\left(\frac{C}{C_0} \right) = \frac{1}{2} \left[1 - \text{ber} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{UL}{DL}} \frac{1 - x/\bar{x}}{\sqrt{x/\bar{x}}} \right) \right]$$

- b) Las condiciones de temperatura y tiempo de residencia durante el tratamiento térmico del Néctar de Manzana fueron adecuadas,

ya que se retiene a la Vitamina C en un rango de 51.60 % a 57.93 %; siendo este aceptable en comparación al obtenido durante el enlatado comercial, en donde su valor es del orden del 44.0 %.

- c) De todo el porcentaje de Vitamina C destruida en el tratamiento térmico, una cantidad muy superior se pierde en la zona de precalentamiento, comparada con la de calentamiento. Esto es debido, a que la zona de precalentamiento por ser la primera zona en la que el Néctar de Manzana entra en contacto con la acción del calor; es aquí, en donde se lleva a cabo la mayor transferencia de calor.
- d) El efecto que tiene el Coeficiente Global de Transferencia de Calor, sobre el porcentaje de retención de Vitamina C; es de que al aumentar éste, también se ve favorecido el incremento del contenido de Vitamina C; luego entonces se puede deducir, que el sistema ICP, desde el punto de vista de transferencia de calor y retención de Vitamina C, es recomendable para el tratamiento térmico de fluidos pseudoplásticos, en los cuales se persigan los objetivos planteados.

NOMENCLATURA

IX. NOMENCLATURA.

A_f	m^2	Area de flujo
A_t	m^2	Area total de transferencia de calor.
b	m	Espacio entre las placas
C_p, c_p	$Kcal/Kg \text{ } ^\circ C$	Calor específico
C	mg	Concentración de Vitamina C
D_e	m	Diámetro equivalente
F	-	Factor de corrección de la diferencia media logarítmica de temperatura
G, g	m^3/seg	Gasto volumétrico
h_1, h_2	$Kcal/h \text{ } m^2 \text{ } ^\circ C$	Coefficiente de película de Néctar-de Manzana/Agua
h_3	$Kcal/h \text{ } m^2 \text{ } ^\circ C$	Sumatoria de Coeficientes de película
K	$Nw/seg^n/m^2$	Indice de consistencia al flujo
k, k_p	$Kcal/h \text{ } m^2 \text{ } ^\circ C/m$	Conductividad térmica Conductividad térmica placa
L	m	Longitud de la placa
$LMTD$	$^\circ C$	Diferencia media logarítmica de temperatura
M, m	Kg/h	Gasto másico
NTU	-	No. Unidades de transferencia de calor
n	-	Indice de comportamiento al flujo

P_m	m	Perímetro mojado
Q	Kcal/h	Flujo de calor
$T, t_{1-2}, \Delta T$	$^{\circ}C$	Temperatura, diferencia de temperatura
t	seg	Tiempo
\bar{t}	seg	Espacio tiempo (tiempo medio de residencia)
t/\bar{t}	-	tiempo reducido
U	Kcal/h m ² $^{\circ}C$	Coefficiente Global de transferencia de calor
V	m/seg	Velocidad de flujo
W	m	Ancho de la placa
y	m	Espesor de la placa

SÍMBOLOS.

α	-	Constante de proporcionalidad
β	seg ⁻¹	Velocidad de deformación
Ω	rad/seg	Velocidad angular
τ	Dina/cm ²	Esfuerzo constante
t	Dina/cm ²	Torque
μ	Pa. seg	Viscosidad aparente (Newtoniana)

NUMEROS ADIMENSIONALES.

Nu	No. Nusselt
Pr	No. Prandtl
Re	No. Prandtl

UL/DL

No. Peplet

BIBLIOGRAFIA

X. BIBLIOGRAFIA.

1. LAVAL, Alfa Thermal Handbook
(Alfa Laval AB lund, Sweden) 1969.
2. APV, Company Incorporated
Heat Transfer Handbook
3. MARRIOT, J. "The plate heat exchangers"
Chemical Engineering Progress Vol. 73
No.2, 1977.
4. CROSS, P.H. "Studies of plate heat exchangers"
Chemical Engineering, Enero 1979.
5. COOPER, A. y otros "Recover more heat with plate exchangers"
The Chemical Engineer
No. 285, 1974, p. 280-285.
6. TROUPE, A.R. y otros "The plate heater versatile chemical engineering tool"
Chemical Engineering Progress Vol. 56, No.1
1960, p. 124-128.
7. WILKINSON, W.L. "Flow distribution in plate heat exchangers"
The Chemical Engineer
No. 285, 1974, p.289-293.
8. USHER, D. Compact Heat Exchangers
1969, (Glasgow: Ministry of Technology).
9. BUONOPANE, R. y otros "Heat Transfer design method for plate heat exchangers"
Chemical Engineering Progress Vol. 59, -
1963, p.57.

10. WILLIAMS, R.W. "Determination of viscometric data from the - Brookfield RVT Viscosimeter"
Rheological Acta 18, 1979, p. 345.
11. BADUI, D.S. *Química de los Alimentos*
Ed. Alhambra Mexicana, 1a. Ed. 1981.
12. DARYL, B. Lund, "Effect of commercial processing on nutrients" *Food Technology*
Febrero 1979, p. 28-34.
13. HURT, David H. "Effect of canning on the nutritive value of vegetables" *Food Technology*
Febrero 1979, p. 62-65.
14. THOMPSON, David R. "The Challenge in predicting nutrient - Changes during food processing"
Food Technology, Febrero 1982, p. 95-108.
15. RITTER, De Elmer, "Stability Characteristics of Vitamins in processed foods" *Food Technology*
Enero 1976, p. 48-52.
16. METHODS of Vitamin Assay The Association of Vitamin Chemists
Interscience Publishers,
New York, 3rd. Ed. 1966, p. 328.
17. WOODROOF and Luh, *Commercial fruit Processing*
The Avi Publishing Co. Inc. 1975.
18. RAMASWAMY, H.S. and Tung M.A. "Thermophysical Properties - of Apples" *Journal of Food Science* Vol. 46, 1981. p. 974-978.
19. GEANKOPLIS, Ch. J. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*, CECSA, 1982.

20. KERN, Q.D. *Procesos de Transferencia de Calor*, CECSA, 1979.
21. TIU, C. and Low G.S. "Momentum and Heat Transfer of Dilute Polymer Solutions in Plate Exchangers"
The American Institute of Chemical Engineers
No. 208, Vol. 77, 1981, p. 132-138.
22. LEVENSPIEL, O. *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. Ed.-
Reverté, S.A.
23. AIBA, S. y otros, *Biochemical Engineering*,
Acad. Press Inc. New York.
24. WANG, D.I.C. y otros, *Fermentation and Enzyme Technology*,
John Wiley and Sons, 1979.
25. SMITH, J.M. *Ingeniería de la Cinética Química*.
CECSA, 1979.
26. DANCKWERTS, P.V. *Chemical Eng. Science*
No. 2, Vol. 1, 1953.
27. BEYER, *Handbook of Mathematical Sciences*
CRC press, 5th. Edition.
28. EDWARDS, M.F. y otros "Heat Transfer and Pressure Drop -
Characteristics of PHE Using Newtonian and No-Newtonian -
Liquids" *The Chemical Engineer*, Mayo 1974, No. 285 p.286 -
293.
29. TULASIDAS, T.N. "Plate Heat Exchangers-Design, Applica-
tion and Performance in Dairy Industry
- A Review and Discussion"
Mysore J. Agric. Sci., 448- 456, 1981.

30. MARRIOT, J. "Where and How to Use PHE"
Chemical Engineering; April 5, 1971.

31. COOPER, A. "Condensation of steam in PHE"
AIChE Symposium Series; No. 138, Vol. 70 p. 172-177.