

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA



OBTENCION DE PERFILES COMPLETOS DE  
TEMPERATURA EN SOLO-AIRES POR  
MEDIO DE SIMULACION

236

ELIAS MERCADO ATRI

INGENIERIA QUIMICA



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

CLAS. Tesis

ADQ. 1975

FECHA 1975

PROC. M-224

Jurado asignado originalmente según el tema:

Presidente Prof.: Vladimir Estivill F. a.  
Vocal " : Jorge Ludlow L. a.  
Secretario " : Antonio Frías M. a.  
1er Suplente " : Gerardo Bazán Navarrete.  
2o Suplente " : Luis Romero Cervantes.

Sitio donde se desarrolló el tema:

Instituto Mexicano del Petróleo.

Ciudad de México.

Sustentante:

  
Elio Mercado Atri

Asesor del tema:

  
Ing. Antonio Frías Mendoza.

A MIS PADRES, SIN CUYO  
APOYO, NO HUBIERA LO -  
GRADO ALCANZAR ESTA ME  
TA.

A MIS HERMANOS

A MIS MAESTROS

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS

MUY ESPECIALMENTE A LA UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO.

MI SINCERO AGRADECIMIENTO PARA  
EL ING. JULIAN CASTELLANOS FER  
NANDEZ, POR SU VALIOSA ASESO -  
RIA EN EL DESARROLLO DE ESTE -  
TRABAJO, ASI COMO AL H. JURADO  
POR SU VALIOSA COOPERACION.

## INDICE

I.-	Introducción.....	3
II.-	Planteamiento del Modelo Matemático.....	6
	1.- Descripción física del equipo.....	7
	2.- Arreglos.....	7
	3.- Trayectorias de los fluidos .....	8
	4.- Modelo Matemático.....	10
	5.- Determinación de coeficientes globales de transferencia.....	12
	5.1. Coeficiente individual por dentro de tubos.....	12
	5.2. Coeficiente individual lado del aire.....	13
III.-	Programa utilizado y su explicación.....	17
	1.- Programa principal.....	18
	2.- Subrutina PRO.....	18
	3.- Subrutina CFT.....	19
	4.- Subrutina GEN.....	19
	5.- Subrutina ELIAS.....	21
	6.- Subrutina CONVE.....	21
	7.- Subrutina ENT.....	21
	8.- Subrutina DENT.....	22
	9.- Resolución de cada tipo de equipo.....	22
IV.-	Herramientas Matemáticas.....	25
	1.- Método de Runge-Kutta de 4º Orden.....	26
	2.- Método de convergencia.....	30

V.- Resultados.....	33
VI.- Conclusiones.....	85
VII.- Bibliografía.....	89



I. - INTRODUCCION.

Un equipo de proceso en general, puede quedar especificado definiendo un conjunto de tres vectores generales:

- A) Vector  $C_e$ , que define las características de los fluidos a la entrada del sistema.
- B) Vector  $C_s$ , éste nos define las características de los fluidos a la salida del sistema.
- C) Vector  $C_c$ , el cual define las características de construcción del sistema.

Conociendo cualquier par de estos tres vectores se puede inmediatamente encontrar el tercero, mediante una secuencia ordenada de cálculos, orientada a éste fin.

Por ejemplo, si conocemos el vector  $C_e$  y el vector  $C_s$ , podemos obtener el vector  $C_c$ , correspondiendo este caso al diseño clásico de un sistema de proceso.

Sin embargo, el tema sobre el cual versará el contenido de nuestro trabajo, es aquel en el que conociendo los vectores  $C_e$  y  $C_c$ , obtengamos el vector de características de los fluidos de salida, siendo éste una simulación de un sistema determinado.

Cuando se desea simular un sistema sencillo, la simulación se puede llevar a cabo construyendo un modelo matemático específico para dicho sistema, capaz de describirlo por completo. Este procedimiento tiene la ventaja de que se puede hacer uso de las características del sistema, para que el programa sea lo más eficiente posible.

El caso que trataremos es de un sistema con un solo equipo, un soloaire. Los soloaire son equipos de transferencia de calor,

que se utilizan para enfriamiento e inclusive condensación de un fluido que va dentro de un haz de tubos, por medio de un flujo de aire que cruza transversalmente este haz de tubos (Fig. 1.1.). (Ref. 2)

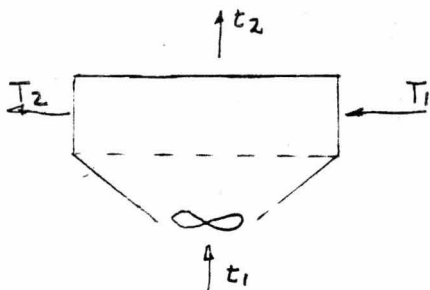


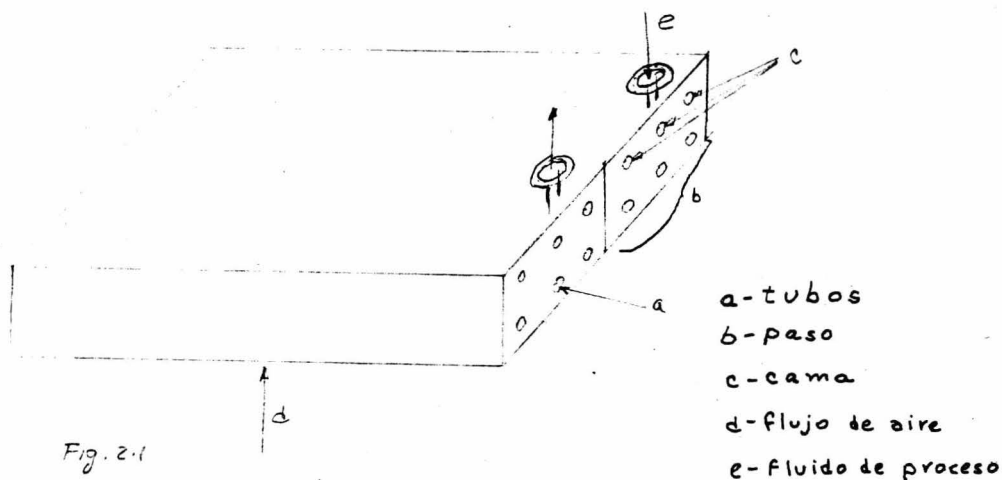
Fig 1.1

II.- PLANTEAMIENTO DEL MODELO MATEMATICO.

## 2.1 Descripción física del equipo.

En el capítulo anterior se mencionó la necesidad del planteamiento de un modelo matemático, para la solución del sistema específico.

Para lograr este propósito se debe conocer primeramente un solo aire (Fig. 2.1).



Como se ve en la Fig. 2.1, un grupo de tubos en un mismo plano longitudinal forman una cama, un grupo de camas forman un paso y un grupo de pasos forman el haz de tubos completo.

## 2.2 Arreglos.

Como se puede intuir de los conceptos anteriores, existe un gran número de combinaciones de tubos, camas y pasos,

Para formar los diferentes arreglos posibles y precisamente uno de los problemas más críticos en el desarrollo de este trabajo fue la deficiente bibliografía al formularnos la pregunta: ¿cuáles arreglos son los más comunes en la industria de procesos?. Ante esta situación, optamos por proponer una serie de arreglos (Fig 2.2), que a nuestro juicio podrían presentarse en la industria.

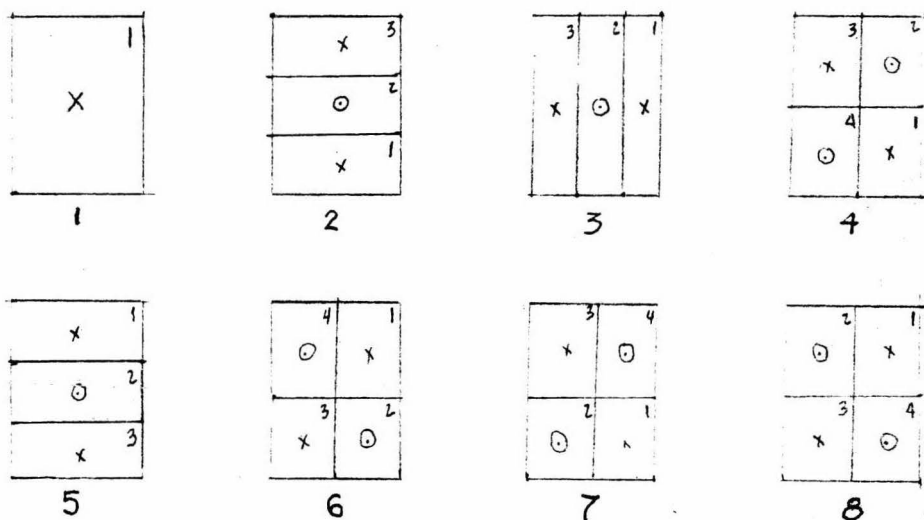


Fig 2.2

### 2.3. Trayectorias de los flúidos.

Debido a esta situación, el problema de elaborar un programa de computación, lo más reducido posible, en número de órdenes y tiempo de ejecución y que además, abarque todas las posibilidades planteadas, se vuelve bastante complejo.

El primer problema que se encontró en este trabajo fue el referente al flujo cruzado entre el aire y el fluido de los tubos. Además, el aire no lleva una trayectoria definida por medio de un cauce, resultando demasiado complejo el definir la trayectoria de una partícula de aire desde que entra por la parte inferior del equipo hasta que sale del mismo.

Debido a esto se consideraron las dos posibilidades extremas:

a) Que el aire sigue teóricamente una trayectoria vertical a través de todo el equipo, sin mezclarse (fig. 2.3).

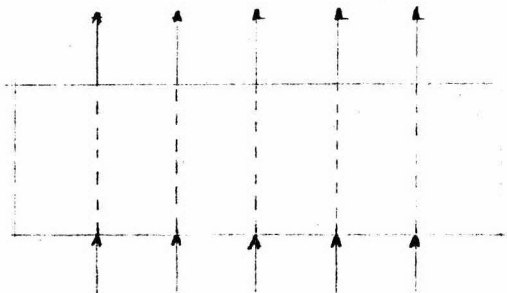


Fig 2.3

b) Que el aire al salir de cada una de las camas se mezcla perfectamente uniformizando su temperatura, antes de entrar a la siguiente cama (Fig. 2.4).

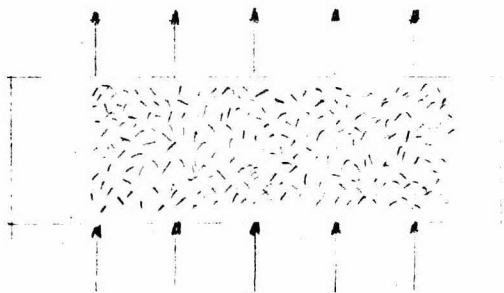


Fig. 2.4

Se elaboró un programa de computación para cada uno de los casos mencionados y se corrieron con datos referentes a un mismo equipo, del cual se conocían ya las características de los fluidos a la salida, vector Cs. Los resultados obtenidos, considerando aquellas variables que pudieran afectar este punto de comparación que estamos buscando, como son gradientes de temperatura a la entrada del equipo, sensibilidad de las funciones de entalpia del fluido de proceso, Vector Cc, etc., fueron prácticamente iguales para ambos casos, con una diferencia máxima en las temperaturas del aire y del fluido de tubos, entre uno y otro caso de 2°F.

En base a estos resultados se tomó la decisión de considerar que el flujo de aire sigue una trayectoria vertical dentro del equipo.

#### 2.4 Modelo Matemático.

La base del modelo matemático general empleado en este trabajo fue el definir matemáticamente el proceso de transferencia de calor entre ambos fluidos. Para lograr esto se dividió la longitud del equipo en un número finito de intervalos diferenciales procediendo a resolver cada uno de ellos, como un simple intercambio térmico e integrado por medio de un método numérico (Cap. IV).

El intercambio térmico para cada elemento diferencial se puede plantear de la siguiente manera:



$$dQ = U (T - t) dAu \quad (1)$$

Q - Calor transferido

U - Coeficiente global de transferencia de calor

T - Temperatura del fluido de proceso

t - Temperatura del aire

Au - Area unitaria de transferencia de calor =  $\frac{\text{Area total}}{\text{Longitud}}$

$$dQ = W dH \quad (2)$$

W - Flujo por tubos

H - Entalpia de la corriente de tubos

$$dH = H' dT \quad (3)$$

donde:

$$H' = \frac{dH}{dT} \quad (4)$$

$$d Au = Au dx \quad (5)$$

x - Longitud

Sustituyendo (3) en (2)

$$dQ = W H' dT \quad (6)$$

Sustituyendo (6) y (5) en (1), nos queda:

$$W H' dT = U (T - t) Au dx \quad (7)$$

Rearreglando (7), obtenemos:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{U (T - t) Au}{W H'} \quad (8)$$

La ecuación (8) es a final de cuentas la ecuación diferencial a resolver por medio del método numérico explicado en el Cap. IV (método de Runge-Kutta de 4o. orden); con el cual se obtiene precisamente el perfil de temperaturas completo a lo largo de todo el equipo.

## 2.5 Determinación de coeficientes globales de transferencia.

En la bibliografía se encuentran varios autores que tratan este punto, encontrando una similitud bastante grande entre ellos, por lo cual, nos fue indiferente el abocarnos a un método en específico.

### 2.5.1 Coeficiente individual por dentro de tubos.

Para estimar estos coeficientes se emplearon las ecuaciones de Sieder y Tate. En 1936, estos investigadores encontraron correlaciones tanto para el calentamiento como para el enfriamiento de diversos fluidos, llegando a la siguiente ecuación para flujos laminares (No. de Reynolds menor a 2100):

$$\frac{h_i \times D_i}{k} = 1.86 \left( \frac{q \times W \times C_p}{\pi \times k \times L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

Para flujo turbulento (No. de Reynolds mayor a 10,000), la ecuación usada es:

$$\frac{h_i \times D_i}{k} = 0.023 \left( \frac{D_i \times G}{\mu} \right)^{0.8} \left( \frac{C_p \times \mu}{k} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

En la región de flujo transicional (No. Reynolds mayor que 2100 y menor que 10,000), se hace el cálculo usando el parámetro  $J_H$ , calculado de la siguiente manera:

$$z = 3.45 (\log Re - 3.9)$$

$$y = 6.58 (\log (\log L/D))$$

$$m = 1.533 + .286 \log L/D$$

$$J_H = 0.392 \left(\frac{L}{D}\right)^{-1.28} (Re)^m + \log \frac{L}{D} (z + 2.05 + y e^{-z^2})$$

$$h_i = J_H \left(\frac{k}{D}\right) \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

Re - No. de Reynolds

L - Longitud

D - Diámetro

k - Conductividad térmica del fluido por tubos

$C_p$  - Calor específico del fluido por tubos

$\mu$  - Viscosidad del fluido a la temp. T.

$\mu_w$  - Viscosidad del fluido a la temp. de la pared.

### 2.6.2 Coeficiente Individual Lado del Aire.

Debido a que los tubos de un soloaire son de superficies extendidas (tubos aletados), el cálculo de los coeficientes por el lado del aire, se complica aún más.

En la bibliografía encontrada, en general, se puede decir que casi todos los autores resuelven el problema de una manera muy similar, tomando en cuenta factores como son: altura de la aleta, material de la aleta, número de aletas por pulgada, número de pasos, eficiencias, la relación entre el área del tubo aletado y la del no aletado, etc. Sin embargo, en toda la bibliografía se encontró que para el método específico de cada autor, se utilizaba una cierta información con respecto a estos tubos aletados, de la cual no se conocía la fuente y únicamente el autor presentaba aquellos datos que él necesitaba para resolver el problema específico que utilizaba como ejemplo (Ref: 1, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16).

Esta situación en cierta manera, estaba restringiendo los alcances del programa que se estaba elaborando, por lo tanto se encontró un autor que presentaba un método de cálculo mas generalizado, aunque no tan exacto como los anteriores; sin embargo, lo suficientemente preciso para nuestros fines (Ref. 13).

En este método primero se calcula la masa velocidad facial del aire, GA:

$$GA = \frac{W_a}{F_a}$$

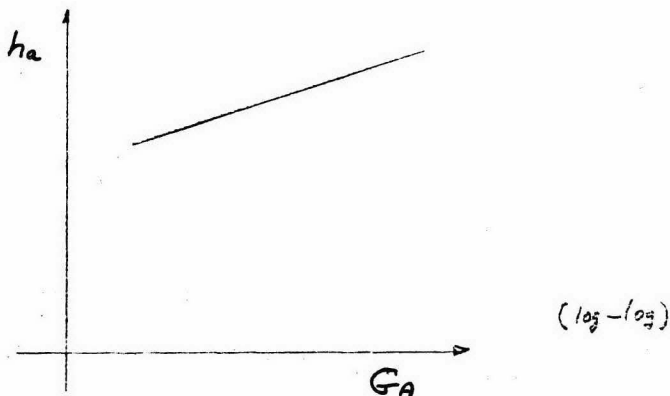
donde  $F_A$  es el área facial del equipo:

$$F_A = L \times H$$

$L$  = Longitud

$H$  = Ancho

teniendo la masa velocidad facial y con la fig. 2.5.1, se encuentra el coeficiente individual del lado del aire ( $h_a$ ).



Además este método requiere la corrección del coeficiente individual por el lado de tubos y del coeficiente de incrustación - por medio de la relación del área de tubo aletado entre la de tubo no aletado:

$$1/h_{i0} = 1/h_i \left( \frac{A}{A_0} \right)$$

$$R_{Do} = R_D \left( \frac{A}{A_0} \right)$$

$h_{to}$  - coeficiente corregido del lado de tubos

$h_t$  - coeficiente sin corregir del lado de tubos

$R_{Do}$  - factor de incrustación corregido de los fluidos

$R_D$  - factor de incrustación sin corregir de los fluidos

$A_0$  - área de tubo sin aletas

$A$  - área de tubo con aletas

### 2.5.3 Cálculo del Coeficiente Global.

Ya disponiendo de los coeficientes individuales por dentro de tubos y por el lado del aire, el cálculo del coeficiente global, se hace de la manera tradicional:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{io}} + R_{Do} + R_m + \frac{1}{h_a}$$

$R_m$  - Resistencia de la pared metálica.

III.- PROGRAMA UTILIZADO Y SU EXPLICACION.

El programa consta de un principal (MAIN) y siete subrutinas.

### 3.1 Programa Principal.

El programa principal lleva a cabo las lecturas de datos necesarios para el programa, identifica el tipo de equipo que se está resolviendo, calcula el coeficiente por el lado del aire e inicia la resolución de cada equipo.

### 3.2 Subrutina PRO.

Esta subrutina se encarga únicamente de evaluar las propiedades de viscosidad, conductividad térmica y capacidad calorífica a la temperatura que se necesite, utilizando valores de estas propiedades, que se leen, evaluadas a dos temperaturas de referencia y llevando a cabo una interpolación o una extrapolación para obtener el valor deseado. Esta interpolación o extrapolación se lleva a cabo con las ecuaciones siguientes: (Ref. 8)

#### 3.2.1 Viscosidad

##### 3.2.1.1 Gas o vapor de agua

$$\mu = \mu_1 \left( \frac{T}{T_1} \right)^{3/2} \frac{\left( \frac{T_1 - T_2}{T - T_2} \right)}{\left( 1 - \frac{T_1 - T}{T_2 - T} \right)} \left( \frac{\mu_1}{\mu_2} \right) \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{3/2}$$

##### 3.2.1.2 Líquido

$$\mu = \mu_1 \left( \frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^{\left[ \frac{T_2}{T} (T_1 - T) \right]}$$



### 3.2.2 Conductividad Térmica.

#### 3.2.2.1 Gas o Vapor de agua

$$k = \frac{k_1 (\bar{T}_2 - T) \sqrt{\bar{T}_2 \times T} - k_2 (T_1 - T) \sqrt{T_1 \times T}}{(\bar{T}_2 - T_1) \sqrt{T_1 \times \bar{T}_2}}$$

#### 3.2.2.2 Líquido

$$k = (k_1 - k_2) \frac{\bar{T}_2 - T}{\bar{T}_2 - T_1} + k_2$$

### 3.2.3 Capacidad Calorífica

$$C_p = (C_{p1} - C_{p2}) \frac{\bar{T}_2 - T}{\bar{T}_2 - T_1} + C_{p2}$$

## 3.3 Subrutina GFT

En esta subrutina se lleva a cabo la evaluación del coeficiente por el lado de tubos. El método de cálculo se muestra en la sección 2.5.1.

## 3.4 Subrutina GEN

En esta subrutina es en realidad donde se lleva a cabo la resolución de los equipos.

Utiliza como datos: el número de camas del equipo, la temperatura de entrada del fluido de proceso, la temperatura de entrada del aire, datos de construcción, el número de tubos, tamaño

del intervalo y número de intervalos y coeficiente por el lado del aire.

Empieza resolviendo la primera cama del paso que se está considerando, para lo cual requiere de la evaluación del área unitaria, supone la temperatura de salida del aire de ese intervalo, y entra a la resolución del método de Runge-Kutta para lo cual, calcula la temperatura media, llama a la subrutina que calcula el coeficiente por el lado de tubos (CFT), con este y con el coeficiente por el lado del aire, evalúa el coeficiente global, calcula el  $C_p$  evaluado a la temperatura en consideración, calcula el valor de la ecuación diferencial con sus respectivos datos, hasta calcular el valor de temperatura de salida del fluido de proceso de ese intervalo. A continuación calcula los calores transferidos en ese intervalo y entra a la subrutina de convergencia donde los compara y en caso de que su diferencia sea mayor a una tolerancia especificada previamente, encuentra un nuevo valor, de la temperatura de salida del aire supuesto y vuelve a entrar al método de Runge-Kutta.

En el momento de encontrar la convergencia correcta sigue resolviendo el siguiente intervalo de la misma forma que el anterior hasta terminar con toda la longitud del equipo.

De esta misma manera pasa a resolver la siguiente cama en consideración y cuando termina con todas las que tiene el equipo calcula una temperatura de mezcla, con las temperaturas de salida de cada cama.

### 3.5 Subrutina ELIAS.

Esta subrutina se utiliza para resolver aquellos equipos o secciones de equipos, en donde la resolución no es directa y requiere del método iterativo.

Lo que hace es suponer la temperatura de salida del último paso, resuelve el equipo en forma inversa, por medio de la subrutina GEN, y compara la temperatura de entrada calculada del primer paso con la temperatura real de entrada y con esto entra a la subrutina CONVE donde checa si la diferencia entre esas dos temperaturas es menor que una cierta tolerancia y en caso contrario propone un nuevo valor de la temperatura de salida del último paso.

### 3.6 Subrutina CONVE.

En esta subrutina es en donde se llevan a cabo todos los cálculos matemáticos necesarios para la convergencia. Las bases matemáticas se explican en la sección 4.2.

### 3.7 Subrutina ENT.

Esta subrutina calcula únicamente los valores de entalpia de cualquiera de los dos fluidos a cualquier temperatura, utilizando para ello una correlación hasta de 50. grado cuyos coeficientes son necesariamente alimentados previamente.

La correlación es del siguiente tipo:

$$H = A + \frac{B}{T} + C \ln T + D \cdot T + E \cdot T^2 + F \cdot T^3 + G \cdot T^4 + I \cdot T^5$$

Donde A, B, C, D, E, F, G, I son los coeficiente característicos de cada uno de los fluidos.

### 3.8 Subrutina DENT.

Esta subrutina calcula el valor de la derivada de la entalpia (capacidad calorífica) y esta es directamente la derivada de la correlación mencionada en la sección 3.7, utilizando obviamente los mismos coeficientes para cada uno de los fluidos:

$$H' = -\frac{B}{T^2} + \frac{C}{T} + D + 2 \cdot E \cdot T + 3 \cdot F \cdot T^2 + 4 \cdot G \cdot T^3 + 5 \cdot I \cdot T^4$$

### 3.9 Resolución de Cada Tipo de Equipo. (Ver fig 2.2)

#### 3.9.1 Tipo 1

Este equipo es el mas sencillo y después de leer los datos, identifica la temperatura de entrada del aire a lo largo de todo el equipo y llama a la subrutina GEN donde encuentra la resolución completa.

### 3.9.2 Tipo 2

Este tipo presenta un número  $n$  de pasos horizontales con la salvedad de que el primero tiene que estar en contacto con el aire fresco. En este después de leer los datos, entra directamente a la subrutina GEN, tantas veces como número de pasos se tengan, obteniendo al final las temperaturas de salida.

### 3.9.3 Tipo 3

Este equipo es similar al anterior, solamente que los pasos están dispuestos en forma vertical.

Después de leer los datos entra directamente a GEN tantas veces como número de pasos tenga y la única variación es que todos los pasos van a tener la misma temperatura de entrada del aire.

### 3.9.4 Tipo 4

Este equipo es una combinación de los tipos 2 y 3 teniendo la característica principal que el primer paso se encuentra en contacto con la entrada de aire fresco. El programa identifica los pasos verticales de que consta el equipo y resuelve el primero de ellos con todos los pasos horizontales de que consta. Al pasar al siguiente paso vertical nos encontramos con el problema de que el paso del cual conocemos la temperatura de entrada del fluido de proceso, no está en contacto con el aire fresco; se vuelve problema iterativo y se tiene que resolver utilizando la subrutina ELIAS, se sigue la resolución

de los siguientes pasos verticales de la misma manera, que los mencionados.

#### 3.9.5 Tipo 5

Este equipo es similar al tipo 2 diferenciándose en que el paso 1 no está en contacto con el aire fresco. Su resolución es iterativa, utilizando para ello la subrutina ELIAS.

#### 3.9.6 Tipo 6

Este equipo es similar al tipo 4, solamente que ahora la entrada del fluido de proceso no está en contacto con el aire fresco, por lo tanto el primer paso vertical se resuelve igual que el segundo paso vertical del equipo tipo 4, el segundo paso del equipo tipo 4, y así sucesivamente.

#### 3.9.7 Tipo 7

En este equipo se identifican un número finito  $n$  de pasos horizontales, resolviendocada uno de ellos, con sus respectivos pasos verticales de la misma manera en la cual se resuelve el equipo tipo 3.

#### 3.9.8 Tipo 8

Este equipo es similar al anterior, con la diferencia de que la entrada de fluido de proceso no está en contacto con el aire fresco, por lo tanto la resolución es netamente iterativa utilizándose para ello la subrutina ELIAS.

IV.- HERRAMIENTAS MATEMATICAS.

#### 4.1 Método de Runge-Kutta de 4o. Orden. (Ref. 3)

La ecuación diferencial que se encontró en la sección 2.4 (ecuación 8):

$$\frac{dT}{dx} = \frac{U_v(T-t)_x A_v}{W \cdot H'}$$

es una ecuación diferencial que solo puede resolverse por las características del sistema, mediante una técnica numérica aproximada. Todas estas técnicas utilizan como base el dar un incremento finito pequeño a la variable independiente  $X$ , en el cual se puede considerar a la función, como una función lineal.

Existen varias técnicas de este tipo, entre las cuales podemos mencionar: el método de Euler, el método de Euler modificado, los métodos de Runge-Kutta de primero, segundo y cuarto orden, etc.

En el caso que nos concierne se utilizó el método de Runge-Kutta de cuarto orden, el cual consiste en lo siguiente:



Sean n ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dY_1}{dX} = F_1(X, Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$$

$$\frac{dY_2}{dX} = F_2(X, Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$$

.....  
.....  
.....

$$\frac{dY_n}{dX} = F_n(X, Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$$

Dando un incremento finito a X ( $\Delta X$ )  $X_i = X_{i-1} + \Delta X$ , los incrementos correspondientes de  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  involucran el cálculo de cuatro grupos de constantes.

Primer Grupo:

$$R(1,1) = \Delta X F_1(X, Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$$

$$R(2,1) = \Delta X F_2(X, Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$$

$$R(3,1) = \Delta X F_3(X, Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$$

.....  
.....

$$R(n,1) = \Delta X F_n(X, Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$$

Segundo Grupo:

$$k(1,2) = \left[ \Delta x F_1 \left( x + \frac{\Delta x}{2}, y_1 + \frac{k(1,1)}{2}, y_2 + \frac{k(2,1)}{2}, \dots, y_n + \frac{k(n,1)}{2} \right) \right]$$

$$k(2,2) = \left[ \Delta x F_2 \left( x + \frac{\Delta x}{2}, y_1 + \frac{k(1,1)}{2}, y_2 + \frac{k(2,1)}{2}, \dots, y_n + \frac{k(n,1)}{2} \right) \right]$$

.....

$$k(n,2) = \left[ \Delta x F_n \left( x + \frac{\Delta x}{2}, y_1 + \frac{k(1,1)}{2}, y_2 + \frac{k(2,1)}{2}, \dots, y_n + \frac{k(n,1)}{2} \right) \right]$$

Tercer Grupo:

$$k(1,3) = \left[ \Delta x F_1 \left( x + \frac{\Delta x}{2}, y_1 + \frac{k(1,2)}{2}, y_2 + \frac{k(2,2)}{2}, \dots, y_n + \frac{k(n,2)}{2} \right) \right]$$

$$k(2,3) = \left[ \Delta x F_2 \left( x + \frac{\Delta x}{2}, y_1 + \frac{k(1,2)}{2}, y_2 + \frac{k(2,2)}{2}, \dots, y_n + \frac{k(n,2)}{2} \right) \right]$$

.....

$$k(n,3) = \left[ \Delta x F_n \left( x + \frac{\Delta x}{2}, y_1 + \frac{k(1,2)}{2}, y_2 + \frac{k(2,2)}{2}, \dots, y_n + \frac{k(n,2)}{2} \right) \right]$$

Cuarto Grupo:

$$k(1,4) = \Delta x F_x(x + \Delta x, Y_1 + R(1,3), Y_2 + R(2,3), \dots, Y_n + R(n,3))$$

$$k(2,4) = \Delta x F_x(x + \Delta x, Y_1 + R(1,3) + Y_2 + R(2,3), \dots, Y_n + R(n,3))$$

⋮  
⋮  
⋮

$$k(n,4) = \Delta x F_x(x + \Delta x, Y_1 + R(1,3) + Y_2 + R(2,3), \dots, Y_n + R(n,3))$$

Una vez calculados los cuatro grupos de constantes, los incrementos correspondientes de  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  podrán obtenerse:

$$\Delta Y_1 = \frac{1}{6} (k(1,1) + 2k(1,2) + 2k(1,3) + k(1,4))$$

$$\Delta Y_2 = \frac{1}{6} (k(2,1) + 2k(2,2) + 2k(2,3) + k(2,4))$$

⋮  
⋮  
⋮

$$\Delta Y_n = \frac{1}{6} (k(n,1) + 2k(n,2) + 2k(n,3) + k(n,4))$$

#### 4.2 Método de convergencia. (Ref. 17)

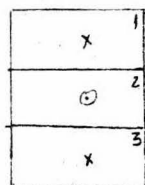
Como se vió en el capítulo anterior, existen puntos en el programa en donde se requiere de una técnica iterativa de convergencia.

Uno de estos puntos es aquel en donde al tratar de resolver cada intervalo de la longitud total del equipo nosotros entramos conociendo la temperatura de entrada del aire y la temperatura de entrada del fluido de proceso a ese intervalo, sin embargo, para resolver la ecuación diferencial correspondiente necesitamos la temperatura media del aire, por lo tanto suponemos la temperatura salida del aire, con ella se calcula la temperatura media y se resuelve la ecuación diferencial.

En este punto se calcula la ganancia de calor por el lado del aire y la pérdida por el lado de tubos con un simple balance térmico y se comparan estos dos calores, debiendo necesariamente ser iguales en el caso en que la temperatura de salida del aire supuesta fuese correcta; en caso de que no lo sean se entra al método de convergencia que nos da un nuevo valor de la temperatura de salida del aire, mejor que el valor anterior.

Otra parte del programa donde se utiliza el método de convergencia es en los casos en donde por la disposición misma del arreglo que se está resolviendo no se conocen directamente las temperaturas de entrada del aire o del fluido de proceso.

Por ejemplo, en el equipo tipo No. 5:



se conoce la temperatura de entrada del aire al paso 3, pero desconocemos la temperatura del fluido de proceso, o conocemos la temperatura de entrada del fluido de proceso al paso 1 y desconocemos la temperatura de entrada del aire a este paso. Lo que se procedió a hacer en este caso es suponer la temperatura de salida del último paso y con la temperatura de entrada del aire, conocida, podemos resolver ese paso en forma inversa, (solamente invirtiendo el signo de la ecuación diferencial), obteniendo la temperatura de entrada al último paso que es la misma de salida del penúltimo. Continuamos de esta forma hasta encontrar la temperatura de entrada calculada del primer paso, y aquí se compara esta con el valor real de entrada a tubos, debiendo necesariamente ser iguales. En caso de que no lo sean se entra al método de convergencia que nos va a dar un mejor valor de la temperatura de salida del último paso. El método de convergencia utilizado se basa en los polinomios de Lagrange. Un polinomio de Lagrange de grado  $n$  representa una curva que pasa exactamente por  $n + 1$  puntos distintos, produciendo un valor único de la variable dependiente para cada valor de la variable independiente. Utilizando los polinomios de Lagrange, el valor de la variable propuesta para la itera-

ción  $n + 1$  queda expresado como:

$$X_{n+1} = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \frac{y_c - y_i}{x_j - y_i}}{\prod_{i=1}^n \frac{y_c - y_i}{x_j - y_i}} \right] x_j$$

El método requiere de una suposición inicial del valor de la variable, y de un incremento para fijar su valor en la segunda iteración. En la fórmula arriba indicada el valor de  $n$  evoluciona desde 2 hasta  $N + 1$  (siendo  $N$  el grado máximo de interpolación especificado) al aumentar la información disponible para el ajuste. El método supone, sucesivamente, que la variable puede ser representada por un polinomio en la función de grado 1, 2, 3, ....  $N$  para proponer el siguiente valor de la variable  $X_{n+1}$  correspondiente al valor de convergencia  $Y_c$  de la función. Cuando se dispone ya de  $N + 1$  puntos de información, cada nuevo punto calculado sustituye al valor más antiguo o al más alejado de la raíz. Cuando se fija el grado máximo de interpolación  $N$  igual a 1, el método se reduce al método de convergencia de la secante.

V.- RESULTADOS.

## EQUIPO TIPO I

PASO - 1

CAMA - 1

LONGITUD	TUBO	AIRE
0.00	205.00	-
1.00	192.55	96.18
2.00	181.75	95.46
3.00	172.11	94.83
4.00	163.57	94.28
5.00	155.98	93.80
6.00	149.22	93.39
7.00	143.20	93.02
8.00	137.83	92.70
9.00	133.03	92.41
10.00	128.73	92.16
11.00	124.83	91.93
12.00	121.43	91.73
13.00	118.33	91.56
14.00	115.55	91.40
15.00	113.05	91.26
16.00	110.80	91.13
17.00	108.77	91.02
18.00	106.95	90.92
19.00	105.30	90.83
20.00	103.82	90.75
21.00	102.49	90.67
22.00	101.28	90.61
23.00	100.20	90.55
24.00	99.22	90.49



PASO - 1

CAMA - 2

LONGITUD	TUBO	AIRE
0.00	205.00	-
1.00	193.33	102.03
2.00	183.95	100.66
3.00	173.70	99.47
4.00	165.43	98.43
5.00	158.04	97.52
6.00	151.42	96.71
7.00	145.48	96.01
8.00	140.14	95.38
9.00	135.34	94.82
10.00	131.03	94.33
11.00	127.14	93.89
12.00	123.63	93.50
13.00	120.46	93.15
14.00	117.60	92.84
15.00	115.02	92.56
16.00	112.69	92.31
17.00	110.57	92.08
18.00	108.60	91.88
19.00	106.83	91.70
20.00	105.37	91.53
21.00	103.95	91.39
22.00	102.66	91.25
23.00	101.49	91.13
24.00	100.43	91.03

PASO - 1

CAMA - 3

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	205.00	-
1.00	193.98	107.57
2.00	184.09	105.63
3.00	175.21	103.94
4.00	167.22	102.45
5.00	160.02	101.14
6.00	153.53	99.98
7.00	147.68	98.95
8.00	142.39	98.04
9.00	137.60	97.23
10.00	133.27	96.51
11.00	129.34	95.87
12.00	125.79	95.29
13.00	122.56	94.78
14.00	119.64	94.31
15.00	116.98	93.90
16.00	114.56	93.52
17.00	112.37	93.19
18.00	110.38	92.89
19.00	108.56	92.61
20.00	106.91	92.37
21.00	105.41	92.14
22.00	104.04	91.94
23.00	102.80	91.76
24.00	101.67	91.60

TEMPERATURA FINAL DE TUDOS - 100.43

Equipo Tipo I  
1 Paso con 3 Camas

$T_{of}$

205

150

100

105-115

5

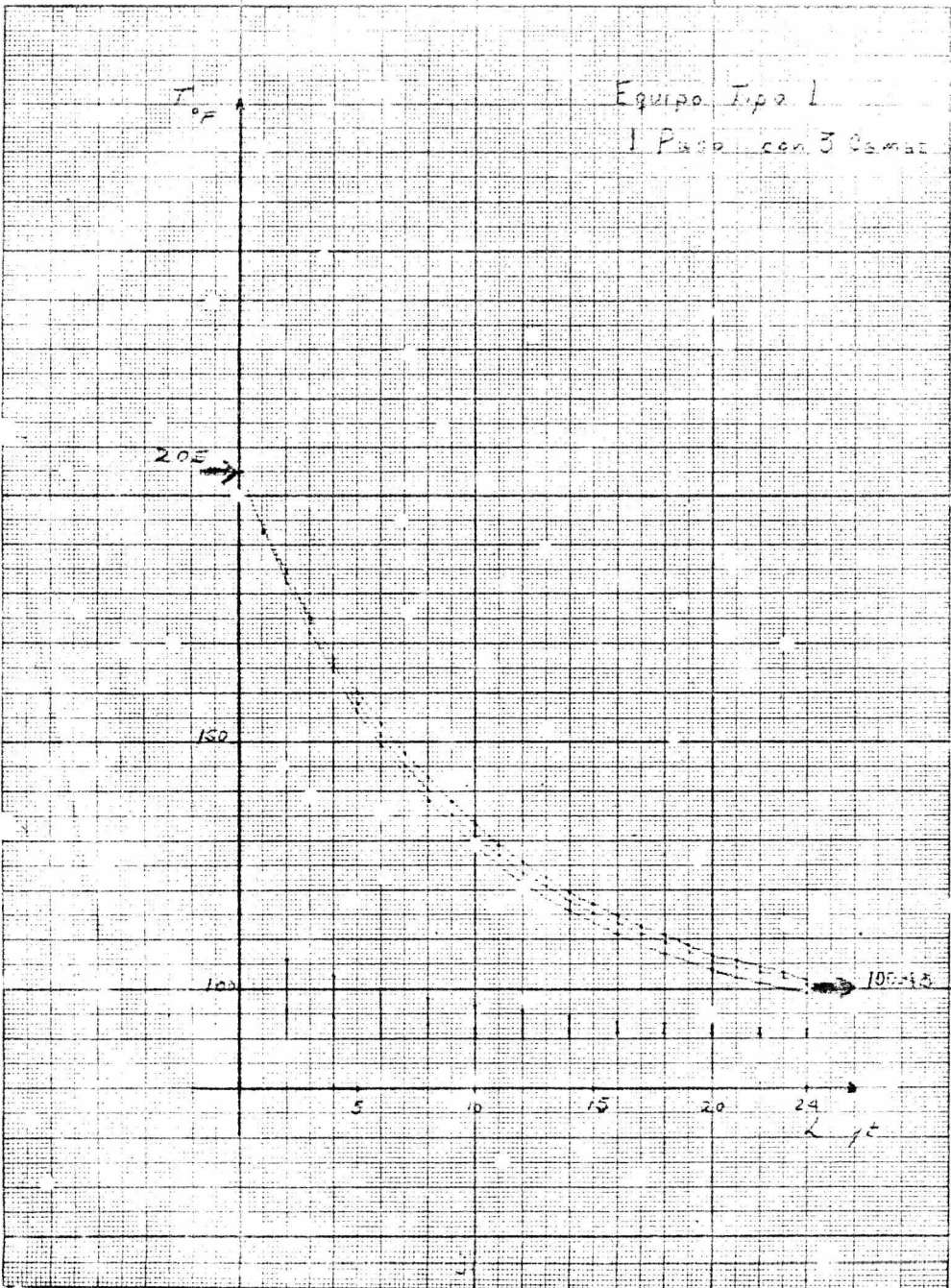
10

15

20

24

27



## EQUIPO TIPO II

PASO - 1

CAMA - 1

LONGITUD	T U B O	: I R E
0.00	233.00	-
1.00	231.23	127.10
2.00	229.48	126.74
3.00	227.75	126.38
4.00	226.06	126.03
5.00	224.38	125.68
6.00	222.73	125.33
7.00	221.09	125.00
8.00	219.48	124.66
9.00	217.89	124.33
10.00	216.32	124.00
11.00	214.78	123.68
12.00	213.25	123.37
13.00	211.74	123.05
14.00	210.26	122.74
15.00	208.79	122.44
16.00	207.35	122.14
17.00	205.92	121.84
18.00	204.51	121.55
19.00	203.12	121.26
20.00	201.75	120.98
21.00	200.40	120.70
22.00	199.07	120.42
23.00	197.75	120.15
24.00	196.45	119.88

FASO - 2

CANA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	196.45	-
1.00	195.43	135.56
2.00	194.44	135.56
3.00	193.45	135.56
4.00	192.49	135.60
5.00	191.54	135.63
6.00	190.61	135.66
7.00	189.69	135.70
8.00	188.79	135.75
9.00	187.91	135.80
10.00	187.04	135.86
11.00	186.19	135.93
12.00	185.35	136.01
13.00	184.53	136.09
14.00	183.72	136.17
15.00	182.93	136.27
16.00	182.15	136.37
17.00	181.39	136.47
18.00	180.64	136.59
19.00	179.91	136.71
20.00	179.19	136.83
21.00	178.49	136.97
22.00	177.80	137.11
23.00	177.12	137.25
24.00	176.46	137.41

PASO - 3

CAMA - 1

LONGITUD	TUBO	AIRE
0.00	176.46	-
1.00	175.94	145.28
2.00	175.43	145.05
3.00	174.92	144.83
4.00	174.41	144.62
5.00	173.92	144.41
6.00	173.42	144.21
7.00	172.93	144.02
8.00	172.45	143.83
9.00	171.97	143.65
10.00	171.50	143.48
11.00	171.03	143.31
12.00	170.56	143.15
13.00	170.10	142.99
14.00	169.65	142.84
15.00	169.20	142.70
16.00	168.76	142.56
17.00	168.32	142.43
18.00	167.89	142.31
19.00	167.46	142.19
20.00	167.04	142.08
21.00	166.62	141.97
22.00	166.21	141.87
23.00	165.81	141.78
24.00	165.40	141.69

PASO - 4

CAMA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	165.40	-
1.00	165.09	146.54
2.00	164.78	146.55
3.00	164.48	146.56
4.00	164.18	146.58
5.00	163.89	146.61
6.00	163.60	146.64
7.00	163.32	146.68
8.00	163.04	146.72
9.00	162.77	146.77
10.00	162.51	146.83
11.00	162.25	146.89
12.00	161.99	146.96
13.00	161.74	147.03
14.00	161.50	147.11
15.00	161.26	147.20
16.00	161.03	147.29
17.00	160.80	147.39
18.00	160.58	147.50
19.00	160.36	147.61
20.00	160.15	147.73
21.00	159.95	147.85
22.00	159.75	147.98
23.00	159.55	148.12
24.00	159.36	148.26

TEMPERATURA FINAL DE TUBOS - 159.36

T  
°F

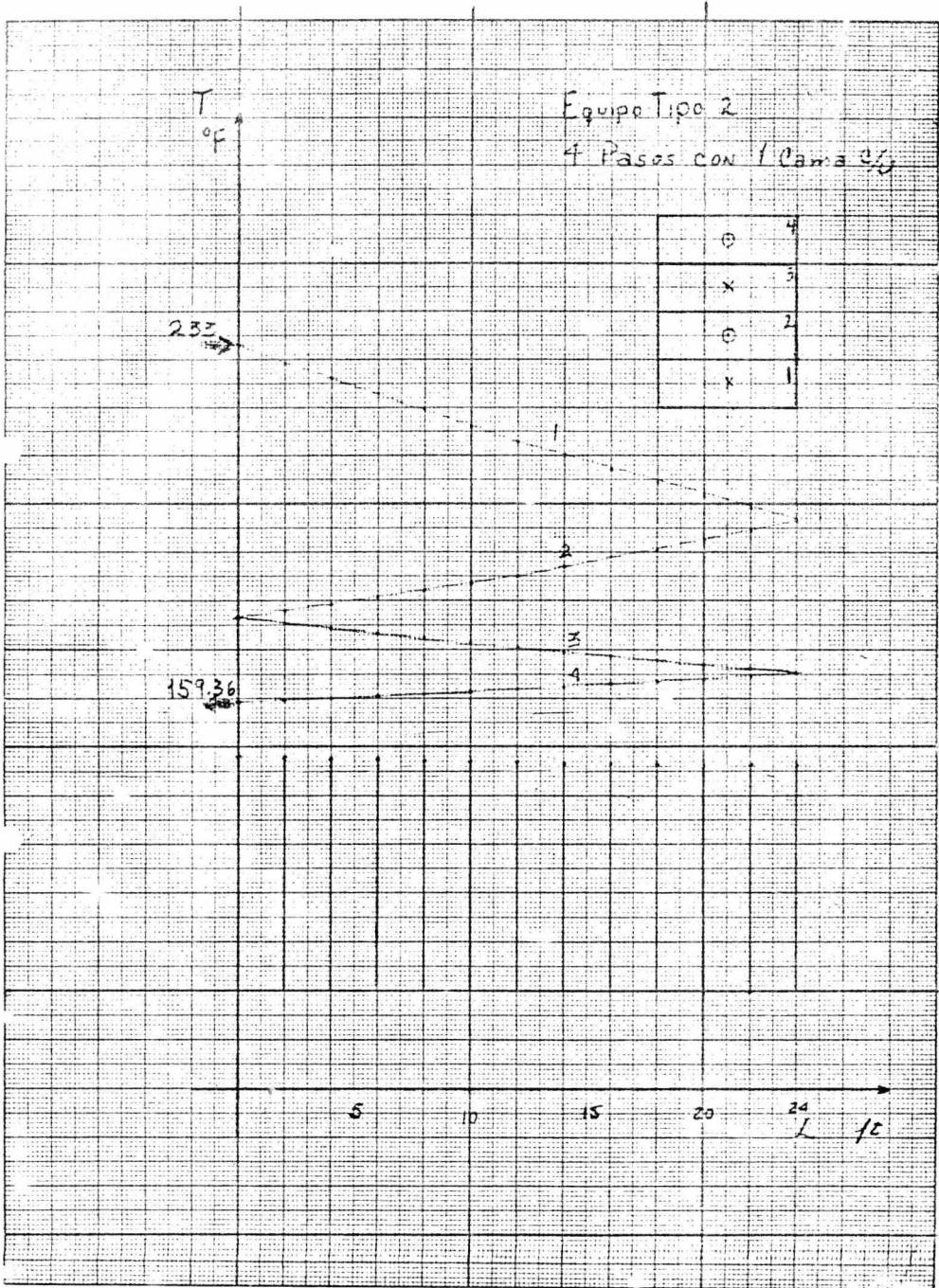
Equipo Tipo 2  
4 Pasos con 1 Cama 2/3

⊙	4
x	3
⊙	2
x	1

233

159.36

5 10 15 20 24  
L / c





## EQUIPO TIPO III

PASO - 1

CAMA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	233.00	-
1.00	231.59	186.18
2.00	230.20	185.24
3.00	228.83	184.31
4.00	227.46	183.40
5.00	226.12	182.49
6.00	224.79	181.59
7.00	223.47	180.70
8.00	222.17	179.82
9.00	220.88	178.96
10.00	219.60	178.10
11.00	218.34	177.25
12.00	217.10	176.41
13.00	215.86	175.58
14.00	214.64	174.76
15.00	213.43	173.95
16.00	212.24	173.15
17.00	211.06	172.36
18.00	209.89	171.57
19.00	208.74	170.80
20.00	207.59	170.03
21.00	206.46	169.27
22.00	205.34	168.53
23.00	204.24	167.79
24.00	203.14	167.05

TASO - 2

CAMA - 1

LONGITUD	T U B C	A I R E
0.00	203.14	-
1.00	202.06	166.33
2.00	200.99	165.61
3.00	199.93	164.91
4.00	198.88	164.21
5.00	197.85	163.52
6.00	196.82	162.83
7.00	195.81	162.15
8.00	194.80	161.49
9.00	193.81	160.82
10.00	192.83	160.17
11.00	191.86	159.52
12.00	190.89	158.88
13.00	189.94	158.25
14.00	189.00	157.63
15.00	188.07	157.01
16.00	187.15	156.40
17.00	186.24	155.79
18.00	185.34	155.20
19.00	184.45	154.60
20.00	183.57	154.02
21.00	182.70	153.44
22.00	181.83	152.87
23.00	180.98	152.30
24.00	180.13	151.75

PASO - 3

CAMA - 1

LONGITUD	TUBO	AIRE
0.00	180.13	-
1.00	179.30	151.19
2.00	178.47	150.65
3.00	177.65	150.11
4.00	176.85	149.57
5.00	176.04	149.04
6.00	175.25	148.52
7.00	174.47	148.00
8.00	173.69	147.49
9.00	172.93	146.99
10.00	172.17	146.48
11.00	171.42	145.99
12.00	170.68	145.50
13.00	169.94	145.02
14.00	169.21	144.54
15.00	168.49	144.07
16.00	167.78	143.60
17.00	167.08	143.13
18.00	166.38	142.68
19.00	165.69	142.22
20.00	165.01	141.78
21.00	164.34	141.33
22.00	163.67	140.90
23.00	163.01	140.46
24.00	162.36	140.03

PASO - 4

CAMA - 1

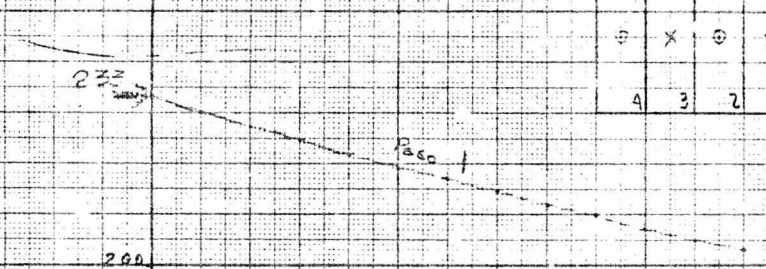
LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	162.36	-
1.00	161.71	139.61
2.00	161.07	139.19
3.00	160.44	138.78
4.00	159.81	138.37
5.00	159.19	137.96
6.00	158.58	137.56
7.00	157.97	137.16
8.00	157.37	136.77
9.00	156.78	136.38
10.00	156.19	136.00
11.00	155.61	135.62
12.00	155.03	135.24
13.00	154.46	134.87
14.00	153.90	134.50
15.00	153.34	134.14
16.00	152.79	133.78
17.00	152.25	133.43
18.00	151.71	133.07
19.00	151.17	132.73
20.00	150.65	132.38
21.00	150.12	132.04
22.00	149.60	131.71
23.00	149.09	131.37
24.00	148.59	131.04

TEMPERATURA FINAL DE TUBOS - 148.58

Equipo Tipo 3  
 4 Pasos con 1 Cama 2/4

T<sub>op</sub>

⊙	x	⊙	x
4	3	2	1



232

200

150

5

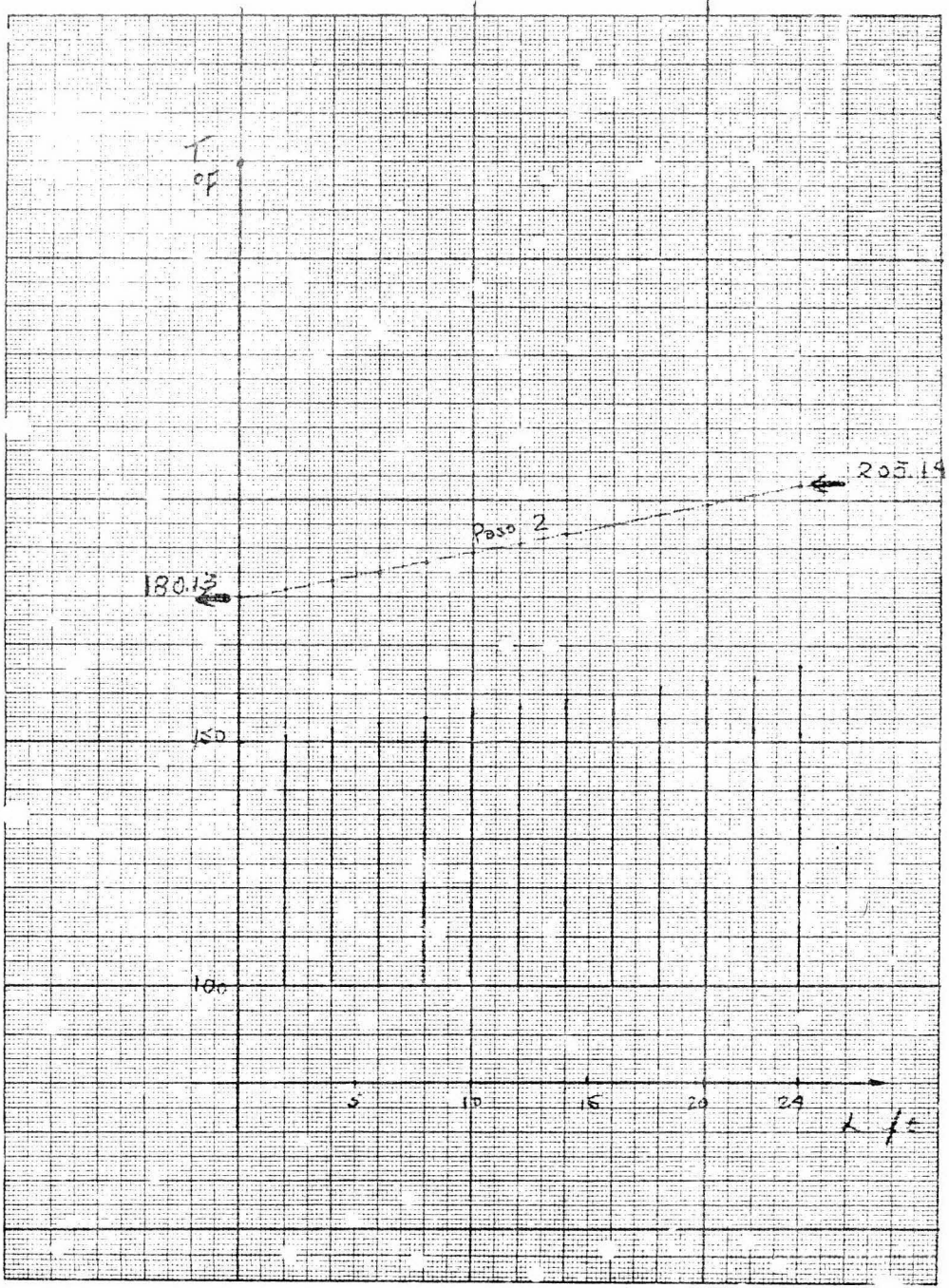
10

15

20

24

L. ft



T of

180.13

Paso 2

205.14

150

100

5

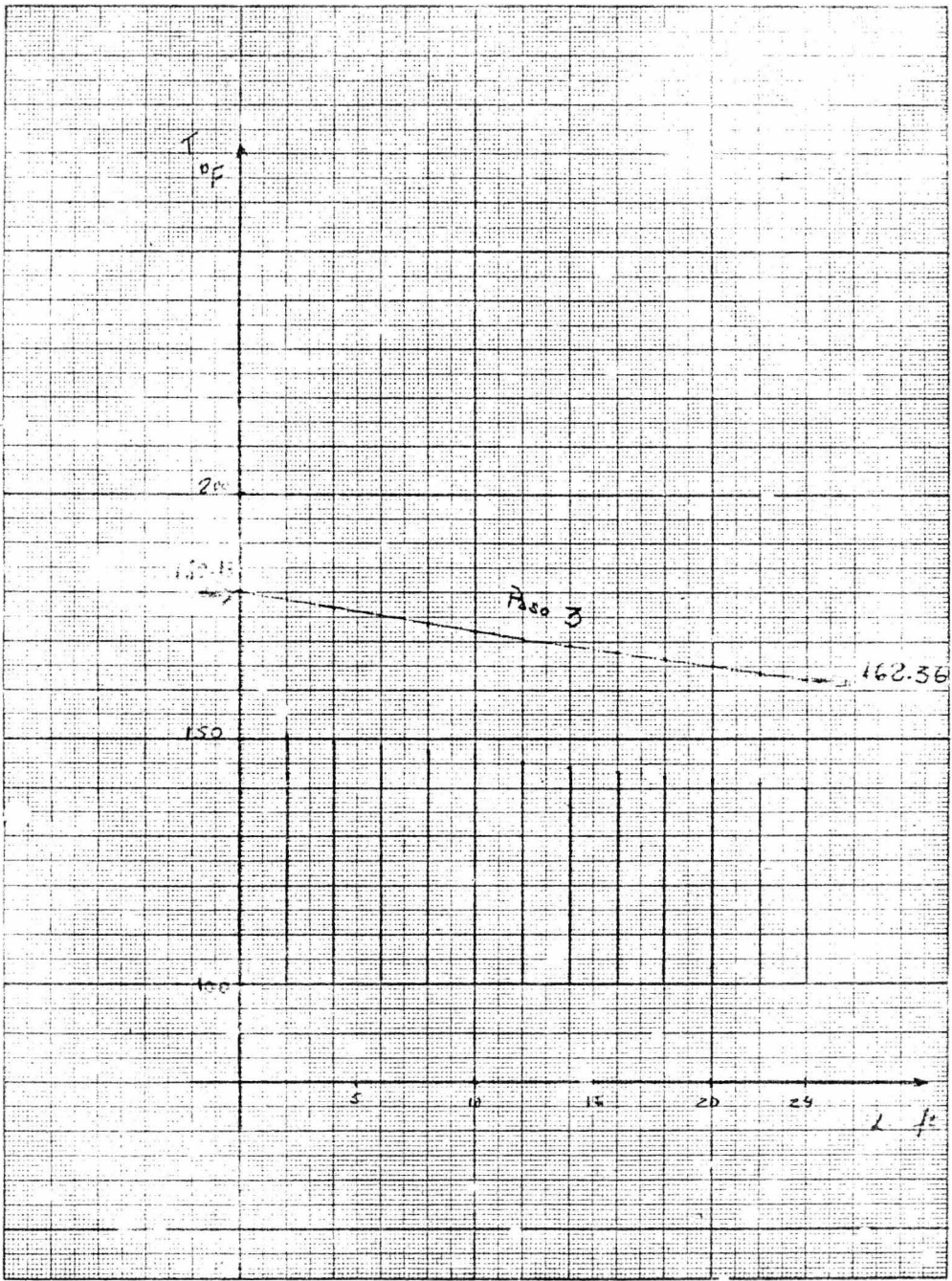
10

15

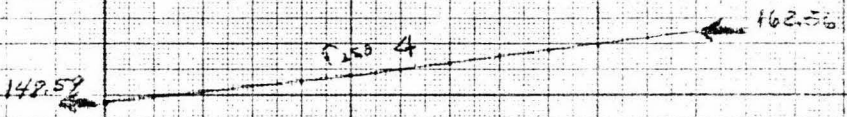
20

25

L / s



T  
of



100

5 10 15 20 24 L / ft

100

100



## EQUIPO TIPO IV

PASO - 1

CAMA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	233.00	-
1.00	231.32	151.42
2.00	229.66	150.75
3.00	228.03	150.08
4.00	226.41	149.43
5.00	224.82	148.78
6.00	223.25	148.14
7.00	221.70	147.51
8.00	220.16	146.89
9.00	218.65	146.28
10.00	217.16	145.68
11.00	215.69	145.08
12.00	214.23	144.50
13.00	212.80	143.92
14.00	211.38	143.35
15.00	209.99	142.79
16.00	208.61	142.23
17.00	207.25	141.68
18.00	205.90	141.14
19.00	204.58	140.61
20.00	203.27	140.08
21.00	201.97	139.57
22.00	200.70	139.05
23.00	199.44	138.55
24.00	198.20	138.05

PASO - 2

CAMA - 1

LONGITUDE	T U B O	A I R E
0.00	198.20	-
1.00	197.45	161.21
2.00	196.71	161.23
3.00	195.99	161.26
4.00	195.29	161.30
5.00	194.60	161.34
6.00	193.93	161.40
7.00	193.28	161.47
8.00	192.63	161.55
9.00	192.01	161.65
10.00	191.39	161.75
11.00	190.80	161.86
12.00	190.21	161.99
13.00	189.65	162.12
14.00	189.09	162.27
15.00	188.55	162.42
16.00	188.03	162.59
17.00	187.52	162.77
18.00	187.02	162.96
19.00	186.54	163.16
20.00	186.07	163.37
21.00	185.62	163.59
22.00	185.18	163.82
23.00	184.75	164.07
24.00	184.34	164.30

PASO - 3

CAMA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	184.34	-
1.00	183.57	146.04
2.00	182.81	145.74
3.00	182.06	145.44
4.00	181.32	145.15
5.00	180.59	144.87
6.00	179.87	144.58
7.00	179.18	144.30
8.00	178.45	144.03
9.00	177.76	143.75
10.00	177.07	143.48
11.00	176.40	143.22
12.00	175.73	142.96
13.00	175.07	142.70
14.00	174.42	142.44
15.00	173.77	142.19
16.00	173.14	141.94
17.00	172.51	141.70
18.00	171.89	141.46
19.00	171.28	141.22
20.00	170.68	140.98
21.00	170.08	140.75
22.00	169.49	140.52
23.00	168.91	140.29
24.00	168.34	140.07

PASO - 4

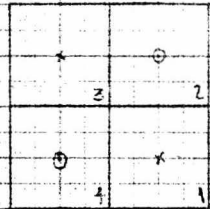
CAMA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	168.34	-
1.00	167.49	125.88
2.00	166.66	125.58
3.00	165.84	125.21
4.00	165.02	124.89
5.00	164.22	124.57
6.00	163.43	124.26
7.00	162.65	123.96
8.00	161.88	123.65
9.00	161.11	123.35
10.00	160.36	123.06
11.00	159.62	122.77
12.00	158.88	122.48
13.00	158.16	122.20
14.00	157.44	121.92
15.00	156.73	121.64
16.00	156.04	121.37
17.00	155.35	121.10
18.00	154.67	120.84
19.00	154.00	120.57
20.00	153.33	120.31
21.00	152.68	120.06
22.00	152.03	119.81
23.00	151.39	119.56
24.00	150.76	119.31

TEMPERATURA FINAL DE TUBOS - 150.76

Equipo Tipo 4

4 Pasos con 1 Camio 9/10



233

Fase 1

Fase 2

184.34

150

100

5 10 15 20 25 L ft



T  
OF

189.34

$P_{350}$

3

150.76

$P_{350}$

4

100

5

10

15

20

24

L  
1/2



## EQUIFO TIPO V

PASO - 1

CAMA - 1

LONGITUD	TUBO	AIRE
0.00	233.00	-
1.00	231.75	159.15
2.00	230.45	158.86
3.00	229.17	158.57
4.00	227.91	158.29
5.00	226.67	158.02
6.00	225.45	157.74
7.00	224.25	157.48
8.00	223.06	157.21
9.00	221.89	156.95
10.00	220.73	156.69
11.00	219.59	156.44
12.00	218.47	156.19
13.00	217.37	155.95
14.00	216.28	155.71
15.00	215.20	155.47
16.00	214.14	155.23
17.00	213.10	155.00
18.00	212.07	154.77
19.00	211.06	154.55
20.00	210.06	154.33
21.00	209.07	154.11
22.00	208.10	153.90
23.00	207.14	153.69
24.00	206.20	153.48

PASC - 2

CAMA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	206.20	-
1.00	205.06	141.54
2.00	203.94	141.29
3.00	202.84	141.05
4.00	201.75	140.81
5.00	200.67	140.57
6.00	199.61	140.34
7.00	198.57	140.11
8.00	197.54	139.88
9.00	196.53	139.66
10.00	195.53	139.44
11.00	194.54	139.22
12.00	193.57	139.01
13.00	192.62	138.80
14.00	191.67	138.59
15.00	190.74	138.38
16.00	189.82	138.18
17.00	188.92	137.98
18.00	188.03	137.79
19.00	187.15	137.60
20.00	186.28	137.41
21.00	185.43	137.13
22.00	184.58	137.04
23.00	183.75	136.85
24.00	182.93	136.68



PASO - 3

CAMA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	182.93	-
1.00	181.95	126.30
2.00	180.98	126.08
3.00	180.02	125.87
4.00	179.08	125.67
5.00	178.14	125.46
6.00	177.23	125.26
7.00	176.32	125.07
8.00	175.43	124.87
9.00	174.55	124.68
10.00	173.69	124.49
11.00	172.83	124.30
12.00	171.99	124.12
13.00	171.16	123.94
14.00	170.34	123.76
15.00	169.53	123.59
16.00	168.73	123.41
17.00	167.95	123.24
18.00	167.17	123.07
19.00	166.41	122.91
20.00	165.66	122.75
21.00	164.91	122.59
22.00	164.18	122.43
23.00	163.46	122.27
24.00	162.75	122.12

PASO - 4

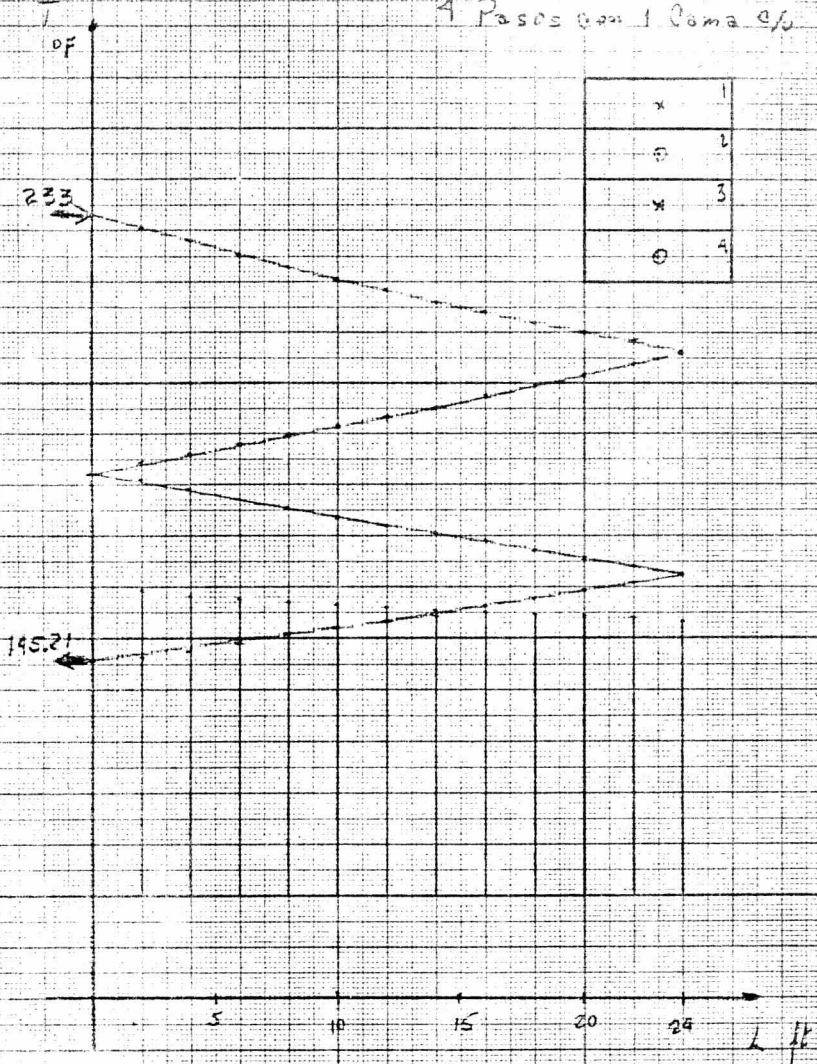
CAMA - 1

LONGITUD	TUBO	AIRE
0.00	152.75	-
1.00	161.89	113.08
2.00	161.05	112.90
3.00	160.22	112.72
4.00	159.40	112.54
5.00	158.59	112.36
6.00	157.80	112.19
7.00	157.01	112.02
8.00	156.24	111.85
9.00	155.47	111.69
10.00	154.72	111.53
11.00	153.98	111.37
12.00	153.25	111.21
13.00	152.52	111.05
14.00	151.81	110.90
15.00	151.11	110.75
16.00	150.42	110.60
17.00	149.73	110.45
18.00	149.06	110.31
19.00	148.40	110.16
20.00	147.74	110.02
21.00	147.10	109.82
22.00	146.46	109.63
23.00	145.83	109.55
24.00	145.21	109.43

TEMPERATURA FINAL DE TUBOS - 145.21

Equipo Tipo 5

4 Pasos con 1 Coma c/p



## EQUIPO TIPO VI

PASC - 1

CAMA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	233.00	-
1.00	231.78	173.37
2.00	230.57	172.88
3.00	229.37	172.40
4.00	228.19	171.93
5.00	227.02	171.46
6.00	225.87	171.00
7.00	224.74	170.54
8.00	223.62	170.09
9.00	222.51	169.65
10.00	221.42	169.21
11.00	220.34	168.78
12.00	219.28	168.36
13.00	218.23	167.94
14.00	217.19	167.52
15.00	216.17	167.11
16.00	215.16	166.71
17.00	214.16	166.31
18.00	213.18	165.92
19.00	212.21	165.34
20.00	211.25	165.15
21.00	210.30	164.77
22.00	209.37	164.40
23.00	208.45	164.03
24.00	207.54	163.67

PASO - 2

CAMA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	207.54	-
1.00	206.19	141.25
2.00	204.86	140.71
3.00	203.55	140.19
4.00	202.25	139.67
5.00	200.97	139.15
6.00	199.71	138.65
7.00	198.46	138.15
8.00	197.23	137.66
9.00	196.02	137.17
10.00	194.82	136.69
11.00	193.64	136.22
12.00	192.47	135.75
13.00	191.32	135.29
14.00	190.18	134.84
15.00	189.06	134.39
16.00	187.95	133.95
17.00	186.85	133.52
18.00	185.77	133.09
19.00	184.71	132.66
20.00	183.65	132.24
21.00	182.61	131.83
22.00	181.59	131.42
23.00	180.57	131.02
24.00	179.57	130.63

PASO - 3

CAMA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	179.57	-
1.00	178.59	130.24
2.00	177.61	129.85
3.00	176.65	129.47
4.00	175.70	129.10
5.00	174.76	128.73
6.00	173.83	128.36
7.00	172.92	128.00
8.00	172.02	127.64
9.00	171.12	127.29
10.00	170.24	126.94
11.00	169.38	126.60
12.00	168.52	126.26
13.00	167.67	125.93
14.00	166.83	125.60
15.00	166.01	125.28
16.00	165.19	124.96
17.00	164.39	124.64
18.00	163.59	124.33
19.00	162.81	124.02
20.00	162.04	123.72
21.00	161.27	123.42
22.00	160.52	123.12
23.00	159.77	122.83
24.00	159.03	122.54

PASO - 4

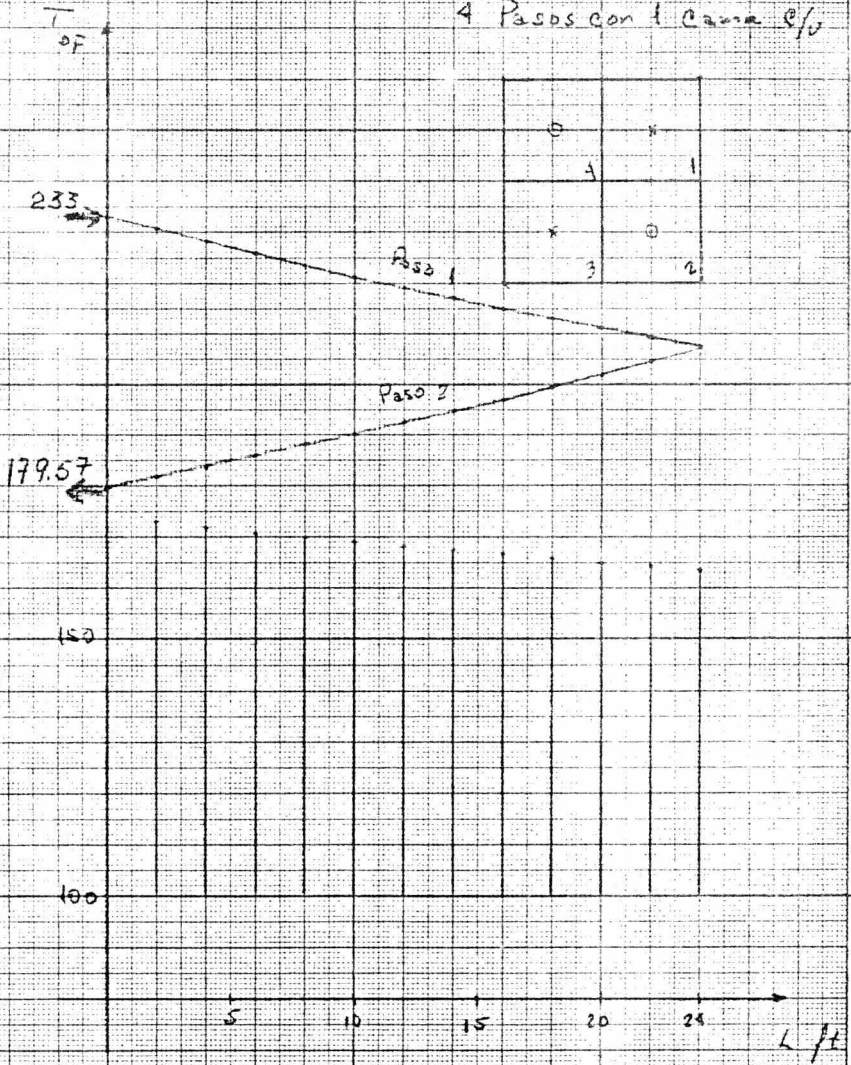
CANA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	159.03	-
1.00	158.59	136.39
2.00	158.15	136.40
3.00	157.72	136.42
4.00	157.29	136.44
5.00	156.83	136.47
6.00	156.48	136.50
7.00	156.03	136.54
8.00	155.70	136.58
9.00	155.32	136.63
10.00	154.95	136.69
11.00	154.59	136.75
12.00	154.24	136.82
13.00	153.90	136.90
14.00	153.56	136.98
15.00	153.24	137.07
16.00	152.92	137.16
17.00	152.61	137.26
18.00	152.31	137.37
19.00	152.02	137.48
20.00	151.73	137.60
21.00	151.46	137.72
22.00	151.19	137.86
23.00	150.93	137.99
24.00	150.67	138.14

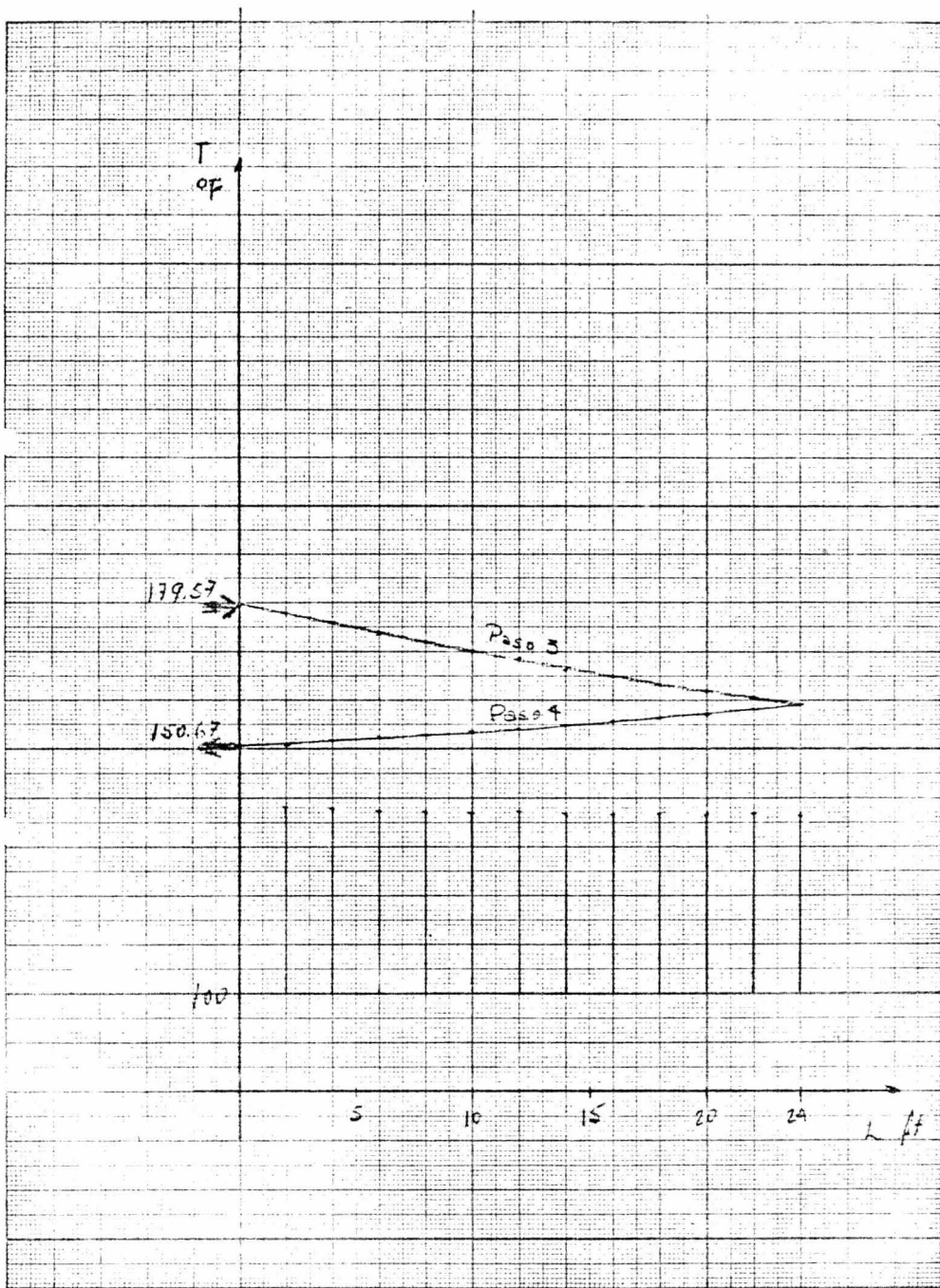
TEMPERATURA FINAL DE TUBOS - 150.67

Equipo Tipo 6

4 Pasos con 1 Cama e/v







## EQUIPO TIPO VII

PASO - 1

CAMA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	233.00	-
1.00	231.32	151.42
2.00	227.66	150.75
3.00	228.03	150.08
4.00	226.41	149.43
5.00	224.82	148.78
6.00	223.25	148.14
7.00	221.70	147.51
8.00	220.16	146.89
9.00	218.65	146.28
10.00	217.16	145.68
11.00	215.69	145.08
12.00	214.23	144.50
13.00	212.80	143.92
14.00	211.38	143.35
15.00	209.99	142.79
16.00	208.61	142.23
17.00	207.25	141.68
18.00	205.90	141.14
19.00	204.58	140.61
20.00	203.27	140.08
21.00	201.97	139.57
22.00	200.70	139.05
23.00	199.44	138.55
24.00	198.20	138.05

PASC - 2

CAMA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	198.20	-
1.00	196.97	137.56
2.00	195.76	137.08
3.00	194.56	136.60
4.00	193.38	136.13
5.00	192.22	135.66
6.00	191.07	135.20
7.00	189.93	134.75
8.00	188.81	134.30
9.00	187.71	133.86
10.00	186.62	133.43
11.00	185.54	133.00
12.00	184.47	132.58
13.00	183.42	132.16
14.00	182.39	131.75
15.00	181.36	131.34
16.00	180.35	130.94
17.00	179.36	130.55
18.00	178.37	130.16
19.00	177.40	129.77
20.00	176.44	129.39
21.00	175.49	129.02
22.00	174.56	128.65
23.00	173.63	128.28
24.00	172.72	127.92

PASO - 3

CANA - 1

LONGITUD	TUBO	AIRE
0.00	172.72	-
1.00	172.30	151.52
2.00	171.88	151.36
3.00	171.47	151.20
4.00	171.06	151.04
5.00	170.66	150.88
6.00	170.26	150.73
7.00	169.87	150.58
8.00	169.48	150.43
9.00	169.10	150.28
10.00	168.72	150.13
11.00	168.35	149.99
12.00	167.98	149.85
13.00	167.62	149.70
14.00	167.26	149.57
15.00	166.91	149.43
16.00	166.56	149.29
17.00	166.21	149.16
18.00	165.87	149.03
19.00	165.53	148.90
20.00	165.20	148.77
21.00	164.87	148.64
22.00	164.55	148.51
23.00	164.07	148.33
24.00	163.91	148.27

PASO - 4

CANA - 1

LONGITUD	TUBO	AIRE
0.00	163.91	-
1.00	163.60	143.15
2.00	163.29	143.03
3.00	162.98	147.91
4.00	162.68	147.79
5.00	162.38	147.68
6.00	162.09	147.57
7.00	161.80	147.45
8.00	161.51	147.34
9.00	161.23	147.23
10.00	160.95	147.13
11.00	160.68	147.02
12.00	160.40	146.92
13.00	160.14	146.81
14.00	159.87	146.71
15.00	159.61	146.61
16.00	159.35	146.51
17.00	159.09	146.41
18.00	158.84	146.31
19.00	158.59	146.22
20.00	158.34	146.12
21.00	158.10	146.03
22.00	157.86	145.94
23.00	157.62	145.84
24.00	157.39	145.75

TEMPERATURA FINAL DE TUBOS - 157.38

# Equipo Tipo 7

4 Pasos con 1 Cama 0/0

T  
OF

233

Paso 1

x	0
3	4
2	x
2	1

198.20

150

100

5

10

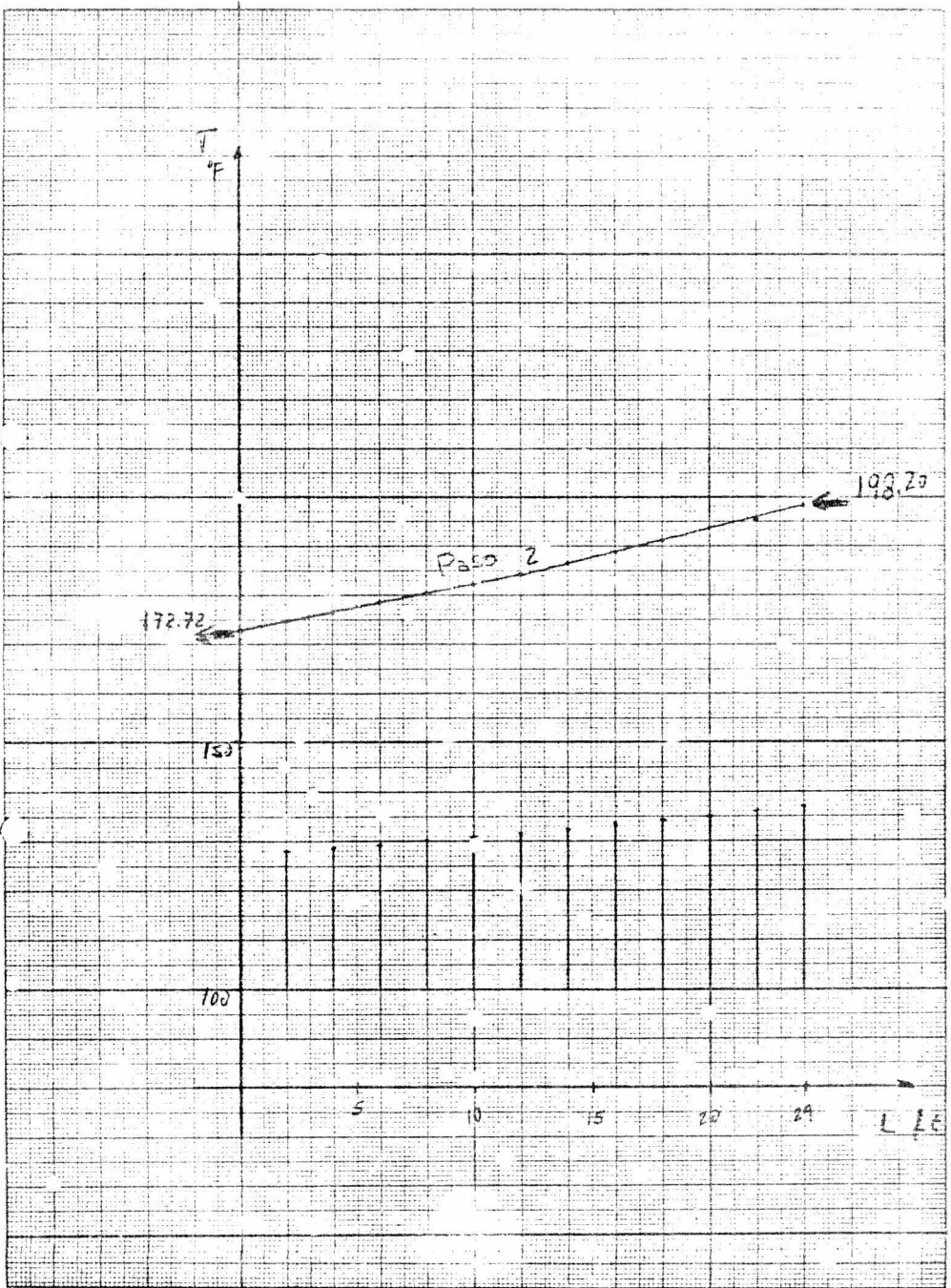
15

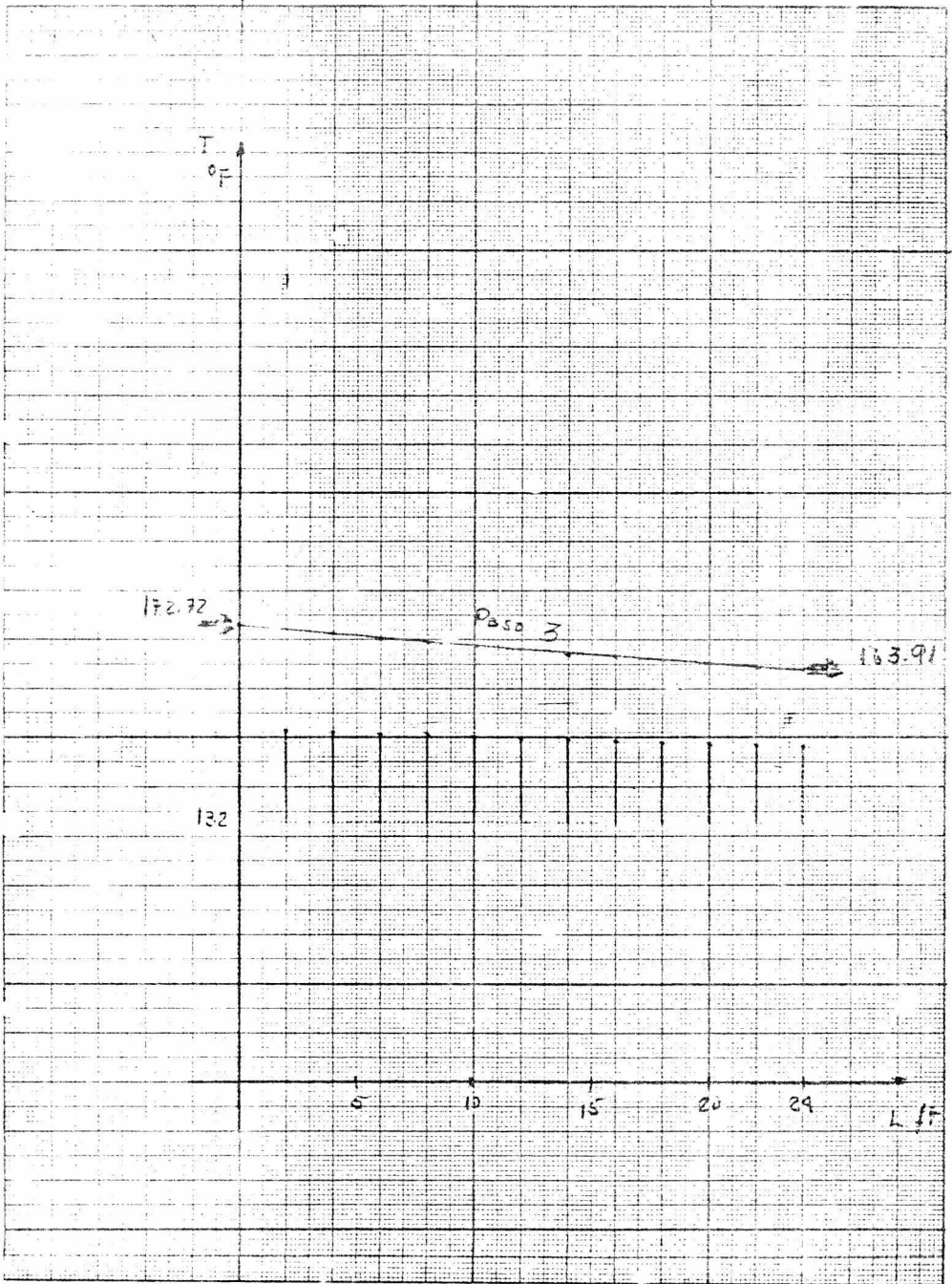
20

25

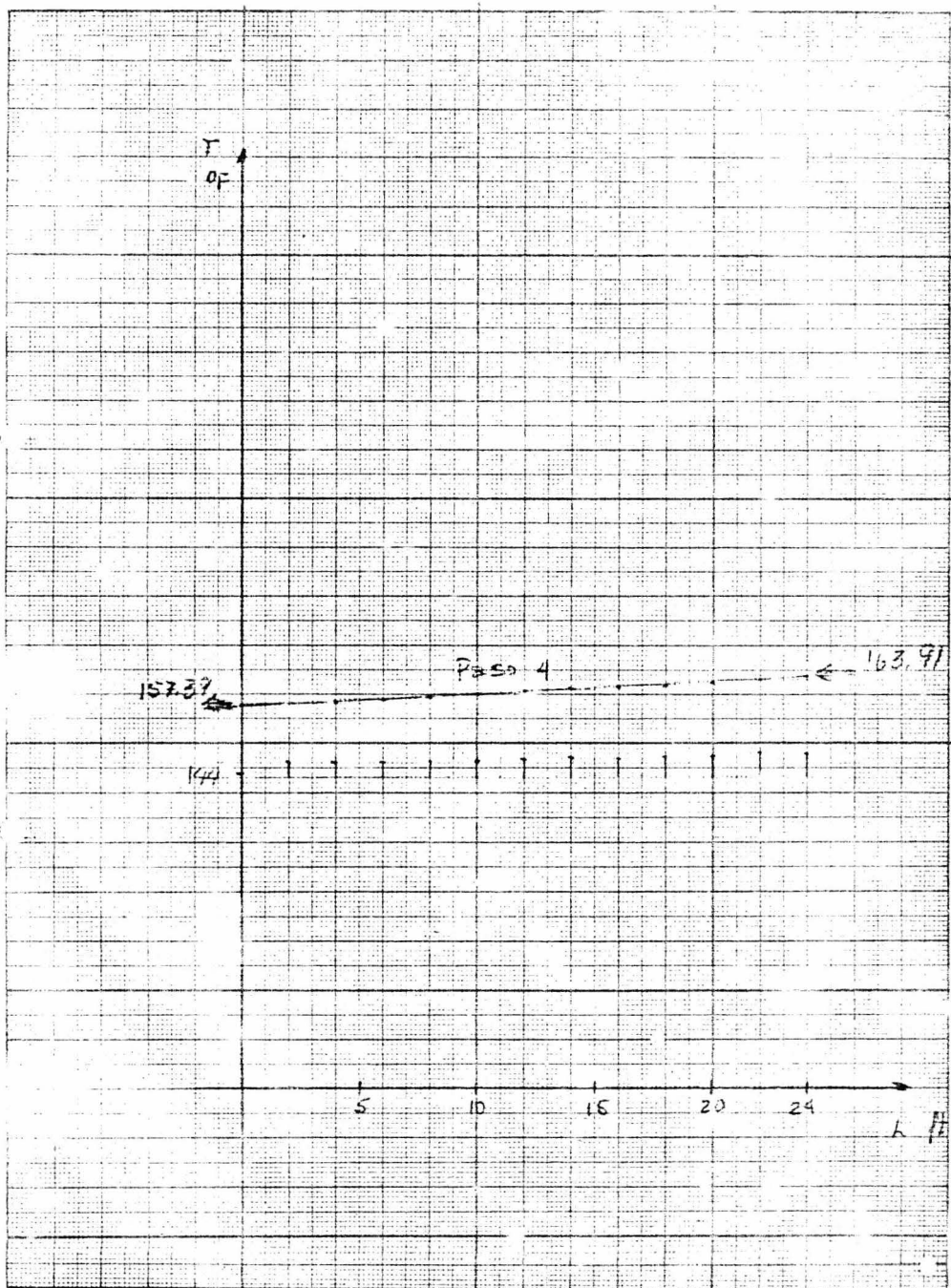
L

11









PASC - 2

CARA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	204.50	-
1.00	203.49	154.85
2.00	202.49	154.45
3.00	201.51	154.06
4.00	200.54	153.68
5.00	199.59	153.30
6.00	198.64	152.92
7.00	197.71	152.55
8.00	196.79	152.19
9.00	195.86	151.82
10.00	194.93	151.47
11.00	194.10	151.12
12.00	193.22	150.77
13.00	192.36	150.43
14.00	191.51	150.09
15.00	190.66	149.76
16.00	189.83	149.43
17.00	189.01	149.11
18.00	188.20	148.79
19.00	187.41	148.47
20.00	186.62	148.16
21.00	185.84	147.85
22.00	185.07	147.55
23.00	184.31	147.25
24.00	183.56	146.96

## EQUIPO TIPO VIII

FASSO - 1

CAMA - 1

LONGITUD	TUBO	AIRE
0.00	233.00	-
1.00	231.68	166.16
2.00	230.32	165.61
3.00	228.98	165.07
4.00	227.65	164.53
5.00	226.35	164.01
6.00	225.06	163.49
7.00	223.79	162.97
8.00	222.53	162.47
9.00	221.29	161.97
10.00	220.06	161.48
11.00	218.86	160.99
12.00	217.66	160.51
13.00	216.49	160.04
14.00	215.32	159.58
15.00	214.18	159.12
16.00	213.04	158.66
17.00	211.93	158.22
18.00	210.82	157.78
19.00	209.73	157.34
20.00	208.66	156.91
21.00	207.60	156.49
22.00	206.55	156.07
23.00	205.52	155.66
24.00	204.50	155.25

PASO - 3

CAMA - 1

LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	183.56	-
1.00	182.52	131.79
2.00	181.50	131.39
3.00	180.48	130.99
4.00	179.48	130.59
5.00	178.50	130.20
6.00	177.52	129.81
7.00	176.56	129.43
8.00	175.61	129.06
9.00	174.68	128.69
10.00	173.75	128.32
11.00	172.84	127.96
12.00	171.94	127.61
13.00	171.05	127.26
14.00	170.17	126.91
15.00	169.30	126.57
16.00	168.44	126.23
17.00	167.60	125.90
18.00	166.76	125.57
19.00	165.94	125.25
20.00	165.12	124.93
21.00	164.32	124.61
22.00	163.53	124.30
23.00	162.74	123.99
24.00	161.97	123.69

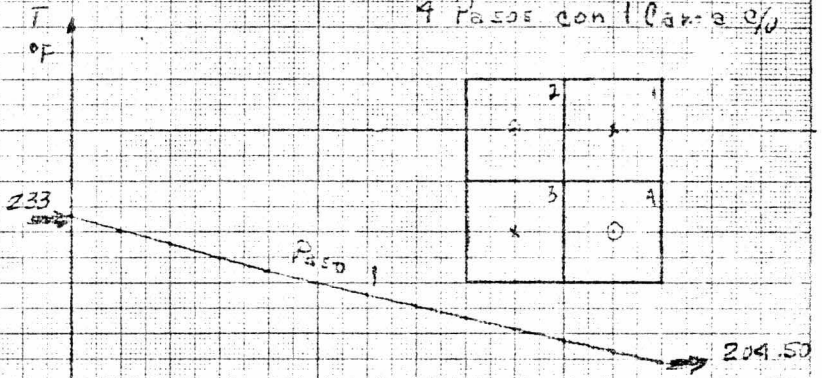
PASO - 4

CAMA - 1

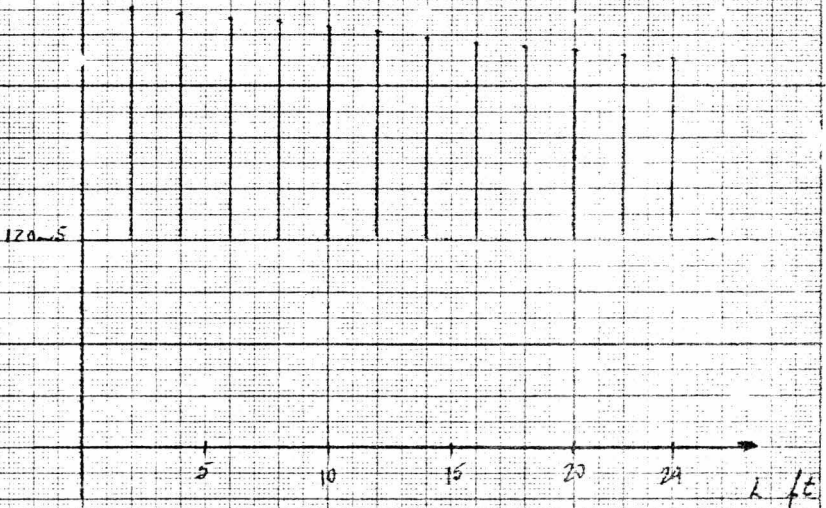
LONGITUD	T U B O	A I R E
0.00	161.97	-
1.00	161.21	123.39
2.00	160.45	123.09
3.00	159.71	122.80
4.00	158.97	122.52
5.00	158.25	122.23
6.00	157.53	121.95
7.00	156.82	121.68
8.00	156.12	121.40
9.00	155.43	121.13
10.00	154.75	120.87
11.00	154.08	120.61
12.00	153.41	120.35
13.00	152.76	120.09
14.00	152.11	119.84
15.00	151.47	119.59
16.00	150.84	119.34
17.00	150.21	119.10
18.00	149.60	118.86
19.00	148.99	118.63
20.00	148.39	118.39
21.00	147.79	118.16
22.00	147.21	117.94
23.00	146.63	117.71
24.00	146.06	117.49

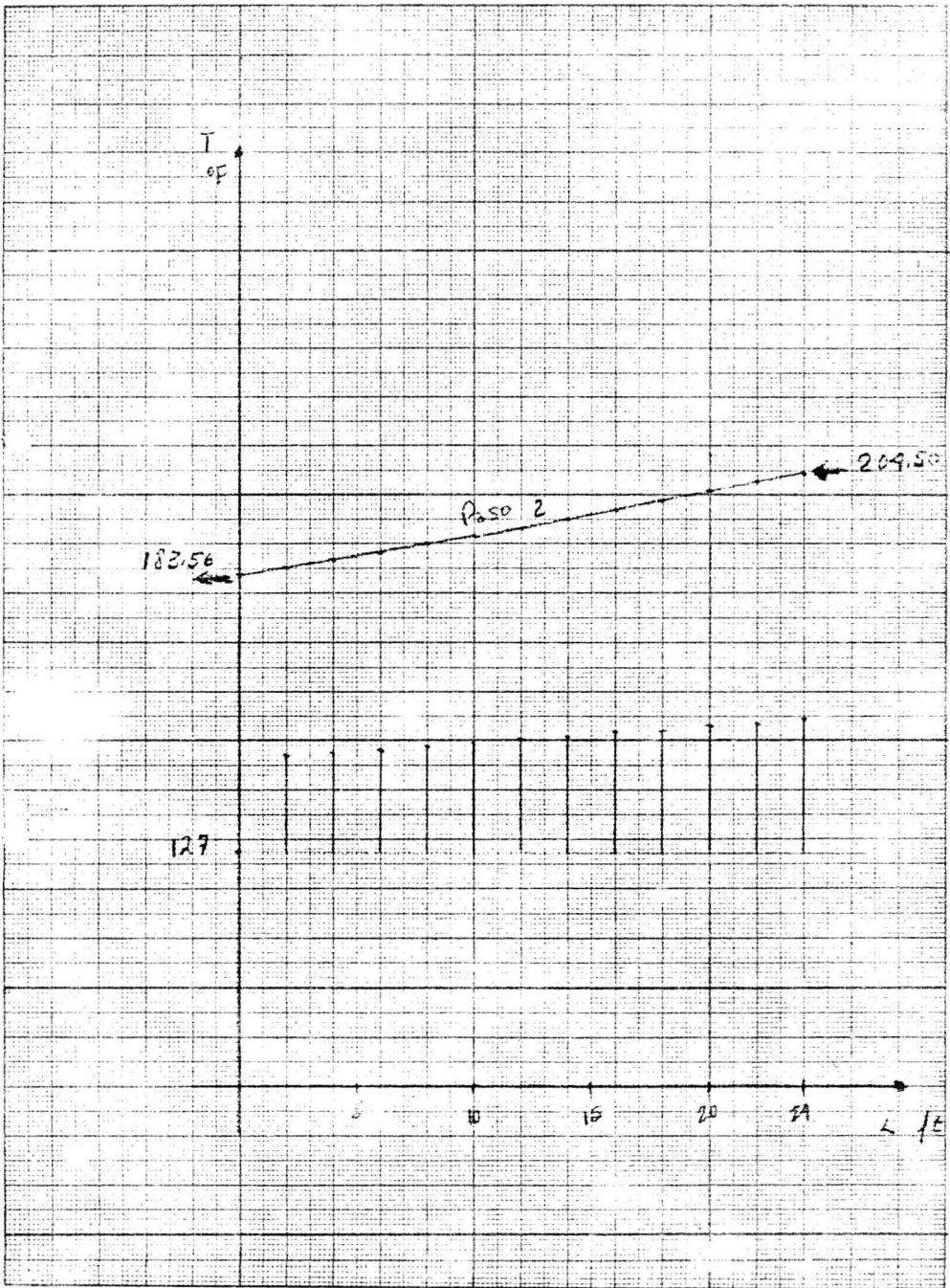
TEMPERATURA FINAL DE TUBOS - 146.06

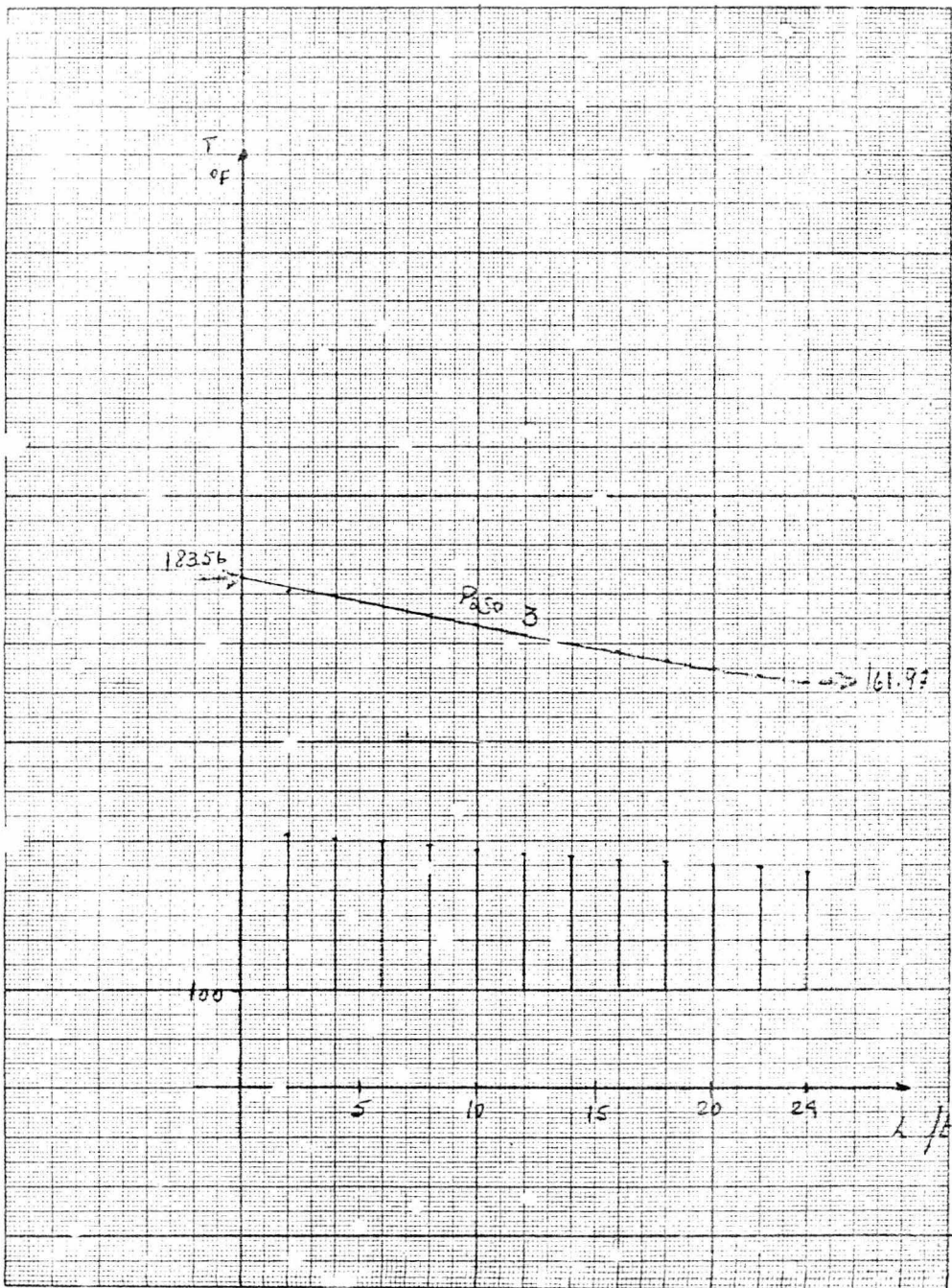
Equipo Tipo 8  
4 Pasos con 1 Carrera 0/0



2	1
3	4

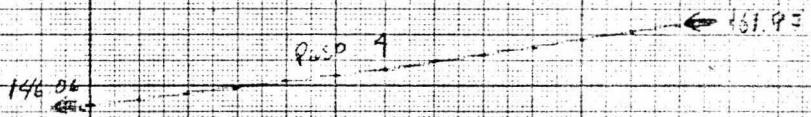








95



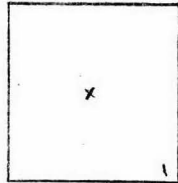
100

5 10 15 20 24

L/A

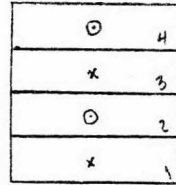


RESUMEN DE RESULTADOS



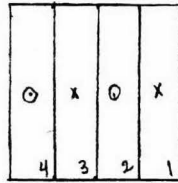
TIPO 1

T1 = 205 F  
T2 = 100.43 F



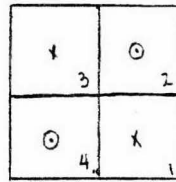
TIPO 2

T1 = 233 F  
T2 = 159.36 F



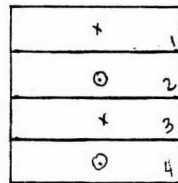
TIPO 3

T1 = 233 F  
T2 = 146.59 F



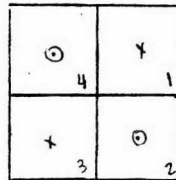
TIPO 4

T1 = 233 F  
T2 = 150.76 F



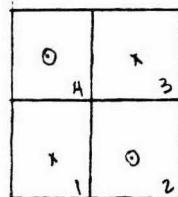
TIPO 5

T1 = 233 F  
T2 = 145.21 F



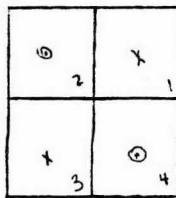
TIPO 6

T1 = 233 F  
T2 = 150.67 F



TIPO 7

T1 = 233 F  
T2 = 157.39 F



TIPO 8

T1 = 233 F  
T2 = 146.06 F

VI.- CONCLUSIONS.

Si analizamos nosotros los resultados obtenidos, podríamos decir:

En cuanto a los resultados del equipo 1, encontramos que es bastante sencillo, vemos como maneja el programa más de una cama y como arroja los resultados que al final de cuenta nos van a ser de cierta utilidad.

En lo que respecta al resto de los tipos de equipo, se presentaron con toda intención resultados de programas corridos con una misma información en cuanto a las propiedades de los fluidos a la entrada y las dimensiones del equipo, con el fin de comparar los perfiles obtenidos y las temperaturas finales de salida en c/u de ellos.

Analizando estos resultados vemos que por ejemplo, el equipo tipo 3 es el que nos arrojó la mínima temperatura de salida del fluido que pretendemos enfriar, cosa que parece lógica si notamos que ambos fluidos entran por partes completamente opuestas, favoreciendo así la transferencia de calor. De la misma manera que el equipo tipo 2 nos ofreció el mínimo enfriamiento de la corriente de proceso, puesto que ésta y el aire entran por la parte baja.

Como se observa en el desarrollo del presente trabajo, se presentaron diferentes problemas:

- a.-) La escasez de bibliografía en cuanto respecta a este tema, fué definitiva. No se encontró información sobre aquellos arreglos más comunes en la industria

por lo que se tuvo que pensar en todas aquellas posibilidades que se podrían presentarse. Además, la manera como los autores calculan los coeficientes por el lado del aire, se presenta demasiado confusa, debido que para ello, ellos hacen uso de características y propiedades de las cuales informan solo para los equipos que ellos resuelven en sus ejemplos.

Por este motivo se tuvo que optar por tomar un método de cálculo, que aunque no es muy exacto, es más general y se puede aplicar para cualquier equipo de este tipo.

b.-) El no saber la trayectoria física del aire dentro del equipo, fué otro grave problema. En el momento en que se quería establecer cual era el intercambio térmico en un intervalo, debido a la falta del caudal del aire, no se conocía la temperatura del mismo a la entrada del aire. Por esto fué que se llegó a considerar las dos posibilidades extremas, cuyos resultados a final de cuentas fueron muy parecidos. Aquí se consideró que el aire llevaba una trayectoria vertical en lugar de considerar que el aire se mezclaba constantemente, únicamente debido a que el primer caso implicaba un tiempo de cálculo menor que el otro.

Como se mencionó en un principio también se usa un solo-aire para condensación. Este programa, con algunas modificaciones en la subrutina de coeficientes y donde calcula cargos térmicos, pueda ser adaptado para este uso y no solamente para enfriamiento.

Cabe hacer notar, que este trabajo utiliza unidades del sistema inglés, debido a que la bibliografía y sobre todo la fuente de datos para correr el programa, utiliza estas unidades.

En resumen este trabajo, además de ser una herramienta muy útil para el Ingeniero Químico, trata de llenar aunque sea en parte; un hueco en la deficiente bibliografía ya antes mencionada.

VII.- BIBLIOGRAFIA.

- 1.- American Petroleum Institute.  
Air-Cooled Heat Exchangers for General Refinery Services.  
Agosto, 1970.
- 2.- F.J. Barnés.  
C.K. King.  
Diseño de Procesos por Computadoras.
- 3.- B. Carnahan.  
H.A. Luther.  
Applied Numerical Methods.  
Wiley, 1969.
- 4.- E.M. Cook.  
Comparison of Equipment for Removing Heat from Process -  
Streams.  
Chem. Eng. , Mayo 1964, pag. 137-142.
- 5.- E.M. Cook.  
Operating Problems for Air-Cooled Units and Air-Water -  
Combinations.  
Chem. Eng. , Julio 1964, pag. 131-136.
- 6.- E.M. Cook.  
Rating Methods for Selection of Air-Cooled Heat Exchangers.  
Chem. Eng. , Agosto 1964, pag. 97-104.
- 7.- E.M. Cook.  
P.S. Otten.  
So you've Decided to Install Air-Cooled Heat Exchangers?  
The Oil and Gas Journal., Junio 1958, pag. 106-113.



- 8.- I. Grossman.  
Tesis. Universidad Ibero Americana.  
1974.
- 9.- D.Q. Kern.  
A.D. Kraus.  
Extended Surfaces Heat Transfer.  
Mc. Graw Hill, 1972.
- 10.- J.E. Lerner.  
Simplified Air-Cooled Estimating.  
Hydr. Proc. , Febrero 1972. pag. 93-100.
- 11.- F.W. Lohrisch.  
How Many Tube Rows for Air-Cooled Exchangers?;  
Hydr. Proc. , Junio 1966.
- 12.- J.W. Murtha.  
S.H. Friedman.  
Estimating Air-Cooled Exchangers Made Easy.  
Chem. Eng. , febrero 1961, pag. 99-100.
- 13.- Natural Gas Processing Suppliers Association.(NGPSA).  
Air-Coolers.  
Cap. 9, 1972.
- 14.- F.L.Rubin.  
Design of Air-Cooled Heat Exchangers.  
Chem. Eng. , Octubre 1966, pag. 91-96.
- 15.- E.C. Smith.  
Air-Cooled Heat Exchangers.  
Chem. Eng. , Noviembre 1958, pag. 145-150.
- 16.- J.J. Weatherley.  
Air vs. Water Cooling.  
Petroleum Refiner , Marzo 1954, pag. 181-182.

17.- J.R. Espina.

J.L. Jano.

Método de Convergencia para Funciones Univariabls.

XIV Congreso Nacional del Instituto Mexicano de Ingenieros  
Químicos. , Noviembre 1974.