



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

"ELABORACION DE PROGRAMAS DE SIMULACION
COMO COMPLEMENTO DIDACTICO DEL LABORATORIO
DE CONTROL DE PROCESOS"

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de

INGENIERO QUÍMICO

Presenta

JUAN JOSE ESPINOSA MARTINEZ

Asesorado por

M. C. JESUS NAVARRO CONTRERAS



T
TS15
E8 . 8
E8
C. 1



1080077138



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

**"ELABORACION DE PROGRAMAS DE SIMULACION
COMO COMPLEMENTO DIDACTICO DEL LABORATORIO
DE CONTROL DE PROCESOS"**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de

INGENIERO QUIMICO

Presenta

JUAN JOSE ESPINOSA MARTINEZ

Asesorado por

M. C. JESUS NAVARRO CONTRERAS



T
TS156
- 8
E8



A mis padres por todo el apoyo y comprensión que siempre me han brindado.

Al mtro. Jesús Navarro Contreras por su valioso apoyo en el asesoramiento del presente trabajo.

A la mtra. Patricia y amigos Carmen, Francisco, entre otros, por brindarme su amistad, cooperación y apoyo.

**A mi hermano Jorge por los
consejos y el gran apoyo que
siempre me ha brindado.**

**A mi hermana Magdalena y mi cuñado
Hipólito Cano Gómez por confiar en mi
y ofrecerme su apoyo para concluir mis
estudios y al presente trabajo.**

**A mis hermanos Félix, Felipe, Esteban,
Silvia, Verónica, Beatriz, Sandra y Rosa
por su apoyo y motivación.**

INDICE

	Pág.
1.-ANTECEDENTES	1
2.-METODOLOGÍA	2
3.-INTRODUCCIÓN A LA RESPUESTA DINÁMICA SISTEMAS DE PRIMER ORDEN PRÁCTICA No. 1	4
3.1.- INTRODUCCIÓN	4
3.2.- CONCEPTOS BÁSICOS	5
3.3.- MODELO MATEMÁTICO	6
3.4.- PROCEDIMIENTO DE LA PRÁCTICA	6
3.5.- EFECTO DE LA CONSTANTE DE TIEMPO	8
3.6.- EFECTO DE LA TEMP. INICIAL	9
3.7.- EFECTO DE LA TEMP. AMB. FIJA	10
3.8.- EFECTO DE LA TEMP. AMB. VARIABLE	11
3.9.- COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA	12
4.-RESPUESTA DINÁMICA DE LOS SISTEMAS CON TRANSFORMADAS DE LAPLACE (TANQUE MEZCLADOR) PRÁCTICA No. 2	15
4.1.- INTRODUCCIÓN	15
4.2.- CONCEPTOS BÁSICOS	16
4.3.- MODELO MATEMÁTICO	17
4.4.- PROCEDIMIENTO DE LA PRÁCTICA	17
4.5.- EFECTO DE LA CONSTANTE DE TIEMPO.....	19
4.6.- EFECTO DEL CO ₃ AGREGADO	20
4.7.- EFECTO DEL GASTO VOLUMÉTRICO	21
4.8.- COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA	22
5.-TANQUE SIMPLE DE ALMACENAMIENTO SISTEMAS DE PRIMER ORDEN PRÁCTICA No. 3	24
5.1.- INTRODUCCIÓN	24
5.2.- CONCEPTOS BÁSICOS	25
5.3.- MODELO MATEMÁTICO	25
5.4.- PROCEDIMIENTO DE LA PRÁCTICA	26
5.5.- EFECTO DE LA CONSTANTE DE TIEMPO.....	28
5.6.- EFECTO DE LA GANANCIA	29
5.7.- EFECTO DEL GASTO VOL. FINAL	30
5.8.- COMPARACION TEÓRICO-PRÁCTICA	31

	Pág.
6.-TANQUES EN CASCADA	
SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN	
PRÁCTICA No. 4	33
6.1.- INTRODUCCIÓN	33
6.2.- CONCEPTOS BÁSICOS	35
A.-TANQUES EN CASCADA CON INTERACCIÓN	
6.1A.-MODELO MATEMÁTICO	36
6.2A.-PROCEDIMIENTO DE LA PRÁCTICA	37
6.3A.-EFECTO DEL ÁREA DEL TANQUE	38
6.4A.-EFECTO DEL GASTO FINAL (CAMBIO ESCALÓN).....	39
6.5A.-COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA	40
B.-TANQUES EN CASCADA SIN INTERACCIÓN	
6.1B.-MODELO MATEMÁTICO	43
6.2B.-PROCEDIMIENTO DE LA PRÁCTICA	43
6.3B.-EFECTO DEL ÁREA DEL TANQUE	45
6.4B.-EFECTO DEL GASTO FINAL (CAMBIO ESCALÓN).....	46
6.5B.-COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA	47
7.-IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	
INTERCAMBIADOR DE CALOR	
PRÁCTICA No. 5	50
7.1.- INTRODUCCIÓN	50
7.2.- CONCEPTOS BÁSICOS	51
7.3.- MODELO MATEMÁTICO	52
7.4.- AJUSTE DE DATOS EXP. A ECN. DE ORDEN 1	53
7.5.- AJUSTE DE DATOS EXP. A ECN. DE ORDEN 2	56
8.-CONTROL EN DOS POSICIONES (ON-OFF)	
TANQUE DE ALMACENAMIENTO	
PRÁCTICA No. 6	58
8.1.- INTRODUCCIÓN	58
8.2.- CONCEPTOS BÁSICOS	59
8.3.- MODELO MATEMÁTICO	60
8.4.- PROCEDIMIENTO DE LA PRÁCTICA	60
8.5.- EFECTO DE LA CTE. DE LA VÁLVULA SIN PERTURBACIÓN	62
8.6.- EFECTO DEL GASTO VOL. INICIAL SIN PERTURBACIÓN	63
8.7.- COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA	64
9.-CONCLUSIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	67

1 ANTECEDENTES

El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y de la ciencia. Además de su extrema importancia en vehículos espaciales, sistemas de pilotaje de aviones, etc., el control automático se ha convertido en parte importante e integral de los procesos industriales y manufactureros modernos. Por ejemplo, el control automático resulta esencial en operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de procesos; maquinado, manejo y armado de piezas mecánicas en las industrias de fabricación, entre muchos otros.

Como las plantas modernas con muchas entradas y salidas se van haciendo más complejas, la descripción de un sistema moderno de control requiere una gran cantidad de ecuaciones, por lo que es indispensable la adaptación de computadoras electrónicas para operar y controlar en forma automática los procesos. Dada la fácil disponibilidad de las mismas para uso en cálculos complejos, en el proyecto de sistemas de control y en el control de operación de los mismos se está convirtiendo ahora en práctica habitual.

La teoría de control moderna afronta la complejidad creciente de las plantas modernas y las necesidades rigurosas en exactitud, optimización de sistemas dinámicos, peso y costo en aplicaciones industriales, por tales motivos la mayoría de los ingenieros y científicos han de tener buenos conocimientos en este campo. Desde los inicios de la carrera de Ingeniero Químico en ésta Facultad, se imparte la materia de Control de Procesos, cuyo objetivo entre otros es principalmente el funcionamiento óptimo de sistemas dinámicos, por lo que existe la necesidad de complementarse con su respectivo laboratorio, que en sus inicios, por la carencia de equipo de cómputo los alumnos presentaban los reportes finales manuscritos y los cálculos que en algunas prácticas no son difíciles pero sí laboriosos, necesitaban de mayor tiempo en su elaboración y por ende se limitaban a hacer lo indispensable que dicho reporte final requería. Por tal motivo no quedaban claros los objetivos y conceptos que cada práctica pretende ni mucho menos obtenían la mayor información del sistema y modelo que se maneja.

Por lo anterior se busca que la educación esté a la vanguardia de nuestro tiempo, éste trabajo tiene dicha finalidad, ya que actualmente con el equipo de cómputo con que cuenta la facultad es un hecho que los alumnos obtengan la disponibilidad de las mismas para mejorar el aprovechamiento de cada una de las prácticas impartidas, presentar los conceptos en forma clara y precisa que faciliten su comprensión y entendimiento, y mediante una simulación de variación de uno o más parámetros o variables del modelo matemático del sistema a manejar, presentando un cuestionario al final de cada simulación para reforzar los conceptos utilizados, lograr los objetivos pretendidos y facilitar los cálculos más complejos para obtener una rapidez en los mismos y por ello disminuir el tiempo que requiere la elaboración del reporte final.

2 METODOLOGÍA

La metodología que se siguió para éste trabajo fué:

- a).-Revisar cada práctica.
- b).-Formular el modelo matemático básico.
- c).-Proponer técnicas numéricas de solución.
- d).-Proponer casos de estudio ó simulación.
- e).-Resolver los modelos resultantes.

Los modelos utilizados son dinámicos; por lo que desde el punto de vista de su estructura matemática, consisten en una ó más ecuaciones diferenciales ordinarias, en la mayoría de los casos y parciales en otros. De modo que las técnicas numéricas de solución fueron acordes a ello.

Posteriormente, se desarrollará un programa administrador que manejará todos los modelos bajo una estructura informática similar para asegurar su compatibilidad, y el manejo uniforme de los datos y los gráficos.

Los programas en general fueron hechos bajo la siguiente estructura:

- a).-Portada de la práctica
- b).-Diagrama del equipo utilizado.
- c).-Presentación de un menú de opciones el cual incluye:
 - 1.- Conceptos Básicos.- Presentación de los conceptos básicos a utilizar en cada práctica de una manera sencilla y entendible.
 - 2.- Comparación Teórico-Práctica.- Alimentación de datos experimentales para que en base a ellos obtener los parámetros involucrados en el modelo matemático.
Presentación gráfica y tabulada de datos experimentales y teóricos.
 - 3.- Simulación del Modelo Matemático a Manejar.- Variación de 1 ó más parámetros o variables para observar el efecto y el programa presenta los resultados gráficamente.
 - 4.- Presentación de una Trivia.- En base a los resultados que se obtienen y a los objetivos y conceptos que pretende cada práctica se hace un cuestionario con opción múltiple para reforzar los conceptos y objetivos.
 - 5.- Salida del Programa.- Salida previa confirmación.

EQUIPO UTILIZADO

Los programas fueron elaborados en una Micro computadora PC 386 SX, 2 MB RAM, DD de 30 MB, monitor a color SVGA.

PUNTO DE VISTA EDUCATIVO

En este sentido se busca que los alumnos obtengan:

- a).-Fácil comprensión de los conceptos manejados frecuentemente en las prácticas del laboratorio.
- b).-Destreza en la simulación de los sistemas dinámicos presentes en el laboratorio
- c).-Observación de los efectos ocasionados en los parámetros a estudiar involucrados en los sistemas dinámicos presentes en el laboratorio.

Los gráficos que se presentan en éste reporte fueron elaborados en Harvard Graphics 2.3, de modo que los gráficos que se tienen en los programas poseen una presentación más burda por las limitaciones del lenguaje y el tipo de monitor. Los datos experimentales presentados fueron tomados de corridas en el laboratorio.

3 INTRODUCCIÓN A LA RESPUESTA DINÁMICA, SISTEMAS DE PRIMER ORDEN

PRÁCTICA No. 1

3.1 INTRODUCCIÓN

La respuesta temporal de un sistema de control consiste en dos partes: la respuesta transitoria y la estacionaria. En muchos casos prácticos, se especifican las características deseadas de los sistemas de control en términos de cantidades en el dominio del tiempo. Frecuentemente, las características de funcionamiento de un sistema de control, son especificadas en términos de la respuesta transitoria a una entrada escalón unitario, ya que es fácil generarla y es suficientemente drástica. Además, si se conoce la respuesta a una entrada escalón, matemáticamente es posible calcular la respuesta a cualquier otra entrada.

Los sistemas con almacenamiento de energía no pueden responder instantáneamente y presentan respuestas transitorias siempre que se les somete a entradas o perturbaciones. Físicamente un sistema de primer orden puede representar, entre otros, a un sistema térmico. Los sistemas térmicos son aquellos que involucran la transferencia o transmisión de calor de una sustancia a otra. Se pueden analizar los sistemas térmicos en términos de resistencia y capacitancia, no pueden ser representados con precisión como parámetros concentrados ya que habitualmente están distribuidos a lo largo de la sustancia. Para un análisis preciso es necesario recurrir a modelos de parámetros distribuidos.

En ésta práctica el sistema está compuesto principalmente por un recipiente aislado para almacenamiento de agua, el cual intercambia calor con el aire que lo rodea a través de su superficie expuesta. Un agitador mecánico mezcla perfectamente el fluido en el recipiente, de modo que se encuentra a temperatura uniforme. De este modo, se puede describir la temperatura del líquido en el recipiente en determinado valor de tiempo. La figura 3.1 muestra el sistema descrito anteriormente.

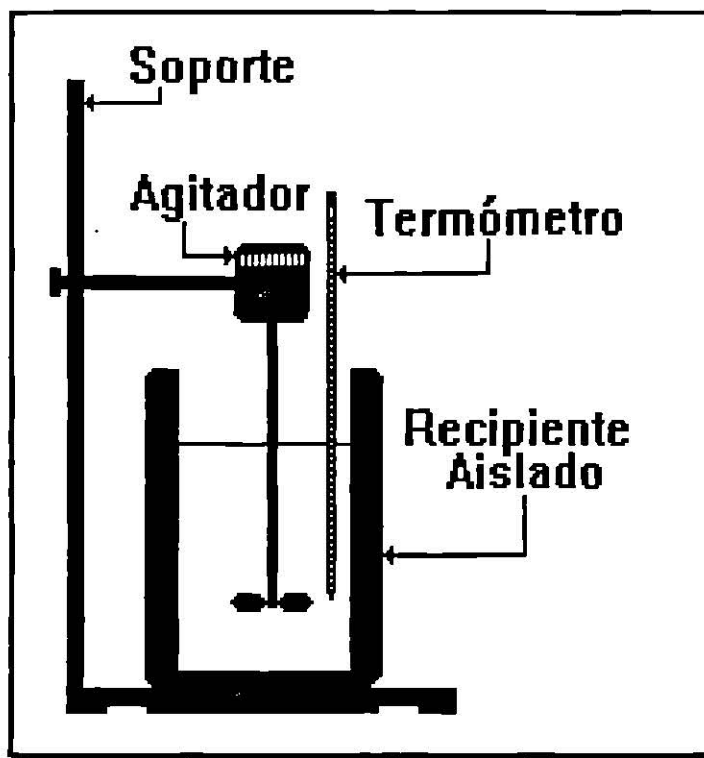


Fig. 3.1 SISTEMA TÉRMICO SIMPLE.

3.2 CONCEPTOS BÁSICOS

a).-RESPUESTA ESTACIONARIA.- Es la salida ó respuesta del sistema cuando el tiempo transcurrido es tan grande que la respuesta ya no cambia.

b).-RESPUESTA TRANSITORIA.- Es cuando la salida ó respuesta del sistema cambia al transcurrir el tiempo.

c).-CONSTANTE DE TIEMPO.- Es un parámetro relacionado con el tiempo de respuesta de un sistema. A menor valor, la respuesta del sistema es más rápida. Se expresa como el producto de una resistencia por una capacitancia (térmicas en éste caso).

d).-RESISTENCIA TÉRMICA.- Es una medida de la dificultad para transmitir calor; para éste caso se calcula como el inverso del producto del coeficiente de transferencia de calor por el área del recipiente.

e).-CAPACITANCIA TÉRMICA.- Está relacionada con la capacidad para almacenar energía; para éste caso se calcula como el producto de la masa por el calor específico (Capacidad Calorífica).

f).-GANANCIA.- Es el cociente de la respuesta y la salida de estado estacionario, para éste caso la ganancia es 1 (uno).

3.3 MODELO MATEMÁTICO

El desarrollo detallado del modelo matemático se encuentra en el Manual del Laboratorio de Control de Procesos, (Navarro y Escalante, 1990).

$$T(t) = T_{amb.} + (T_i - T_{amb.}) e^{-(t/T)} \quad \text{Ecn. general del sistema (3.1)}$$

$$\ln \left[\frac{T(t) - T_{amb.}}{T_i - T_{amb.}} \right] = (-1/T)t \quad \text{Ecn. logarítmica del sistema (3.2)}$$

NOMENCLATURA

- Tamb. = Temperatura ambiente
- T(t) = Temperatura teórica
- Ti = Temperatura inicial
- T = Constante de tiempo
- t = Tiempo

3.4 PROCEDIMIENTO DE LA PRÁCTICA

El procedimiento de la práctica se resume en los siguientes pasos:

- a).- Llenar el recipiente aislado con un volumen de agua de 1 litro.
- b).- Elevar la temperatura de la misma (en éste caso 50 °C).
- c).- Arrancar a velocidad lenta el agitador para homogeneizar la temperatura.
- d).- Hacer mediciones de tiempo y temperatura simultáneas hasta que el agua se enfríe a la temperatura ambiente (en éste caso 28 °C).

La tabla 3.1 muestra los resultados experimentales obtenidos.

TABLA 3.1 DATOS EXPERIMENTALES	
TIEMPO (min)	TEMP. EXP. (°C)
0	50,0
2	46,0
4	45,0
6	45,0
8	44,0
10	43,5
12	43,0
14	43,0
16	42,0
18	42,0
20	41,5

Continuación de la tabla 3.1

TIEMPO (min)	TEMP. EXP. (°C)	TIEMPO (min)	TEMP. EXP. (°C)
22	41,0	82	33,0
24	40,0	84	33,0
26	39,8	86	33,0
28	39,5	88	32,0
30	39,0	90	32,0
32	38,5	92	31,0
34	38,5	94	31,0
36	38,0	96	30,0
38	38,0	98	30,0
40	37,5	100	30,0
42	37,0	102	29,5
44	37,0	104	29,0
46	36,5	106	29,0
48	36,5	108	29,0
50	36,0	110	28,5
52	36,0	112	28,0
54	35,5	120	28,0
56	35,5	130	28,0
58	35,0	140	28,0
60	35,0	150	28,0
62	35,0	160	28,0
64	34,5	170	28,0
66	34,5	180	28,0
68	34,0	190	28,0
70	34,0	200	28,0
72	34,0	210	28,0
74	33,5	220	28,0
76	33,5	230	28,0
78	33,0	240	28,0
80	33,0	250	28,0

3.5 EFECTO DE LA CONSTANTE DE TIEMPO

Para estudiar ese efecto se sustituyeron diferentes valores de la constante de tiempo (T) en la ecuación 3.1 con las temperaturas inicial y ambiente definidas, (T_i y $T_{amb.}$ respectivamente), los valores de T dados indistintamente se presentan en la figura 3.2, donde se observa el efecto que produce la variación dicha constante.

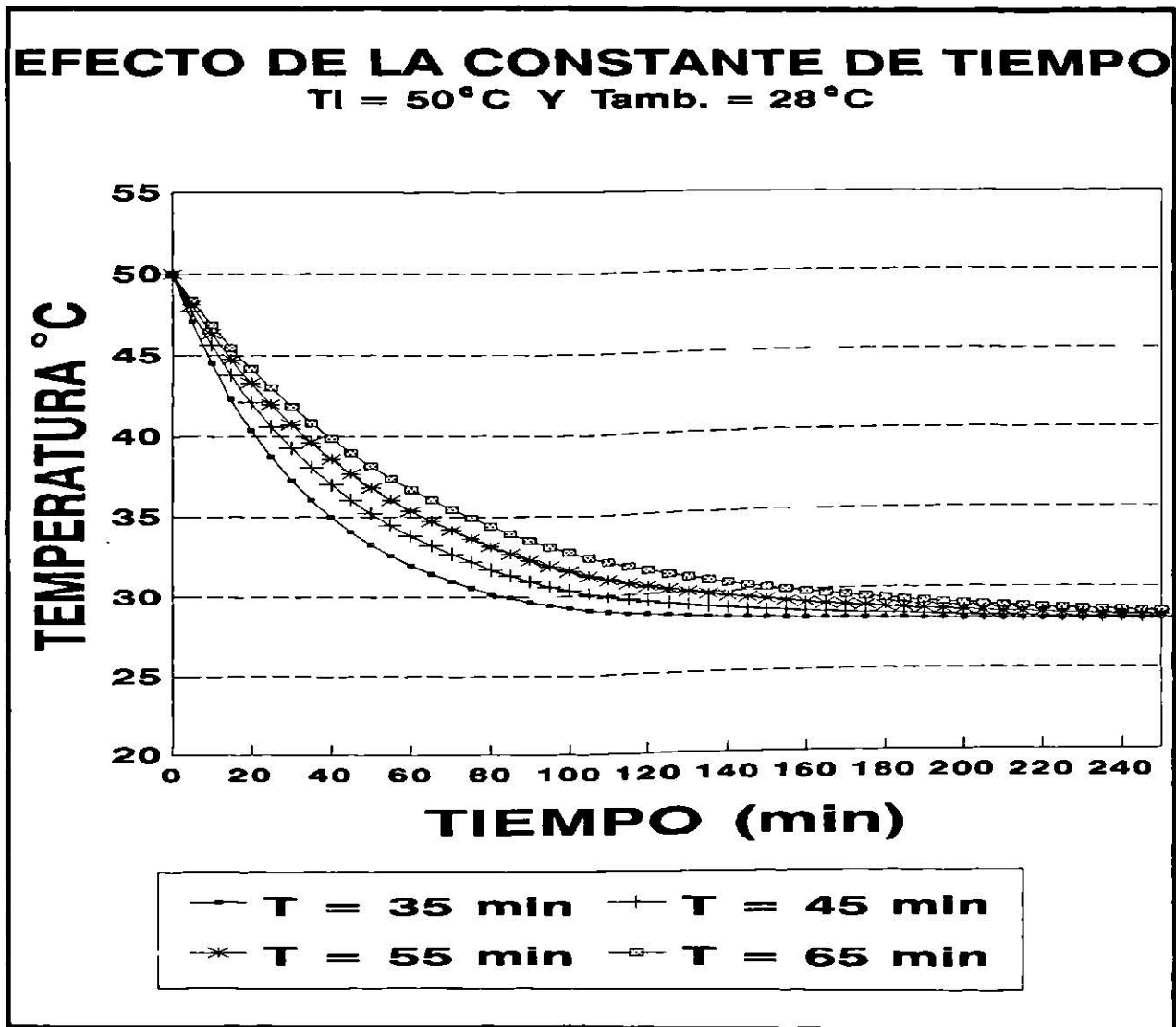


Fig. 3.2 EFECTO DE LA CONSTANTE DE TIEMPO.

De la gráfica se observa que al aumentar la constante de tiempo el sistema alcanza su estado estable en tiempo mayor, es decir, alcanza la temperatura ambiente en un tiempo mayor; por el contrario, si se disminuye la constante de tiempo, el sistema se estabiliza en tiempo menor. La ganancia, la resistencia térmica y la conductividad térmica por las suposiciones que se hacen para obtener el modelo matemático, son constantes, aunque prácticamente no sucede así.

3.6 EFECTO DE LA TEMPERATURA INICIAL DEL SISTEMA

Para observar ese efecto se siguió el mismo procedimiento que en la sección 3.5, pero ahora se sustituyeron diferentes valores de la temperatura inicial (T_i) con valores constantes de la constante de tiempo (T) y de la temperatura ambiente ($T_{amb.}$). Dicho efecto se observa en la figura 3.3.

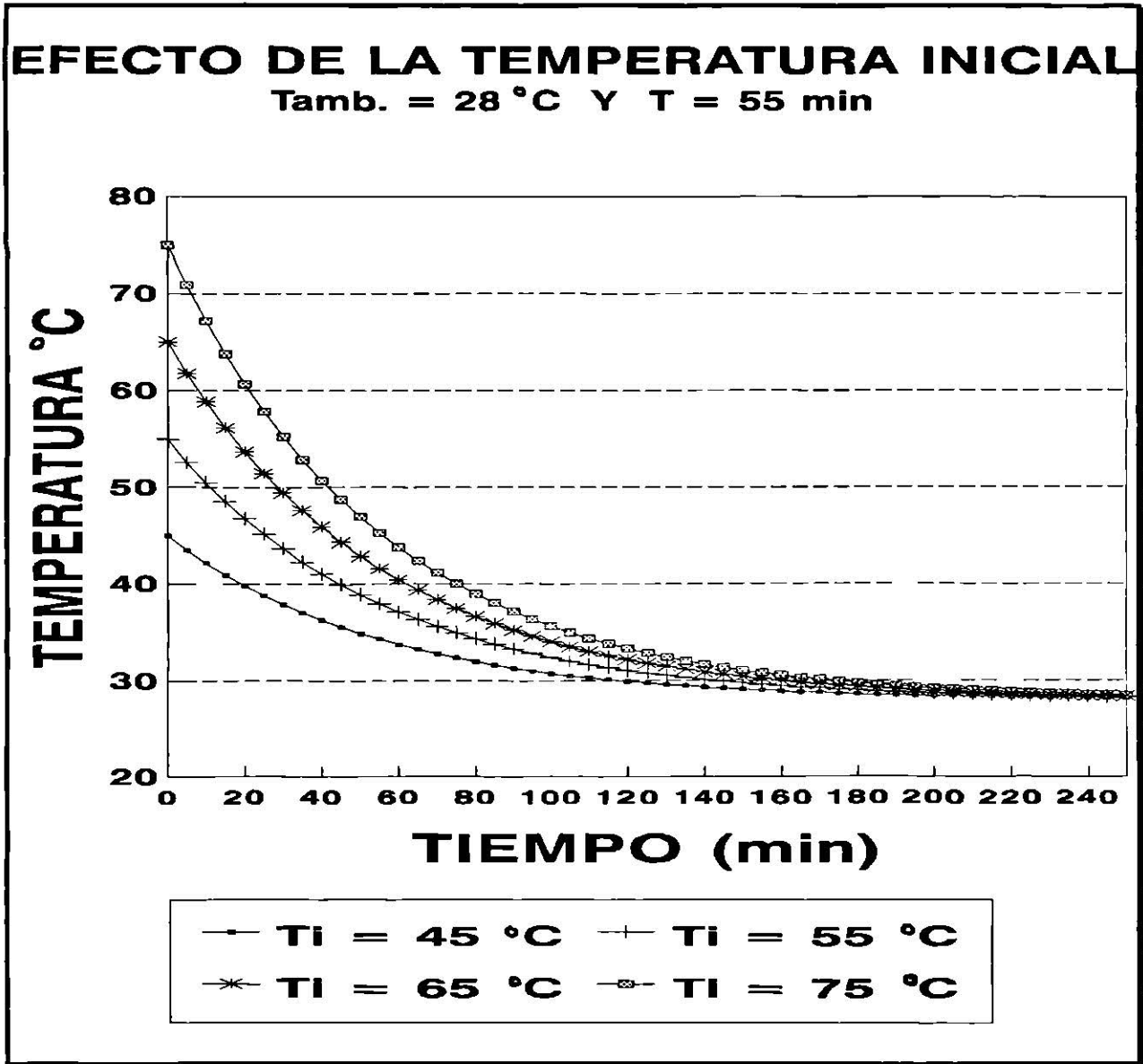


Fig. 3.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA INICIAL DEL SISTEMA

De tal manera, se concluye que al aumentar la temperatura inicial del sistema, el tiempo que se requiere para alcanzar la respuesta de estado estable es el mismo, y de acuerdo al modelo utilizado, también son constantes la resistencia térmica y la conductividad térmica. La ganancia siempre tendrá el valor de 1.

3.7 EFECTO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE FIJA

Se hace el mismo procedimiento que en los puntos anteriores, pero ahora los valores de la temperatura ambiente ($T_{amb.}$) se varían permaneciendo constantes la temperatura inicial (T_i) y la constante de tiempo (T). Tal efecto se observa en la figura 3.4.

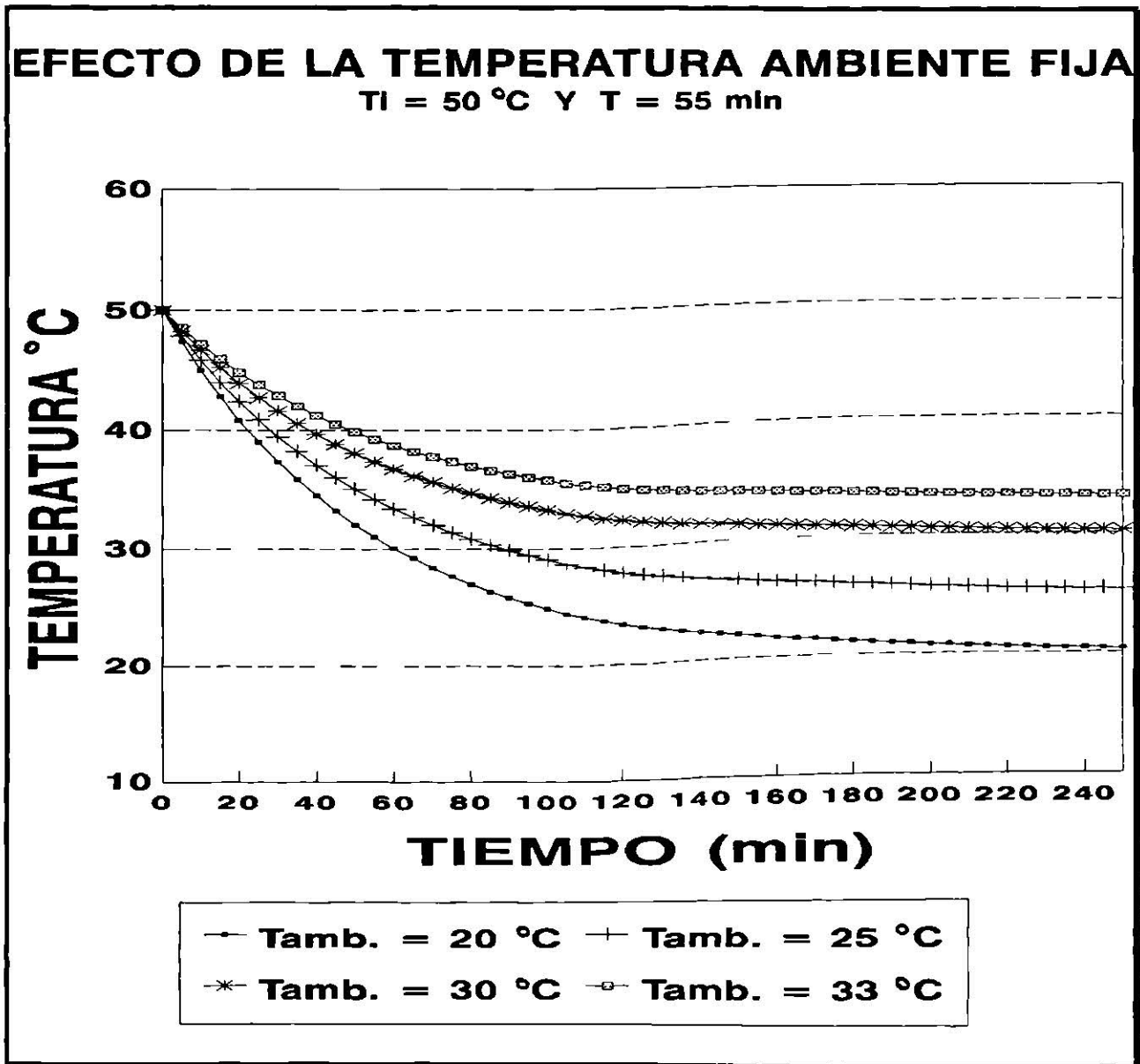


Fig. 3.4 EFECTO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE FIJA.

De la gráfica se observa que el efecto que ocasiona el aumento de la temperatura ambiente, el tiempo para obtener la respuesta estacionaria es independiente de la variación de dicha temperatura, es decir, en los cuatro casos se obtiene el estado estable con el mismo tiempo. La resistencia y conductividad térmicas teóricamente permanecen constantes.

3.8 EFECTO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE VARIABLE

Si se supone que la temperatura ambiente cambia linealmente, tal efecto hace que en la función del sistema se introduzca un cambio rampa ($1/s^2$), por tal motivo la ecuación resultante es:

$$T(t) = 0.0166T + (T_{amb.} - 0.0166T) + (T_i - T_{amb.} + 0.0166T)e^{-t/T}$$

Para observar el efecto se hace el procedimiento similar a los puntos anteriores, en éste caso se toman los mismos valores del punto 3.4, es decir, $T_i = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{amb.} = 28\text{ }^\circ\text{C}$ y $T = 55\text{ min}$ obtenida con los datos de la sección 3.4 y sustituidos en la ecuación 3.2, con los respectivos valores del tiempo, con una extrapolación hasta de 250 min. Dicho efecto se observa en la figura 3.5.

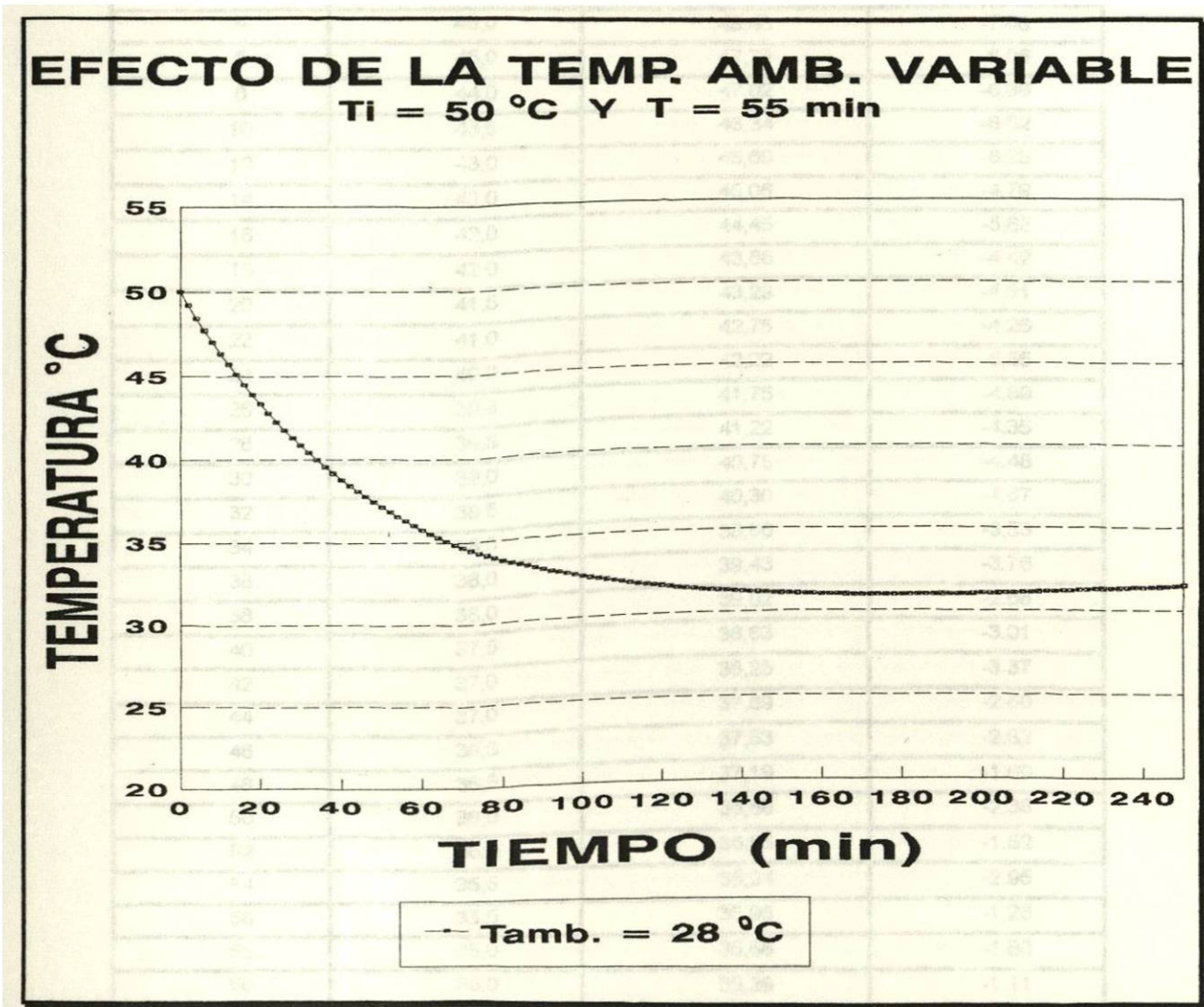


Fig. 3.5 EFECTO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE VARIABLE.

De la gráfica se observa que al no estar la temperatura ambiente constante, el sistema alcanza una respuesta estacionaria **relativa** y no **absoluta**, por lo que tendrá una respuesta transitoria ó dinámica relativamente grande y que estará en función de ésta variable.

3.9 COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA

Para obtener el valor de la constante de tiempo experimental (T), se sustituyen los datos de la tabla 3.1 en la ecuación 3.2, utilizando el método de mínimos cuadrados y haciendo el álgebra correspondiente se obtiene el valor de $T = 55$ min. Con ésta constante dada y las variables obtenidas experimentalmente de $T_i = 50$ °C, $T_{amb.} = 28$ °C se sustituyen en la ecuación 3.1 con los respectivos valores de tiempo para obtener las temperaturas teóricas. La tabla 3.2 además de presentar los resultados experimentales y teóricos, presenta también el porcentaje de desviación de cada dato.

TABLA 3.2 DATOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS			
TIEMPO (min)	TEMP. EXP. (°C)	TEMP. TEÓRICA (°C)	% DESVIACIÓN
0	50,0	50,00	0.00
2	46,0	49,21	-6.97
4	45,0	48,46	-7.68
6	45,0	47,73	-6.06
8	44,0	47,02	-6.86
10	43,5	46,34	-6.52
12	43,0	45,69	-6.25
14	43,0	45,06	-4.79
16	42,0	44,45	-5.83
18	42,0	43,86	-4.42
20	41,5	43,29	-4.31
22	41,0	42,75	-4.26
24	40,0	42,22	-5.55
26	39,8	41,75	-4.89
28	39,5	41,22	-4.35
30	39,0	40,75	-4.48
32	38,5	40,30	-4.67
34	38,5	39,86	-3.53
36	38,0	39,43	-3.76
38	38,0	39,02	-2.68
40	37,5	38,63	-3.01
42	37,0	38,25	-3.37
44	37,0	37,89	-2.40
46	36,5	37,53	-2.82
48	36,5	37,19	-1.89
50	36,0	36,86	-2.38
52	36,0	36,55	-1.52
54	35,5	36,24	-2.95
56	35,5	35,95	-1.26
58	35,0	35,66	-1.88
60	35,0	35,39	-1.11
62	35,0	35,13	-0.37
64	34,5	34,87	-1.07
66	34,5	34,63	-0.37
68	34,0	34,39	-1.14
70	34,0	34,16	-0.47

Continuación de la tabla 3.2.

TIEMPO (min)	TEMP. EXP. (°C)	TEMP. TEÓRICA (°C)	% DESVIACIÓN
72	34,0	33,94	0.17
74	33,5	33,73	-0.68
76	33,5	33,52	-0.06
78	33,0	33,33	-0.01
80	33,0	33,14	-0.42
82	33,0	32,95	0.15
84	33,0	32,78	0.66
86	33,0	32,61	1.18
88	32,0	32,44	-1.37
90	32,0	32,28	-0.87
92	31,0	32,13	-3.64
94	31,0	31,98	-3.16
96	30,0	31,84	-6.13
98	30,0	31,70	-5.66
100	30,0	31,57	-5.23
102	29,5	31,44	-6.57
104	29,0	31,32	-8.00
106	29,0	31,20	-7.58
108	29,0	31,09	-7.20
110	28,5	30,98	-8.70
112	28,0	30,87	-10.25
120	28,0	30,48	-8.85
130	28,0	30,07	-7.39
140	28,0	29,73	-6.17
150	28,0	29,44	-5.14
160	28,0	29,20	-4.28
170	28,0	29,00	-3.57
180	28,0	28,83	-2.96
190	28,0	28,70	-2.50
200	28,0	28,58	-2.07
210	28,0	28,48	-1.71
220	28,0	28,40	-1.42
230	28,0	28,34	-1.21
240	28,0	28,28	-1.00
250	28,0	28,23	-0.82

Los datos de la tabla 3.2 se presentan gráficamente en la figura 3.6.

COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA

$T = 55 \text{ min} : T_i = 50^\circ\text{C} : T_{amb.} = 28^\circ\text{C}$

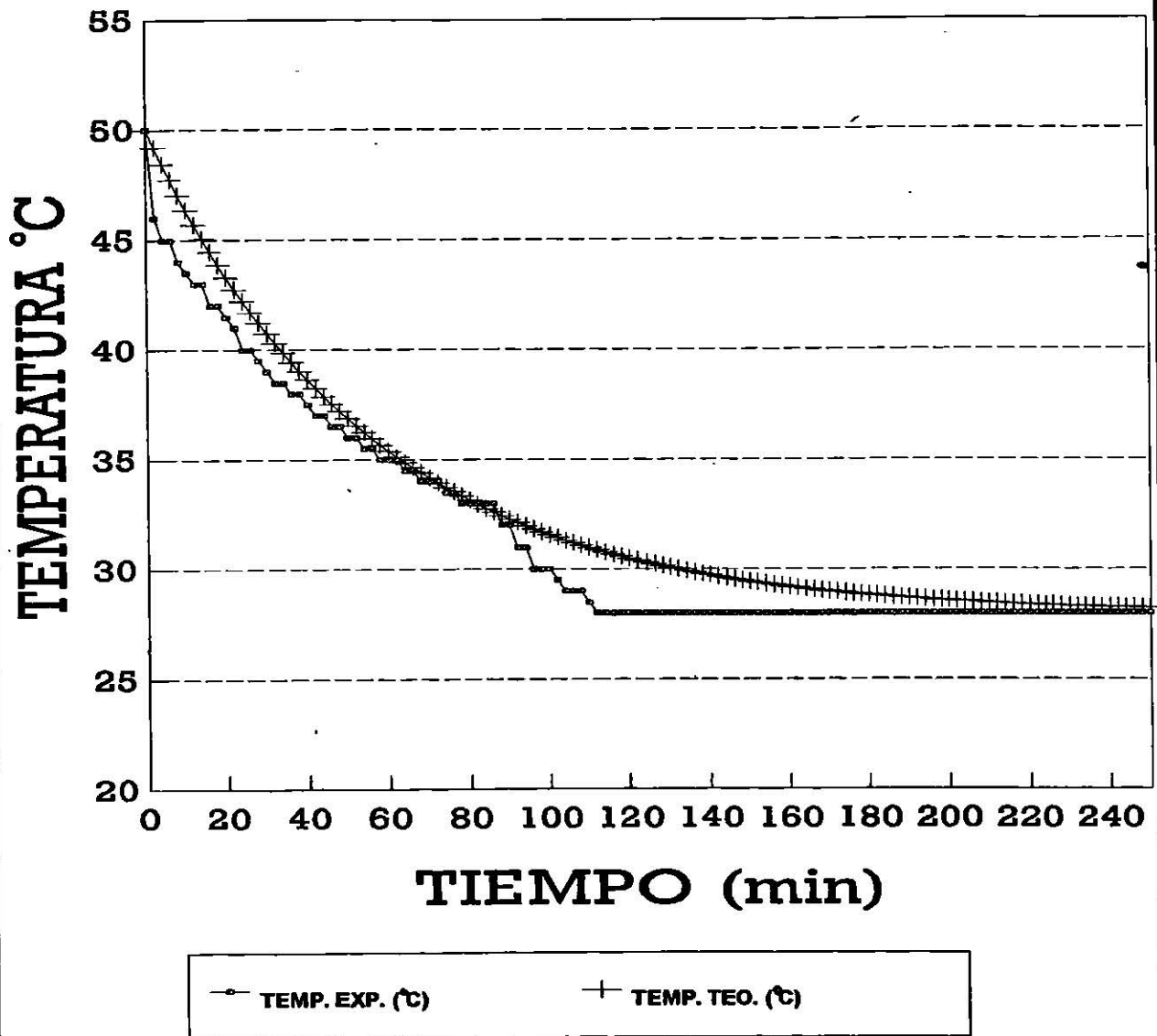


Fig. 3.6 GRÁFICA TEÓRICO-PRÁCTICA.

Como se observa en la tabla 3.2 y en la figura 3.6 hay relativamente poca desviación de los datos experimentales comparados con los teóricos, ya que al tomar los datos experimentales puede haber factores que provoquen errores, tales como: termómetro mal calibrado, redondeo de las temperaturas y variación de la $T_{amb.}$ principalmente. La respuesta estacionaria teórica se obtiene cuando el tiempo transcurrido es $4T$, que corresponde al 98 % de la respuesta total.

4 RESPUESTA DINÁMICA DE LOS SISTEMAS CON TRANSFORMADAS LAPLACE TANQUE MEZCLADOR

PRÁCTICA No. 2

4.1 INTRODUCCIÓN

En las aplicaciones de Control de Procesos, la transformada de Laplace permite convertir las ecuaciones diferenciales en el tiempo como variable independiente, en ecuaciones algebraicas de una nueva variable compleja "s". Cuya solución es más sencilla, aunque para obtener la solución en el dominio del tiempo, se debe invertir la solución en "s" mediante una antitransformación de Laplace.

Los modelos matemáticos que representan los sistemas dinámicos generalmente se transforman al dominio de "s", mediante una tabla de Transformadas de Laplace, y después se expresan como el cociente de la Respuesta y la Entrada, que provoca la primera (Función de Transferencia ó Transmítancia).

El estudio de los sistemas dinámicos comienza con el desarrollo de un modelo matemático que represente adecuadamente el sistema físico que se desea estudiar. Si las variables de interés son constantes en todo el volumen bajo estudio, por ejemplo: un tanque perfectamente mezclado, tendremos un sistema de parámetros concentrados. En ésta práctica, se estudiará la respuesta dinámica del sistema que se muestra en la fig. 4.1 y el modelo matemático se resolverá mediante la Transformación de Laplace, dicha figura representa un sistema sencillo, formado por dos tanques de almacenamiento del fluido; el primero es simplemente el tanque de alimentación, y el segundo es un mezclador con agitación constante.

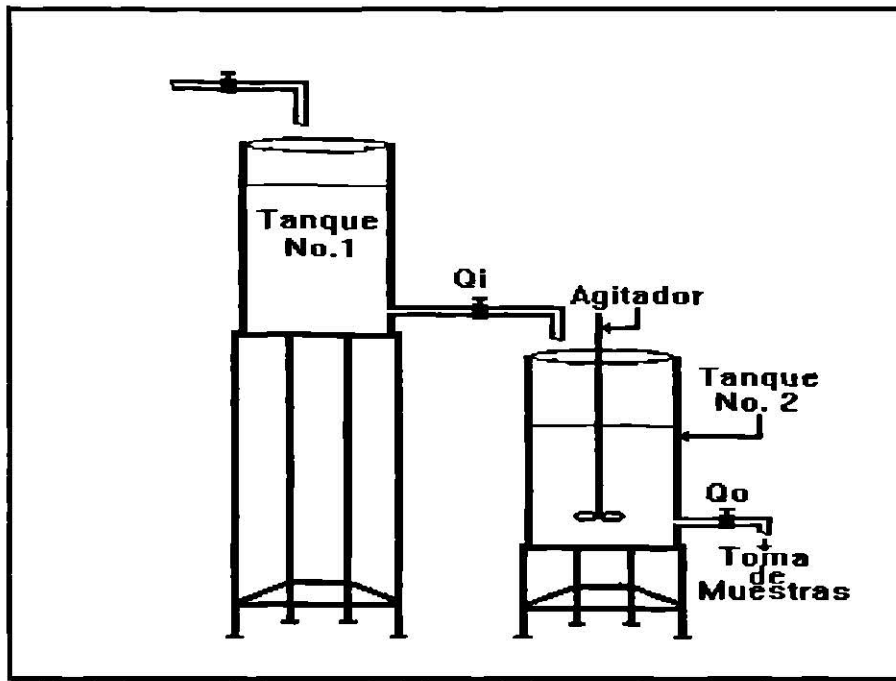


Fig. 4.1 DIAGRAMA DEL EQUIPO UTILIZADO.

4.2 CONCEPTOS BÁSICOS

a).- **TRANSFORMADA DE LAPLACE.**- Es un método que se utiliza para resolver ecuaciones diferenciales lineales ordinarias, convirtiéndolas momentáneamente en ecuaciones algebraicas, para facilitar su solución.

b).- **SISTEMA DE PARÁMETROS CONCENTRADOS.**- Es aquel cuyas variables de interés son constantes en todo el volumen bajo estudio, por ejemplo: un tanque perfectamente mezclado. Su densidad, temperatura, etc. son constantes en todo el volumen.

c).- **SISTEMA DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS.**- Es aquel cuyas variables de interés cambian como función de la posición, ejemplo: un intercambiador de calor de tubos concéntricos. La temperatura cambia a lo largo del equipo.

d).- **TIEMPO DE RETARDO.**- Es el tiempo que tarda un sistema en comenzar a responder a un estímulo, puede ser causado por el transporte de un elemento de fluido que se mueve a través de un conducto; como una muestra para su análisis, en éste caso se calcula como el cociente de la longitud y la velocidad.

e).- **FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA O TRANSMITANCIA.**- Son modelos matemáticos que representan sistemas dinámicos, transformados previamente al dominio de "s", mediante una transformación de Laplace, y expresados como el cociente de la respuesta y la entrada.

f).- **ENTRADA IMPULSO.**- Es un tipo de entrada a un sistema, que se expresa matemáticamente como $1/s$ ó $\delta(t)$ y se puede aproximar físicamente por un pulso de duración muy breve.

4.3 MODELO MATEMÁTICO

El desarrollo detallado del modelo matemático se encuentra en el Manual de Laboratorio de Control de Procesos (Navarro y Escobante, 1990).

$$Co(t) = \frac{KW}{T} e^{-t/T} \quad \text{Ecn. general del sistema} \quad (4.1)$$

$$\ln[Co(t)] = \ln\left[\frac{KW}{T}\right] - \left[\frac{1}{T}\right]t \quad \text{Ecn. linealizada del sistema} \quad (4.2)$$

NOMENCLATURA

Co(t) = Concentración teórica a la salida del segundo tanque (mg/lt)
W = Carbonato añadido (impulso), (mg)
K = Ganancia del sistema (min/lt)
T = Constante de tiempo (min)
t = Tiempo (min)

4.4 PROCEDIMIENTO DE LA PRÁCTICA

Para tomar los datos experimentales el procedimiento que se siguió fue el siguiente:

- a).- Abrir la válvula de alimentación del primer tanque y al llegar éste al nivel deseado, abrir la válvula de descarga, posteriormente cuidar que el nivel sea constante.
- b).- Al llegar al nivel deseado en el segundo tanque, abrir la válvula de descarga del mismo.
- c).- Regular las válvulas de salida de ambos tanques hasta encontrar el estado estacionario.
- d).- Medir la altura y el gasto de salida del segundo tanque.
- e).- Agitar de manera constante el segundo tanque y agregar el CO_3^{2-} , arrancar el cronómetro al instante de añadir el sólido.
- f).- Tomar 10 muestras cada minuto, y después cada 5 minutos hasta que la concentración sea cero.
- g).- Titular las muestras tomadas con solución valorada de H_2SO_4 , utilizando fenolftaleína.

Los datos se muestran en la tabla 4.1

TABLA 4.1 CONCENTRACIONES EXPERIMENTALES	
TIEMPO (min)	CONC. EXP. (ppm)
0	0.00
1	97.20
2	354.00
3	378.00
4	330.00
5	312.00
6	294.00
7	288.00
8	270.00
9	264.00
10	258.00
15	204.00
20	162.00
25	138.00
30	132.00
35	114.00
40	102.00
45	84.00
50	78.00
55	72.00
60	60.00
65	48.00
70	39.60
75	36.00
80	30.00
85	26.40
90	20.40
95	18.00
100	15.60
105	12.00
110	8.40
115	6.00
120	0.00

4.5 EFECTO DE LA CONSTANTE DE TIEMPO

Para ver el efecto que tiene dicha constante el procedimiento que se sigue es variar indistintamente los valores de las mismas a una ganancia (K) y cantidad de CO_3^{2-} agregado al sistema (W) definidos, sustituyéndolos en la ecuación 4.1. Tal efecto se observa en la figura 4.2 presentando los valores dados de las constantes de tiempo.

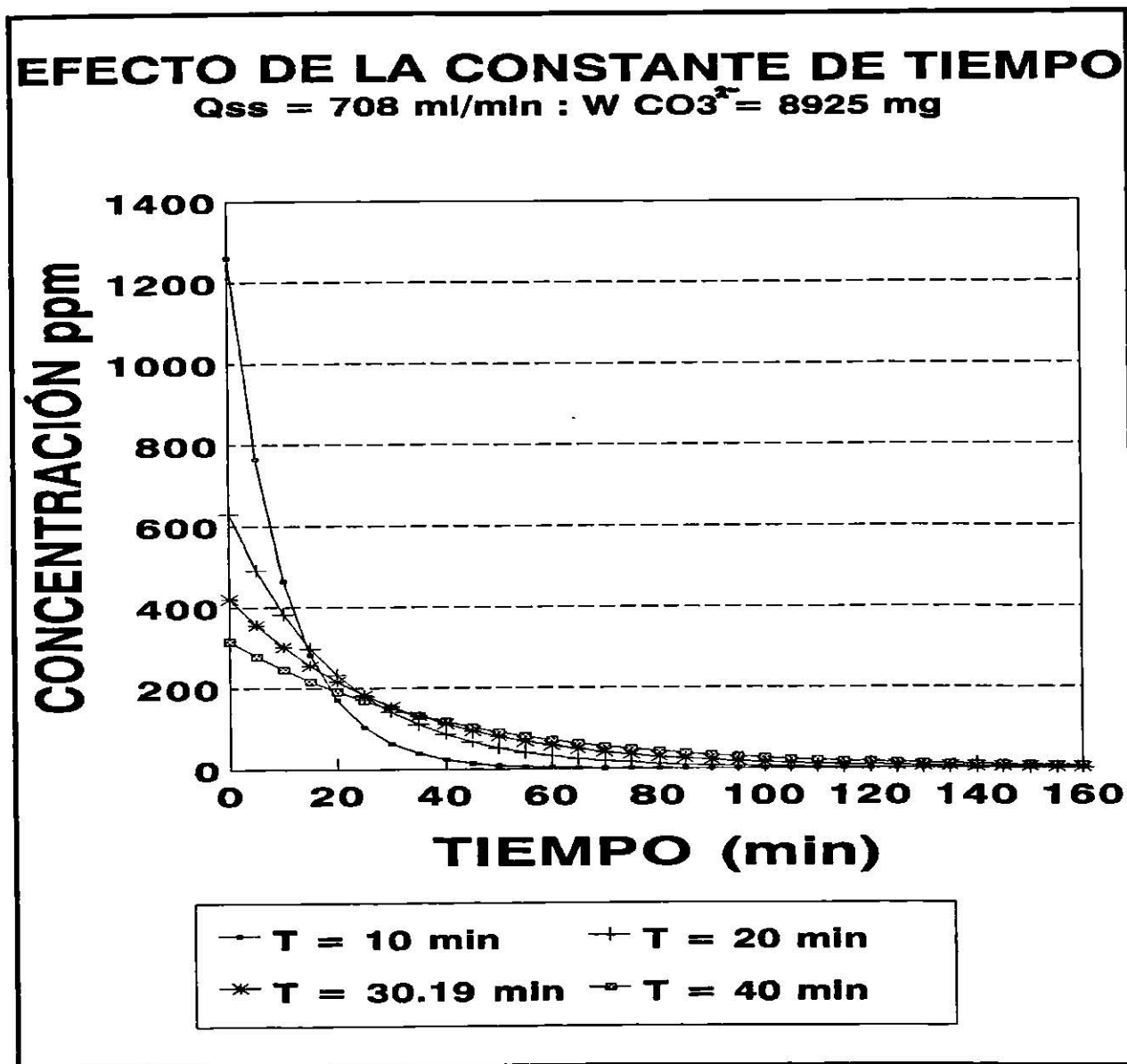


Fig. 4.2 EFECTO DE LA CONSTANTE DE TIEMPO.

De tal manera, se concluye que el efecto que produce al variar dicha constante: es que a menor valor de T, menor es el tiempo que requiere el sistema para estabilizarse, además aumenta la altura del pico que es $(KW)/T$. En caso de aumentar dicha constante se invierte lo anterior.

4.6 EFECTO DE LA CANTIDAD DE CO_3^{2-} AGREGADO

Para observar el efecto que ocasiona la variación de CO_3^{2-} en el sistema se hace el mismo procedimiento del punto anterior, manteniendo constantes la ganancia (K) y la constante de tiempo (T). Tal efecto se observa en la fig. 4.3.

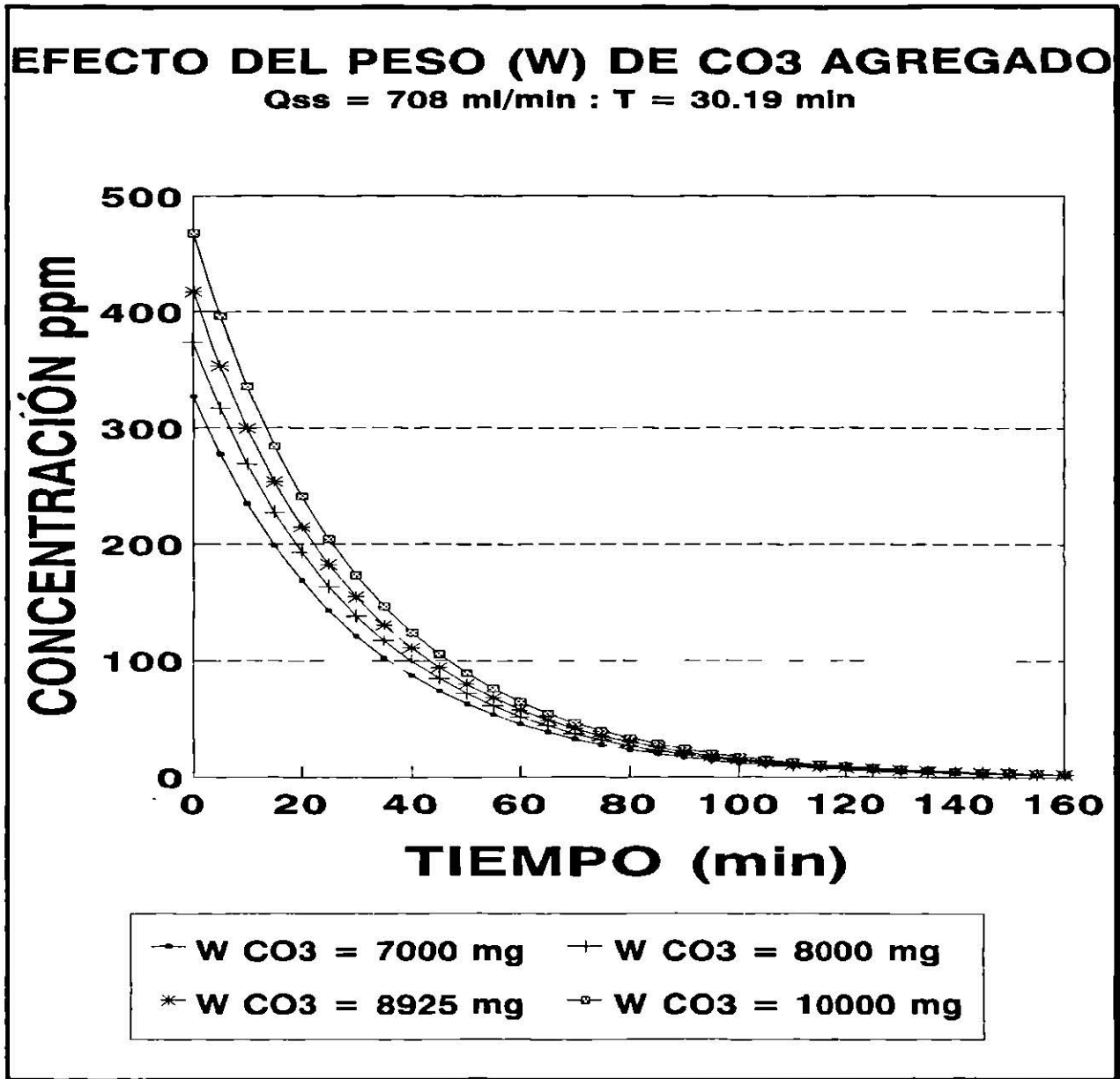


Fig. 4.3 EFECTO DE LA CANTIDAD DE CO_3^{2-} AGREGADO.

De tal manera, se concluye que al aumentar la cantidad de CO_3^{2-} en el sistema, se requiere de mayor tiempo para que se elimine por completo, es decir, que su concentración sea cero. Además se infiere que la altura del pico aumenta por $(KW)/T$, y en consecuencia el área bajo la curva.

4.7 EFECTO DEL GASTO VOLUMÉTRICO

Para ver el efecto que produce dicha variación del gasto se siguió el mismo procedimiento que en los puntos anteriores, manteniendo constantes ahora la constante de tiempo (T) y la cantidad de CO_3^{2-} agregado (W). Dicho efecto se observa en la fig. 4.4.

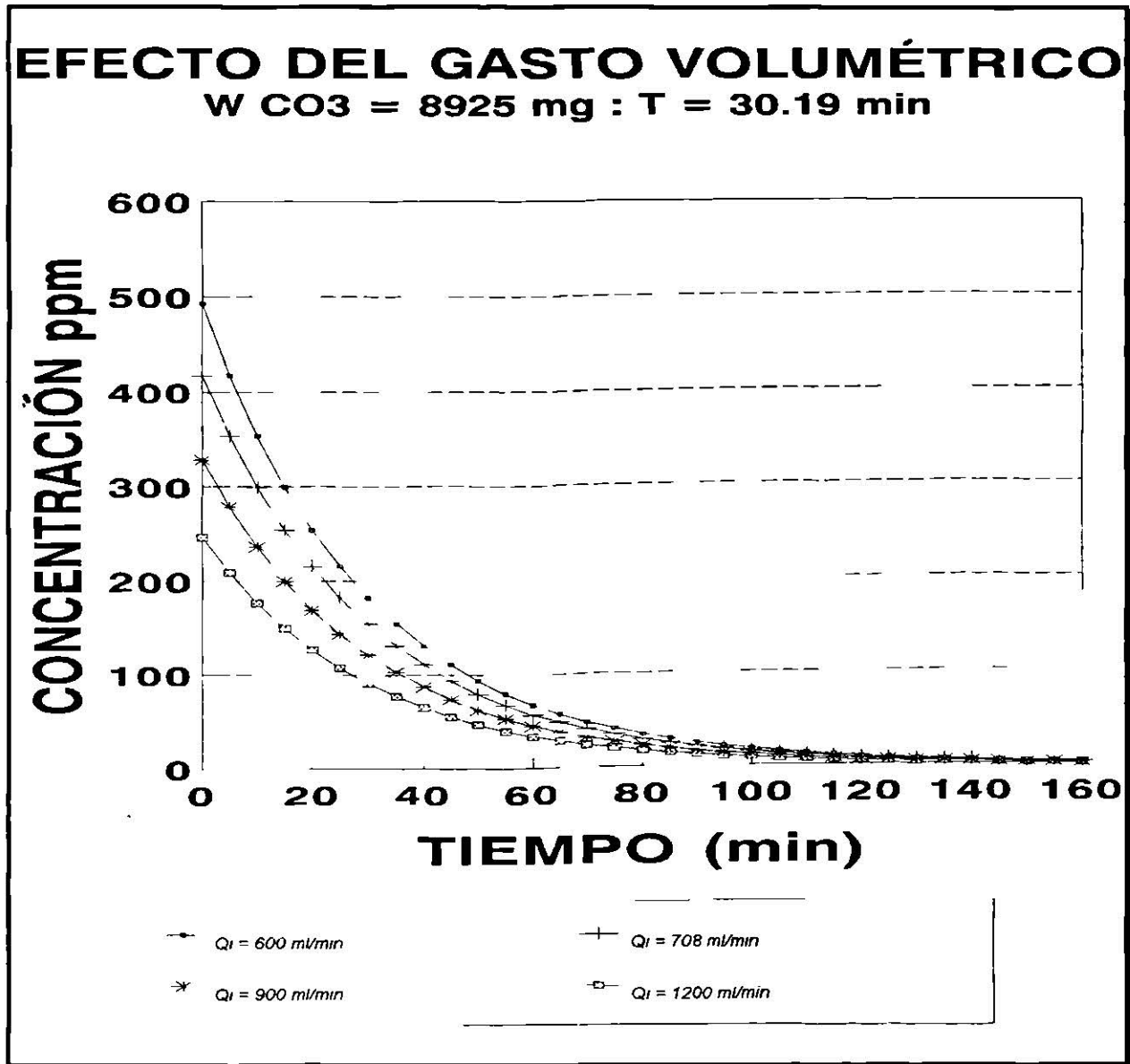


Fig. 4.4 EFECTO DEL GASTO VOLUMÉTRICO.

De la figura anterior se concluye que al aumentar el gasto en el sistema, la concentración del CO_3^{2-} disminuye más rápido y por consiguiente la ganancia (K) también aumenta. También se afecta en gran proporción el tiempo de retardo, ya que si el gasto aumenta el tiempo para que responda el sistema es menor, pero es pequeño el efecto global. Además la altura del pico disminuye y en consecuencia el área bajo la curva.

4.8 COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA

Para obtener los parámetros de la ecuación 4.1, se utilizan los datos de la tabla 4.1 y se sustituyen en la ecuación 4.2, utilizando el método numérico de mínimos cuadrados y haciendo el álgebra correspondiente, obtenemos los valores para $T = 30.19$ min; $K = 1.41$ min/lit y el valor dado del $W \text{CO}_3^{2-} = 8925$ mg. Estos valores son sustituidos en la ecuación 4.2 para obtener las concentraciones teóricas. La tabla 4.2 presenta los datos experimentales y teóricos obtenidos además del porcentaje de desviación.

TABLA 4.2 CONCENTRACIONES EXPERIMENTALES Y TEÓRICAS.			
TIEMPO (min)	CONC. EXP. (ppm)	CONC. TEÓRICA (ppm)	% DESVIACIÓN
0	0.00	0.00	0.00
1	97.20	403.95	-315.58
2	354.00	390.79	-10.39
3	378.00	378.06	-0.01
4	330.00	365.74	-10.83
5	312.00	353.82	-13.40
6	294.00	342.29	-16.42
7	288.00	331.14	-14.97
8	270.00	320.35	-18.64
9	264.00	309.92	-17.39
10	258.00	299.82	-16.24
15	204.00	254.06	-24.53
20	162.00	215.28	-32.88
25	138.00	182.42	-32.18
30	132.00	154.58	-17.10
35	114.00	130.99	-14.90
40	102.00	110.99	-8.81
45	84.00	94.05	-11.96
50	78.00	79.70	-2.18
55	72.00	67.53	6.20
60	60.00	57.23	4.61
65	48.00	48.49	-1.02
70	39.60	41.09	-3.76
75	36.00	34.82	3.27
80	30.00	29.50	0.16
85	26.40	25.00	5.30
90	20.40	21.18	-3.82
95	18.00	17.95	0.27
100	15.60	15.21	2.50
105	12.00	12.89	-7.41
110	8.40	10.92	-30.0
115	6.00	9.26	-54.33
120	0.00	7.84	-
130	0.00	5.63	-
140	0.00	4.04	-
150	0.00	2.90	-

La gráfica correspondiente a los datos de la tabla anterior se observa en la figura 4.5.

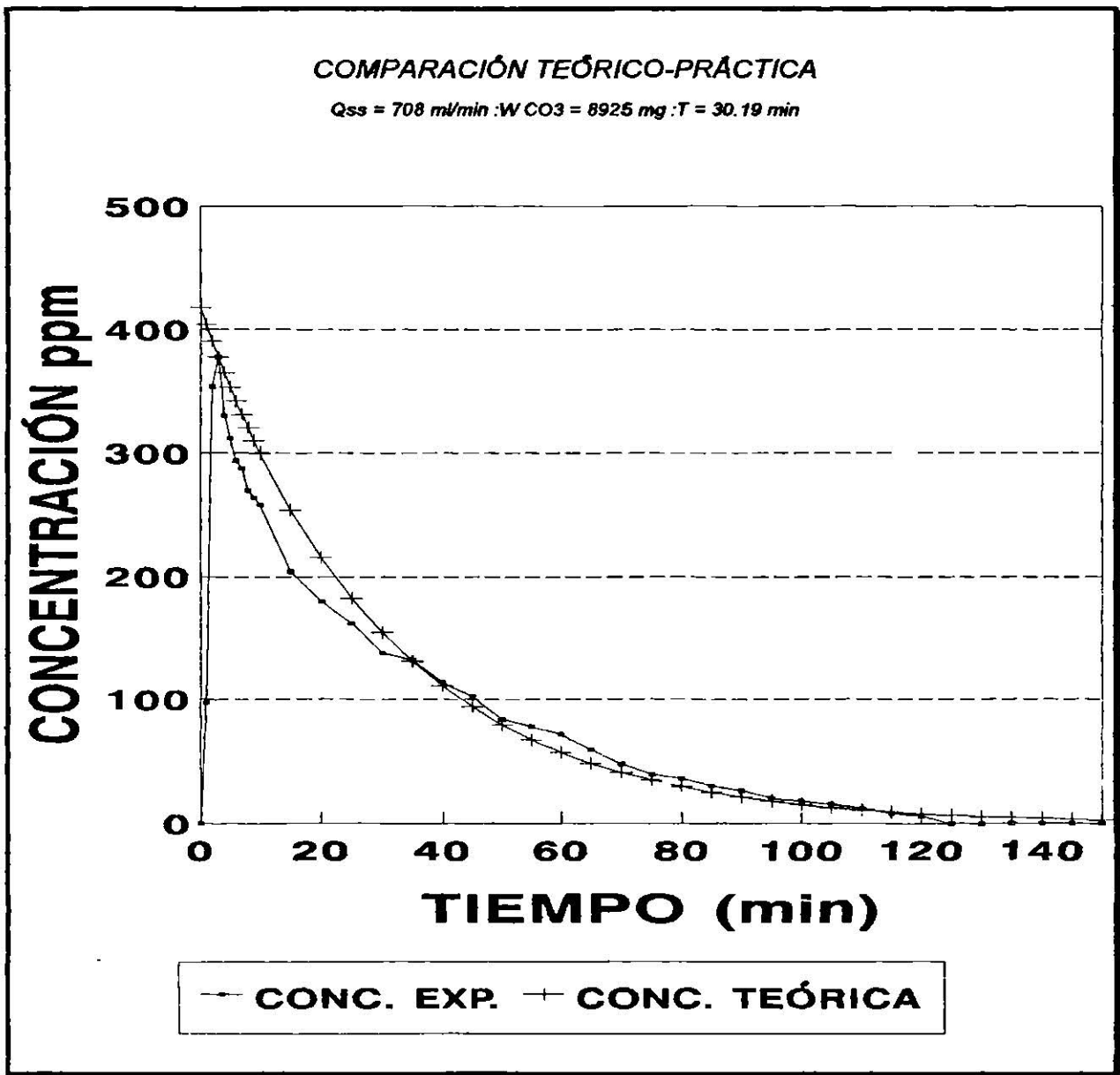


Fig. 4.5 COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA.

Por los resultados obtenidos se observa que los datos experimentales difieren poco en comparación con los teóricos, por lo que respecta al tiempo para que el sistema haya empezado a reaccionar (tiempo de retardo), éste tuvo un valor de 1 min, de tal manera que no afectó al tiempo de desarrollo de la práctica.

Para calcular el peso de CO₃²⁻ recuperado se calculó el área bajo la curva experimental por un método numérico, en éste caso Simpson 1/3, dando un valor de 11494.4 ppm*min y multiplicando por el gasto se obtiene que el peso de CO₃²⁻ recuperado = 8138.036 mg perdiéndose 786.964 mg. El sistema es de Parámetros Concentrados.

5 TANQUE SIMPLE DE ALMACENAMIENTO SISTEMAS DE PRIMER ORDEN

PRÁCTICA NO. 3

5.1 INTRODUCCIÓN

Al diseñar un sistema de control se debe poder predecir el comportamiento dinámico del sistema por un conocimiento de sus componentes. Una de las características más importantes del comportamiento dinámico de un sistema de control es la estabilidad tanto absoluta como la estabilidad relativa.

El sistema ésta compuesto por un tanque de almacenamiento de un fluido cualquiera y sus respectivas tuberías de alimentación y descarga, además de los parámetros ya conocidos (ganancia y constante de tiempo), intervienen dos nuevos parámetros, éstos son la resistencia y capacitancia fluidicas. El sistema descrito se muestra en la figura 5.1. Además de mostrar el sistema el tipo de estabilidad, también ilustra si el sistema es lineal o no-lineal.

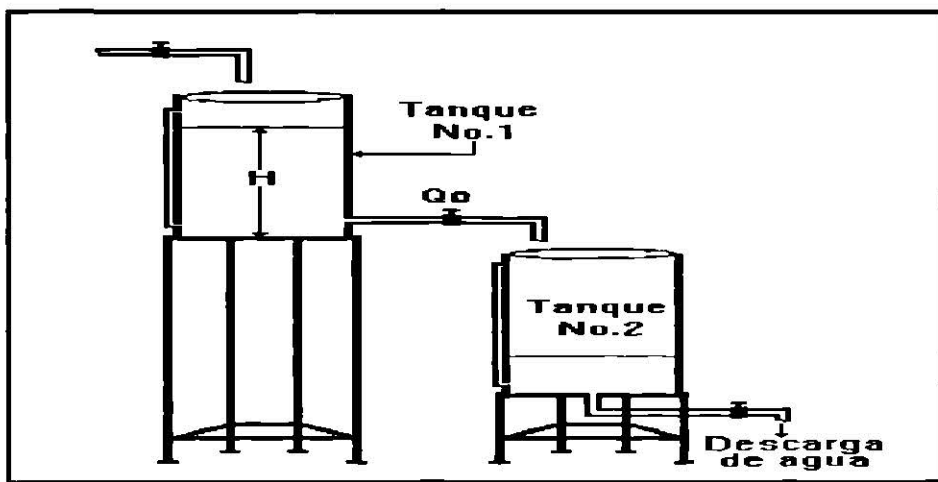


Fig. 5.1 DIAGRAMA DEL EQUIPO UTILIZADO.

5.2 CONCEPTOS BÁSICOS

a).- **RESISTENCIA FLUÍDICA.**- Es la resistencia al paso de fluido, necesaria para producir una variación unitaria en el gasto ó caudal.

b).- **CAPACITANCIA FLUÍDICA.**- Es la medida de la capacidad para almacenar un líquido acumulado en un tanque o recipiente, necesaria para producir una variación unitaria en la carga hidrostática.

c).- **DIFERENCIA ENTRE CAPACIDAD Y CAPACITANCIA.**- La capacitancia de un tanque es el área de sección recta, si ésta es constante, la capacitancia es constante para cualquier carga. La capacidad de un tanque es la capacidad que tiene para almacenar un volumen de cualquier líquido.

d).- **ESTABILIDAD ABSOLUTA.**- Un sistema tiene estabilidad absoluta, si estando en estado estacionario sufre un cambio en alguna entrada y es capaz de retomar un estado estacionario, que puede ser diferente al inicial.

e).- **ESTABILIDAD RELATIVA.**- Representa que tan cerca está el sistema de volverse inestable. Se mide como la distancia al eje imaginario del polo más cercano de la función característica y se relaciona con la complejidad de la respuesta.

f).- **SISTEMA LINEAL.**- Es aquel en que la relación entre su respuesta y el estímulo que la produce es una línea recta. Además, es válido el principio de superposición. Si no se cumple lo anterior, el sistema será **no-lineal**.

5.3 MODELO MATEMÁTICO

El desarrollo detallado del modelo matemático se encuentra en el Manual del Laboratorio de Control de Procesos, (Navarro y Escobante, 1990).

$$Q_i - Q_o = \frac{dV}{dt} \quad \text{Ecn. general del sistema (5.1)}$$

$$H(t) = A - Be^{-Tt} \quad \text{Ecn. de nivel en función del tiempo (5.2)}$$

donde:

$$A = K \cdot Q_{fss}$$

$$B = -K \cdot Q_{fss}$$

Las ecuaciones para obtener la resistencia y capacitancia fluidica son:

$$R_f = \frac{\rho g H_{fss}}{Q_{fss}} \quad \text{y} \quad C_f = \frac{A}{\rho g}$$

NOMENCLATURA

- H_{fss} = Altura final de estado estacionario (m)
- Q_{fss} = Gasto volumétrico final (m³/min)
- C_f = Capacitancia fluidica (m⁴ min² /kg)
- R_f = Resistencia fluidica (kg/m⁴ min)
- ρ = Densidad del fluido (kg/m³)
- g = Aceleración de la gravedad (m/seg²)
- T = Constante de tiempo (min)
- K = Ganancia (min/m²)
- t = Tiempo (min)

5.4 PROCEDIMIENTO DE LA PRÁCTICA

Para obtener los datos experimentales el procedimiento fué el siguiente:

- a).- Ajustar la apertura de la válvula de descarga a la magnitud deseada, posteriormente abrir la válvula de alimentación al gasto deseado.
- b).- Esperar a que se alcance el estado estacionario, posteriormente medir gasto y nivel.
- c).- Arrancar el cronómetro y aumentar la apertura del gasto de la válvula de entrada.
- d).- Leer el nivel del tanque a intervalos medidos hasta alcanzar el estado estacionario.
- e).- Medir las condiciones finales de nivel y gasto volumétrico.

Los datos experimentales obtenidos se muestran en la tabla 5.1

TABLA 5.1 ALTURAS EXPERIMENTALES	
TIEMPO (min)	ALTURA EXP. (cm)
0	0.00
1	4.80
2	10.10
3	16.50
4	20.30
5	24.00
6	26.90
7	29.60
8	31.20
9	33.40
10	34.30

Continuación de la tabla 5.1.

TIEMPO (min)	ALTURA EXP. (cm)
11	35.60
12	36.70
13	37.80
14	38.90
15	39.10
16	39.80
17	40.50
18	40.70
19	40.90
20	41.10
21	41.30
22	41.50
23	41.70
24	41.80
25	42.00
26	42.10
27	42.30
28	42.50
29	42.60
30	42.80
31	43.00
32	43.00
33	43.40
34	43.60
35	43.70

5.5 EFECTO DE LA CONSTANTE DEL TIEMPO

Para ver el efecto que tiene dicha constante, el procedimiento que se sigue es variar los valores de la misma a una ganancia (K) y gasto volumétrico (Qfss) definidos, sustituyéndolos en la ecuación 5.2. Tal efecto se observa en la figura 5.2.

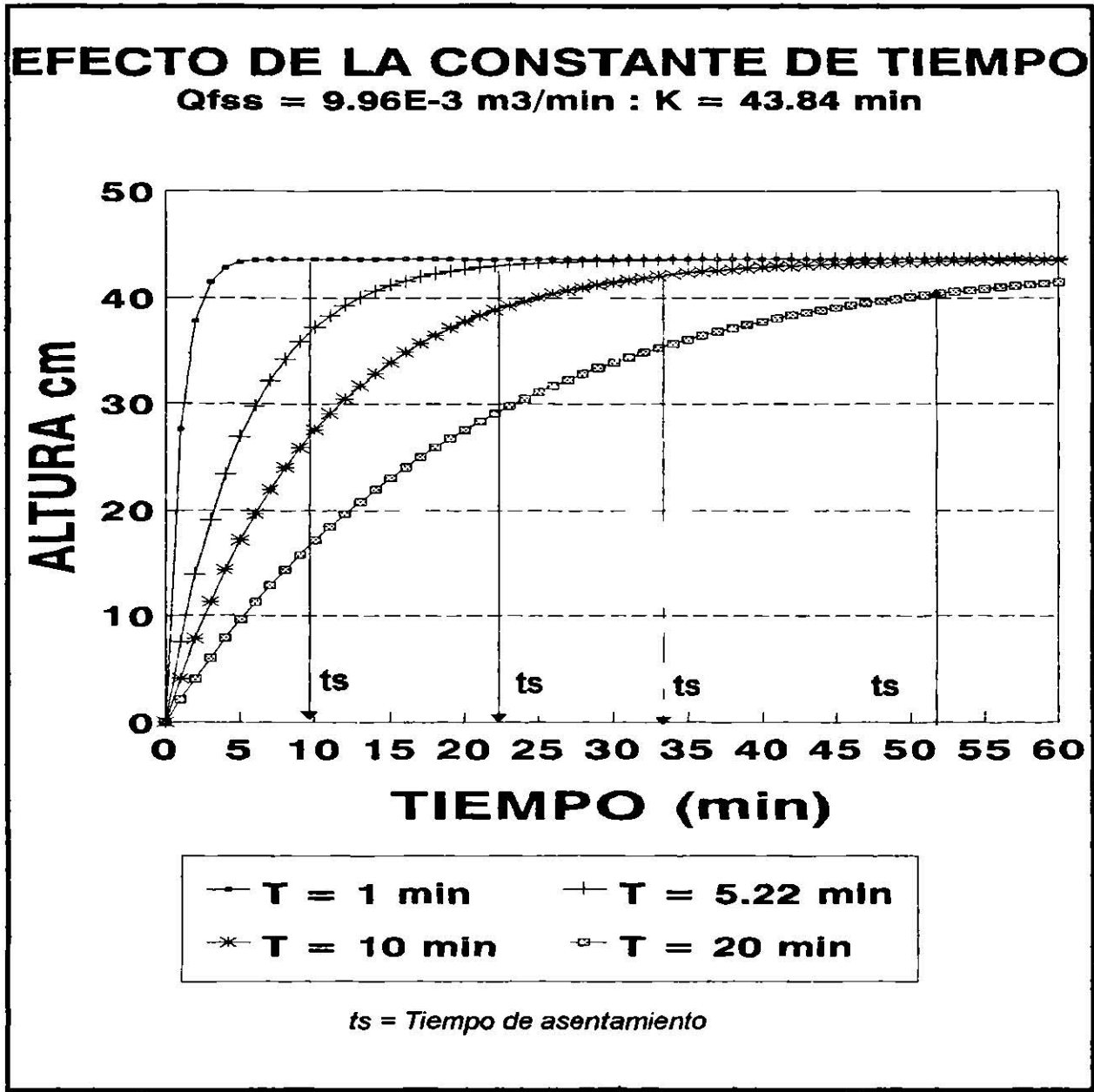


Fig. 5.2 EFECTO DE LA CONSTANTE DE TIEMPO.

De la figura anterior, se observa que al aumentar la constante de tiempo ocasiona que el sistema logre el estado estacionario con un tiempo de asentamiento mayor, (ts). Cabe notar que la altura final de estado estacionario, es la misma en los cuatro casos, por lo que el valor de la resistencia y capacitancia fluidica no es afectado.

5.6 EFECTO DE LA GANANCIA

Para observar el efecto de tal parámetro se hizo el procedimiento del punto anterior, alimentando distintos valores de éste parámetro, manteniendo constantes el gasto volumétrico final (Q_{fss}) y la constante de tiempo (T) a valores ya alimentados. Dicho efecto de tal parámetro se observa en la figura 5.3.

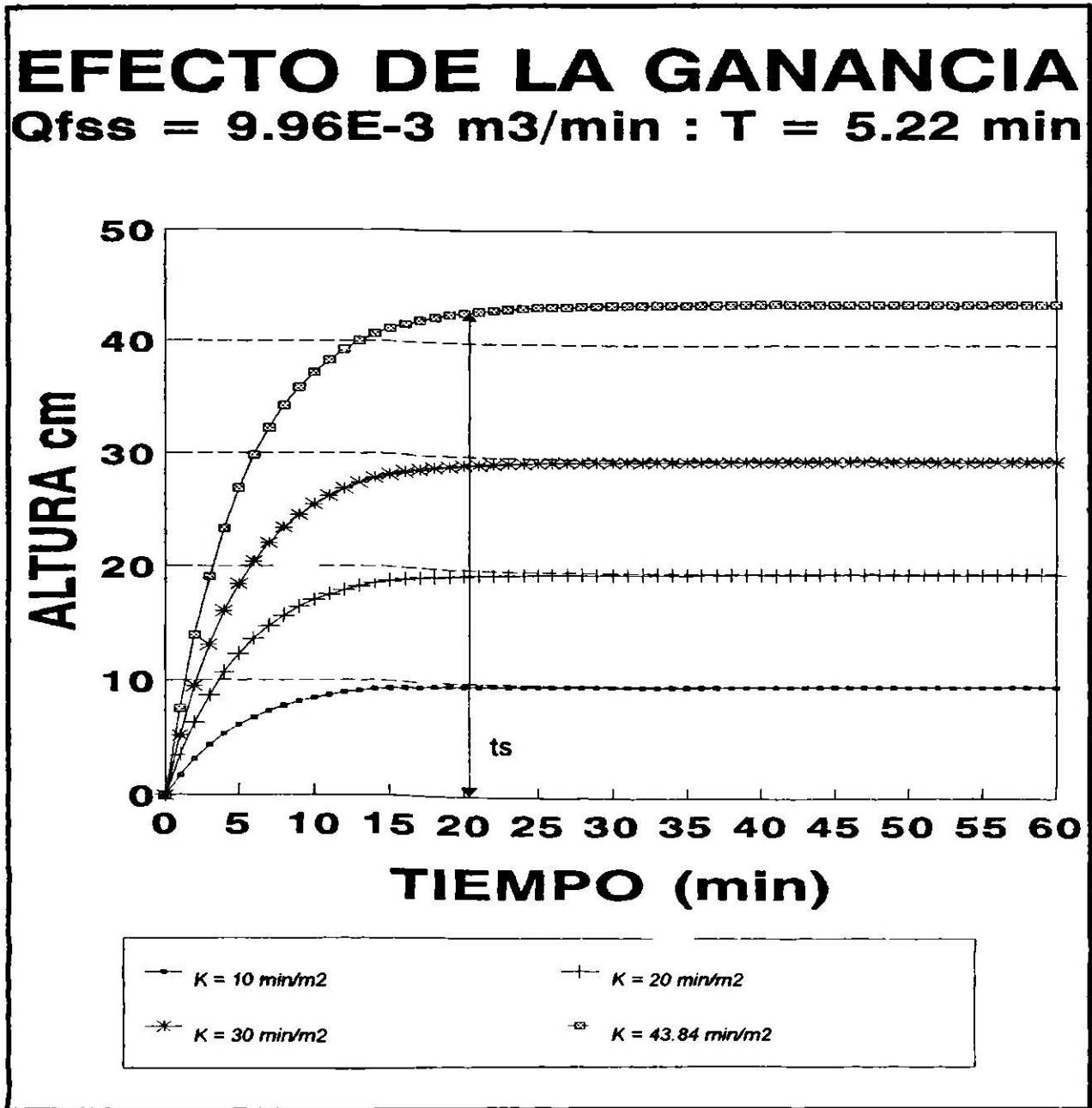


Fig. 5.3 EFECTO DE LA GANANCIA.

Se concluye que el efecto que ocasiona el aumento de la ganancia hace que la altura de estado estacionario también se incremente, y en consecuencia la resistencia fluidica aumenta. El tiempo para que se estabilice el sistema (t_s) es el mismo en todos los casos.

5.7 EFECTO DEL GASTO VOLUMÉTRICO FINAL

Para observar el efecto que tiene tal variable se siguió el mismo procedimiento de los puntos anteriores, permaneciendo fijos la constante de tiempo (T) y la ganancia (K) ya determinadas, por lo que ahora se alimentaron valores diferentes del gasto volumétrico final. Dicho efecto se observa en la figura 5.4.

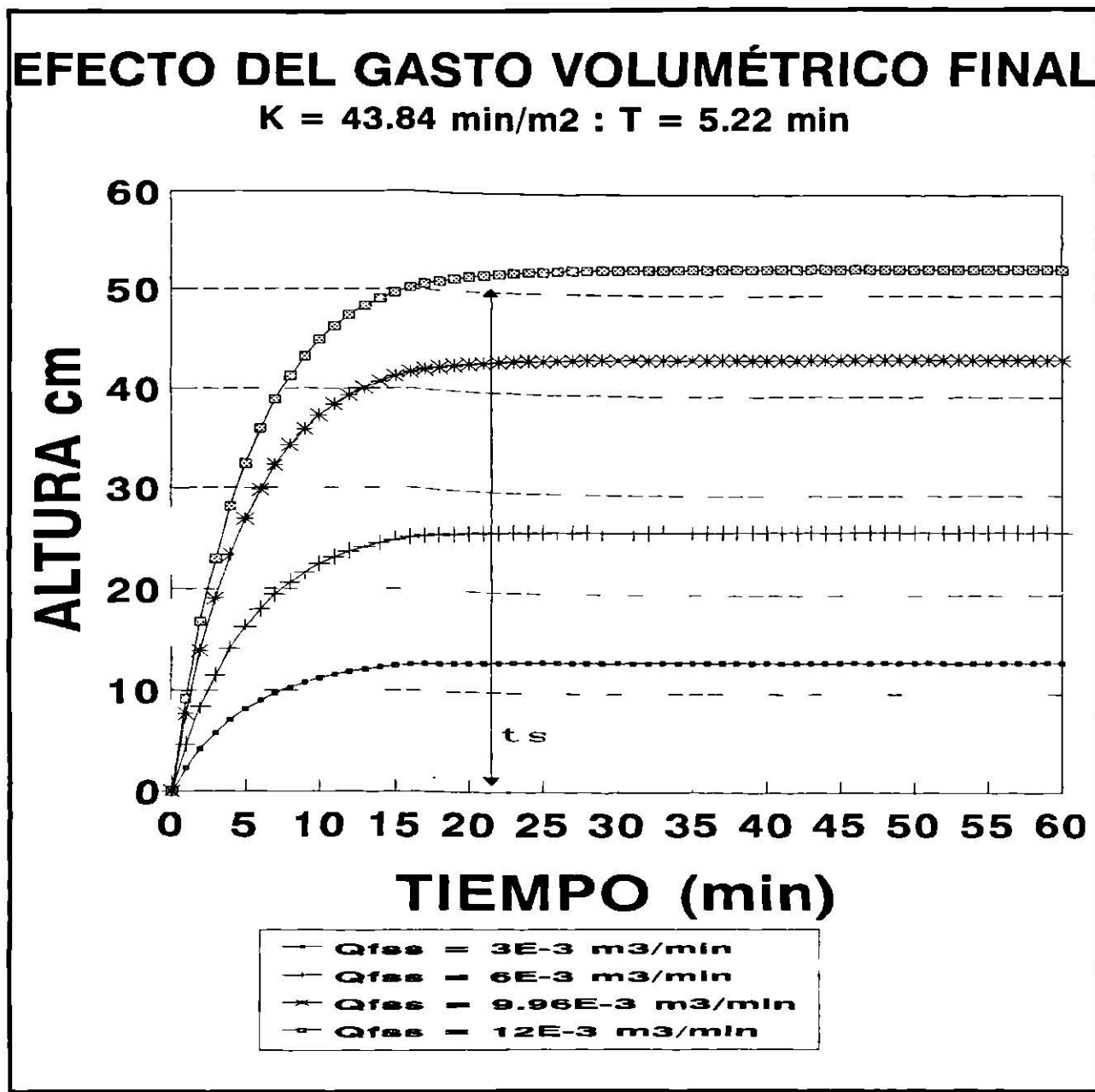


Fig. 5.4 EFECTO DEL GASTO VOLUMÉTRICO FINAL.

Como se observa, el efecto que produce el aumento del gasto ocasiona que la altura de estado estacionario sea mayor, pero la resistencia fluidica (R_f), el tiempo de asentamiento (t_s) y la capacitancia fluidica (C_f), son iguales en los cuatro sistemas.

5.8 COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA

Para calcular los datos teóricos se utilizan los datos experimentales de la sección 5.4 y haciendo los cálculos correspondientes para obtener primeramente los valores de $K = 43.84 \text{ min/m}^2$ (ganancia) y $T = 5.22 \text{ min}$ (constante de tiempo). Con éstos valores se calculan las constantes A y B , sustituyéndose en la ecuación 5.2. La tabla 5.2 presenta los datos experimentales y teóricos.

TABLA 5.2 ALTURAS TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES			
TIEMPO (min)	ALTURA EXP. (cm)	ALTURA TEÓ. (cm)	% DESVIACIÓN]
0	0.00	0.00	-
1	4.80	7.59	-58.12
2	10.10	13.86	-37.22
3	16.50	19.03	-15.33
4	20.30	23.31	-14.82
5	24.00	26.84	-11.83
6	26.90	29.75	-10.59
7	29.60	32.16	-8.64
8	31.20	34.15	-7.85
9	33.40	35.79	-7.15
10	34.30	37.14	-8.27
11	35.60	38.26	-7.47
12	36.70	39.19	-6.78
13	37.80	39.95	-5.68
14	38.90	40.58	-4.31
15	39.10	41.10	-5.11
16	39.80	41.53	-4.34
17	40.50	41.89	-3.43
18	40.70	42.18	-3.63
19	40.90	42.42	-3.71
20	41.10	42.62	-3.69
21	41.30	42.79	-3.60
22	41.50	42.92	-3.42
23	41.70	43.04	-3.21
24	41.80	43.13	-3.18
25	42.00	43.21	-2.88
26	42.10	43.27	-2.77
27	42.30	43.32	-2.41
28	42.50	43.37	-2.04
29	42.60	43.40	-1.87
30	42.80	43.43	-1.47
31	43.00	43.45	-1.04
32	43.00	43.47	-0.39
33	43.40	43.49	-0.20
34	43.60	43.50	-0.22
35	43.70	43.52	-0.41

Los datos de la tabla 5.2 son presentados gráficamente en la figura 5.5.

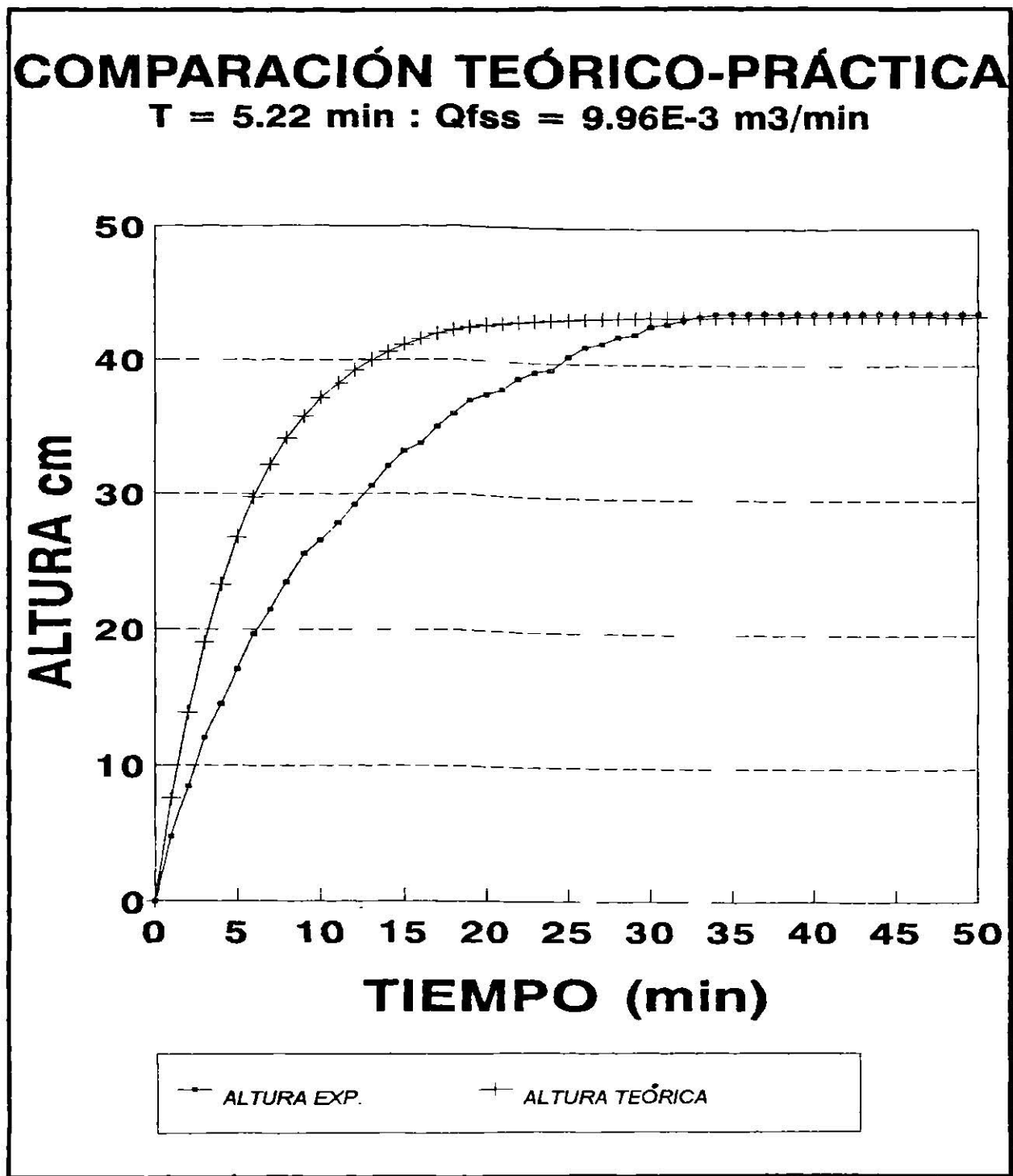


Fig. 5.2 GRÁFICA TEÓRICO-PRÁCTICA.

Para el experimento efectuado, como se observa, existe una similitud entre los datos teóricos y experimentales. Cabe señalar que en éste caso por la figura de la gráfica el sistema es no-lineal y que siempre tendrá estabilidad absoluta, ya que al variar el gasto o la apertura de una de las válvulas; éste obtendrá el estado estacionario con variables distintas (altura y tiempo).

6 TANQUES EN CASCADA

SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN,

PRÁCTICA No. 4

6.1 INTRODUCCIÓN

En muchos sistemas de segundo orden, la respuesta transitoria de un sistema de control real frecuentemente presenta movimientos alternativos de baja intensidad (oscilaciones amortiguadas) antes de alcanzar el estado estacionario. Al especificar las características de respuesta transitoria de un sistema de control a una entrada con una señal constante aplicada súbitamente al sistema en el instante en que el tiempo es cero (entrada escalón unitario), es habitual encontrar los gráficos de las figuras 6.1a y 6.1b, en donde también se especifica lo siguiente:

- 1.- Tiempo de retardo, t_d
- 2.- Tiempo de crecimiento, t_r
- 3.- Tiempo pico, t_p
- 4.- Tiempo de establecimiento, t_s
- 5.- Máximo sobreimpulso, M_p

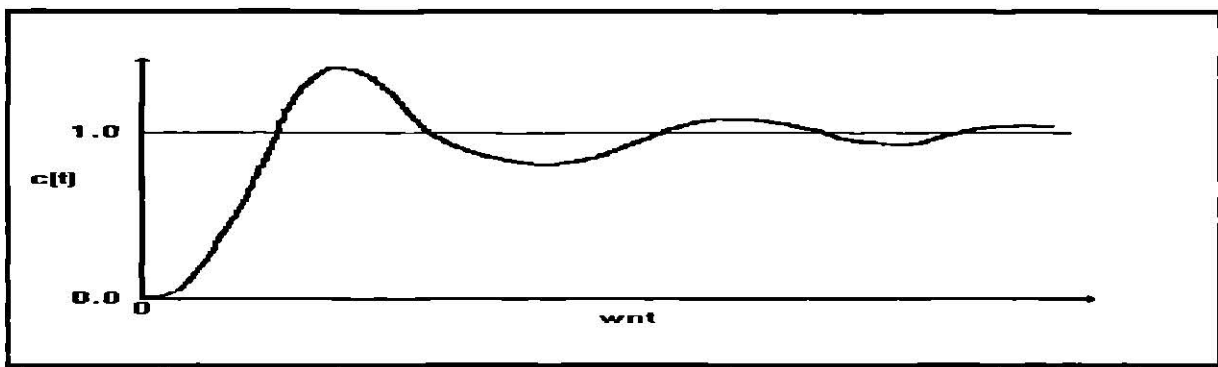


Fig. 6.1a. RESPUESTA TEÓRICA A UN ESCALÓN DE UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN SUBAMORTIGUADO.

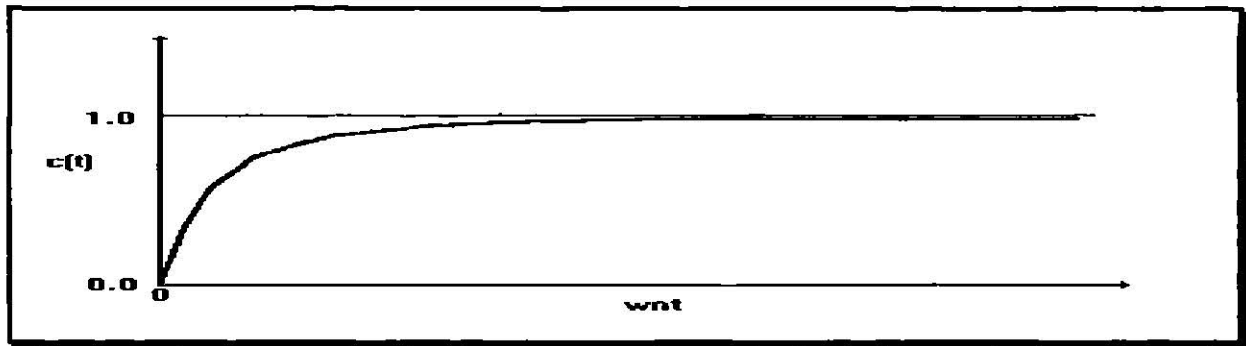


Fig. 6.1b. RESPUESTA TEÓRICA A UN ESCALÓN DE UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN SOBREAMORTIGUADO.

En éste tipo de sistemas se encuentran dos parámetros hasta ahora desconocidos, w_n que es la frecuencia natural no-amortiguada y ξ que es la razón de amortiguamiento. De acuerdo al valor de éste último, los sistemas se clasifican como:

- 1.- $\xi = 0$, **sin amortiguamiento.**
- 2.- $0 < \xi < 1$, **sub-amortiguado.**
- 3.- $\xi = 1$, **críticamente amortiguado.**
- 4.- $\xi > 1$, **sobreamortiguado.**

Esta práctica presenta como ejemplo un sistema de segundo orden, formado por dos tanques de almacenamiento simple, con una entrada del fluido y su salida a través de una válvula. Como se observa en las figuras respectivas, el sistema de tanques en cascada está formado por dos sistemas de primer orden en serie, por lo que el modelo resultante será de segundo orden. En ésta práctica se pueden trabajar los tanques en cascada **con interacción** (figura 6.2), ó **sin interacción** (figura 6.3). En los tanques en cascada con interacción la función de transferencia del sistema no es simplemente el producto de dos funciones de transferencia de primer orden.

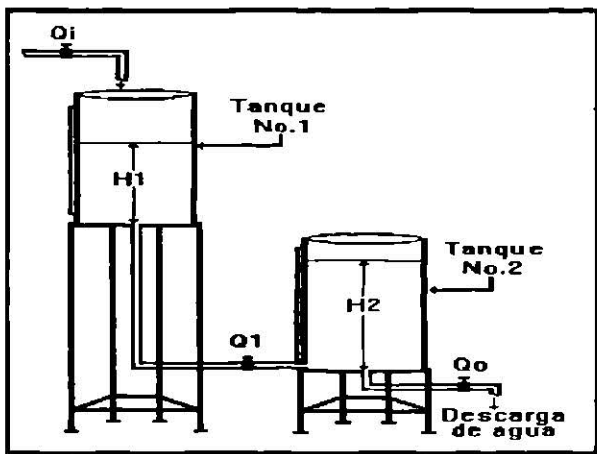


Fig. 6.2 TANQUES EN CASCADA CON INTERACCIÓN

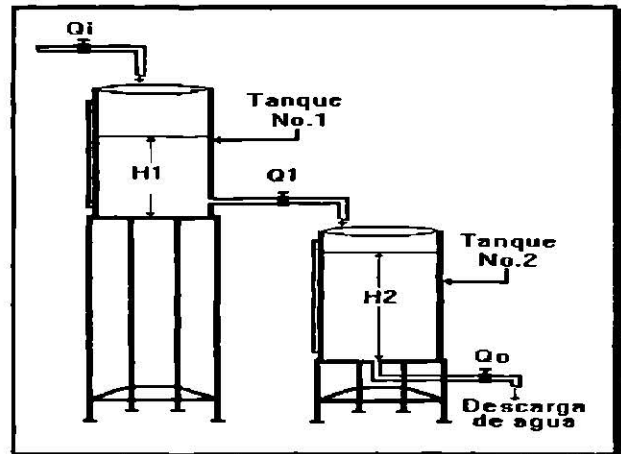


Fig. 6.3 TANQUES EN CASCADA SIN INTERACCIÓN

6.2 CONCEPTOS BÁSICOS

- a).- **RAZÓN DE AMORTIGUAMIENTO.**- Este parámetro es un indicador de la cantidad de amortiguamiento, a mayor amortiguamiento respuesta más lenta y oscilaciones menos pronunciadas cuando existan estas.
- b).- **FRECUENCIA NATURAL NO AMORTIGUADA.**- Es la frecuencia con que oscila la respuesta si no hay amortiguamiento ($\xi = 0$).
- c).- **FRECUENCIA NATURAL AMORTIGUADA.**- Es la frecuencia con que oscila la respuesta si hay amortiguamiento ($\xi \neq 0$).
- d).- **CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN DE ACUERDO AL VALOR DE LA RAZÓN DE AMORTIGUAMIENTO (ξ)**
- 1.- $\xi = 0$; **sin amortiguamiento**, la respuesta es armónica simple.
 - 2.- $0 < \xi < 1$, **sub-amortiguado**, la respuesta consiste en oscilaciones que decrecen en amplitud.
 - 3.- $\xi = 1$; **críticamente amortiguado**, la respuesta carece de oscilaciones.
 - 4.- $\xi > 1$; **sobreamortiguado**, la respuesta carece de oscilaciones como en 3 pero es más amortiguada (más lenta).
- e).- **PARÁMETROS DE LA RESPUESTA ESCALÓN DE UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN**
- 1.- t_r , **tiempo de elevación**, es el tiempo requerido para que la respuesta pase del 0% al 100% (sub-amortiguado) ó del 10% al 90% (sobreamortiguado) del valor final del estado estacionario.
 - 2.- t_p , **tiempo pico**, es el tiempo requerido para que se alcance el primer pico (sub-amortiguado).
 - 3.- M_p , **máximo sobretiro**, es el valor máximo de la respuesta del sistema, ocurre en el tiempo pico, puesto que las oscilaciones decrecen en amplitud.
 - 4.- t_s , **tiempo de asentamiento**, es el tiempo necesario para que la respuesta del sistema se mantenga alrededor del valor de estado estacionario dentro de una banda de 2% ó 5% del valor del mismo.
 - 5.- t_d , **tiempo de retraso**, es el tiempo requerido para alcanzar el 50% del valor de estado estacionario.

A.- TANQUES EN CASCADA CON INTERACCIÓN

6.1A MODELO MATEMÁTICO

El desarrollo del modelo matemático se encuentra detallado en el Manual del Laboratorio de Control de Procesos (Navarro y Escalante, 1990).

$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{Q_f - K_1\sqrt{H_1}}{A} \quad \text{Ecn. diferencial del tanque No. 1 (6.1a)}$$

$$\frac{dH_2}{dt} = \frac{K_1\sqrt{H_1} - K_2\sqrt{H_2}}{A} \quad \text{Ecn. diferencial del tanque No. 2 (6.1b)}$$

donde:

$$K_1 = \frac{Q_f}{\sqrt{H_1}} \quad \text{y} \quad K_2 = \frac{Q_f}{\sqrt{H_2}}$$

$$H(t)_{\text{global}} = A + B e^{-cte_1 t} + C e^{-cte_2 t} \quad \text{Ecn. global de respuesta de ambos tanques (6.1c)}$$

NOMENCLATURA

K_1 = Constante de la válvula del tanque No. 1 ($m^{2.5}/min$)

K_2 = Constante de la válvula del tanque No. 2 ($m^{2.5}/min$)

H_1 = Altura final estacionaria del tanque No. 1 (m)

H_2 = Altura final estacionaria del tanque No. 2 (m)

Q_f = Gasto volumétrico final (m^3/min)

D = Densidad del fluido (kg/m^3)

Cte_1, Cte_2 = Constantes (min)

A, B, C = Constantes (m)

A = Área del tanque (m^2)

6.2A PROCEDIMIENTO DE LA PRÁCTICA

La metodología con la cual se obtuvieron los datos experimentales fué:

- a).- Ajustar la apertura de la válvula de descarga.
- b).- Abrir la válvula de alimentación hasta el gasto deseado.
- c).- Esperar a que se alcance el estado estacionario.
- d).- Medir las condiciones iniciales de estado estacionario, tales como niveles y gasto.
- e).- Aumentar la apertura de la válvula de entrada.
- f).- Leer el nivel de ambos tanques a intervalos medidos.
- g).- Mantener el gasto constante y continuar anotando los niveles hasta que se alcance el estado estacionario.
- h).- Medir las condiciones finales de estado estacionario, tales como niveles y gasto.

Los datos obtenidos se muestran en la tabla 6.1.

TABLA 6.1 DATOS EXPERIMENTALES		
$Q_i = 13E-03$ m^3/min	$Q_f = 13.8E-03$ m^3/min	$H_1 = 0.984$ m $H_2 = 1.139$ m
TIEMPO (min)	H_1 exp. (cm)	H_2 exp. (cm)
0	27.00	39.00
5	45.30	46.10
10	61.70	56.60
15	70.20	64.60
20	75.90	70.80
25	83.40	76.30
30	87.60	81.10
35	89.60	85.90
40	91.40	90.20
45	93.70	94.20
50	94.90	97.10
55	95.90	101.20
60	96.10	104.50
65	96.80	106.30
70	97.30	108.10
75	98.20	110.00
80	98.30	115.50
85	98.40	112.00
90	98.40	112.80
95	98.40	113.20
100	98.40	113.50
105	98.40	113.70
110	98.40	113.90
115	98.40	113.90
120	98.40	113.90

6.3A EFECTO DEL ÁREA DEL TANQUE

El efecto que produce la variación del área en la respuesta global del sistema se observa en la figura 6.4, en donde se hacen los cálculos respectivos para encontrar los valores de las constantes involucradas en la ecuación 6.1c.

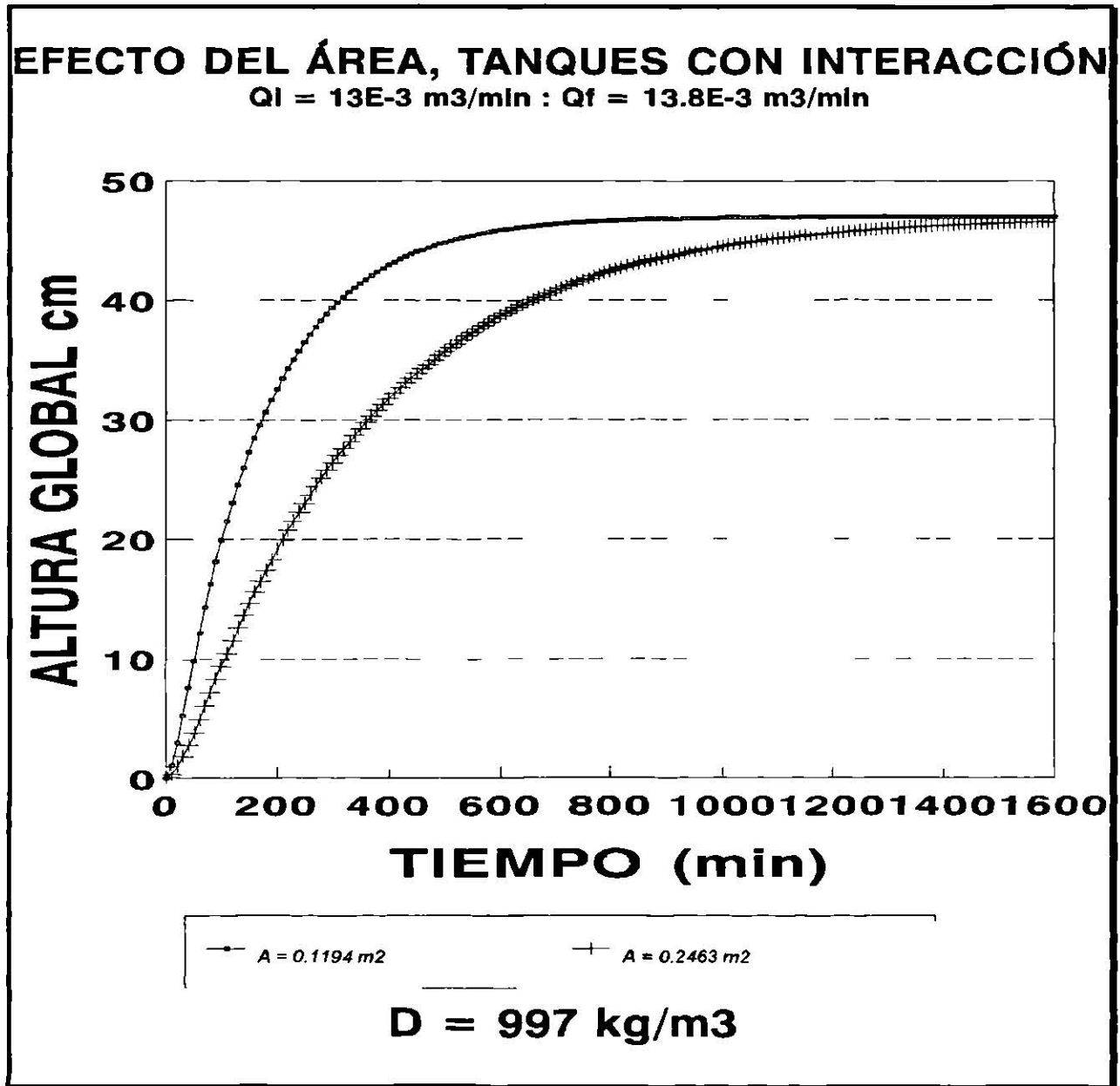


Fig. 6.4. EFECTO DEL ÁREA DEL TANQUE CON INTERACCIÓN.

Como se observa en la figura, a mayor área, el tiempo de elevación (t_r), el tiempo de retraso (t_d) y la razón de amortiguamiento (ξ) aumentan, además la altura global del sistema es la misma en ambos casos.

6.4A EFECTO DEL GASTO VOLUMÉTRICO FINAL (CAMBIO ESCALÓN)

Se hace el procedimiento del punto anterior, dicho efecto se observa gráficamente en la figura 6.5.

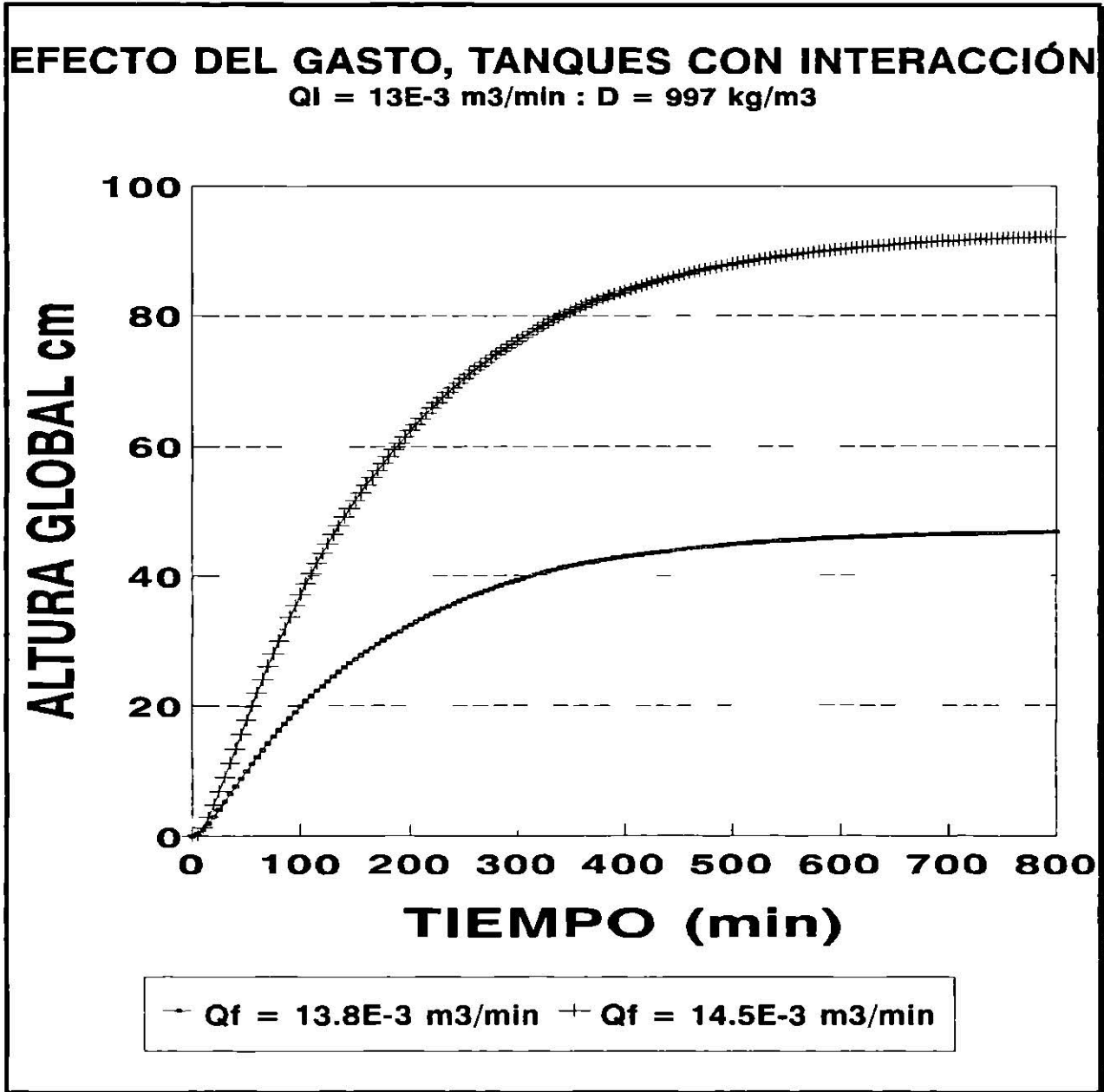


Fig. 6.5. EFECTO DEL GASTO (CAMBIO ESCALÓN) CON INTERACCIÓN.

Por lo anterior se observa que a mayor gasto, mayor es la altura global del sistema, por lo que el tiempo de asentamiento (t_s), el tiempo de elevación (t_r) y el tiempo de retraso (t_d) permanecen constante, es decir, no son afectados por la variación del gasto final. La razón de amortiguamiento es la misma en ambos casos.

6.5A COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA

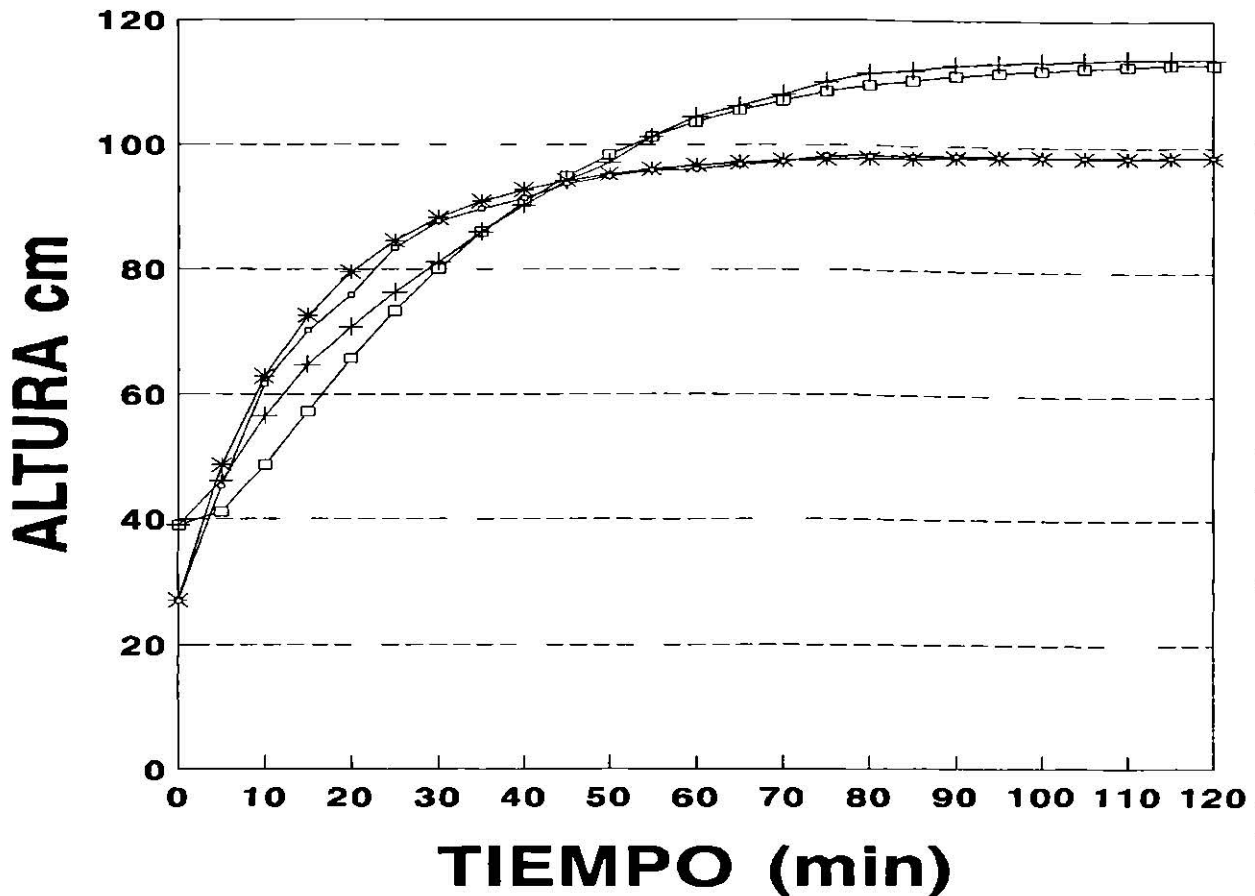
Para obtener las alturas teóricas se utilizan los datos de la sección 6.2A y se calculan las constantes K y K_1 , se sustituyen en las ecuaciones 6.1a y 6.2a, posteriormente se resuelven por un método numérico, en éste caso Runge-Kutta para 2 ecuaciones. Se escogió éste método ya que además de ser clásico, proporciona una exactitud excelente y es relativamente fácil de programar. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 6.2.

TABLA 6.2 COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA						
$Q_i = 13E-03 \text{ m}^3/\text{min}$		$Q_f = 13.8E-03 \text{ m}^3/\text{min}$		$H_1 = 0.984 \text{ m}$		$H_2 = 1.139 \text{ m}$
TIEMPO (min)	$H_1 \text{ exp. (cm)}$	$H_2 \text{ exp. (cm)}$	$H_1 \text{ teó. (cm)}$	$H_2 \text{ teó. (cm)}$	% DESVIACIÓN ₁	% DESVIACIÓN ₂
0	27.00	39.00	27.00	39.00	0.00	0.00
5	45.30	46.10	48.67	41.16	-7.43	10.71
10	61.70	56.60	62.82	48.62	-1.81	14.09
15	70.20	64.60	72.58	57.27	-3.34	11.34
20	75.90	70.80	79.51	65.67	-4.75	7.24
25	83.40	76.30	84.50	73.31	-1.31	3.91
30	87.60	81.10	88.14	80.03	-0.61	1.31
35	89.60	85.90	90.80	85.82	-1.33	0.09
40	91.40	90.20	92.76	90.75	-1.48	-0.60
45	93.70	94.20	94.21	94.91	-0.54	-0.75
50	94.90	97.10	95.29	98.38	-0.41	-1.31
55	95.90	101.20	96.08	101.26	-0.18	-0.06
60	96.10	104.50	96.68	103.64	-0.60	0.82
65	96.80	106.30	97.12	105.59	-0.33	0.66
70	97.30	108.10	97.44	107.20	-0.14	0.83
75	98.20	110.00	97.69	108.50	0.51	1.36
80	98.30	111.50	97.87	109.56	0.43	1.73
85	98.40	112.00	98.00	110.42	0.40	1.41
90	98.40	112.80	98.10	111.12	0.30	1.48
95	98.40	113.20	98.18	111.68	0.22	1.34
100	98.40	113.50	98.24	112.13	0.16	1.20
105	98.40	113.70	98.28	112.49	0.12	1.06
110	98.40	113.90	98.31	112.78	0.09	0.98
115	98.40	113.90	98.33	113.01	0.07	0.78
120	98.40	113.90	98.33	113.01	0.07	0.78

Los datos de la tabla 6.2 se muestran gráficamente en la figura 6.6

COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA

$Q_i = 13E-3 \text{ m}^3/\text{min} : Q_f = 13.8E-3 \text{ m}^3/\text{min}$



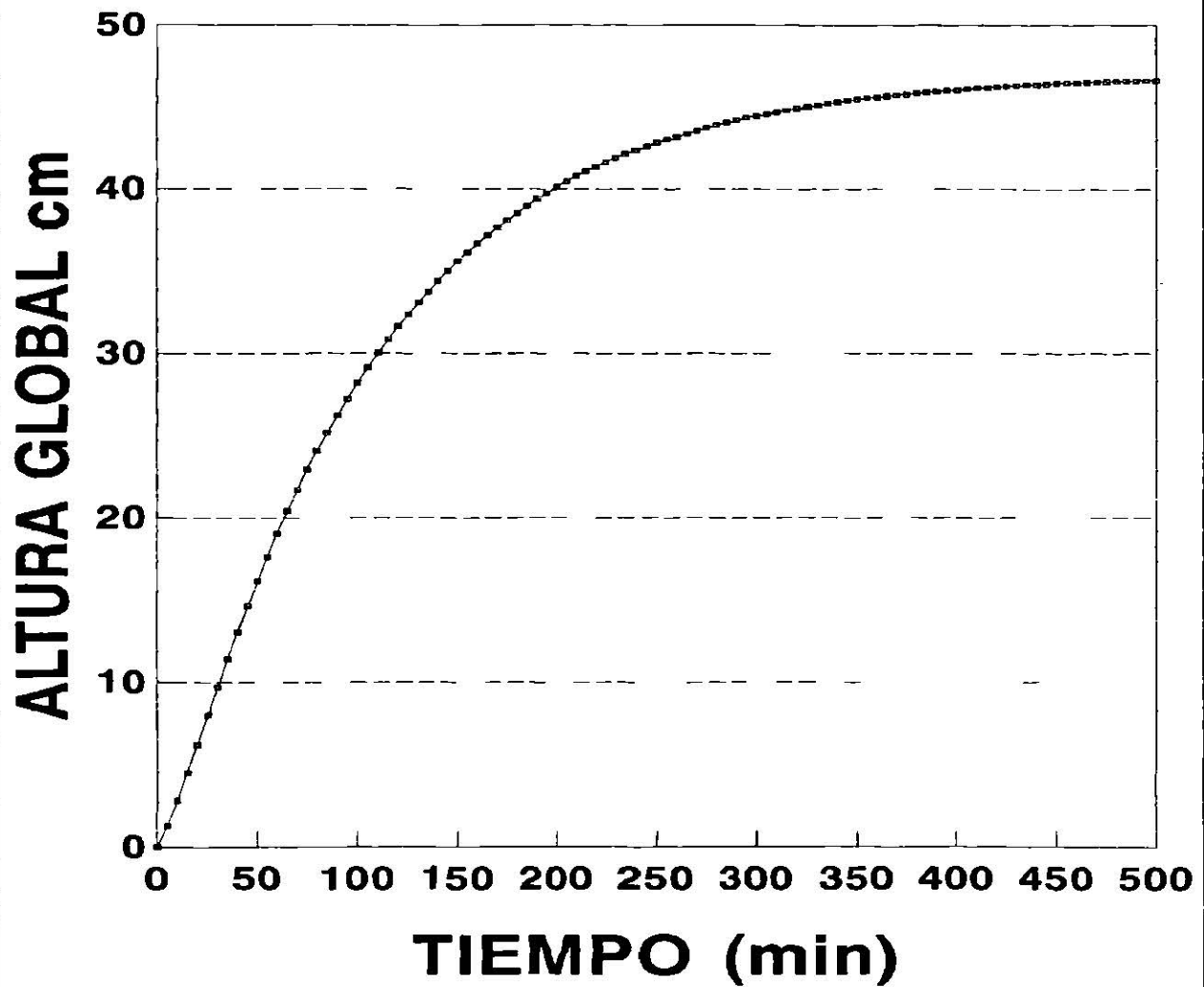
○ H1 EXP. (TANQUE 1) + H2 EXP. (TANQUE 2)
* H1 TEÓ. (TANQUE 1) □ H2 TEÓ. (TANQUE 2)

$D = 997 \text{ kg/m}^3 : H1_{ss} = 0.984 \text{ m} : H2_{ss} = 1.139 \text{ m}$

Fig. 6.6 COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA.

Para obtener la curva de respuesta global del sistema y por ende el tipo correspondiente según la razón de amortiguamiento, se calculan los valores de las constantes A, B, C, Cte_1 y Cte_2 , posteriormente se sustituyen en la ecuación 6.1c. Dicha curva se muestra en la figura 6.7.

TANQUES EN CASCADA CON INTERACCIÓN ALTURA GLOBAL DEL SISTEMA (2 TANQUES)



— ALTURA GLOBAL

$Q_i = 13E-3 \text{ m}^3/\text{min} : Q_f = 13.8E-3 \text{ m}^3/\text{min}$

Fig. 6.7 RESPUESTA GLOBAL DEL SISTEMA CON INTERACCIÓN.

Como se observa en la figura 6.7 dada la forma de la curva, el sistema se clasifica como sobreamortiguado, careciendo de oscilaciones.

B.- TANQUES EN CASCADA SIN INTERACCIÓN

6.1B MODELO MATEMÁTICO

El desarrollo del modelo matemático se encuentra detallado en el manual del Laboratorio de Control de Procesos (Navarro y Escalante 1990). En éste caso se utilizan las ecuaciones 6.1a y 6.1b, pero se obtiene una ecuación diferente de la respuesta global de ambos tanques (del sistema).

$$H(t)_{\text{global}} = A + B e^{-t/T_1} + C e^{-t/T_2} \quad \text{Ecn. global de respuesta de ambos tanques (6.1b)}$$

NOMENCLATURA

A,B,C = Constantes (m)

T_1, T_2 = Constantes de tiempo del tanque 1 y 2 respectivamente.

6.2B PROCEDIMIENTO DE LA PRÁCTICA

La metodología para obtener los datos experimentales es la misma que en el punto 6.2A, en la tabla 6.3 se muestran tales datos.

TABLA 6.2 COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA		
$Q_i = 8.5E-03$ m^3/min	$Q_f = 9.1E-03$ m^3/min	$H_1 = 0.401$ m $H_2 = 0.501$ m
TIEMPO (min)	H_1 exp. (cm)	H_2 exp. (cm)
0	25.70	30.50
5	30.30	32.80
10	32.90	35.10
15	34.70	37.20
20	36.60	39.60
25	37.50	42.20
30	37.80	43.80
35	38.10	44.50
40	38.40	45.10
45	38.70	46.20
50	39.00	46.90
55	39.40	47.30
60	39.70	47.70

Continuación de la tabla 6.3.

TIEMPO (min)	H ₁ exp. (cm)	H ₂ exp. (cm)
65	39.90	47.90
70	40.10	48.10
75	40.10	48.40
80	40.10	48.70
85	40.10	48.90
90	40.10	49.30
95	40.10	49.60
100	40.10	49.80
105	40.10	50.00
110	40.10	50.20
115	40.10	50.30
120	40.10	50.30

6.3B EFECTO DEL ÁREA DEL TANQUE

Para ver dicho efecto en la respuesta global se calculan las constantes respectivas para cada área de la ecuación 6.1b, esto se observa gráficamente en la figura 6.8.

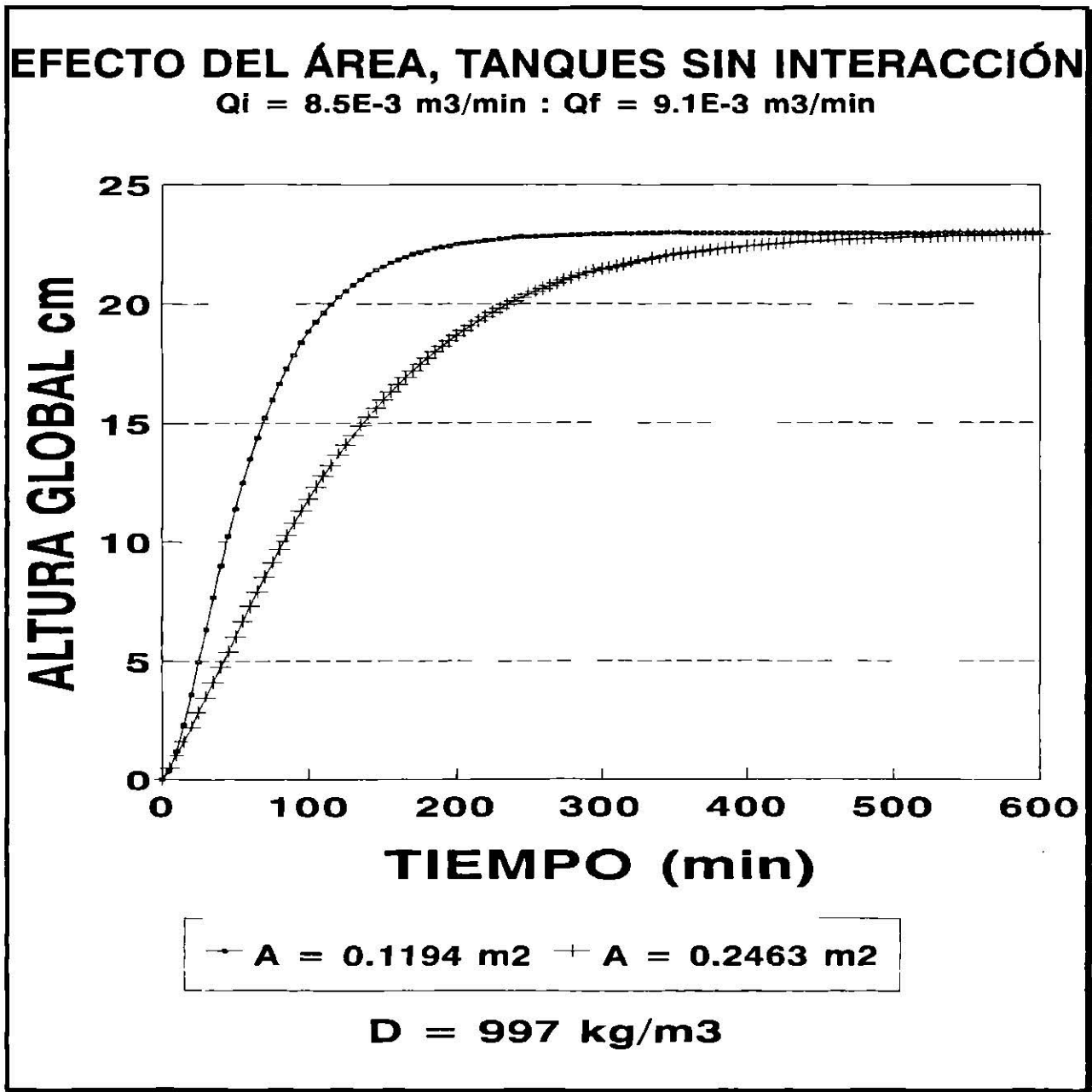


Fig. 6.8 EFECTO DEL ÁREA DEL TANQUE SIN INTERACCIÓN.

Por la figura anterior se observa que a mayor área mayor es el tiempo de asentamiento (t_s), mayor tiempo de elevación (t_r), mayor tiempo de retraso (t_d) y mayor razón de amortiguamiento (ξ). La altura final del sistema es la misma en ambos casos.

6.4B EFECTO DEL GASTO VOLUMÉTRICO (CAMBIO ESCALÓN)

Se hace el mismo procedimiento del punto anterior, tal efecto se observa en la figura 6.9.

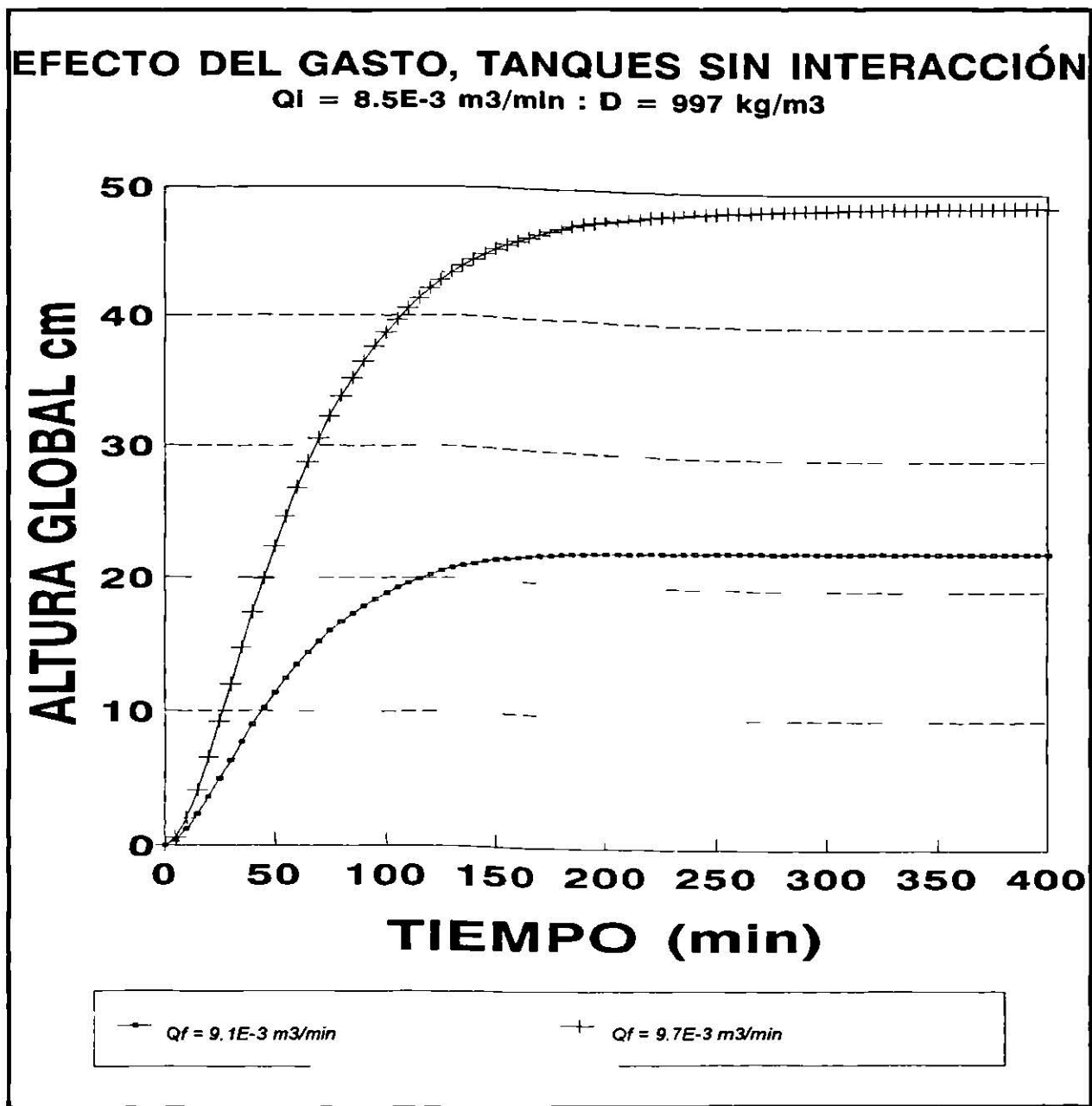


Fig. 6.9 EFECTO DEL GASTO (CAMBIO ESCALÓN) SIN INTERACCIÓN.

Por la figura anterior se observa que a mayor gasto volumétrico mayor es la altura final del sistema, pero el tiempo de elevación (t_r), el tiempo de asentamiento (t_s), el tiempo de retraso (t_d) y la razón de amortiguamiento (ξ) tienen el mismo valor en ambos casos; es decir; no influye en éstas variables.

6.5B COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA

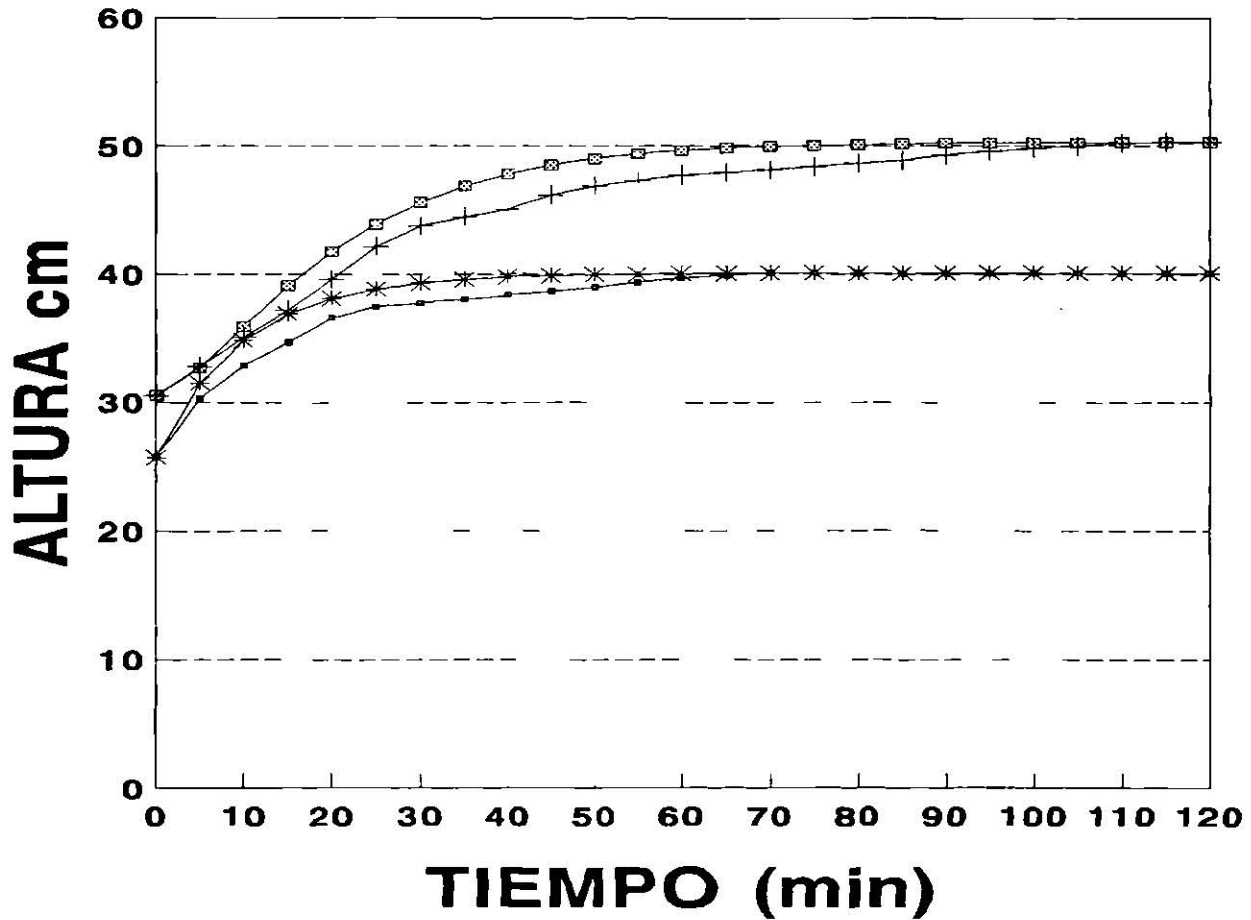
La metodología para obtener los datos teóricos es la misma que en el punto 6.5A, en la tabla 6.4 se muestran tales datos.

TABLA 6.4 COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA						
$Q_i = 8.5E-03 \text{ m}^3/\text{min}$		$Q_f = 9.1E-03 \text{ m}^3/\text{min}$		$H_1 = 0.401 \text{ m}$		$H_2 = 0.503 \text{ m}$
TIEMPO (min)	$H_1 \text{ exp. (cm)}$	$H_2 \text{ exp. (cm)}$	$H_1 \text{ teó.. (cm)}$	$H_2 \text{ teó. (cm)}$	% DESVIACIÓN ₁	% DESVIACIÓN ₂
0	25.70	30.50	25.70	30.50	0.00	0.00
5	30.30	32.80	31.49	32.70	-3.92	3.99
10	32.90	35.10	34.86	35.96	-5.95	-2.45
15	34.70	37.20	36.89	39.12	-6.31	-5.16
20	36.60	39.60	38.12	41.80	-4.15	-5.55
25	37.50	42.20	38.87	43.95	-3.65	-4.14
30	37.80	43.80	39.34	45.62	-4.07	-4.15
35	38.10	44.50	39.63	46.89	-4.01	-5.37
40	38.40	45.10	39.81	47.83	-3.67	-6.05
45	38.70	46.20	39.92	48.52	-3.15	-5.02
50	39.00	46.90	39.99	49.03	-2.93	-4.54
55	39.40	47.30	40.03	49.40	-1.59	-4.43
60	39.70	47.70	40.06	49.66	-0.90	-4.10
65	39.90	47.90	40.07	49.85	-0.42	-4.07
70	40.10	48.10	40.08	49.98	0.05	-3.90
75	40.10	48.40	40.09	50.08	0.02	-3.47
80	40.10	48.70	40.09	50.14	0.02	-2.95
85	40.10	48.90	40.10	50.19	0.00	-2.63
90	40.10	49.30	40.10	50.22	0.00	-1.86
95	40.10	49.60	40.10	50.25	0.00	-1.31
100	40.10	49.80	40.10	50.26	0.00	-0.92
105	40.10	50.00	40.10	50.27	0.00	-0.54
110	40.10	50.20	40.10	50.28	0.00	-0.15
115	40.10	50.30	40.10	50.29	0.00	0.02
120	40.10	50.30	40.10	50.29	0.00	0.02

Los datos de la tabla 6.4 son presentados gráficamente en la figura 6.10.

COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA

$$Q_i = 8.5E-3 \text{ m}^3/\text{min} : Q_f = 9.1E-3 \text{ m}^3/\text{min}$$



—●— H1 EXP. (TANQUE 1) + H2 EXP. (TANQUE 2)
 * H1 TEÓ. (TANQUE 1) ◻ H2 TEÓ. (TANQUE 2)

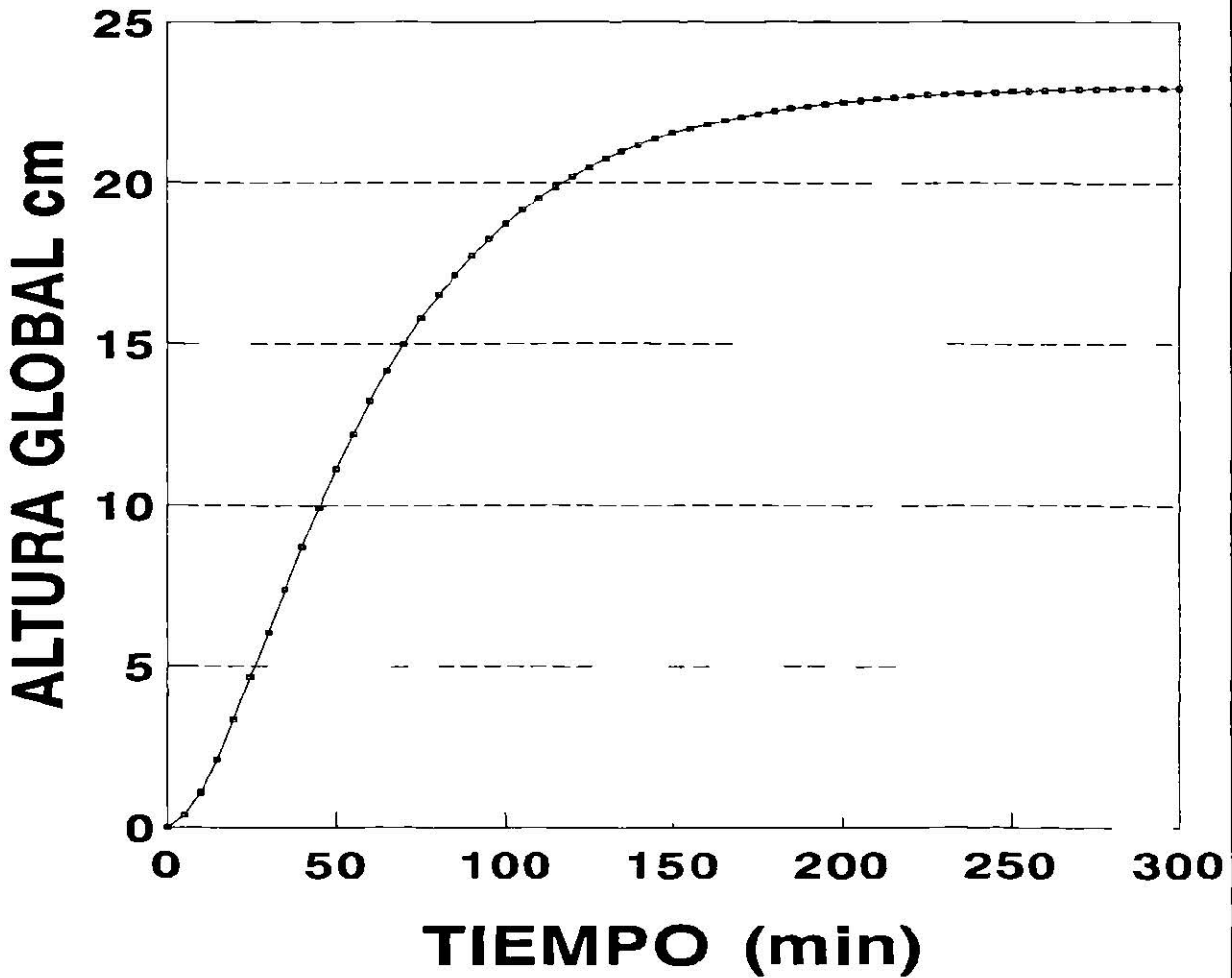
$$D = 997 \text{ kg/m}^3 : H_{1ss} = 0.401\text{m} : H_{2ss} = 0.501\text{m}$$

Fig. 6.10 COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA.

Se hacen los cálculos correspondientes para encontrar los valores de las constantes de la ecuación 6.1b y se obtiene la respuesta global del sistema, los datos calculados se muestran gráficamente en la figura 6.11.

TANQUES EN CASCADA SIN INTERACCIÓN

RESPUESTA GLOBAL DEL SISTEMA (2 TANQUES)



$Q_i = 8.5E-3 \text{ m}^3/\text{min} : Q_f = 9.1E-3 \text{ m}^3/\text{min}$

Fig. 6.11 RESPUESTA GLOBAL DEL SISTEMA SIN INTERACCIÓN.

Por la figura anterior se observa que éste sistema se clasifica como **sobreamortiguado**, el cual también carece de oscilaciones.

7 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS, INTERCAMBIADOR DE CALOR

PRÁCTICA No. 5

7.1 INTRODUCCIÓN

Durante la operación de un equipo, hay que medir e identificar las características dinámicas del sistema. Esto debe realizarse sin afectar el funcionamiento normal del sistema. Para identificar las características de un sistema, hay que realizar una prueba y analizar los resultados. Se puede efectuar la identificación con los datos de funcionamiento normal de la planta o utilizando señales de prueba, la identificación no debe ser excesivamente larga, pues si lo es, pueden producirse variaciones adicionales de los parámetros del sistema. La dificultad en realizar una identificación realista, depende de cuanta información se requiere sobre el sistema y el conocimiento previo que se tiene del mismo.

El sistema a estudiar, compuesto principalmente por un intercambiador de calor de tubos concéntricos (fig. 7.1), está sometido a cambios escalón en los flúidos de entrada. El sistema no está definido, es decir, no sabemos si se ajustan los datos experimentales obtenidos en un lapso de tiempo breve a un sistema de primer o segundo orden.

En equipos simples como el descrito anteriormente, se puede saber de forma casi inmediata a que orden se puede ajustar el sistema, en éste caso en particular, si al gráficar los datos obtenidos experimentalmente (Temperaturas de salida del flúido Vs. Tiempo), y éstos presentan una forma lineal, el sistema es de **primer orden**, si forman cualquier otro tipo de figura, el sistema es de **segundo orden**.

Generalmente por el método anterior es difícil identificar el orden del sistema, por lo que hay que recurrir a los modelos matemáticos de cada sistema en particular, y ajustar los datos experimentales, y en base a los resultados obtenidos definir el orden correcto.

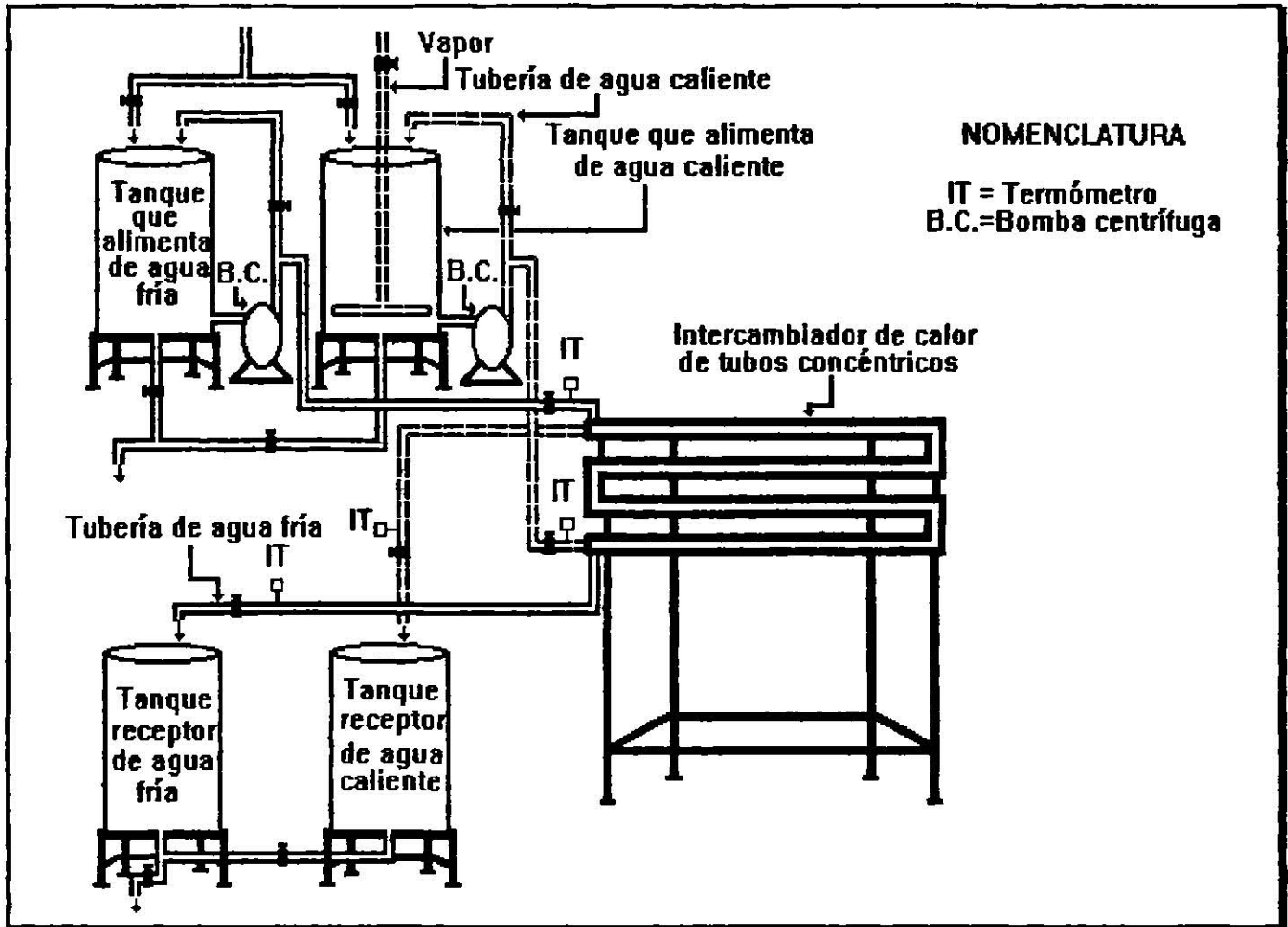


Fig. 7.1 INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS.

7.2 CONCEPTOS BÁSICOS

a).- **VARIABLES DE ESTADO.**- Son las que resultan de la solución de los balances dinámicos de masa, energía y momento, y que caracterizan al proceso, tales como volumen, densidad, concentración, temperatura ó presión.

b).- **VARIABLES FIJAS.**- Son las que se determinan al fijar la geometría, el sistema físico y otros.

c).- **ECUACIONES DE ESTADO.**- Son las ecuaciones que se originan al aplicar los balances de materia, energía y momento, resultan de plantear:

- 1.- Expresiones de Cinética Química y equilibrio termodinámico.
- 2.- Principios de conservación de masa, calor y momentum.
- 3.- Velocidad de transporte.

7.3 MODELO MATEMÁTICO

El desarrollo detallado de los modelos matemáticos se encuentra en el Manual del Laboratorio de Control de Procesos (Navarro y Escalante, 1990) y en el libro Ingeniería de Control Moderna (Ogata, 1974).

PARA UN SISTEMA DE PRIMER ORDEN SE PRESENTAN DOS CASOS:

a).- Datos sin tiempo muerto, las ecuaciones son:

$$T(t) = T_f + (T_i - T_f) e^{-(t/T)} \quad \text{Ecuación general (7.1)}$$

$$\ln\left(\frac{T(t) - T_f}{T_i - T_f}\right) = \left(-\frac{1}{T}\right)t \quad \text{Ecuación linealizada (7.2)}$$

b).- Datos con tiempo muerto, las ecuaciones son:

$$T(t) = T_f + (T_i - T_f) e^{-(t-t_0)/T} \quad \text{Ecuación general (7.3)}$$

$$\ln\left(\frac{T(t) - T_f}{T_i - T_f}\right) = \left(-\frac{1}{T}\right)(t - t_0) \quad \text{Ecuación linealizada (7.4)}$$

PARA UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN CON Ó SIN TIEMPO MUERTO LAS ECUACIONES SON:

$$C_t \text{ exp.} = \frac{(T_i - T)}{(T_i - T_f)} \quad \text{Ecuación experimental (7.5)}$$

$$C_t \text{ teó.} = 1 + \frac{wn}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \left[\frac{e^{-s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{-s_2 t}}{s_2} \right] \quad \text{Ecuación teórica (7.6)}$$

donde:

$$s_1 = (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})wn \quad \text{y} \quad s_2 = (\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})wn$$

Tal ecuación se resuelve por un método iterativo en el cual se suponen valores de $Wn > 0$ y $\xi > 1.0$, dichos valores son correctos cuando el Residuo Total (R_T) calculado como

$$R_T = \sum_{i=1}^n \left[C(t)^{\text{exp}} - C(t)^{\text{teó}} \right]^2 \text{ sea lo más cercano a cero.}$$

NOMENCLATURA

- T_i = Temperatura inicial (°C)
 $T(t)$ = Temperatura experimental (°C)
 T_f = Temperatura final (°C)
 t_o = Tiempo muerto (seg.)
 t = Tiempo (seg.)
 T = Constante de tiempo (seg.)
 ω_n = Frecuencia natural no amortiguada (seg⁻¹).
 ξ = Razón de amortiguamiento (adimensional).

7.4 AJUSTE DE DATOS EXPERIMENTALES A UN SISTEMA DE PRIMER ORDEN

Para obtener los datos experimentales el procedimiento se resume en dos pasos:

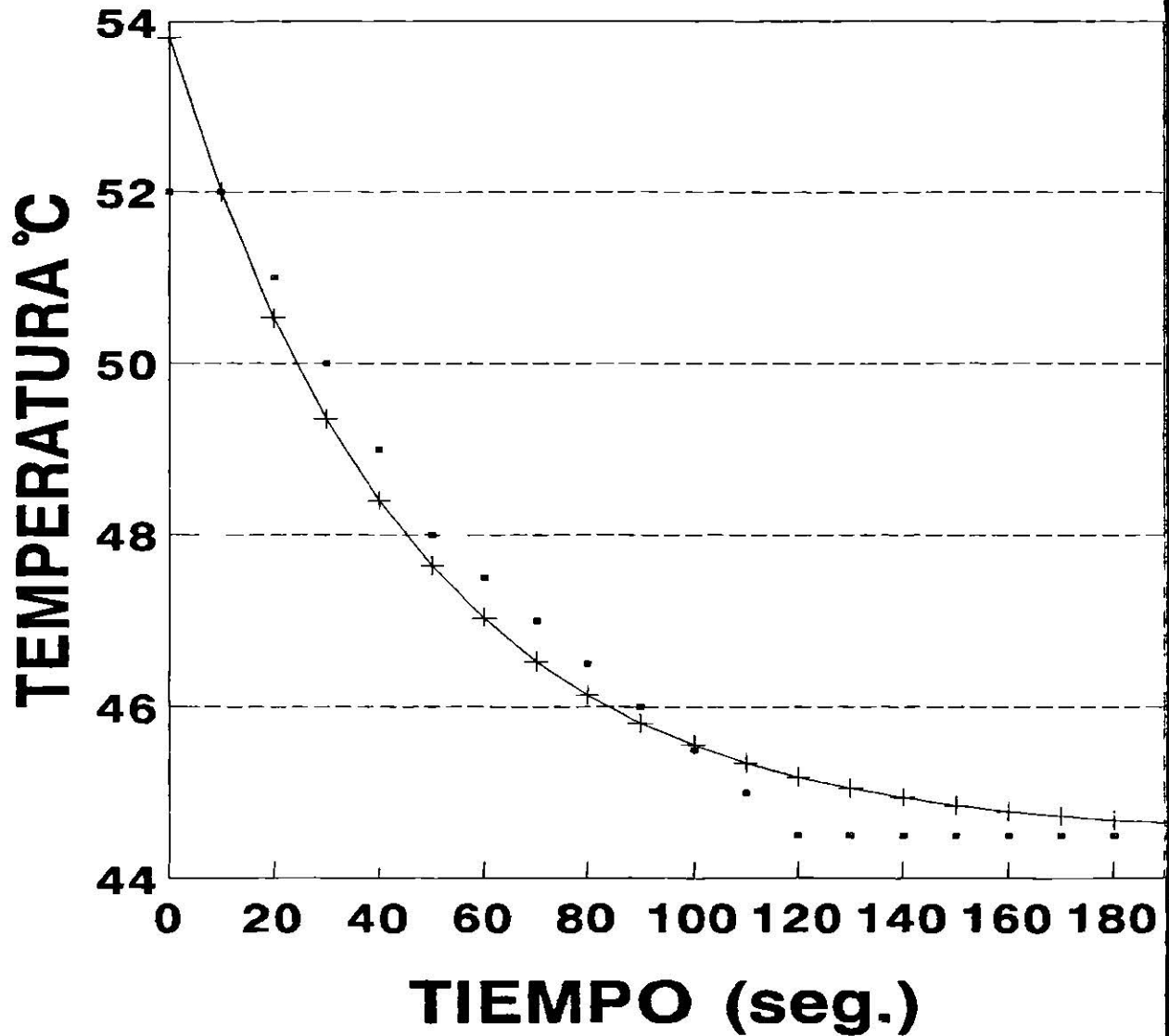
- Para cada una de las variables de entrada del sistema, en forma alternada se provoca un cambio de tipo escalón.
- Se anotan las temperaturas de salida del fluido a intervalos regulares hasta que la temperatura del fluido permanezca constante.

A continuación en la tabla 7.1 se muestran datos experimentales con tiempo muerto (t_o), cuyo cambio escalón se provoca agregando hielo al fluido de entrada del intercambiador de calor, disminuyendo la temperatura del mismo de 20 °C a 5 °C. En éste caso se reportan las temperaturas del fluido frío a la salida del equipo. Los datos son ajustados a las ecuaciones 7.3 y 7.4 respectivamente.

TABLA 7.1 DATOS AJUSTADOS A UN SISTEMA DE PRIMER ORDEN					
TIEMPO (seg.)	TEMP. EXP. (°C)	TEMP. TEÓ. (°C)	$\ln [(T(t)-T_f)/(T_i-T_f)]$ experimental [=]	$\ln [(T(t)-T_f)/(T_i-T_f)]$ teórica [=]	% DESVIACIÓN
0	52.0	53.81	0.000	0.217	-3.48
10	52.0	52.00	0.000	0.000	0.00
20	51.0	50.53	-0.143	-0.217	0.92
30	50.0	49.35	-0.310	-0.434	1.30
40	49.0	48.40	-0.510	-0.651	1.22
50	48.0	47.64	-0.762	-0.869	0.75
60	47.5	47.03	-0.916	-1.086	0.98
70	47.0	46.53	-1.099	-1.303	1.00
80	46.5	46.14	-1.321	-1.520	0.77
90	46.0	45.81	-1.609	-1.738	0.41
100	45.5	45.56	-2.014	-1.955	-0.13
110	45.0	45.35	-2.708	-2.172	-0.77
120	44.5	45.18	-	-2.389	-1.52
130	44.5	45.05	-	-2.607	-1.23
140	44.5	44.94	-	-2.824	-0.98
150	44.5	44.85	-	-3.041	-0.78
160	44.5	44.78	-	-3.258	-0.62
170	44.5	44.73	-	-3.476	-0.51
180	44.5	44.68	-	-3.693	-0.40
190	44.5	44.65	-	-3.910	-0.33

A continuación en las figuras 7.2 y 7.3 se muestran las gráficas de la tabla anterior.

AJUSTE DE DATOS A ECN. DE PRIMER ORDEN TEMPERATURA (°C) Vs. TIEMPO (seg.)

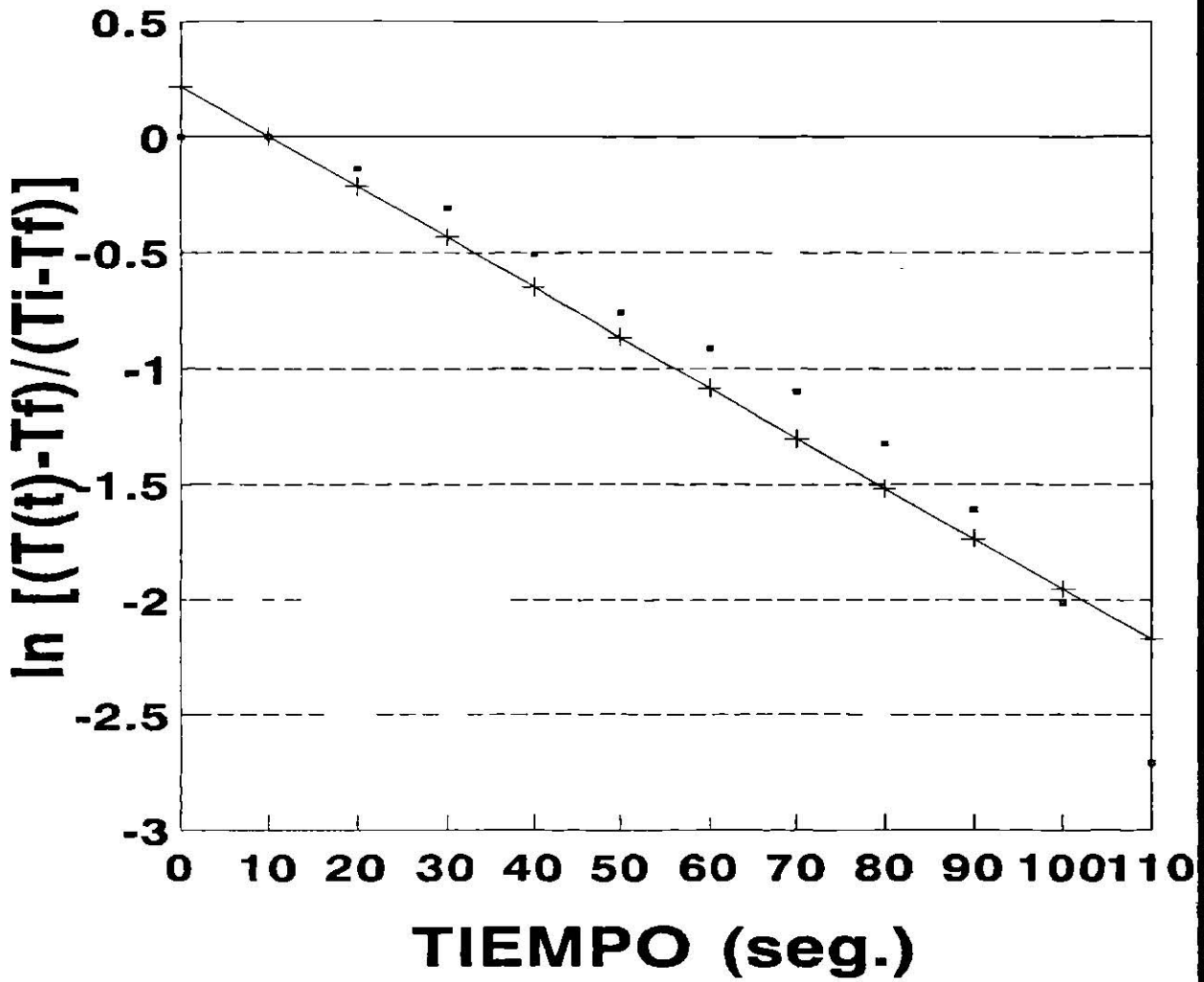


DATOS EXP. + DATOS TEÓ.

TIEMPO MUERTO = 10 seg.

Fig. 7.2 GRÁFICA TEMP. (°C) VS. TIEMPO (seg.)

DATOS AJUSTADOS A ECN. DE PRIMER ORDEN
 $\ln [(T(t)-T_f)/(T_i-T_f)]$ Vs. TIEMPO (seg.)



DATOS EXP. + DATOS TEÓ.

$m = -2.172E-2 \text{ seg}^{-1} : r = -0.9886$

Fig. 7.3 DATOS AJUSTADOS A SISTEMA DE PRIMER ORDEN

Como se observa en la figura 7.2, al gráficar los datos experimentales, éstos no presentan una forma definida en la sección 7.1, por lo que para definir perfectamente el sistema es necesario ajustar los datos a un sistema de segundo orden, y por ello en la sección siguiente se hacen los cálculos necesarios.

7.6 AJUSTE DE DATOS EXPERIMENTALES A UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN

Para hacer tal ajuste se utilizan las ecuaciones 7.5 y 7.6. Por razones de presentación en la gráfica se hace el cambio de variable ξ por E_p , los resultados se muestran en la tabla 7.2.

TABLA 7.2 DATOS AJUSTADOS A UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN					
TIEMPO (seg.)	C(t)exp. [=]	C(t) teó. [=]	% DESVIACIÓN	Ri [=]	
0	0.0000	0.0000	-	0.0000	
10	0.0000	0.0486	-	23.610E-04	
20	0.1333	0.1552	-16.42	4.796E-04	
30	0.2667	0.2813	-5.47	2.131E-04	
40	0.4000	0.4059	-1.47	0.348E-04	
50	0.5333	0.5190	2.68	2.044E-04	
60	0.6000	0.6166	-2.76	2.755E-04	
70	0.6667	0.6981	-4.70	9.859E-04	
80	0.7333	0.7645	-4.25	9.734E-04	
90	0.8000	0.8177	-2.21	3.132E-04	
100	0.8667	0.8598	0.79	0.476E-04	
110	0.9333	0.8928	4.33	16.401E-04	
120	1.0000	0.9183	8.17	66.743E-04	
130	1.0000	0.9380	6.20	38.442E-04	
			$\xi = 1.015$	$\omega n = 0.035 \text{ (seg}^{-1}\text{)}$	TOTAL = 0.0180

Los datos anteriores se muestran gráficamente en la figura 7.4

AJUSTE DE DATOS A ECN. DE SEGUNDO ORDEN

$w_n = 0.035 : E_p = 1.01 : R_I = 0.0180$

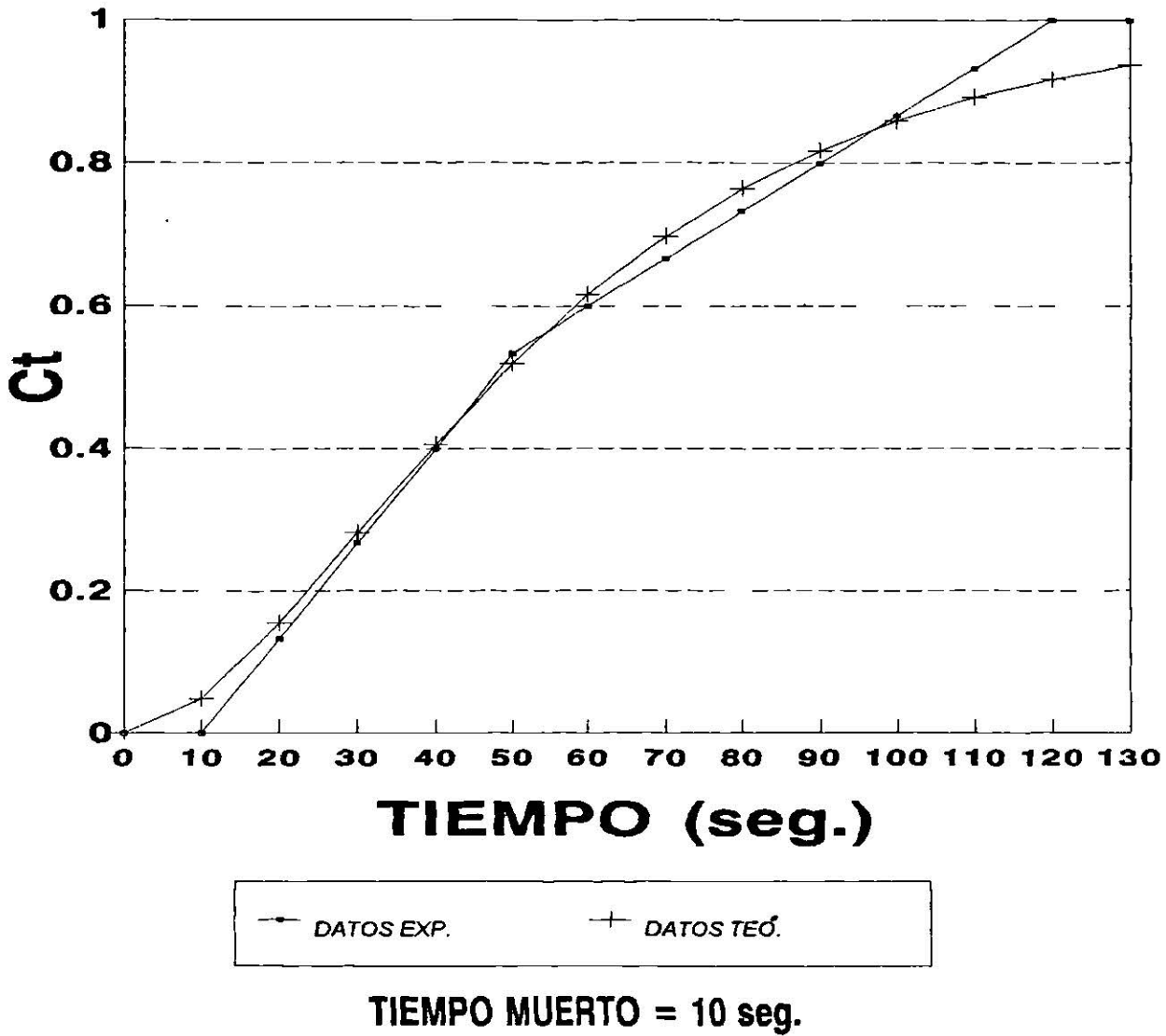


Fig. 7.4 DATOS AJUSTADOS A UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN

Se observa en la figura que el ajuste de los datos se hace dentro del rango del tiempo experimental (130 seg.), por lo que la respuesta teórica al final (C_t teó. = 0.938) no alcanza el mismo valor de la respuesta experimental al final (C_t exp. = 1.0). Pero si se extrapola con un rango de tiempo mayor, entonces coincidirán ambas respuestas al final. Al comparar las figuras 7.3 con la anterior y los resultados respectivos, puede decirse que los resultados experimentales se ajustan más a un sistema de primer orden, esto se debe a que hay menos porcentaje de desviación en el ajuste de los datos. Cabe señalar que el programa ajusta los datos experimentales también sin tiempo muerto.

8 CONTROL EN DOS POSICIONES (ON-OFF), TANQUE DE ALMACENAMIENTO

PRÁCTICA No. 6

8.1 INTRODUCCIÓN

El control de dos posiciones se utiliza comunmente en termostatos y sistemas de nivel de líquido, en actividades industriales y domésticas, esto se debe a que es simple, económico y poco peligroso. Es un sistema en donde el elemento accionador tiene solamente dos posiciones, que es abierto o cerrado, de tal manera que en el lapso donde se abre y se cierra forma una brecha diferencial.

Esta práctica nos muestra como funciona éste tipo de sistema, el equipo se muestra en la figura 8.1. Con el control en dos posiciones, la válvula está o bien abierta o bien cerrada. El caudal de entrada de agua es una constante positiva o cero. La señal de salida se mueve continuamente entre los dos límites requeridos para que el elemento accionador se desplace de una posición fija a la otra. Gráficando esto obtendríamos que la curva de salida sigue una de las dos curvas exponenciales, una que corresponde a llenado y la otra a vaciado, una oscilación como ésta entre dos límites es una típica respuesta característica de un sistema de control de dos posiciones.

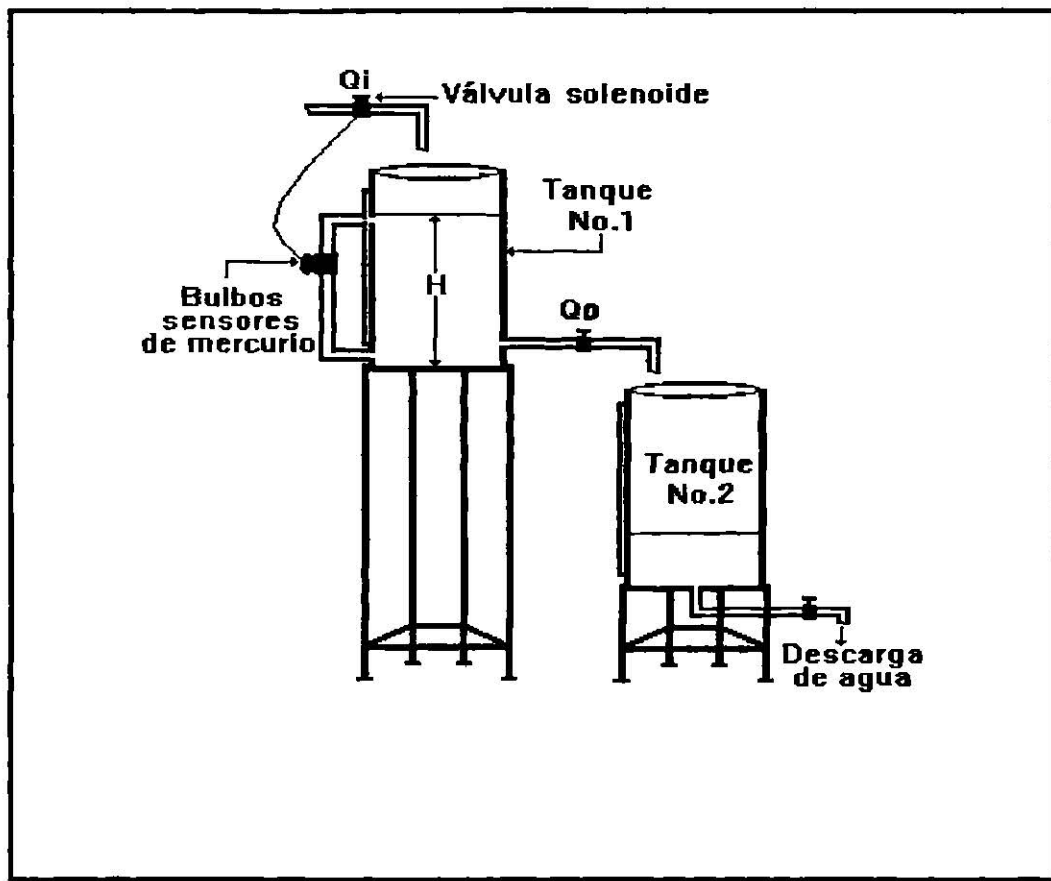


Fig. 8.1 EQUIPO DE CONTROL ON-OFF

8.2 CONCEPTOS BÁSICOS

a).- **OPERACIÓN DEL CONTROL DE DOS POSICIONES.**- El control de dos posiciones o de sí-no es relativamente simple y económico, y por esta razón, ampliamente utilizado en sistemas de control tanto industriales como domésticos. Generalmente son dispositivos eléctricos, compuestos por una válvula conectada a un solenoide eléctrico. Su funcionamiento consiste en que la salida de un sistema cualesquiera (comunmente flujo volumétrico), la respuesta de salida del controlador (solenoides eléctricos), solamente puede tomar dos posiciones fijas, que son simplemente conectado y desconectado; esto a su vez ocasionará que la válvula quede totalmente cerrada o totalmente abierta respectivamente.

b).- **BRECHA DIFERENCIAL.**- Es el rango en el que se debe desplazar la señal de error actuante antes de que se produzca la conmutación.

c).- **EFECTO DE LA BRECHA DIFERENCIAL.**- Al aumentar la brecha diferencial, la banda entre cuyos límites varía el nivel, se hace más ancha, por ello la diferencia de alturas es mayor y disminuye la cantidad de conmutaciones por minuto, aumentando la vida útil del componente y viceversa.

8.3 MODELO MATEMÁTICO

El desarrollo detallado del modelo matemático se encuentra en el Manual del Laboratorio de Control de Procesos, (Navarro y Escalante, 1990).

$$\frac{dH}{dt} = \frac{Q_i - K_s \sqrt{H}}{A} \quad \text{Ecuación general del sistema (8.1)}$$

En donde:
$$K_s = \frac{Q_i}{\sqrt{H_{ss}}}$$

Para obtener los valores dentro del rango de la brecha diferencial se supone lo siguiente:

- a).- Cuando $t < t_{\text{pert.}}$ la ecuación es la 8.1
- b).- Cuando $t = t_{\text{pert.}}$; $Q_i = Q_a$ y se sustituye en la ecuación 8.1
- c).- Cuando $t > t_{\text{pert.}}$ y $H_{\text{teó.}} \geq H_{\text{máx.}}$; $Q_i = 0$ sustituyéndose en la ecuación 8.1
- d).- Cuando $t > t_{\text{pert.}}$ y $H_{\text{teó.}} \leq H_{\text{mín.}}$; se utiliza la ecuación 8.1

NOMENCLATURA

- $H_{\text{máx.}}$ = Altura de limite superior de la brecha diferencial (m)
- $H_{\text{mín.}}$ = Altura de limite inferior de la brecha diferencial (m)
- H_{ss} = Altura de estado estacionario del tanque (m)
- Q_a = Gasto volumétrico adicional (m^3/min)
- Q_i = Gasto volumétrico inicial (m^3/min)
- K_s = Constante de la válvula ($\text{m}^{2.5}/\text{min}$)
- $t_{\text{pert.}}$ = Tiempo de perturbación (min)
- $H_{\text{teó.}}$ = Altura teórica (m)
- A = Área del tanque (m^2)
- t = Tiempo (min)

8.4 PROCEDIMIENTO DE LA PRÁCTICA

Los datos experimentales se obtuvieron mediante el siguiente procedimiento:

- a).- Ajustar la apertura de la válvula de descarga.
- b).- Abrir la válvula de aguja hasta el gasto deseado.
- c).- Conectar la válvula de solenoide al tomacorriente de pared.
- d).- Tomar las lecturas de nivel a intervalos medidos hasta que el nivel oscile alrededor de la banda de amplitud constante.
- e).- Vaciar rápidamente en el tanque una cubeta de 20 lt.
- f).- Continuar tomando lecturas de nivel hasta que éste varíe alrededor de la banda de amplitud constante.

En la tabla 8.1 se muestran los datos experimentales obtenidos.

TABLA 8.1. DATOS EXPERIMENTALES	
H_{min.} = 0.558 m	H_{máx.} = 0.561 m
H_{ss} = 0.621 m	t_{pert.} = 30 min
Q_i = 0.00774 m³/min	Q_a = 0.02 m³/min
TIEMPO (min)	ALTURA EXP. (cm)
0.0	0.0
1.0	3.0
2.0	5.7
3.0	8.6
4.0	10.8
5.0	13.2
6.0	15.4
7.0	17.6
8.0	19.9
9.0	21.9
10.0	24.0
11.0	26.0
12.0	28.0
13.0	30.1
14.0	32.1
15.0	34.1
16.0	36.1
17.0	38.0
18.0	39.7
19.0	41.7
20.0	43.3
21.0	45.0
22.0	46.8
23.0	48.5
24.0	50.2
25.0	51.5
26.0	53.2
27.0	54.9
28.0	56.1
29.0	55.9
30.0	64.5
31.0	61.2
32.0	59.8
33.0	58.2
35.8	55.8
40.2	56.1
43.0	55.8
44.0	56.1
46.6	55.8

8.5 EFECTO DE LA CONSTANTE DE LA VÁLVULA SIN PERTURBACIÓN

Para ver el efecto de dicho parámetro en el sistema, lo que se hace es variar éste parámetro en la ecuación 8.1, a un determinado gasto vol. inicial (Q_i) y área definida. Tal efecto se observa en la figura 8.2

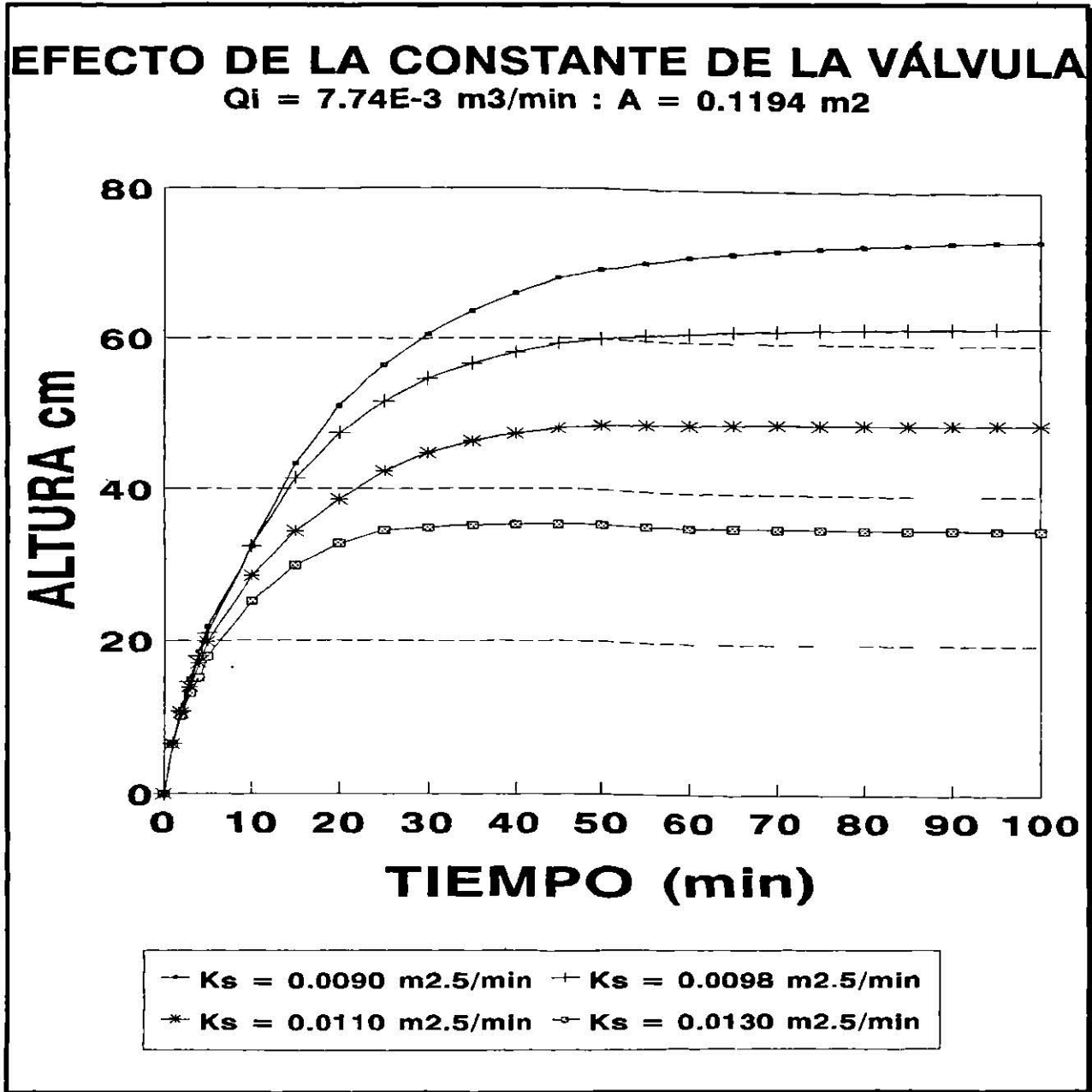


Fig. 8.2. EFECTO DE LA CONSTANTE DE LA VÁLVULA SIN PERTURBACIÓN

Como se observa el efecto que produce al aumentar dicho parámetro ocasiona que el sistema obtenga el estado estable en menor tiempo, y por ello la altura final del tanque no es tan elevada. Si se disminuye dicha constante se invierte lo anterior.

8.6 EFECTO DEL GASTO VOLUMÉTRICO INICIAL SIN PERTURBACIÓN

Para ver el efecto que ocasiona la variación del gasto se procedió de la misma forma que en el punto anterior. Tal efecto se presenta gráficamente en la figura 8.3.

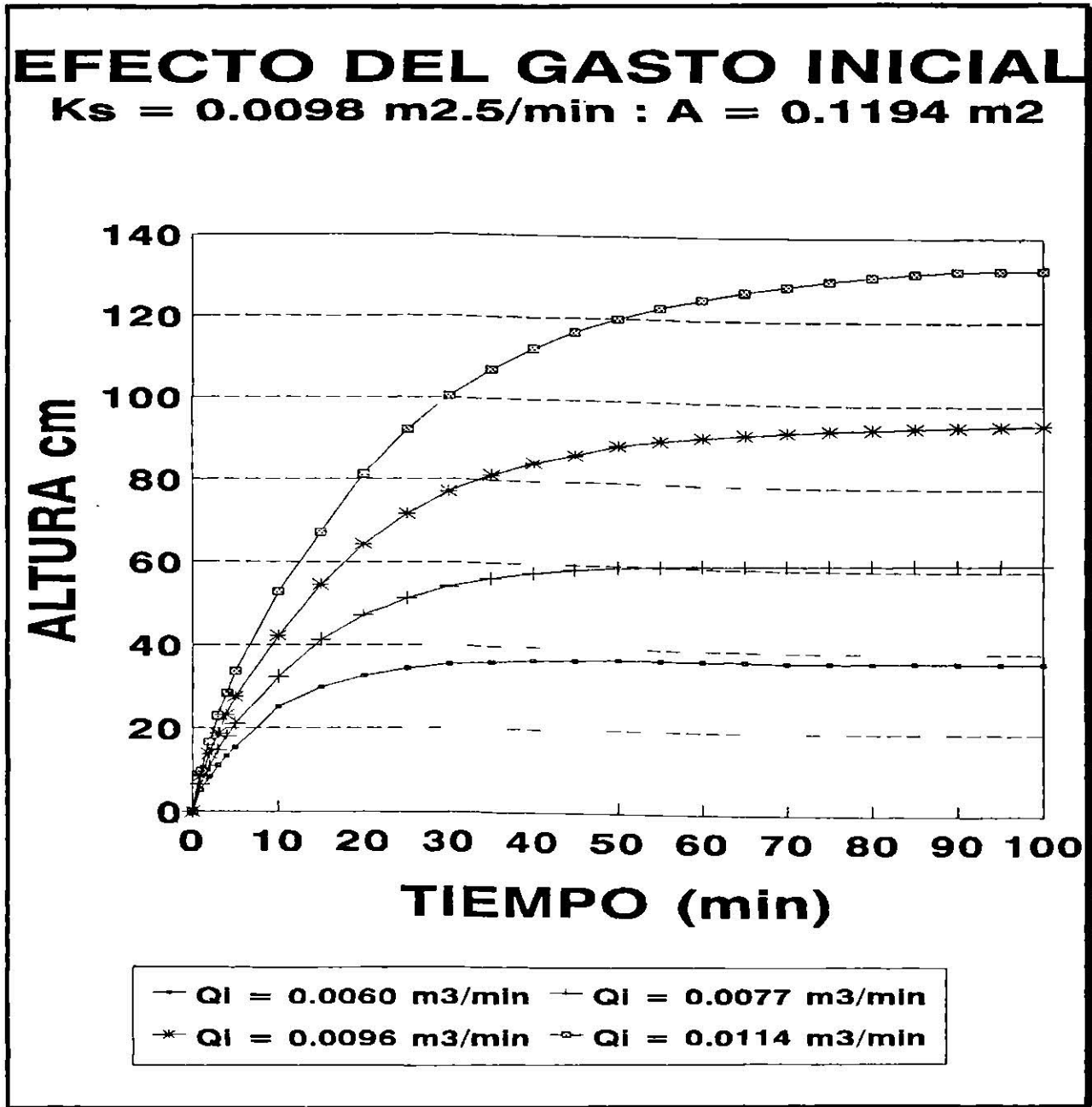


Fig. 8.3 EFECTO DEL GASTO VOLUMÉTRICO INICIAL SIN PERTURBACIÓN

De lo anterior se observa que dicho efecto que ocasiona el aumento del gasto ó caudal ocasiona que el sistema logre su estado estable con tiempo elevado, y por ello la altura final del tanque también es elevada.

8.7 COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA

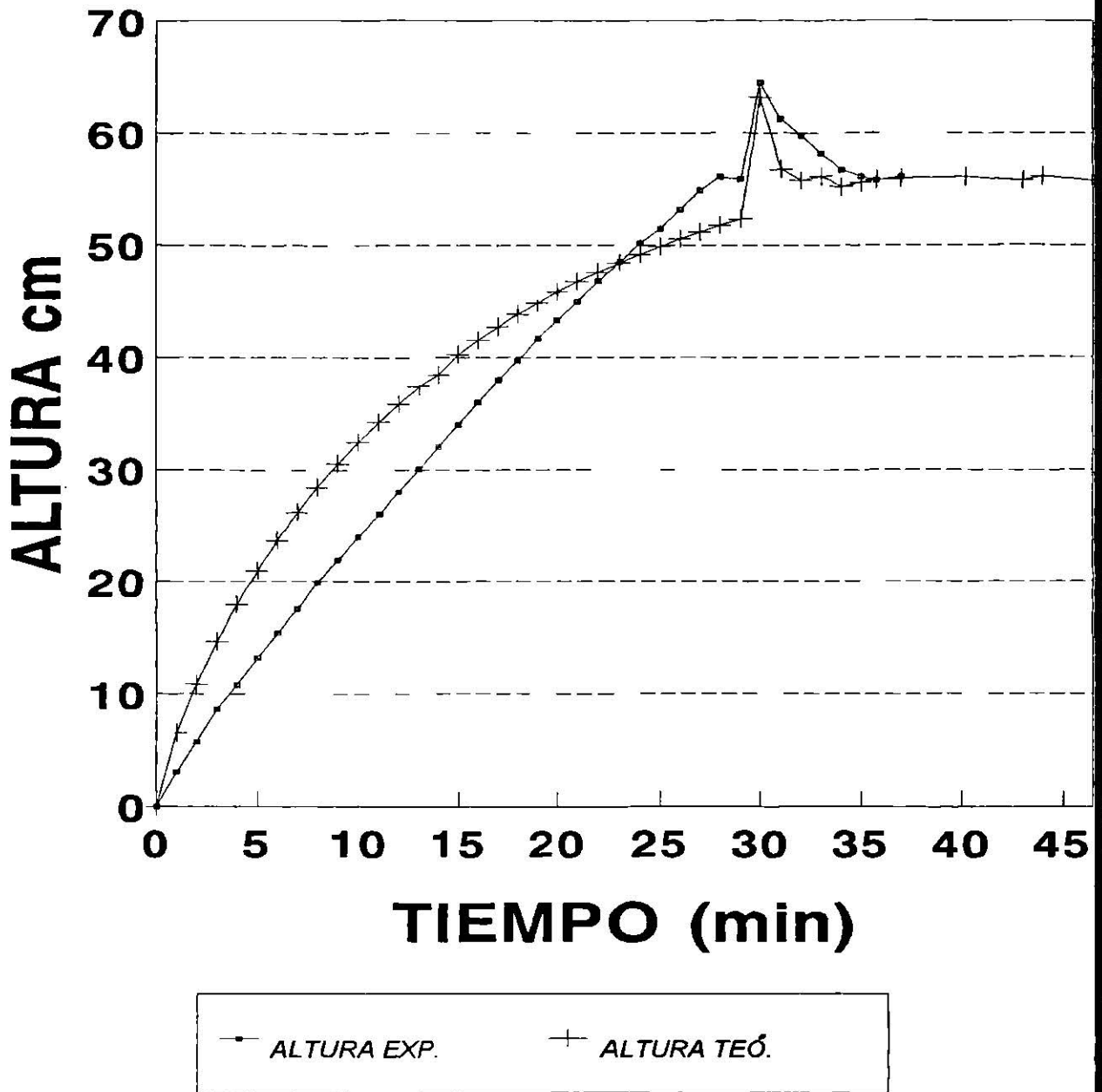
Para calcular los datos teóricos en la ecuación 8.1 se sustituyen los datos obtenidos de la sección 8.4, posteriormente se utilizó un método numérico para resolver la ecuación diferencial, en éste caso Euler. Se escogió éste método debido a que es sencillo de programar y no se requiere de gran exactitud en los datos. El área del tanque tiene un valor de 0.1194 m². En la tabla 8.2 se muestran los datos teóricos y experimentales.

TABLA 8.2. DATOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES			
Qi = 0.00774 m ³ /min		tpert. = 30 min	
Hss = 0.621 m	Hmín. = 0.558 m	Hmáx. = 0.561 m	Qa = 0.02 m ³ /min
TIEMPO (min)	ALTURA EXP. (cm)	ALTURA TEÓRICA (cm)	% DESVIACIÓN
0.0	0.00	0.00	-
1.0	3.00	6.48	-116.00
2.0	5.70	10.87	-90.70
3.0	8.60	14.64	-70.23
4.0	10.80	17.98	-66.48
5.0	13.20	20.97	-58.86
6.0	15.40	23.69	-53.83
7.0	17.60	26.16	-48.63
8.0	19.90	28.44	-42.91
9.0	21.90	30.53	-39.40
10.0	24.00	32.47	-35.29
11.0	26.00	34.27	-31.80
12.0	28.00	35.93	-28.32
13.0	30.10	37.49	-24.55
14.0	32.10	38.93	-21.27
15.0	34.10	40.28	-18.12
16.0	36.10	41.54	-15.07
17.0	38.00	42.72	-12.42
18.0	39.70	43.83	-10.40
19.0	41.70	44.87	-7.60
20.0	43.30	45.84	-5.86
21.0	45.00	46.75	-3.88
22.0	46.80	47.61	-1.73
23.0	48.50	48.42	0.16
24.0	50.20	49.17	2.05
25.0	51.50	49.89	3.12
26.0	53.20	50.56	4.96
27.0	54.90	51.19	6.75
28.0	56.10	51.79	7.68
29.0	55.90	52.35	6.35
30.0	64.50	63.15	2.09
31.0	61.20	56.75	7.27
32.0	59.80	55.80	6.68
33.0	58.20	56.13	3.55
35.8	55.80	55.84	-0.07
40.2	56.10	56.10	0.00
43.0	55.80	55.80	0.00
44.0	56.10	56.14	-0.07
46.6	55.80	55.80	0.00

Los datos de la tabla 8.2 son presentados gráficamente en la figura 8.4

COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA

$Q_i = 7.74E-3 \text{ m}^3/\text{min}$: $H_{ss} = 0.621 \text{ m}$



$H \text{ lím sup.} = .561 \text{ m}$: $H \text{ lím inf} = .558 \text{ m}$

Fig. 8.4 COMPARACIÓN TEÓRICO-PRÁCTICA.

9 CONCLUSIONES

En éste trabajo se muestra la importancia en nuestros días de la computación para una mejor preparación de profesionistas, en éste caso particular el tema que se trató fué de programas de simulación de las prácticas impartidas en el laboratorio de control de procesos en la Facultad de Ciencias Químicas.

Por tal motivo, cumple con los objetivos para los cuales fué elaborado, ya que facilita el entendimiento, asimilación y comprensión de cada una de las prácticas, estos son principalmente:

Primero.- Mediante la presentación de definiciones entendibles de los conceptos a utilizar en cada práctica.

Segundo.- Hacer una comparación de lo establecido en la teoría a lo hecho o encontrado en la práctica.

Tercero.- Posteriormente hacer una simulación de variación de uno o más parámetros o variables del modelo matemático del sistema a manejar, y observar en forma gráfica como son afectados los parámetros o conceptos pretendidos.

Cuarto.- Por último con el cuestionario que se presenta después de la gráfica, reforzar los conceptos pretendidos.

Además de los puntos anteriores, formula ideas de que forma es conveniente diseñar o utilizar el equipo para obtener los resultados convenientes y esperados, en base a el o los parámetros a controlar, y en consecuencia , de la(s) variable(s) que es (son) conveniente(s) permanecer constante(s), y por conveniencia en economizar el equipo.

BIBLIOGRAFÍA

K. Ogata
Ingeniería de Control Moderno
Editorial Prentice Hall, 1974.

Mtro. Jesús Navarro Contreras
Ing. Patricia Escalante Mares
Manual del Laboratorio de Control de Procesos
Editorial UASLP, 1990.

Mtro. Jesús Navarro Contreras
Notas del Curso de Control de Procesos

Robert H. Perry/Cecil H. Chilton
Manual del Ingeniero Químico
Quinta edición, Segunda edición en español
Volumen II
Editorial Mc Graw - Hill, 1982.

Carnahan, B, Luther, H.A. & Wilkes, J.O.
Applied Numerical Methods
Editorial John Wiley, New York, 1969.

**Los programas de simulación se encuentran
disponibles con el mtro. Jesús Navarro Contreras
y con la mtra. Patricia Escalante Mares**

