

2  
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ZARAGOZA"

RESOLUCION DE PROBLEMAS TIPICOS DE  
INGENIERIA QUIMICA, APOYANDOSE EN EL  
SIMULADOR TUTSIM

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A N :  
LIDA INES AMBROSIO NIETO  
ANTONIO AVALOS RAMIREZ

ASESORES: I.O. SALVADOR GALLEGOS RAMALES  
DR. ALEJANDRO GOMEZ MUÑOZ



MEXICO, D. F.

1992



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

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

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

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

## INDICE

- INTRODUCCION	
- CAPITULO I.	GENERALIDADES. 1
- CAPITULO II.	SIMULADOR TUTSIM. 7
II.1	MANEJO DEL SIMULADOR
II.1.1	COMANDOS DE ACCESO
II.1.2	COMANDOS DE EDICION
II.1.3	COMANDOS DE SIMULACION
II.1.4	OTRO TIPO DE COMANDOS
II.2	COMO ARMAR UN MODELO
II.2.1	DESCRIPCION MATEMATICA DEL MODELO
II.2.2	ORDENAMIENTO DE ECUACIONES, DIAGRAMAS DE BLOQUES
II.2.3	DESCRIPCION DEL LISTADO DEL MODELO DESPLEGADO POR EL SIMULADOR
- CAPITULO III.	RESOLUCION DE PROBLEMAS TÍPICOS DE INGENIERIA QUIMICA A REGIMEN DINAMICO. 22
III.1	SISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE MASA
1.	Flux de momentum con agua (3).
2.	Simulación de un absorbedor de gas (5).

### III.2 SISTEMAS TERMICOS

3. Desviación de la temperatura de un Kettle con ciclo de control (1).
4. Respuesta dinámica de un tanque agitador y calentador (1).

### III.3 TANQUES DE ALMACENAMIENTO

5. Comportamiento de la altura de un líquido en un tanque (7).
6. Tanque con flujo a la salida por gravedad (4).
7. Tanque con un orificio como salida (7).

### III.4 SISTEMAS CON REACCION QUIMICA

8. Simulación de un modelo cinético.
9. Comportamiento de tres RTAC en serie (4).
10. Comportamiento de tres RTAC en serie con controlador integral (4).

### III.5 OTRO TIPO DE SISTEMAS

11. Comportamiento de un cristizador batch por evaporación (8).
12. Comportamiento de un cristizador batch por enfriamiento (8).
13. Respuesta dinámica de una válvula de diafragma (1).

- BIBLIOGRAFIA.	135
- APENDICE A. RESUMEN DE COMANDOS DEL SIMULADOR TUTSIM	137
- APENDICE B. BREVE DESCRIPCION DE LOS PRINCIPALES BLOQUES DEL SIMULADOR TUTSIM	140
- APENDICE C. SIGNIFICADO DE LOS ERRORES DESPLEGADOS EN LA PANTALLA AL USAR EL SIMULADOR TUTSIM	169

## INTRODUCCION

## INTRODUCCION

Uno de los objetivos principales del Ingeniero Químico es el análisis y diseño de procesos, en los cuales existe una vía de transformación de materias primas en productos; ya sean productos finales o intermedios.

La transformación de estas materias primas puede ir desde una simple separación física, hasta involucrar reacción química y otras cuestiones mas complejas (como son los fenómenos de transferencia). Estos cambios en la materia, se llevan a cabo en equipos con características específicas de acuerdo a la operación que se desea realizar en ellos.

El análisis y diseño en Ingeniería Química generalmente se realiza con equipo a régimen permanente, lo cual no contempla como se comporta dicho equipo cuando se encuentra en una situación de arranque y paro o, por otro lado, está condicionado a que no ocurran perturbaciones en las condiciones de alimentación (hábese de flujo, temperatura, presión o concentración); lo cual no es cierto, ya que por fallas en la energía eléctrica, en el suministro de servicios de calentamiento o enfriamiento, las condiciones de la alimentación pueden variar y a su vez afectar la operación del equipo, el cual incluso deba parar.

De ahí que es conveniente tener presente el análisis y diseño de

sistemas a régimen dinámico. ¿ Pero qué es el régimen dinámico ó la dinámica de proceso ?

La dinámica de proceso es el análisis o estudio de las variables de proceso que cambian con respecto al tiempo; en otras palabras, se trata de ver el comportamiento de aquellos sistemas que dependen del tiempo, de sistemas a régimen no-permanente.

Los objetivos de la dinámica de proceso son:

1. La construcción de modelos matemáticos de procesos químicos, así como, el estudio de las técnicas para resolver dichos modelos.
2. Analizar técnicas de control como teoría de estabilidad; además de, diseño de equipo de proceso y diseño de sistemas de control.
3. Analizar el comportamiento dinámico de sistemas a circuito abierto .

Basándose en la necesidad de resolver problemas típicos de Ingeniería Química a régimen dinámico se llevarán a cabo los siguientes pasos:

- a) Reconocimiento del problema
- b) Interpretación física del problema
- c) Obtención del modelo matemático que describa el sistema
- d) Desarrollo de un diagrama de bloques, estilo computadora analógica, que interprete al modelo matemático



e) Solución del modelo matemático, apoyándose en el simulador TUTSIM.

Como consecuencia de lo anteriormente planteado surgen los siguientes objetivos:

- Analizar la necesidad de apoyarse en un simulador
- Comparar las ventajas y desventajas que presenta la simulación analógica y digital
- Demostrar cómo puede ser útil la simulación analógica
- Estudiar el funcionamiento de un paquete de simulación analógica y la forma de aplicarlo en la resolución de problemas de Ingeniería Química
- Resolver problemas típicos de Ingeniería Química a régimen dinámico.

Para recaudar la información necesaria, se consultará material bibliográfico de las bibliotecas del Instituto Tecnológico de Celaya y de la ENEP Zaragoza, principalmente.

También habrá apoyo en asesorías por parte del DOCTOR ALEJANDRO GOMEZ MUÑOZ, Coordinador Académico del Posgrado en el Instituto Tecnológico de Celaya.

En el presente trabajo se analizará la forma en que un paquete de simulación puede servir como herramienta para analizar y resolver problemas de Ingeniería Química, este tema se abordará al describir brevemente el simulador TUTSIM en el capítulo II y su aplicación en

problemas específicos en el capítulo III.

Para complementar el conocimiento acerca del manejo del simulador se incluyen tres apéndices de suma utilidad, ya que contienen información sobre los comandos, los diagramas de bloques usados por el TUTSIM y los probables errores que se puedan cometer al hacer uso del programa de simulación TUTSIM.

## CAPITULO I

### GENERALIDADES

## GENERALIDADES

En Ingeniería Química es importante la simulación de procesos debido al gran desarrollo tecnológico en los últimos años. Aunado esto a la crisis económica, la simulación de procesos toma gran impulso en las áreas de la educación y la industria, ya que se pueden analizar sistemas con menor costo y tiempo.

La simulación de procesos es la representación de un proceso químico por medio de un modelo o conjunto de modelos matemáticos, que con la ayuda de algunos métodos o técnicas numéricas se resuelven para obtener información acerca del funcionamiento del proceso químico. Estos modelos matemáticos, a veces por su estructura y complejidad, requieren de mucho tiempo para resolverse, por lo que generalmente se utilizan para su resolución programas de computadora: que comúnmente reciben el nombre de programas de simulación.

Un programa de simulación puede usarse para evaluar un problema ya sea a régimen permanente o a régimen dinámico. En el primer caso se utiliza un balance de materia y energía, en el segundo caso se varía el tiempo en la operación para la simulación.

La simulación dinámica es más complicada y costosa que la simulación a régimen permanente, debido a las numerosas ecuaciones diferenciales que resultan de un proceso, y el tiempo de resolución es relativamente mayor.

Actualmente se dispone de computadoras de alta velocidad y un gran

desarrollo en paquetes de simulación a régimen dinámico, que permiten efectuar la simulación dinámica de equipos en poco tiempo.

A partir de los balances de materia y energía en los procesos, es posible generar los diagramas de flujo, el contenido del proceso e información del mismo en lo referente a control. La instrumentación de los procesos dinámicos para el control de los mismos se realiza siguiendo un procedimiento heurístico y a veces sobrediseñándose el control, para hacerlo más seguro. Se pueden usar programas de simulación dinámica para revisar la configuración del control.

Los controladores deben dar respuestas óptimas para perturbaciones del esquema simulado, esto se logra aplicando estrategias evolutivas al control y configuración del proceso. Una vez que el esquema deseado ha sido seleccionado, el dimensionamiento de la planta se efectúa tomando en cuenta la dinámica del proceso así como el estado estacionario del mismo.

Evidentemente la simulación dinámica provee de información adicional después de que la planta ha sido construida. La alteración de los esquemas de proceso y/o control después del arranque de la planta, justifica la simulación dinámica en el periodo de diseño del proceso.

Una parte esencial de la simulación dinámica es la solución numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias. Un problema que se encuentra en la simulación de grandes sistemas rígidos<sup>\*</sup> dinámicos es una computación rápida

\* Una ecuación diferencial es llamada rígida si algunos componentes de la solución decaen más rápidamente que otros, esto ocurre frecuentemente en el diseño de reactores y cálculos en columnas de destilación.

y eficiente de los mismos, y además frecuentemente los métodos convencionales de integración no son aceptables cuando se encuentran ecuaciones gobernantes transientes que usualmente son "rígidas".

Para integrar estas ecuaciones por métodos convencionales es necesario usar pasos pequeños de integración, pero como resultado de esto se generan tiempos de cómputo prohibitivos.

Para sistemas pequeños y no "rígidos" se pueden usar los métodos Adams-Moulton o Runge-Kutta-Merson.

Para sistemas grandes débilmente "rígidos" es adecuado el método Euler, provisto de un ajustador automático de paso o de tamaño de paso; en cambio para grandes sistemas fuertemente "rígidos" se recomienda usar una linearización al método implícito Euler.

Muchos de los procesos químicos son modelados por ecuaciones diferenciales no lineales. Solamente para ecuaciones diferenciales lineales en forma cerrada se tiene soluciones analíticas disponibles. Cuando se confronta el análisis dinámico de sistemas no lineales se tienen las siguientes alternativas:

1. Simular el modelo no lineal, empleando para esto una computadora analógica o bien digital y calcular su solución (ver figura I.1)
2. Transformar el sistema no lineal a un sistema lineal por una transformación o cambio apropiado en sus variables.

3. Desarrollar un modelo lineal que aproxime el comportamiento dinámico de un sistema no lineal, esto en la vecindad de determinadas condiciones de operación específicas.

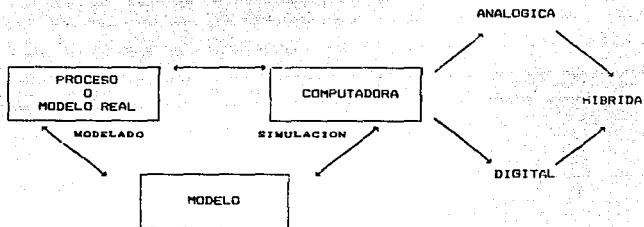


FIGURA 1.1. SECUENCIA PARA SIMULAR UN MODELO.

Realizar la simulación directa del modelo matemático sin transformar o aproximar a un modelo lineal es más rápido y menos complicado. Para esto se tiene que usar una computadora ya sea analógica, digital o híbrida.

Las computadoras analógicas fueron las primeras en ser empleadas para la simulación de modelos dinámicos, esto con o sin control, y permitían una rápida solución del modelo. Estas computadoras jugaron un rol significativo en la ayuda del diseño de cálculo en los 50's y 60's.

Para mejorar algunas insuficiencias en las computadoras híbridas y

analógicas, se desarrollaron las computadoras digitales. Logrando obtener buen resultado los avances tecnológicos hechos en simuladores transientes.

Las desventajas de la computadora analógica son las siguientes:

- El tiempo para programar un determinado problema y ejecutarlo es bastante significativo.
- Por cada operación matemática se requiere de un elemento del Hardware y esto prohíbe la simulación de problemas grandes y complejos.
- Los términos no lineales son simulados por elementos del Hardware (generadores de función) con limitada flexibilidad.
- No poseer memoria.

Sin embargo, la simulación analógica presenta ciertas ventajas. Como la respuesta instantánea en tiempo real a la simulación del modelo, además de dar una respuesta gráfica que facilita la interpretación de los resultados.

Así pues, se desarrollaron programas que simulan un computador analógico en uno digital; facilitando así la resolución de ecuaciones diferenciales.

Obviamente para cada problema se requiere una secuencia de cálculo distinta, pero ya no se necesita programar a nivel Hardware. Todo es por medio del teclado agilizando los cambios en los parámetros del modelo o las correcciones que sean necesarias, y obteniendo resultados rápidamente (en



pantalla o impresora). Uno de estos programa-simulador de ecuaciones diferenciales es el simulador "TUTSIM", del cuál se mostrará mas adelante cómo puede ser una herramienta útil para el Ingeniero Químico.

## **CAPITULO II**

### **SIMULADOR TUTSIM**

## SIMULADOR TUTSIM

Aproximadamente hace 17 años ingenieros de control de la "Twente University of Technology", de los Países Bajos, desarrollaron un programa de simulación al que llamaron TUTSIM. De aquí el nombre del paquete:

### TWENTE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY SIMULATION PROGRAM.

TUTSIM es una marca comercial registrada en los Estados Unidos y Canadá. Originalmente el TUTSIM se realizó para estructuras principales, usando para tal caso una máquina PDP-11. Después, para un uso más amplio entre estudiantes, se desarrollaron versiones compatibles con APFLE y CP/M. Su popularidad entre ingenieros y científicos europeos permitió introducirlo a los Estados Unidos en 1982. Para entonces el TUTSIM podía emplearse en PC-IBM, siendo esta la "versión 1.0". La compañía Applied i, con asistencia de "Meerman Automation" en Ze Nee, Países Bajos, ha contribuido a desarrollar la versión actual.

En Norteamérica el TUTSIM es distribuido por Applied i, de Palo Alto, California. Actualmente Applied i trabaja en el desarrollo de nuevas versiones del TUTSIM.

### II.1 MANEJO DEL SIMULADOR.

En este capítulo se aborda la forma de realizar simulaciones de modelos matemáticos valiéndose del TUTSIM. Para esto se explica brevemente el manejo del paquete, de hecho se muestra la forma de uso de los

principales comandos, los cuales se dividen en los siguientes grupos:

- comandos de acceso
- comandos de edición
- comandos de simulación
- otros comandos importantes

Además de los comandos aquí descritos, en el Apéndice A se presenta una lista muy amplia, la cual puede ser consultada por el usuario.

### II.1.1 COMANDOS DE ACCESO.

En esta parte es conveniente explicar la "inicialización" y copiado del paquete. Esto se refiere a que el programa TUTSIM no correrá a menos que sea "inicializado" con el programa TUTINIT.EXE, lo cual sólo se ejecuta cuando se trata de un programa recién comprado, después de esto se tiene acceso al programa. En caso que se trate de una copia de un disco ya "inicializado" no se requiere el TUTINIT.EXE.

Si se trabaja con un disco duro se recomienda copiar los archivos del TUTSIM a un directorio adecuado. Si se trabaja con discos flexibles, entonces se debe poner el TUTSIM y los archivos \*.SIM y \*.DOC en un disco, de esta forma puede ahorrarse un disco al tener estos archivos y el sistema DOS juntos.

### COMO ACCEDER AL TUTSIM

Para tener acceso al programa TUTSIM se tiene que teclear "TUTSIM". Después de esto aparece la siguiente pantalla o similar:

```

*****          TUTSIM IBM/PC/XT/AT VERSION 5.0          *****
*****          Distributed by APPLIED i in USA and CANADA          *****
*****          APPLIED i, 200 California Avenue, Palo Alto, CA 94304          *****
*****          US and Canadian Copyright: APPLIED i 1985,1984,1985,1986          *****
*****          Elsewhere: Copyright and Distributed by:          *****
*****          * MEERMAN AUTOMATION, Postbus 194, 7100 AC Nieuwe, The Netherlands *
*****
*****          ***** SINGLE MACHINE LICENSE *****          *****
*****          * Registered to:          *****          *****
*****          *   User's Name          *****          *****
*****          *   Company Name          *****          *****
*****          *   Street Address          *****          *****
*****          *   City          *****          *****          Department or Mail Stop
*****          *   Country          *****          *****          State          Zipcode
*****          *   SERIAL NUMBER: nnnnn          *****          *****          DATE: mm/dd/yy          *****
*****          *****          *****          *****          *****          *****
*****          PROFESSIONAL VERSION OF TUTSIM: MAXIMUM MODEL SIZE IS 099 BLOCKS.
*****
INPUT FROM ?

K = MODEL INPUT WITH KEYBOARD
F = MODEL FILE INPUT FROM FLOPPY
N = TO CONTINUE WITH PRESENT MODEL
?

```

Los demás comandos son simples, de una dos o tres letras. Las que deben ir seguidas de un "cr" (tecla return). Las entradas de usuario son subrayadas.

El usuario tiene las opciones "K", "F" o "N", para llamar o introducir el modelo.

Un comando "K" indica que las especificaciones del modelo se dan con el teclado. Se usa "K" para introducir un modelo nuevo.

Un comando "F" indica que se va a usar un modelo que existe como archivo.

Un comando "N" indica que se sigue usando el modelo que está en la memoria. Usualmente se usa "N" para restablecer el TUTSIM o entrar directamente al modo de edición.

Para ejemplificar el uso de estos comandos se da la respuesta "F" (en este caso se usa CRIS'1, que es el nombre del archivo que se le asignó a un problema de cristalización):

```

?E
MODEL FILE INPUT FROM FLOPPY DISK
TYPE FILE NAME (? FOR DIRECTORY)
"CRIS'1
COMMAND:

```

"COMMAND:", en la pantalla, indica que el TUTSIM está en modo de comandos. En este modo se pueden teclear la mayoría de los comandos operativos, y también el comando HELP: "H".

El comando HELP despliega el resto de los comandos TUTSIM.

### II.1.2 COMANDOS DE EDICION

#### TECLAS DE FUNCIONES PARA ETIQUETAR CURVAS

Después de empezar la simulación gráfica usando el comando SD, se puede presionar F1, F2, F3 o F5 para ver las escalas y el número de identificación de cada curva.

#### ENTRADA O CAMBIO DE LA ESTRUCTURA DEL MODELO

Después de graficar hay que presionar la tecla "return" para regresar al modo comando; esto es en caso de que se vaya a editar. Si se entra al programa con la tecla "K" aparece la forma como se debe introducir el modelo. El orden para dar los datos de tal modelo es como se explica aquí. Ahora se muestra la sintaxis para introducir la estructura del modelo

(las sintaxis o formatos que se ven son tanto para introducir por primera vez el modelo como para editarlo):

NUMERO DE BLOQUE, TIPO DE BLOQUE, ENTRADA 1, ENTRADA 2, ... ; COMENTARIO  
cuando se tenga en la pantalla:

COMMAND: \_

se puede entrar a edición para realizar el cambio que se necesite. En caso que se quiera cambiar la estructura del modelo se utiliza el comando "CS".

Ejemplo:

COMMAND: CS CF

CHANGE STRUCTURE

Format: BLOCKNR, TYPE, INPUT 1, INPUT 2, ... ; OPTIONAL COMMENT

6,MUL,10,11,Producto WMC

Esto indica que el cambio realizado consiste en que el bloque 6 era CON y ahora es MUL y sus entradas provienen de las salidas de los bloques 10 y 11, los cuales son dos bloques CON que dan los valores de W y C.

Después de realizar el cambio y apretar "return" el programa aparece nuevamente ":" por si se desean hacer mas cambios. Si ya se realizaron todos, solo hay que teclear "return" para regresar al modo comando.

#### ENTRADA O CAMBIO DE LOS PARAMETROS DEL MODELO

Para cambiar los parámetros hay que dar el comando "CP", después de esto aparece en la pantalla ":" entonces se introducen los cambios en los parámetros. La sintaxis para introducir los parámetros al inicio o para hacer

cambios es la siguiente:

NUMERO DE BLOQUE, PARAMETRO 1, PARAMETRO 2, ....

Ejemplo (se usa el archivo TAN-CAL1 para todos los ejemplos de esta unidad, el cual corresponde al ejercicio desarrollado para un tanque agitador y calentador):

COMMAND: CP CL

CHANGE PARAMETERS

7 50 CL

"7" indica que se trata del bloque 7

"50" es mayor en 15 unidades que el valor anterior

#### ENTRADA O CAMBIO DE LOS BLOQUES GRAFICADOS

Para cambiar la salida de algún bloque en la simulación gráfica o numérica se usa el comando "CB". El formato que debe seguirse es:

NUMERO DE BLOQUE, VALOR MINIMO DE LA VARIABLE EN LA GRAFICA, VALOR MAXIMO

Sólo se pueden graficar cuatro salidas, de la Y1 a la Y4, al renglón donde aparece HORZ se le da como número de bloque el cero y está reservado para el tiempo de simulación. Ejemplo:



COMMAND: CB CT

Date: 2 / 11 / 1992

Time: 14 : 32

Timing: 1.0000 , DELTA : 50.0000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

BlockNo.	Plot-MINimum.	Plot-MAXimum.	Comment
Horz:	0	0.0000	50.0000 ; Time
Y1:	1	55.0000	110.0000 ; TEMPERATURA SALIDA
Y2:	.	.	;
Y3:	.	.	;
Y4:	.	.	;

Format: BLOCKNR, PLOT-MINIMUM, PLOTMAXIMUM  
or: BLOCKNR: ZERO-POSITION, INCREMENT

TO CHANGE: type nev BLOCK#, MIN, MAX.

NOTE: Comments are from structure file; Do not enter here.

TO RETAIN: type (cr); TO DELETE: type "D".  
Block 0 is "time".

Work:

#### ENTRADA O CAMBIO DEL TIEMPO DE INFORMACION

El tiempo de información es el rango de tiempo de simulación durante el cual se obtienen resultados gráficos o numéricos; puede ser igual o diferente que el tiempo dado en el renglón HORZ de la sección "PLOTBLOCKS AND RANGES". Para realizar los cambios del tiempo se usa el comando "CT". El formato es el siguiente:

PASO O INCREMENTO DE TIEMPO, TIEMPO FINAL

Ejemplo:

COMMAND: CT CT

CHANGE TIMING

1.0000, 50.0000

### II.1.3 COMANDOS DE SIMULACION

#### SIMULACION GRAFICA

El comando "SD" grafica la respuesta del modelo, de acuerdo a los bloques escogidos para ser graficados. La figura II.1 muestra el resultado de usar este comando.

Para obtener la simulación gráfica en impresora se usa el comando "HC".

#### SIMULACION NUMERICA

Si se desea tener un listado numérico de la simulación del modelo se utiliza el comando "SN"; este comando despliega en forma de columnas de números los resultados obtenidos de los bloques que fueron señalados en la sección "PLOTBLOCKS AND RANGES". La primera columna se refiere al tiempo y las siguientes cuatro a cada una de las Y's.

Esta simulación numérica puede obtenerse impresa por medio del comando "NP".

### II.1.4 OTRO TIPO DE COMANDOS

#### COMANDO LIST

Al teclear el comando "L cr" se listan todos los parámetros y las conexiones del modelo, ver figura II.3.

El listado tiene el grupo de parámetros completo del modelo y también las instrucciones de tiempo y graficado.

#### INTERRUPCION DE LA SIMULACION

El TUSIM es interactivo. A menudo se quiere interrumpir la

14 BIS.

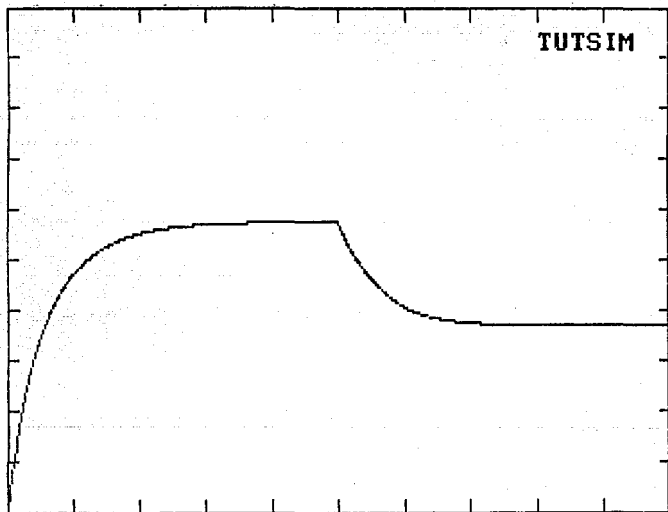


FIGURA IX.1 RESULTADO DE USAR EL COMANDO "SD" (SIMULACION GRAFICA)

simulación en la pantalla. Para hacerlo simplemente se oprime la "barra espaciadora". Para regresar al modo comando después de una interrupción hay que presionar "cr".

#### COMANDOS "V" Y "CL"

Estos comandos son útiles en el modo de interrupción. Ejemplo:

Todos los comandos "S" aceptan el sufijo numérico "in". por ejemplo para n=4 "SN:4": esto significa la salida del valor en la pantalla cada 4 puntos. Permitiendo ahorrar papel o tiempo si la respuesta es lenta. Se puede interrumpir la simulación y pedir la salida de ciertos bloques, aun aquellos no graficados, con el comando "v".

Algunas veces si se vuelve a correr un modelo tal parece que no ocurriera nada porque se está graficando exactamente sobre los puntos anteriores. Para apreciar como se está graficando se usa el comando "CL", que borra la pantalla, y se vuelve a graficar.

## II.2 COMO ARMAR UN MODELO

Se ha dicho que el TUTSIM realiza la simulación dinámica del modelo de un sistema. Ahora se ve como armar dicho modelo para introducirlo al programa.

El ejemplo para ilustrar tal objetivo es el modelo del tanque agitador-calentador (archivo TAN-CAL1). Este sistema involucra transferencia

de calor de la chaqueta, en la que ocurre un cambio de fase, hacia el interior del tanque. Por lo tanto, el líquido que pasa por el interior del tanque aumenta su temperatura inicial  $\theta_1$  a una temperatura final  $\theta_2$ .

### 11.2.1 DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO

El modelo de un sistema siempre describe o involucra un grupo de ecuaciones. Con TUSIM se tratan las ecuaciones término a término en base a bloques operadores del simulador.

El diagrama de bloques se obtiene a partir de las ecuaciones dinámicas del sistema.

#### DESARROLLO DEL MODELO DEL TANQUE AGITADOR Y CALENTADOR

Basándose en la ley de la conservación de la masa y la energía se tiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Energía que gana el} \\ \text{sistema receptor} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Energía que cede el} \\ \text{sistema fuente} \end{array} \right\}$$

la energía ganada es igual a:

$$W c (\theta_1 - \theta_2)$$

siendo W el flujo másico y c la capacidad calorífica.

La energía cedida está determinada por: un coeficiente global de transferencia de calor U el cual es característico de cada sistema, el Área de contacto A entre la chaqueta y el tanque, y la temperatura de la chaqueta  $\theta_H$ :

$$\text{Energía cedida} = - U A (\theta_H - \theta_2)$$

Si el sistema está a régimen dinámico, entonces, la acumulación de energía es igual a lo que entra menos lo que sale:

$$m c \frac{d\theta_2}{dt} = W c (\theta_1 - \theta_2) + U A (\theta_H - \theta_2)$$

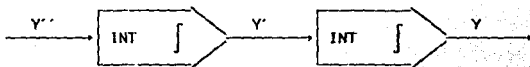
donde  $m$  es la masa del líquido contenido en el tanque.

### 11.2.2 ORDENAMIENTO DE ECUACIONES, DIAGRAMAS DE BLOQUES

El orden numérico que se le da a los bloques no es muy importante.

Se tiende a escribir las ecuaciones con la variable dependiente a la izquierda, pero con los diagramas de bloques se tiende a construirlos con la variable dependiente a la derecha.

Se podrá ver que al convertir una ecuación a un diagrama de bloques usualmente se resuelve para la derivada de mayor orden. Entonces se toma ese término para construir el diagrama con los bloques operacionales. Por lo tanto, puede integrarse la derivada una o dos veces para obtener todos los ordenes de la variable. La siguiente figura es una estructura básica:



Dos integradores;  $y''$  a  $y'$  a  $y$

## CONCLUSION DEL DIAGRAMA DE BLOQUES

De las estructuras de los tipos de bloques (descritas en el Apéndice B) y de la ecuación dinámica descrita antes, el modelo en diagrama de bloques se puede hacer por inspección. Posteriormente, cuando el modelo se ha introducido en TUISIM como una estructura, se puede guardar en el disco. El diagrama de bloques del modelo TAN-CALI queda como se muestra en la figura 11.2.

Después de introducir el modelo TAN-CALI al programa se puede pedir el listado de dicho modelo con el comando "L". desplegándose la pantalla que aparece en la figura 11.3.



FIGURA 11. 2. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MODELO TAN-CALI.

continuación se da una breve explicación del listado.

"TIMING:" Contiene el incremento y el tiempo final para la simulación. El rango siempre empieza de cero.

La primera línea en "PLOTBLOCKS AND SCALES" define el eje X. El primer parámetro de cada línea es la salida del bloque graficado o impreso. El renglón 0 está reservado para el tiempo del TUTSIM. Además es representado como HORZ.

```

Model File: tan-cals
Date: 2 / 4 / 1992
Time: 14 : 59
Timing: 1.0000 DELTA : 50.0000 RANGE
PlotBlocks and Scales:
Format:
BlockNo. Plot-MINimum, Plot-MAXimum; Comment
Horz: 0 , 0.0000 , 50.0000 ; Time
Y1: 1 , 35.0000 , 110.0000 ; TEMPERATURA DE SALIDA
Y2: . , . , . ;
Y3: . , . , . ;
Y4: . , . , . ;
35.0000 1 INT 0 ; TEMPERATURA SALIDA
115.0000 2 CON ; TEMPERATURA CHAQUETA
3 SUM -1 2 ; DELTA T
1.455E+03 4 GAI 3 ; COEF GLOBAL UA*DELTA T
675.0000 5 GAI 1 ; TETA 1SWC
675.0000 6 CON ; VC
35.0000 7 GAI 6 ; TETA 1SWC
8 SUM 4 -5 7 ; SUMATORIA DE CALORES
13.500E+03 9 ATT 8 ; T2

```

FIGURA II.3 LISTADO DEL MODELO TAN-CALS DESPLEGADO POR EL PAQUETE TUTSIM AL USAR EL COMANDO "L".

El rango de HORZ es el rango completo del tiempo de simulación.

El resto de las líneas de "PLOTBLOCKS AND SCALES" son una o más de las cuatro posibles salidas graficadas en el eje "Y". Aquí Y1 está



definida y es la salida del bloque 1.

Las escalas del eje Y son los siguientes dos parámetros de cada línea. La escala de TI es de 35 en la parte inferior de la gráfica y de 110 en la parte superior. Estos parámetros son definidos por el usuario; si se desea cambiarlos se usa el comando "CB".

"MODEL": Aquí cada bloque usado, tipo de bloque, parámetros y conexiones son listados en un formato compacto:  
 Parámetros; No. bloque; Tipo de bloque; Conexiones de entrada . . .

Cerca del centro de algunas líneas está un número y un nombre nemotécnico. Un ejemplo es la cuarta línea con "4 GAI". Esto indica que la línea concierne al bloque 4 del tipo GAI (GAI es ganancia; las entradas se suman y son multiplicadas por un parámetro). El parámetro está a la izquierda, en este caso es  $1.655 \times 10^3$ . La entrada es procedente del bloque 3, como se indica a la derecha. Las entradas pueden ser negativas o positivas; para negativas se indica con el signo (-).

Algunos bloques son generadores de señales y no tienen entrada. Este es el caso del bloque CON (constante). Algunos tienen varias entradas que generalmente son sumadas.

Algunos bloques tienen uno o más parámetros. PLS es uno que tiene más de un parámetro: inicio del pulso, amplitud y altura del pulso. Si la amplitud es igual o excede al pulso, solo se aprecia el inicio de este. Algunos bloques no tienen parámetros, por ejemplo SUM.

La estructura puede cambiarse borrando, adicionando o reconectando bloques en cualquier momento mediante el uso del comando "CS". Cuando se cambia la estructura de los bloques se deben restituir los parámetros. Para esto hay que usar el comando "CP".

### CAPITULO III

#### RESOLUCION DE PROBLEMAS TÍPICOS DE INGENIERIA QUIMICA A REGIMEN DINAMICO

## RESOLUCION DE EJERCICIOS APOYANDOSE EN EL TUTSIM

En este capítulo se propone la resolución de un grupo de ejercicios dando primero el planteamiento del problema y en algunos casos una representación física del mismo. Posteriormente se expone el modelo matemático que describe el sistema y dicho modelo se transforma en diagrama de bloques. Para los ejercicios del ABSORBEDOR DE GAS y del COMPORTAMIENTO DE LA ALTURA DE LIQUIDO EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO solo se muestra el diagrama de bloques inicial, para los incisos de cada uno de los ejercicios se omitirán los diagramas ya que sólo varía un bloque o dos (esto puede verse en el caso del Tanque con flujo por gravedad; archivos en TUTSIM: TANFLUG, TANFLUGA y TANFLUGB). Para cada ejercicio se muestran los listados del modelo matemático tal y como aparecen en el programa de simulación; también se presentan las simulaciones gráfica y numérica de cada ejercicio; en caso de que el ejercicio tenga varios incisos se incluyen los listados y simulaciones para cada inciso. De esta forma se pretende enseñar las ventajas que representa trabajar con este simulador, sobre todo en la obtención de resultados de una forma rápida y manejable.

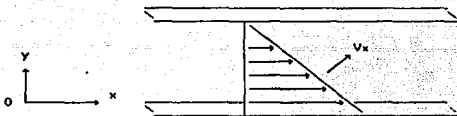
Cabe señalar que las simulaciones numéricas son solamente un resumen del listado de resultados. Las tablas numéricas aparecen en columnas, la primera columna siempre se refiere al tiempo y las siguientes a las variables que se escogieron para conocer su valor. Estas variables se encuentran indicadas en PLOTBLOCKS AND RANGES en forma de Y1 a Y4, de igual manera están localizadas las columnas después

de la que indica el tiempo; aunque no aparezca leyenda arriba de ellas.

En la simulación gráfica las figuras sólo tienen dibujadas las curvas de las variables sin escalas o indicación alguna, para facilitar el entendimiento de la gráfica se indica, cuando se encuentra mas de una curva en cada figura, a que "Y" corresponde cada curva.

FLUX DE MOMENTUM CON AGUA<sup>4</sup>

Se tiene un sistema representado por la siguiente figura



La distancia entre las dos placas es 0.10 cm y la velocidad de la placa inferior es 10 cm/seg. El fluido es agua a 20 °C. Calcular el flux de momentum a régimen permanente.

La ecuación que describe este caso es

$$\rho g \tau_{yx} = -\mu \frac{d^2 u_x}{dy^2} \quad \dots \quad (1)$$

<sup>4</sup> Este ejemplo es para ayudar al lector a comprender las técnicas de simulación. Normalmente la computadora no se usa para resolver casos donde existen soluciones analíticas simples, como este ejemplo.

donde

$\tau_{yx}$  = esfuerzo cortante,  $\overline{q^2}/\text{cm}^2$  ó  $\text{lb}/\text{ft}^2$

$\mu$  = viscosidad,  $\text{gmase}/\text{cm-sec}$  ó  $\text{lbmase}/\text{ft-sec}$

$u_x$  = velocidad en X,  $\text{cm}/\text{seg}$  ó  $\text{ft}/\text{seg}$

$y$  = distancia,  $\text{cm}$  ó  $\text{ft}$

$g_c$  =  $980 \text{ gmase-cm}/\overline{g}\text{-s}^2$  ó  $32.17 \text{ lbmase-ft}/\overline{\text{lb}}\text{-s}^2$

Rearreglando la ecuación para resolver la derivada

$$\frac{du_x}{dy} = - \frac{g_c \tau_{yx}}{\mu}$$

Llamando la variable  $y$  como el tiempo en el simulador, el diagrama es un simple integrador (ver diagrama de bloques para el simulador).

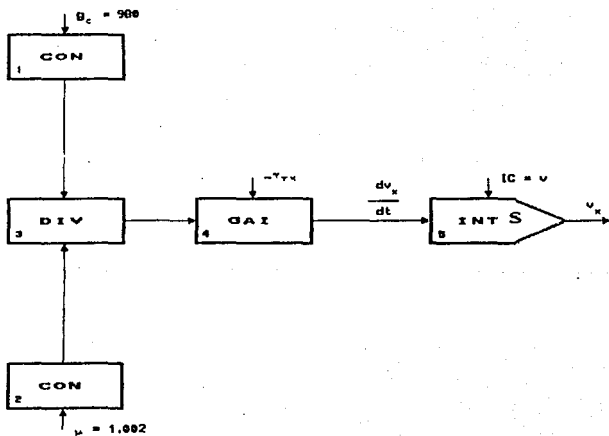
La condición inicial es  $u_x = 0$  a  $y$  (o tiempo  $t$ ) = 0, que es

$$u_x \Big|_{y=0} = 0.$$

#### SOLUCION

Se desconoce  $\tau_{yx}$ . Para hacer una corrida se supone  $\tau_{yx}$  y grafica  $u_x$  contra  $y$  (ó  $t$ ). En  $y = 0.10 \text{ cm}$  la grafica debe dar  $u_x = 0$ . Si no, se prueba de nuevo.

## FLUX DE MOMENTUM CON AGUA





Model File: FLUX

Date: 2 / 27 / 1992

Time: 15 : 36

Timing: 0.010000 ,DELTA ; 0.150000 ,RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	0.150000	Time
Y1: 5	0.0000	15.0000	Vx
Y2:			
Y3:			
Y4:			

980.0000	1 CON			:gc
1.0020	2 CON			:VISCOSIDAD
	3 DIV	1	2	:gc/Nu
-0.1022450	4 GAI	3		:dVx/dt
10.0000	5 INT	4		:Vx

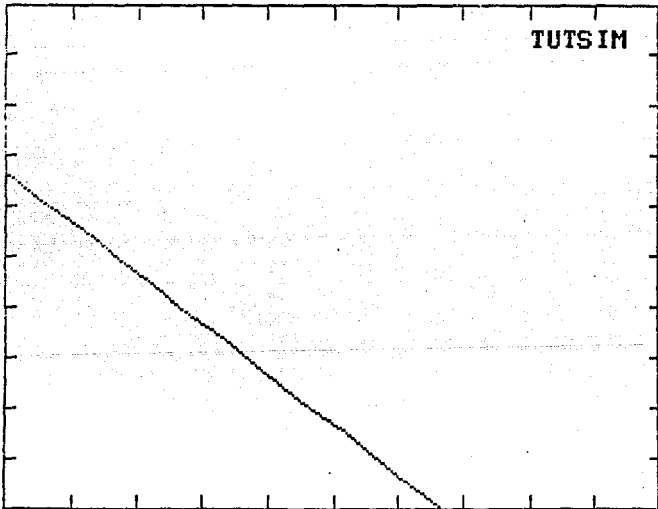
## LISTADO DEL MODELO

## REGULACION NUMERICA

0.0000	10.0000
0.0100000	9.0000
0.0300000	7.0000
0.0400000	6.0000
0.0600000	3.9999
0.0700000	2.9999
0.0900000	0.9999900
0.1000000	-10.728E-06
0.1200000	-2.0000
0.1300000	-3.0000
0.1500000	-5.0000

Model File: FLUX  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 35  
 Timing: 0.0100000 ,DELTA : 0.1500000 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:  

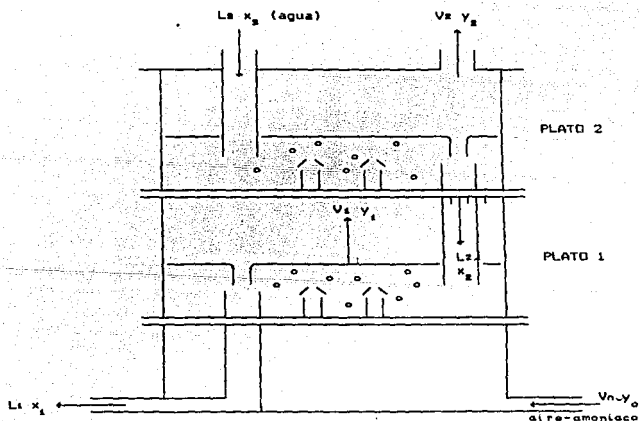
BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
0	0.0000	0.1500000	Time
5	0.0000	15.0000	Vx
Y1:			
Y2:			
Y3:			
Y4:			



SIMULACION GRAFICA

## SIMULACION DE UN ABSORBEDOR DE GAS

En la simulación se espera proporcionar los cambios en la concentración del gas de entrada y la razón del flujo líquido para la columna de dos platos mostrada en la figura:



ABSORBEDOR DE GAS CON PLATOS DE BULBO TAPON

Las ecuaciones que describen el equipo a régimen dinámico son:

$$\frac{dX_1}{dt} = \frac{1}{H} (L_2 X_2 - L_1 X_1) + \frac{V_m}{H} (X_0 - X_1)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = \frac{V_m}{H} (X_1 - X_2) - \frac{1}{H} L_2 X_2$$

$$\frac{dL_2}{dt} = \frac{L_2}{\tau_2} - \frac{L_2}{\tau_2}$$

$$\frac{dL_1}{dt} = \frac{L_2}{\tau_1} - \frac{L_1}{\tau_1}$$

Hay cuatro variables dependientes ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $X_1$  y  $X_2$ ) y dos funciones de fuerza ( $X_0$  y  $L_0$ ) en este grupo de ecuaciones simultáneas, donde:

$L_n$  = flujo de líquido saliendo del  $n$ ésimo plato, moles/min

$V_n$  = flujo de gas saliendo del  $n$ ésimo plato, moles/min

$X_n$  = concentración del líquido saliendo del  $n$ ésimo plato, fracción mol de  $NH_3$

$Y_n$  = concentración del gas saliendo del  $n$ ésimo plato, fracción mol de  $NH_3$

$H$  = acumulación de líquido, moles

$\tau_n$  = constantes de tiempo para el plato "n"

Recordando que  $X_0$  está relacionada con la concentración del gas de entrada  $Y_0$  por

$$X_0 = \frac{Y_0 - b}{m}$$

En otras palabras,  $X_0$  es la concentración de un líquido que estaría en equilibrio con el gas de entrada.

#### PROBLEMA

La torre se simulará para el siguiente problema<sup>4</sup>:

Un absorbedor de dos platos como el mostrado en la figura opera a régimen permanente a 25°C y 1 atm de presión total. Una mezcla de aire-SO<sub>2</sub> conteniendo 2 por ciento en mol de SO<sub>2</sub> entra a la columna a una razón de  $V = 0.031$  lb mol/min de mezcla de gas. Entra agua pura por lo alto de la columna a razón de  $L_s = 0.90$  lb mol/min. La relación de equilibrio es aproximadamente

$$Y = 27 X - 0.00324$$

La acumulación, que es igual para cada plato es  $H = 0.11$  lb mol.

La constante de tiempo del líquido dinámico, que es también igual para

<sup>4</sup> Los valores de  $H$  y  $T$  usados en este problema fueron obtenidos en un estudio experimental de la dinámica de un absorbedor de bulbo-tapon por L. M. Nobbe, "Respuesta transiente de un absorbedor de platos tipo bulbo-tapon". Tesis M.C., Universidad de Purdue, Enero 1961. Los platos, con 8 in de diámetro, tienen 3 bulbos de 2 1/2 in cada uno.

cada plato, es  $\tau = 4$  seg. De esta información se desea hacer la simulación para los siguientes cambios:

- a) Un cambio de paso de 0.02 a 0.043 fracción mol de  $\text{SO}_2$  en  $Y_0$ , todas las demás condiciones permanecen igual.
- b) Un cambio de 0.90 a 0.45 lb mol/min en  $L_s$ , todas las demás condiciones permanecen igual.

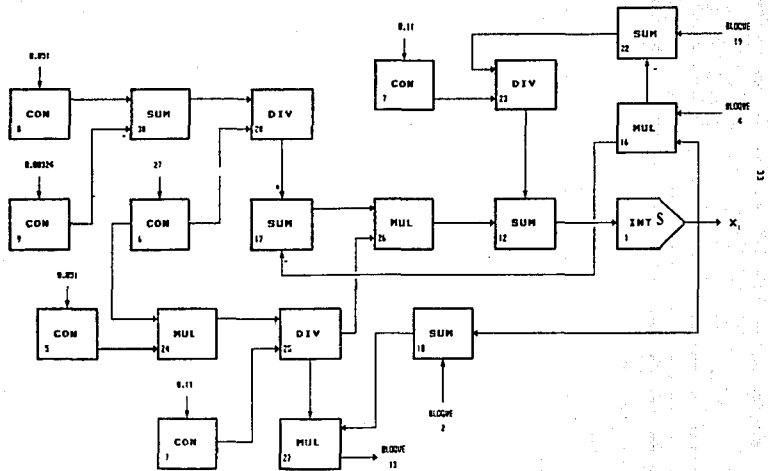
#### SOLUCION

Pasando el modelo matemático a diagrama de bloques este queda como se puede ver en la figura que corresponde a tal diagrama.

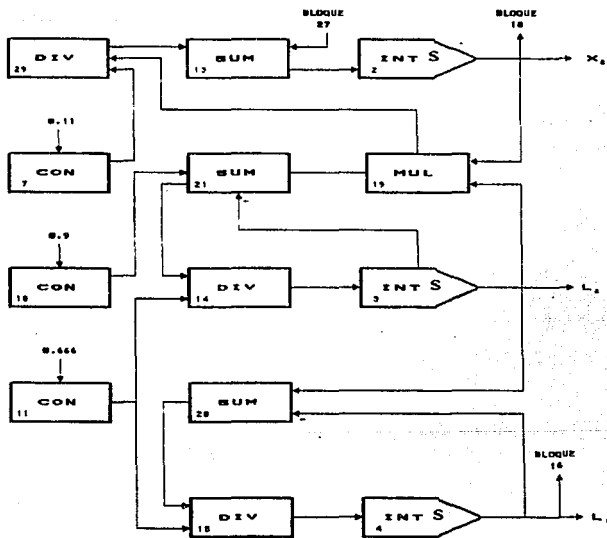
Una vez alcanzado el régimen permanente ocurre la perturbación del inciso a), la cuál se puede representar en el diagrama de bloques como un pulso que entra al bloque 30 (SUMADOR). El pulso empieza una vez alcanzada la estabilidad y permanece en el sistema, aún encontrando un nuevo régimen permanente.

Para el caso del inciso b) es similar, el pulso entra al bloque 21 (SUMADOR), empieza una vez alcanzado el régimen permanente, y sigue hasta llegar a un nuevo régimen permanente.

# SIMULACION DE UN ABSORBEDOR DE GAS



# SIMULACION DE UN ABSORBEDOR DE GAS





Model File: ABSOR

Date: 2 / 27 / 1992

35

Time: 14 : 58

Timing: 0.010000 ,DELTA ; 1.0000 ,RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0 ,	0.0000	1.0000	; Time
Y1: 1 ,	0.0000	800.000E-06	; X1
Y2: 2 ,	0.0000	800.000E-06	; X2
Y3: ,			
Y4: ,			

0.0000	1 INT	12		;X1
0.0000	2 INT	13		;X2
0.0000	3 INT	14		;L2
0.0000	4 INT	15		;L1
0.0510000	5 CON			;V
27.0000	6 CON			;m
0.1100000	7 CON			;H
0.0200000	8 CON			;Yo
0.0032400	9 CON			;b
0.9000000	10 CON			;L3
0.0666700	11 CON			;Tau
	12 SUM	26	23	;dX1/dt
	13 SUM	27	-29	;dX2/dt
	14 DIV	21	11	;{(L3-L2)/Tau
	15 DIV	20	11	;{(L2-L1)/Tau
	16 MUL	1	4	;L1X1
	17 SUM	-16	28	;Xo-X1
	18 SUM	1	-2	;X1-X2
	19 MUL	2	3	;L2X2
	20 SUM	3	-4	;L2-L1
	21 SUM	-3	10	;L3-L2
	22 SUM	-16	19	;L2X2-L1X1
	23 DIV	22	7	;BLOQ 22/H
	24 MUL	6	6	;Vm
	25 DIV	24	7	;Vm/H
	26 MUL	17	25	;{(Xo-X1)*Vm/H
	27 MUL	18	25	;{(X1-X2)*Vm/H
	28 DIV	30	6	;Xo
	29 DIV	19	7	;L2X2/H
	30 SUM	8	-9	;Yo-b

LISTADO DEL MODELO

SIMULACION NUMERICA

0.0100000	77.705E-06	0.0000
0.1100000	686.150E-06	294.595E-06
0.2100000	754.007E-06	449.281E-06
0.3100000	657.873E-06	423.904E-06
0.4100000	590.762E-06	376.400E-06
0.5100000	558.699E-06	347.556E-06
0.6100000	544.990E-06	333.859E-06
0.7100000	539.432E-06	327.987E-06
0.8100000	537.247E-06	325.601E-06
0.9099990	536.404E-06	324.661E-06
0.9999990	536.103E-06	324.320E-06

Model File: ABSOR

Date: 2 / 27 / 1992

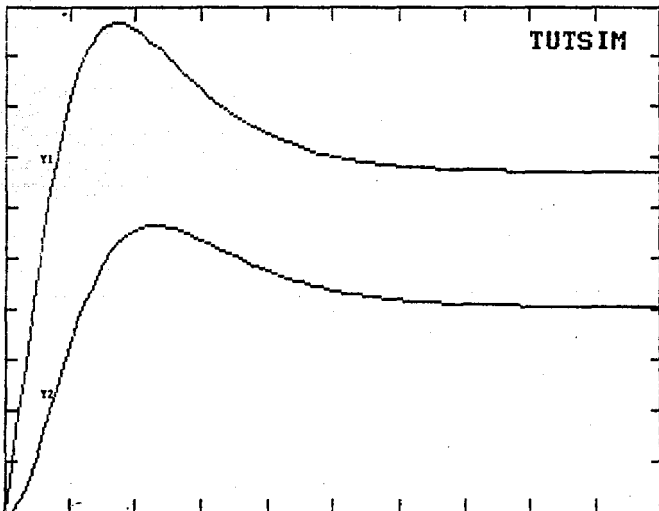
Time: 14 : 57

Timing: 0.0100000 ,DELTA ; 1.0000 ,RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	1.0000	Time
Y1: 1	0.0000	800.000E-06	X1
Y2: 2	0.0000	800.000E-06	X2
Y3:	:	:	:
Y4:	:	:	:



SIMULACION GRAFICA

Model File: ABSOR-DI  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 12  
 Timing: 0.0100000 ,DELTA ; 3.0000 <sup>37</sup> ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:

BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	3.0000	; Time
Y1: 1	0.0000	0.0015000	; X1
Y2: 2	0.0000	0.0015000	; X2
Y3:			; ;
Y4:			; ;
0.0000	1 INT	12	;X1
0.0000	2 INT	13	;X2
0.0000	3 INT	14	;L1
0.0000	4 INT	15	;L2
0.0510000	5 CON		;L1
27.0000	6 CON		;V
0.1100000	7 CON		;W
0.0200000	8 CON		;H
0.0032400	9 CON		;Yo
0.9000000	10 CON		;b
0.0666700	11 CON		;L3
	12 SUM	26	;Tau
	13 SUM	27	;dX1/dt
	14 DIV	21	;dX2/dt
	15 DIV	20	;((L3-L2)/Tau
	16 MUL	1	;((L2-L1)/Tau
	17 SUM	-16	;L1X1
	18 SUM	1	;X0-X1
	19 MUL	2	;X1-X2
	20 SUM	3	;L2X2
	21 SUM	-3	;L2-L1
	22 SUM	-16	;L3-L2
	23 DIV	22	;L2X2-L1X1
	24 MUL	5	;BLOQ 22/H
	25 DIV	24	;V*W
	26 MUL	17	;V*H
	27 MUL	18	;{X0-X1}*V*W/H
	28 DIV	30	;{X1-X2}*V*W/H
	29 DIV	19	;X0
	30 SUM	8	;L2X2/H
1.5000	31 PLS	-9	;Yo-b
3.0000			;disturbio en Yo
0.0230000			

LISTADO DEL MODELO. (INCISO A)

SIMULACION NUMERICA. (INCISO A)

0.0300000	232.063E-06	35.692E-06
0.3300000	640.794E-06	413.573E-06
0.6300000	543.438E-06	332.241E-06
0.9299990	536.313E-06	324.558E-06
1.2300	535.912E-06	324.101E-06
1.5300	755.819E-06	354.112E-06
1.8300	0.0012486	742.458E-06
2.1300	0.0012701	767.453E-06
2.4300	0.0012712	768.739E-06
2.7300	0.0012713	768.805E-06
3.0000	0.0012713	768.809E-06

Model File: ABSOR-DI

Date: 2 / 27 / 1992

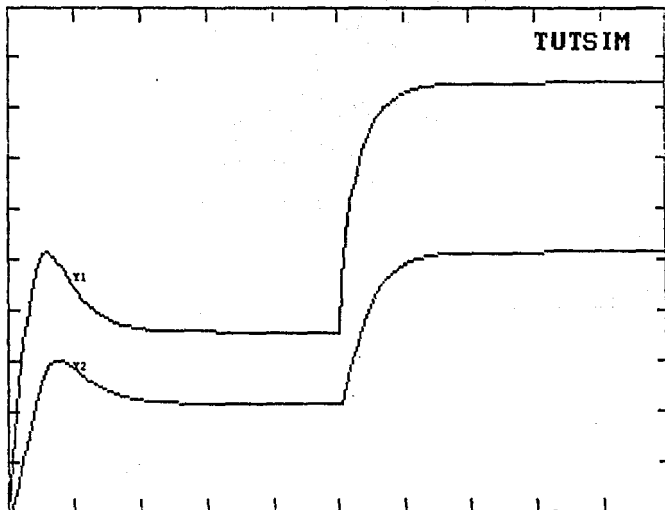
Time: 15 : 11

Timing: 0.0100000 ,DELTA : 3.0000 ,RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	3.0000	Time
Y1: 1	0.0000	0.0015000	X1
Y2: 2	0.0000	0.0015000	X2
Y3:	:	:	:
Y4:	:	:	:



SIMULACION GRAFICA (INCISO A)

Model File: ABSOR-B  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 10  
 Timing: 0.0100000 ,DELTA ; 3.0000 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0,	0.0000	3.0000	; Time
Y1: 1,	0.0000	0.0015000	; X1
Y2: 2,	0.0000	0.0015000	; X2
Y3: 3,	0.0000	1.0000	; L2
Y4: 4,	0.0000	1.0000	; L1

0.0000	1 INT	12			;X1
0.0000	2 INT	13			;X2
0.0000	3 INT	14			;L2
0.0000	4 INT	15			;L1
0.0510000	5 CON				;V
27.0000	6 CON				;m
0.1100000	7 CON				;H
0.0200000	8 CON				;Yo
0.0032400	9 CON				;b
0.9000000	10 CON				;L3
0.0666700	11 CON				;Tau
	12 SUM	26	23		;dx1/dt
	13 SUM	27	-29		;dx2/dt
	14 DIV	21	11		;{(L3-L2)/Tau
	15 DIV	20	11		;{(L2-L1)/Tau
	16 MUL	1	4		;L1X1
	17 SUM	-16	28		;Xo-X1
	18 SUM	1	-2		;X1-X2
	19 MUL	2	-3		;L2X2
	20 SUM	3	-4		;L2-L1
	21 SUM	-3	10	-31	;L3-L2
	22 SUM	-16	19		;L2X2-L1X1
	23 DIV	22	7		;BLOQ 22/H
	24 MUL	5	6		;Vm
	25 DIV	7	7		;Vm/H
	26 MUL	17	25		;{(Xo-X1)*Vm/H
	27 MUL	5	25		;{(X1-X2)*Vm/H
	28 DIV	0	6		;Xo
	29 DIV	19	7		;L2X2/H
	30 SUM	8	-9		;Yo-b
	31 PLS				;disturbio en L3
1.5000					
3.0000					
0.4500000					

LISTADO DEL MODELO (INCISO B)

SIMULACION NUMERICA (INCISO B)

0.0300000	232.063E-06	35.692E-06	0.3308210	0.0673252
0.3300000	640.794E-06	413.573E-06	0.8933830	0.8614570
0.6300000	543.438E-06	332.241E-06	0.8999230	0.8992160
0.9299990	536.313E-06	324.558E-06	0.8999990	0.8999870
1.23000	535.912E-06	324.101E-06	0.9000000	0.9000000
1.5300	531.416E-06	328.551E-06	0.7540370	0.8772210
1.8300	884.697E-06	600.777E-06	0.4535310	0.4703780
2.1300	0.0011045	810.967E-06	0.4500410	0.4504160
2.4300	0.0011563	866.755E-06	0.4500000	0.4500070
2.7300	0.0011672	878.742E-06	0.4500000	0.4500000
3.0000	0.0011694	881.140E-06	0.4500000	0.4500000

Model File: ABSOR-B

40

Date: 2 / 27 / 1992

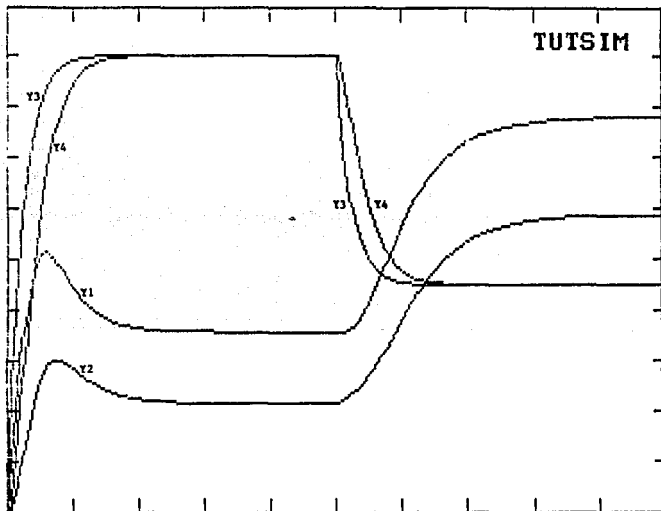
Time: 15 : 8

Timing: 0.010000 ,DELTA : 3.0000 ,RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

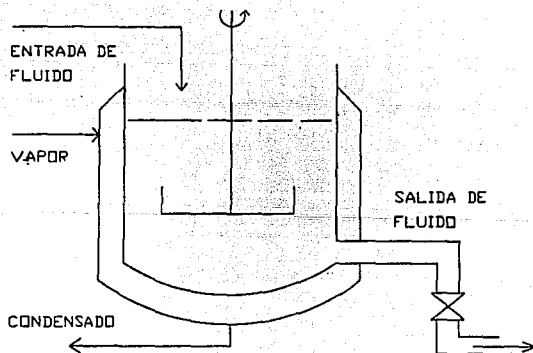
BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	3.0000	Time
Y1: 1	0.0000	0.0015000	X1
Y2: 2	0.0000	0.0015000	X2
Y3: 3	0.0000	1.0000	L2
Y4: 4	0.0000	1.0000	L1



SIMULACION GRAFICA (INCISO B)

## DESVIACION DE LA TEMPERATURA DE UN KETTLE CON CICLO DE CONTROL

La temperatura del contenido de la coraza de un kettle como el que se muestra en la figura es medido por un termocople.



La señal del termopar se recibe por un controlador, que manda una señal neumática a una válvula accionada con aire. Esta válvula controla el suministro de vapor a la coraza. Las funciones de transferencia para los elementos son:

G <sub>v</sub> (válvula)	$\frac{6.4}{1 + 12 s}$	$\frac{\text{KW}}{\text{KPa}}$
G (kettle)	$\frac{0.085}{1 + 300 s}$	$\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{KW}}$
H (termopar)	0.038	$\frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}}$

#### PROBLEMA

Operando la planta a régimen permanente, la línea de aire que alimenta al accionador neumático se daña, resultando una caída súbita en la señal de presión. Esto puede modelarse como un cambio de paso de magnitud  $-6$  KPa.

¿Cuál será el efecto de la temperatura del contenido del tanque? Resolviendo este problema con la técnica de transformadas de Laplace, considerando un controlador proporcional G<sub>c</sub>, que tiene una constante de ganancia igual a 350 KPa/mV.

Por las reglas de reducción de diagramas de bloques, la función de



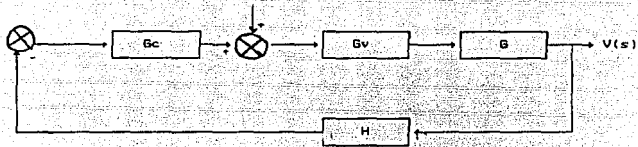


DIAGRAMA DE BLOQUES PARA EL SISTEMA

transferencia del proceso completo es

$$\frac{V(s)}{U(s)} = \frac{G_v G}{1 + G_v G H G_c}$$

La transformada de Laplace para el cambio de paso  $U(t)$  es:

$$U(s) = -\frac{6}{s}$$

por lo tanto

$$V(s) = \frac{-6 G_v G}{s (1 + G_v G H G_c)}$$

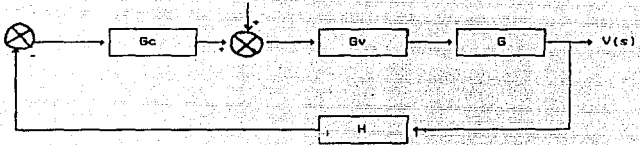


DIAGRAMA DE BLOQUES PARA EL SISTEMA

transferencia del proceso completo es

$$\frac{V(s)}{U(s)} = \frac{G_v G}{1 + G_v G H G_c}$$

La transformada de Laplace para el cambio de paso  $U(t)$  es:

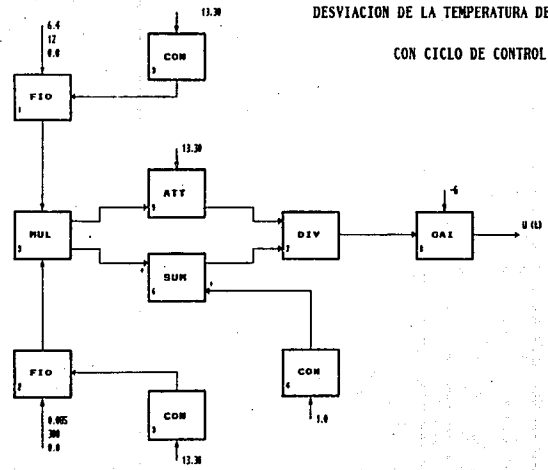
$$U(s) = -\frac{6}{s}$$

por lo tanto

$$V(s) = \frac{-6 G_v G}{s (1 + G_v G H G_c)}$$

# DESVIACION DE LA TEMPERATURA DE UN KETTLE

## CON CICLO DE CONTROL



Model File: KETTLE  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 38  
 Timing: 10.0000 ,DELTA ; 300.0000 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:

Format:  
 BlockNo, Plot-MINimum, Plot-MAXimum, Comment  
 Horz: 0 , 0.0000 , 300.0000 ; Time  
 Y1: 8 , -0.5000000 , 0.5000000 ; V(t)  
 Y2: , , , ;  
 Y3: , , , ;  
 Y4: , , , ;

6.4000 1 FIO 3 ;Gv  
 12.0000  
 0.0000  
 0.0850000 2 FIO 3 ;G KETTLE  
 300.0000  
 0.0000  
 13.3000 3 CON ;H\*Gc  
 1.0000 4 CON ;PARA INVERSO  
 5 MUL 1 2 ;Gv\*G\*Gc\*H  
 6 SUM 4 5 ;1+BLOQ 5  
 7 DIV 9 6 ;GvG/1+GvGGcH  
 -6.0000 8 GAI 7 ;V(t)  
 13.3000 9 ATT 5 ;Gv\*G

## LISTADO DEL MODELO

## SIMULACION NUMERICA

0.0000	0.0000
30.0000	-0.4078620
60.0000	-0.4247110
90.0000	-0.4342150
120.0000	-0.4371490
150.0000	-0.4396040
180.0000	-0.4409410
210.0000	-0.4420200
240.0000	-0.4427670
270.0000	-0.4433670
300.0000	-0.4438300

Model File: KETTLE

46

Date: 2 / 27 / 1992

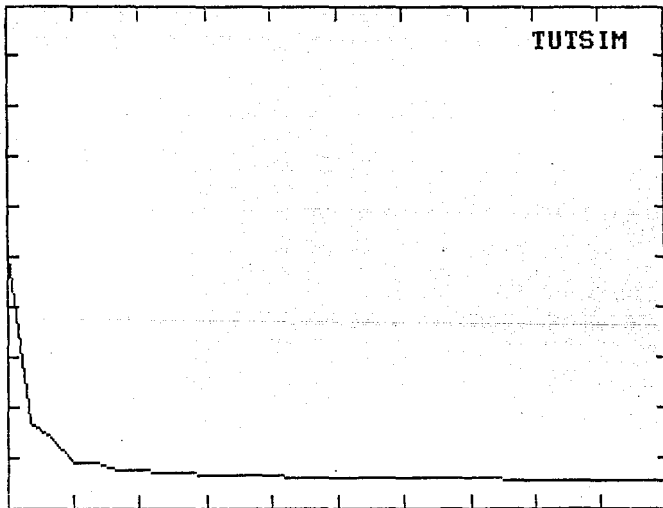
Time: 15 : 37

Timing: 10.0000 , DELTA ; 300.0000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

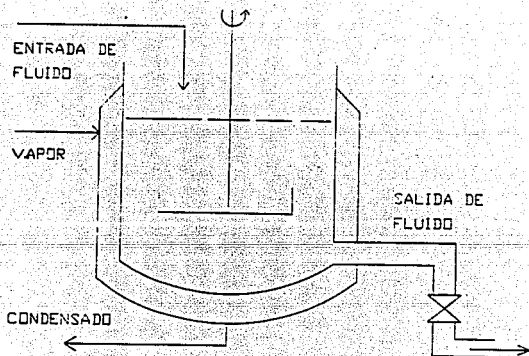
Format:

BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	300.0000	Time
Y1: 8	-0.5000000	0.5000000	V(t)
Y2:	:	:	:
Y3:	:	:	:
Y4:	:	:	:



SIMULACION GRAFICA

## RESPUESTA DINAMICA DE UN TANQUE AGITADOR Y CALENTADOR



Tomando flujo másico constante,  $W$ , el balance de calor alrededor del tanque queda:

$$W c \theta_1 - W c \theta_2 + U A (\theta_H - \theta_2) = m c \frac{d\theta_2}{dt} \quad (1)$$

donde:

$W$  = flujo másico del líquido a la entrada y salida del tanque

$c$  = calor específico del líquido

$m$  = masa del líquido contenido en el tanque, asumiendo que es constante (incluyendo si es necesario una masa para representar las paredes del tanque y del agitador)

$\theta_1$  = temperatura del líquido a la entrada del tanque

$\theta_2$  = temperatura del contenido del tanque, asumiendo que es uniforme y además igual a la temperatura del líquido en la salida del tanque

$\theta_H$  = temperatura de la chaqueta, considerándola constante

$U$  = coeficiente global de transferencia de calor, de la chaqueta al contenido del tanque

$A$  = área de transferencia de calor

#### PROBLEMA

Si se tiene un flujo de 500 Kg/h, el cual es alimentado a un tanque enchaquetado como el mostrado en la figura y este tanque contiene 10 000 Kg de un líquido cuyo calor específico es de 1.35 Kcal/Kg °C analizar si el tanque

a) alcanza el estado estable al variar su temperatura de entrada de  $35^{\circ}\text{C}$  a:  $50^{\circ}\text{C}$

b) si así es, en cuánto tiempo lo alcanza y cual es el valor de  $\theta_2$  para cada caso.

El área de transferencia de calor es de  $27 \text{ m}^2$  y el coeficiente global de transferencia de calor es igual a  $65 \text{ Kcal}/^{\circ}\text{C m}^2$ . El tanque es calentado con vapor saturado de  $115^{\circ}\text{C}$  de temperatura.

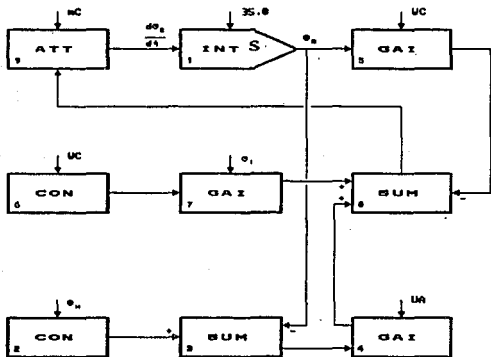
#### SOLUCION

Despejando la derivada de la ecuación (1), se tiene lo siguiente

$$\theta_2' = \frac{1}{m c} \left[ W_c \theta_1 - W_c \theta_2 + U \cdot A \cdot (\theta_H - \theta_2) \right]$$



RESPUESTA DINAMICA DE UN TANQUE  
AGITADOR Y CALENTADOR



Model File: TAN-CAL1  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 48  
 Timing: 1.0000 , DELTA ; 50.0000 , RANGE  
 PlotBlocks and Scales:

Format:

Horz	BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Y1:	0 ,	0.0000	50.0000	Time
Y2:	1 ,	35.0000	110.0000	TEMPERATURA SALIDA
Y3:	,	,	,	,
Y4:	,	,	,	,
	35.0000	1 INT	9	; TEMPERATURA SALIDA
	115.0000	2 CON		; TEMPERATURA CHAQUETA
		3 SUM	-1 2	; DELTA T
	1.655E+03	4 GAI	3	; COEF GLOBAL UA*DELTA T
	675.0000	5 GAI	1	; TETA 2*WC
	675.0000	6 CON		; WC
	35.0000	7 GAI	6	; TETA 1*WC
		8 SUM	4 -5 7	; SUHATORIA DE CALORES
	13.500E+03	9 ATT	8	; T2'

LISTADO DEL MODELO

SIMULACION	NUMERICA
0.0000	35.0000
5.0000	67.9816
10.0000	81.6477
15.0000	87.4807
20.0000	89.9702
25.0000	91.0328
30.0000	91.4863
35.0000	91.6799
40.0000	91.7625
45.0000	91.7978
50.0000	91.8128

Model File: TAN-CALI

52

Date: 2 / 27 / 1992

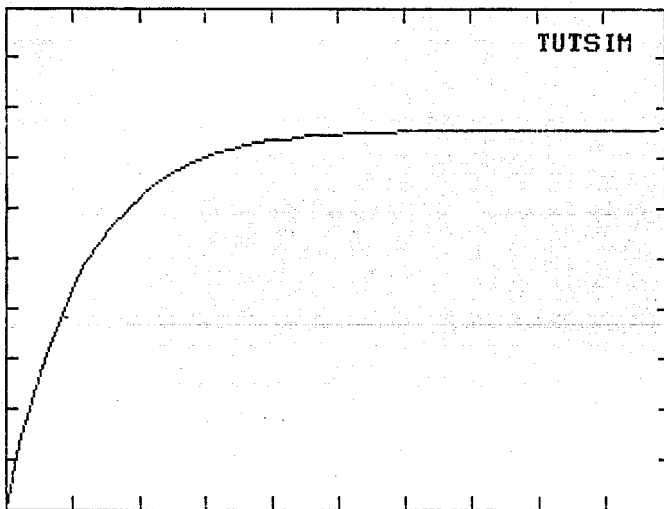
Time: 15 : 45

Timing: 1.0000 , DELTA : 50.0000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

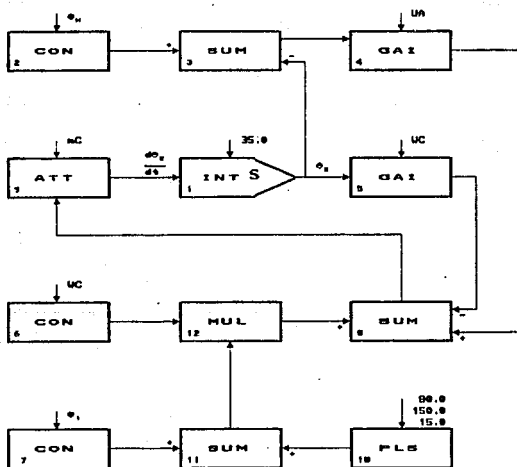
Format:

BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	50.0000	Time
Y1: 1	35.0000	110.0000	TEMPERATURA SALIDA
Y2:			
Y3:			
Y4:			



SIMULACION GRAFICA

RESPUESTA DINAMICA DE UN TANQUE  
 AGITADOR Y CALENTADOR  
 INCISO a)



Model File: TAN-CAL2  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 55  
 Timing: 1.0000 , DELTA ; 150.0000 , RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0 ,	0.0000 ,	150.0000 ;	Time
Y1: 1 ,	30.0000 ,	110.0000 ;	TEMPERATURA SALIDA
Y2: ,	, ,	, ;	
Y3: ,	, ,	, ;	
Y4: ,	, ,	, ;	
35.0000	1 INT	9	; TEMPERATURA SALIDA
115.0000	2 CON		; TEMPERATURA CHAQUETA
	3 SUM	-1 2	; DELTA T
1.655E+03	4 GAI	3	; COEF GLOBAL UA*DELTA T
675.0000	5 GAI	1	; TETA 2*WC
675.0000	6 CON		; WC
35.0000	7 CON		; TETA 1
	8 SUM	4 -5	12 ; SUMATORIA DE CALORES
13.500E+03	9 ATT	8	; T2'
80.0000	10 PLS		; DIETURBIO EN TETA 1
150.0000			
15.0000			
	11 SUM	7 10	; TETA 1 DISTURB
	12 MUL	11 6	; TETA 1 * WC

LISTADO DEL MODELO (INCISO A)

SIMULACION NUMERICA (INCISO A)

1.0000	44.8074
16.0000	88.1607
31.0000	91.5392
46.0000	91.8019
61.0000	91.8223
76.0000	91.8239
91.0000	95.5741
106.0000	96.1232
121.0000	96.1659
136.0000	96.1693
150.0000	96.1695

Model File: TAN-CAL2

Date: 2 / 27 / 1992

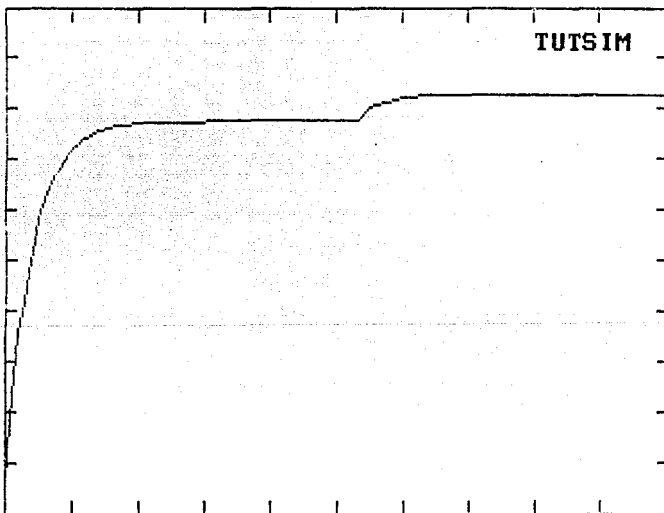
Time: 15 : 52

Timing: 1.0000 , DELTA ; 150.0000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

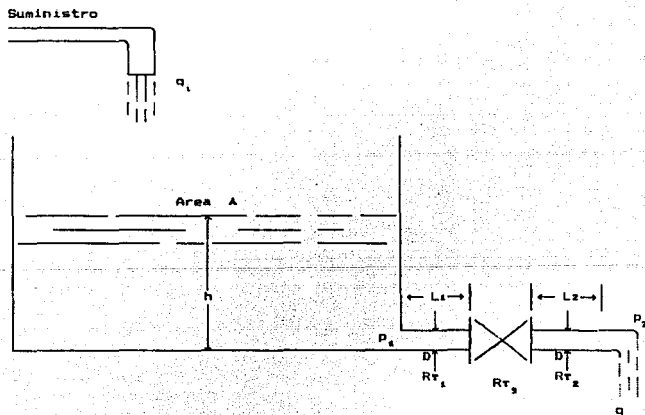
BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	150.0000	Time
Y1: 1	30.0000	110.0000	TEMPERATURA SALIDA
Y2:			
Y3:			
Y4:			



SIMULACION GRAFICA (INCISO A)

## COMPORTAMIENTO DE LA ALTURA DE UN LIQUIDO EN UN TANQUE

Desarrollo de un modelo para el comportamiento de la altura  $h$  del liquido en el sistema mostrado en la figura.



Un componente parecido a una válvula ha sido insertado entre las dos secciones del tubo. Considerar que existe flujo turbulento y mostrar que la resistencia total en la turbulencia es la suma de todas las resistencias de los elementos.

PROBLEMA.

Denotar la caída de presión en el tubo 1 por  $\Delta P_1$ , y a la del tubo 2 por  $\Delta P_2$ , y a través del componente por  $\Delta P_3$ . Sabiendo que la relación de resistencia para flujo turbulento es no lineal y de la forma

$$R_T q^2 = P_1 - P_2$$

entonces

$$R_{T1} q^2 = \Delta P_1$$

$$R_{T2} q^2 = \Delta P_2$$

$$R_{T3} q^2 = \Delta P_3$$

donde la razón de flujo  $q$  es la misma a través de cada elemento. Las resistencias  $R_{T1}$  y  $R_{T2}$  se obtienen de

$$R_T = \frac{8 f L \rho}{\pi^2 D^5}$$

y  $R_{T3}$  de

$$R_T = \frac{8 \rho C_L}{\pi^4 D^4}$$



donde:

$f$  = factor de fricción (se obtiene de tablas)

$C_L$  = coeficiente de pérdida de cabeza, está disponible en información de fabricantes o en manuales

$D$  = diámetro; para componentes como válvulas, codos, etc. se trata del diámetro de salida

$\rho$  = densidad del líquido

$L$  = longitud del tubo

La caída de presión através de los tres elementos es la suma de las caídas en cada elemento. Por lo tanto

$$P_1 - P_2 = R_{T1} q^2 + R_{T2} q^2 + R_{T3} q^2$$

ó

$$P_1 - P_2 = R_T q^2$$

donde

$$R_T = R_{T1} + R_{T2} + R_{T3}$$

Como  $P_1 - P_2 = \left[ \rho g h \right]$ , se tiene

$$q = \sqrt{\frac{\rho g h}{R_T}}$$

y de la conservación de volumen (masa)

$$A \frac{dh}{dt} = q_L - \sqrt{\frac{\rho g h}{R_T}}$$

Si el sistema es un tanque atmosférico de almacenamiento de crudo de 32 °API a temperatura ambiente, 20 °C. Obtener:

- a) Que altura alcanza al llegar al régimen permanente, y en cuanto tiempo lo hace, si el flujo volumétrico es de 1 m<sup>3</sup>/minuto
- b) Al alcanzar el régimen permanente, ¿qué ocurre? si el flujo volumétrico cambia a:
  - I. 0.8 m<sup>3</sup>/min
  - II. 1.35 m<sup>3</sup>/min
  - III. Hay un cambio de 1 a 2 m<sup>3</sup>/min durante treinta minutos y luego cambia a su valor inicial.
- c) Si se interrumpe la alimentación, en cuanto tiempo se vacía el tanque.

#### SOLUCIÓN

Para este modelo el diagrama de bloques se dividirá en dos partes, para poderlo apreciar mejor. Una será la evaluación de  $R_T$ , de la ecuación 7 (figura 1); otro será en sí la ecuación 7, con  $R_T$  ya calculada (figura 2).

Los resultados se presentan indicando de que caso se trata cada grupo de estos.

Para los casos planteados en los incisos b) y c) se pueden manejar como pulso que entra al bloque 11 (sumador). Los parámetros de cada pulso se pueden apreciar en los diagramas de bloques y en los listados de cada inciso.

FIGURA 1. COMPORTAMIENTO DE LA ALTURA DE UN LIQUIDO EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO

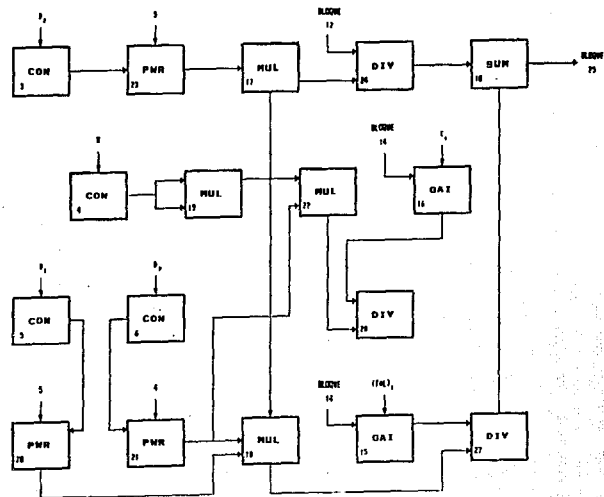
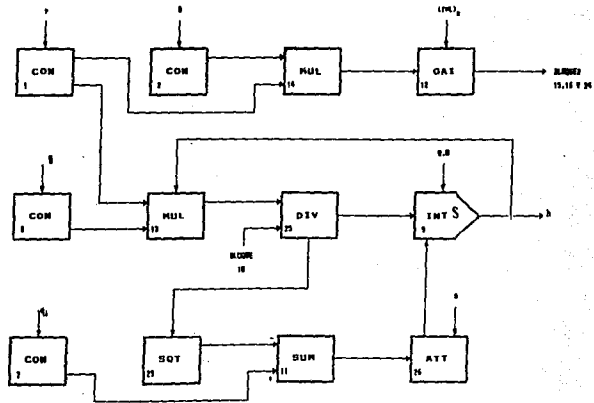


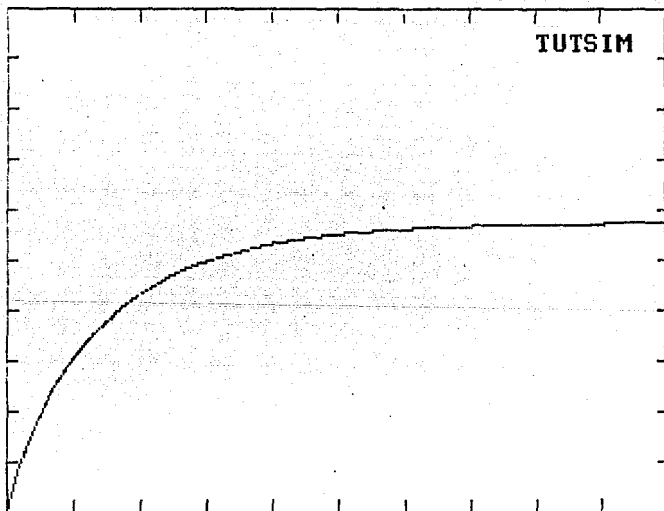
FIGURA 2. COMPORTAMIENTO DE LA ALTURA DE UN LIQUIDO EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO





Model File: AL-TAN  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 15  
 Timing: 40.0000 ,DELTA ; 40.000E+03 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:  

BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	40.000E+03	Time
Y1: 9	0.0000	500.0000	h
Y2: .	.	.	.
Y3: .	.	.	.
Y4: .	.	.	.

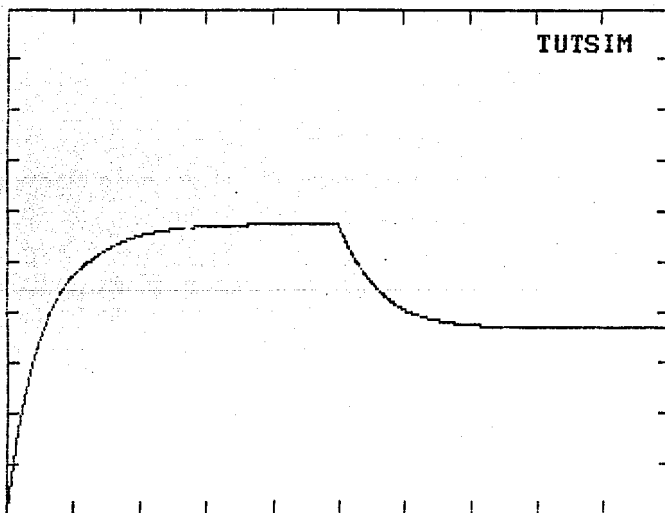


SIMULACION GRAFICA (INCISO A)



Model File: altan a1  
 Date: 4 / 2 / 1992  
 Time: 15 : 6  
 Timing: 100.0000 ,DELTA ; 100.000E+03 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:  

BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	100.000E+03	Time
Y1: 9	0.0000	500.0000	h
Y2:			
Y3:			
Y4:			



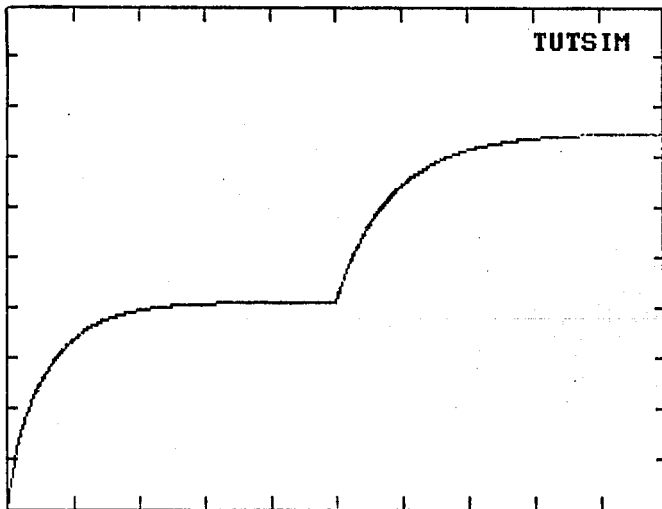
SIMULACION GRAFICA (INCISO B.1)





Model File: ALTAN B2  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 20  
 Timing: 100.0000 ,DELTA ; 100.000E+03 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0 ,	0.0000 ,	100.000E+03 ;	Time
Y1: 9 ,	0.0000 ,	700.0000 ;	h
Y2: ,	, ,	, ;	
Y3: ,	, ,	, ;	
Y4: ,	, ,	, ;	



SIMULACION GRAFICA (INCISO B.2)

Model File: ALTAN B3  
 Date: 2 / 27 / 1992 68  
 Time: 15 : 25  
 Timing: 100.0000 ,DELTA ; 100.000E+03 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum,	Comment
Horz: 0 ,	0.0000	100.000E+03	: Time
Y1: 9 ,	0.0000	500.0000	: h
Y2: ,	:	:	:
Y3: ,	:	:	:
Y4: ,	:	:	:
0.8200000	1 CON		:DENSIDAD
8.0000	2 CON		:8
10.0000	3 CON		:D2
3.1416	4 CON		:PI
10.0000	5 CON		:D1
5.0000	6 CON		:D3
16.667E+03	7 CON		:q1
981.0000	8 CON		:E
0.0000	9 INT	25	:h
	10 SUM	24 27	:Rt
	11 SUM	7 -29	28 30
10.0000	12 GAI	14	:
	13 MUL	1 8	:RO*g=h
	14 MUL	1 2	:8*RO
3.2000	15 GAI	14	:
0.7000000	16 GAI	14	:
	17 MUL	23 19	:
	18 MUL	19 20	:
	19 MUL	4 4	:PI CUADRADO
5.0000	20 PWR	5	:D1^5
4.0000	21 PWR	6	:D3^4
	22 MUL	21 19	:
5.0000	23 PWR	3	:D2^5
	24 DIV	12 17	:
	25 DIV	13 10	:
200.000E+03	26 ATT	11	:
	27 DIV	15 18	:
	28 DIV	16 22	:
	29 SQT	25	:
50.000E+03	30 PLS		:DISTURBIO EN q1
51.800E+03			
16.666E+03			

LISTADO DEL MODELO (INCISO B.3)

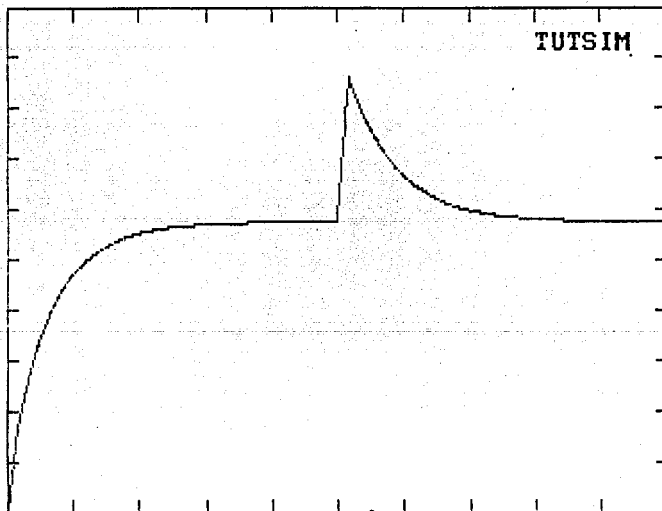
SIMULACION NUMERICA (INCISO B.3)

1.200E+03	66.3841
11.200E+03	244.0620
21.200E+03	277.4890
31.200E+03	285.0600
41.200E+03	286.8220
51.200E+03	287.0060
61.200E+03	287.3960
71.200E+03	287.7530
81.200E+03	287.9780
91.200E+03	287.8620
100.000E+03	287.5070

Model File: ALTAN B3  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 22  
 Timing: 100.0000 , DELTA : 100.000E+03 , RANGE  
 PlotBlocks and Scales:

Format:  

BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	100.000E+03	Time
Y1: 9	0.0000	500.0000	h
Y2:	:	:	:
Y3:	:	:	:
Y4:	:	:	:

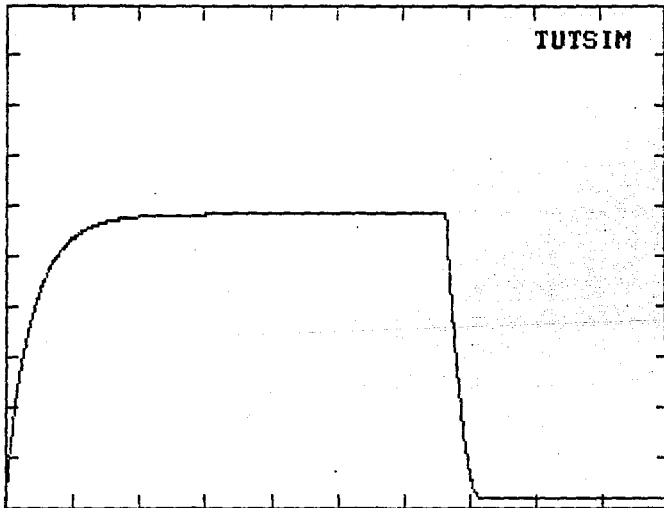


SIMULACION GRAFICA (INCISO B.3)



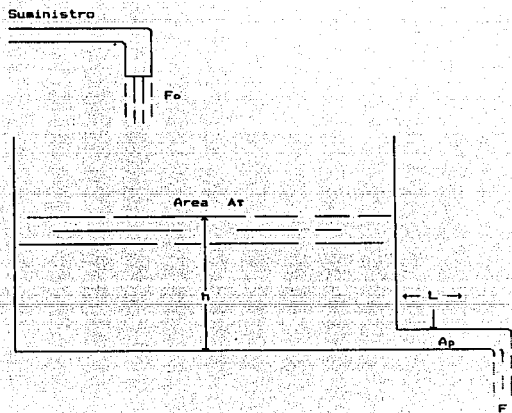
Model File: ALTAN-C  
Date: 2 / 27 / 1992  
Time: 15 : 26  
Timing: 100.0000 , DELTA ; 150.000E+03 , RANGE  
PlotBlocks and Scales:

Format:  
BlockNo, Plot-MINimum, Plot-MAXimum; Comment  
Horz: 0 , 0.0000 , 150.000E+03 ; Time  
Y1: 9 , -10.0000 , 500.0000 ; h  
Y2: , , , ;  
Y3: , , , ;  
Y4: , , , ;



SIMULACION GRAFICA (INCISO C)

## TANQUE CON FLUJO A LA SALIDA POR GRAVEDAD



El balance de fuerza en la línea de salida da la ecuación diferencial ordinaria no-lineal

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g}{L} h - \frac{K_f g c}{\rho A_p} v^2 \quad (1)$$

Para describir completamente el sistema se necesita una ecuación total de continuidad para el líquido en el tanque

$$A_t \frac{dh}{dt} = F_0 - F \quad (2)$$

donde

$A_p$  = Área de flujo transversal para el tubo

$A_t$  = Área transversal al eje vertical en el tanque

La ecuación (1) es no lineal por el término  $v^2$ .

#### PROBLEMA

Resolver el sistema para los valores de los parámetros que se dan a continuación, así como para el flujo y la altura del líquido.

Para el tubo:

$D_i = 3 \text{ ft}$

Área =  $7.06 \text{ ft}^2$

Longitud = 3000 ft



Tanque

$$D_i = 12 \text{ ft}$$

$$\text{Area} = 113 \text{ ft}^2$$

$$\text{Altura} = 7 \text{ ft}$$

Valores del estado estable

$$\bar{F} = 35.1 \text{ ft}^3/\text{s} \text{ (15 700 gpm)}$$

$$\bar{h} = 4.72 \text{ ft}$$

$$\bar{v} = 4.97 \text{ ft/s}$$

Parámetros

$$\text{Número de Reynolds} = 1\,380\,000$$

$$\text{Factor de fricción} = 0.0123$$

$$K_f = 2.81 \times 10^{-2} \frac{\text{lb}}{(\text{ft/s})^2} \text{ ft}$$

Se resolverá el sistema de acuerdo a los siguientes casos:

- Cuando el flujo inicial es 50 por ciento del de diseño
- Cuando el flujo inicial es 67 por ciento del de diseño

En el tiempo igual a cero, la razón de flujo en el tanque aumenta a la razón de flujo máximo de diseño de  $35.1 \text{ ft}^3/\text{s}$ .

SOLUCION

Usando la relación de  $F = \left[ v A_p \right]$  y sustituyendo los valores numéricos de los parámetros en las ecuaciones (1) y (2) da

$$\frac{du}{dt} = 0.0107 h - 0.00205 u^2 \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

$$\frac{dh}{dt} = 0.311 - 0.0624 u \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

el diagrama de bloques de las ecuaciones (3) y (4) se puede ver en su figura correspondiente.

a) Las ecuaciones 1 y 2 para flujo inicial de 50 % del de diseño quedan rearrregladas de la siguiente forma:

$$\frac{du}{dt} = 0.0107 h - 0.00205 u^2 \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

$$\frac{dh}{dt} = 0.155 - 0.0624 u \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

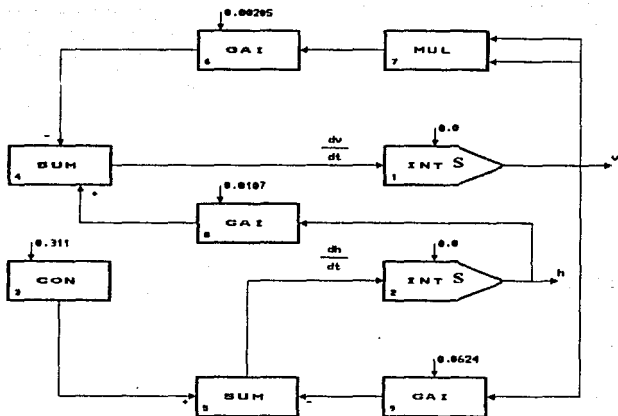
b) Para flujo inicial de 67 % del de diseño, el modelo matemático

es

$$\frac{du}{dt} = 0.0107 h - 0.00205 u^2 \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

$$\frac{dh}{dt} = 0.208 - 0.0624 u \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

TANQUE CON FLUJO A LA SALIDA  
POR GRAVEDAD



Model File: TANFLU-G  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 56  
 Timing: 0.500000 ,DELTA ; 700.0000 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:

Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0	0.0000	700.0000	; Time
Y1: 1	0.0000	15.0000	; v
Y2: 2	0.0000	15.0000	; h
Y3: ;	;	;	;
Y4: ;	;	;	;
0.0000	1 INT	4	;v
0.0000	2 INT	5	;h
0.3110000	3 CON		;0.311
	4 SUM	-6 8	;dv/dt
	5 SUM	3 -9	;dh/dt
0.0020500	6 GAI	7	;0.00205*vCUADRADA
	7 MUL	1 1	;V CUADRADA
0.0107000	8 GAI	2	;0.0107*h
0.0624000	9 GAI	1	;0.0624*v

#### LISTADO DEL MODELO

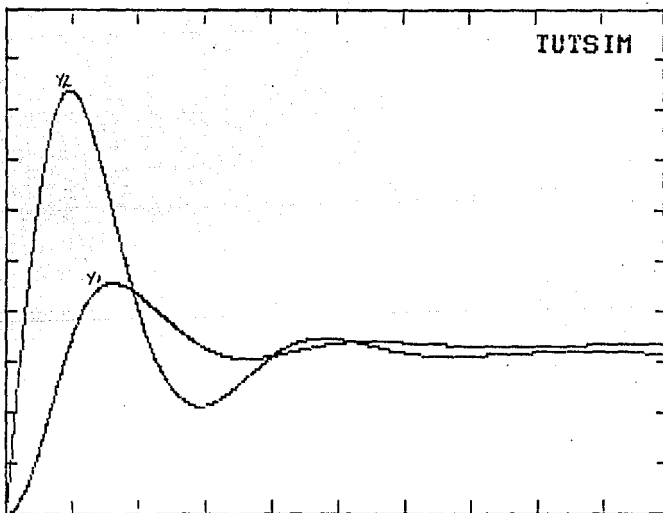
#### SIMULACION NUMERICA

8.5000	0.1192910	2.6226
78.5000	5.8126	12.2476
148.5000	6.3014	5.3534
218.5000	4.7854	3.2567
288.5000	4.6988	4.7852
358.5000	5.0623	5.1320
428.5000	5.0456	4.7219
432.5000	5.0389	4.7074
568.5000	4.9713	4.7755
638.5000	4.9908	4.7779
700.0000	4.9873	4.7549

Model File: TANFLU-G  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 56  
 Timing: 0.500000 ,DELTA ; 700.0000 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:

Format:  

BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	700.0000	Time
Y1: 1	0.0000	15.0000	v
Y2: 2	0.0000	15.0000	h
Y3:			
Y4:			

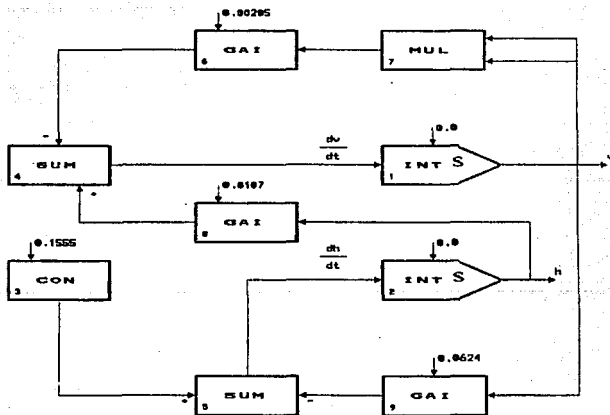


SIMULACION GRAFICA

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

79

TANQUE CON FLUJO A LA SALIDA  
POR GRAVEDAD  
INCISO a)



Model File: TANFLUGA

Date: 2 / 27 / 1992

Time: 15 : 58

Timing: 0.5000000 , DELTA ; 1.000E+03 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0,	0.0000	1.000E+03	; Time
Y1: 1,	-2.0000	7.0000	; v
Y2: 2,	-2.0000	7.0000	; h
Y3: ,			; .
Y4: ,			; .

0.0000	1 INT	4		;v
0.0000	2 INT	5		;h
0.1555000	3 CON			;0.311
	4 SUM	-6	8	;dv/dt
	5 SUM	3	-9	;dh/dt
0.0020500	6 GAI	7		;0.00205*vCUADRADA
	7 MUL	1	1	;v CUADRADA
0.0107000	8 GAI	2		;0.0107*h
0.0624000	9 GAI	1		;0.0624*v

## LISTADO DEL MODELO (INCISO A)

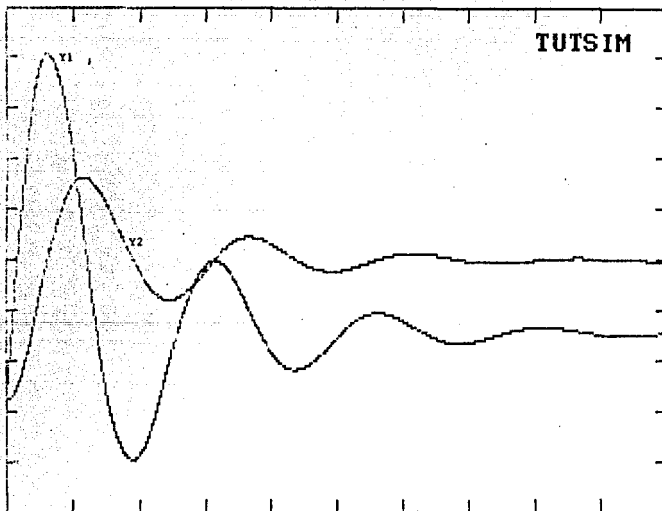
## SIMULACION NUMERICA (INCISO A)

12.0000	0.1185890	1.8365
112.0000	3.9463	3.3125
212.0000	2.0363	-0.7034500
312.0000	2.4801	2.4726
373.0000	2.8824	1.4352
512.0000	2.3112	1.2495
612.0000	2.6021	1.3191
712.0000	2.4491	1.0432
812.0000	2.4948	1.2885
912.0000	2.5046	1.1457
1.000E+03	2.4763	1.1867

Model File: TANFLUGA  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 58  
 Timing: 0.5000000 ,DELTA ; 1.000E+03 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:

Format:  

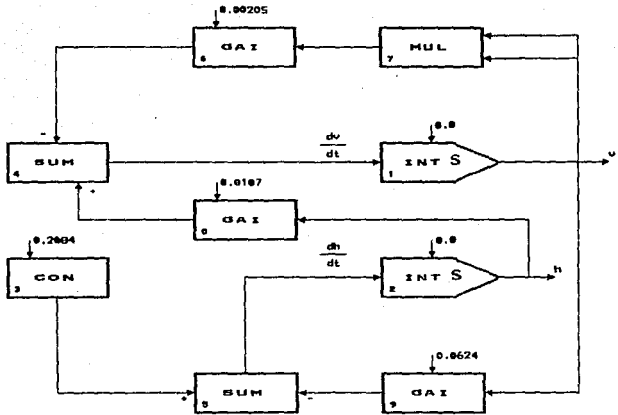
	BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum,	Comment
Horz:	0,	0.0000	1.000E+03	Time
Y1:	1,	-2.0000	7.0000	v
Y2:	2,	-2.0000	7.0000	h
Y3:	,			
Y4:	,			



SIMULACION GRAFICA (INCISO A)



TANQUE CON FLUJO A LA SALIDA POR GRAVEDAD  
 INCISO b)



Model File: TANFLUGB

Date: 2 / 27 / 1992

Time: 16 : 0

Timing: 2.0000 , DELTA : 1.000E+03 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0 ,	0.0000 ,	1.000E+03 ;	Time
Y1: 1 ,	-0.5000000 ,	10.0000 ;	v
Y2: 2 ,	-0.5000000 ,	10.0000 ;	h
Y3: ,	,	,	,
Y4: ,	,	,	,

0.0000	1 INT	4		;v
0.0000	2 INT	5		;h
0.2084000	3 CON			;0.311
	4 SUM	-6	8	;dv/dt
	5 SUM	3	-9	;dh/dt
0.0020500	6 GAI	7		;0.00205*vCUADRADA
	7 MUL	1	1	;V CUADRADA
0.0107000	8 GAI	2		;0.0107*h
0.0624000	9 GAI	1		;0.0624*v

LISTADO DEL MODELO (INCISO B)

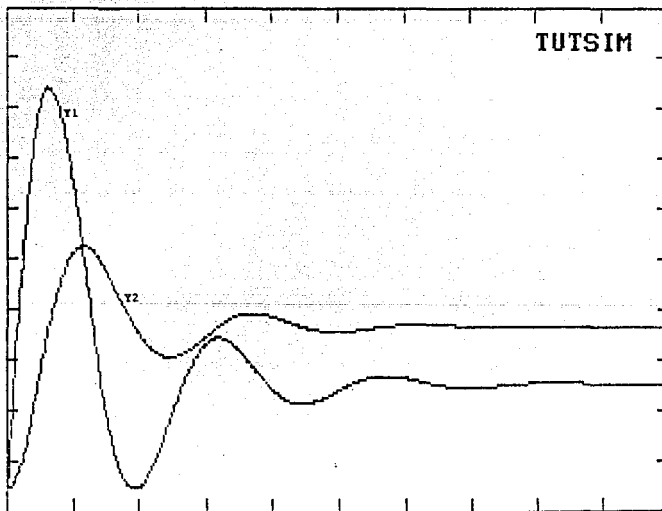
## SIMULACION NUMERICA (INCISO B)

12.0000	0.1551670	2.4663
112.0000	5.0023	5.0606
212.0000	2.9808	0.2179320
312.0000	3.2673	3.0898
412.0000	3.4968	1.9016
512.0000	3.2325	2.0939
612.0000	3.3862	2.2328
712.0000	3.3297	2.0713
812.0000	3.3360	2.1654
912.0000	3.3452	2.1307
1.000E+03	3.3361	2.1320

Model File: TANFLUGB  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 59  
 Timing: 2.0000 , DELTA : 1.000E+03 , RANGE  
 PlotBlocks and Scales:

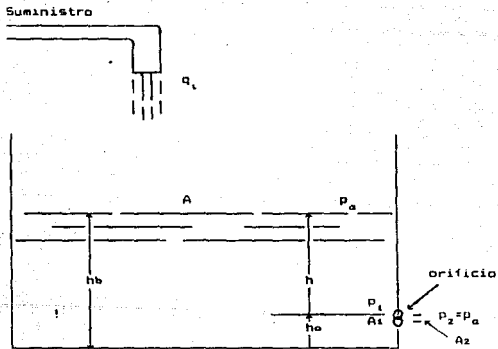
Format:  

BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	1.000E+03	Time
Y1: 1	-0.5000000	10.0000	v
Y2: 2	-0.5000000	10.0000	h
Y3: :	:	:	:
Y4: :	:	:	:



SIMULACION GRAFICA (INCISO B)

### TANQUE CON UN ORIFICIO



Representación física del modelo de un tanque de almacenamiento con salida del líquido por un orificio.



ecuación para la razón de la descarga volumétrica

$$q = C_d A_s \sqrt{2 g h} \quad . . . . . (4)$$

donde  $C_d$  es el coeficiente de descarga. Esta es una relación constitutiva entre la variable  $q$  y la variable  $h$ .

La masa del líquido en el tanque es  $[\rho A h b]$ . De la conservación de masa; la razón del cambio de esta masa debe ser igual a la masa que entra menos la que sale; esto es

$$d(\rho A h b) = \rho q_i - \rho q \quad . . . . . (5)$$

Para un fluido incompresible la densidad  $\rho$  es constante y cancela en la ecuación. La altura del orificio  $h_o$  es constante así como el área del tanque, por lo tanto

$$A \frac{dh}{dt} = A \frac{d(h + h_o)}{dt} = A \frac{dh}{dt} = q_i - q \quad . . . . . (6)$$

sustituyendo en (4) da el modelo final del sistema

$$A \frac{dh}{dt} = q_i - C_d A_s \sqrt{2 g h} \quad . . . . . (7)$$

#### PROBLEMA

Resolver el sistema anterior de acuerdo a los siguientes valores

$$q_i = 30\,000 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$C_d = 0.70$$

$$A_t = 76.5 \text{ cm}^2$$

$$g = 981 \text{ cm/s}^2$$

$$A = 80\,000 \text{ cm}^2$$

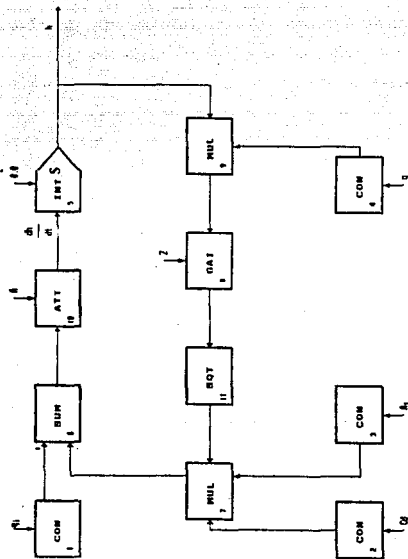
#### SOLUCION

La ecuación a representar en el diagrama de bloques (figura 1) es

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} \left[ q_i - C_d A_t \sqrt{2 g h} \right] \quad (8)$$

Los valores obtenidos de la simulación de este modelo se muestran a continuación.

# TANQUE CON UN ORIFICIO





Model File: TAN-ORI  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 16 : 2  
 Timing: 2.0000 ,DELTA ; 4.500E+03 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:

Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0 ,	0.0000 ,	4.500E+03 ;	Time
Y1: 5 ,	0.0000 ,	300.0000 ;	h
Y2: ,	;	;	;
Y3: ,	;	;	;
Y4: ,	;	;	;
30.000E+03	1 CON		;qi
0.7000000	2 CON		;Cd
78.5000	3 COM		;A1
981.0000	4 CON		;g
0.0000	5 INT	10	;h
	6 SUM	1	;
	7 MUL	2 -7	;
2.0000	8 GAI	3 11	;
	9 MUL	4	;2gh
80.000E+03	10 ATT	5	;
	11 SQT	6	;dh/dt
		8	

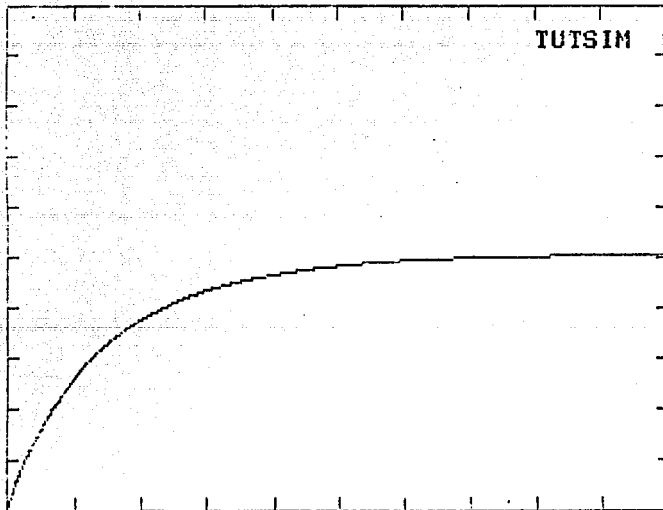
## LISTADO DEL MODELO

## SIMULACION NUMERICA

56.0000	16.2739
506.0000	84.5541
956.0000	115.3680
1.408E+03	131.5200
1.856E+03	140.3860
2.154E+03	143.9830
2.756E+03	148.1690
3.206E+03	149.7720
3.656E+03	150.6880
4.108E+03	151.2130
4.500E+03	151.4840

Model File: TAN-ORI  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 18 : 1  
 Timing: 2.0000 , DELTA ; 4.500E+03 , RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:  

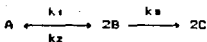
BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	4.500E+03	Time
Y1: 5	0.0000	300.0000	h
Y2:			
Y3:			
Y4:			



SIMULACION GRAFICA

## SIMULACION DE UN MODELO CINETICO

Para la reacción:



a temperatura y volumen constantes se determinaron los siguientes valores:

$$k_1 = 0.5 \text{ (referido a A)}$$

$$k_2 = 2.3 \text{ (referido a B)}$$

$$k_3 = 1.1 \text{ (referido a B)}$$

la concentración está en g mol/(l s)

Encontrar la concentración máxima de B y ¿ a qué tiempo ocurre?

## SOLUCION

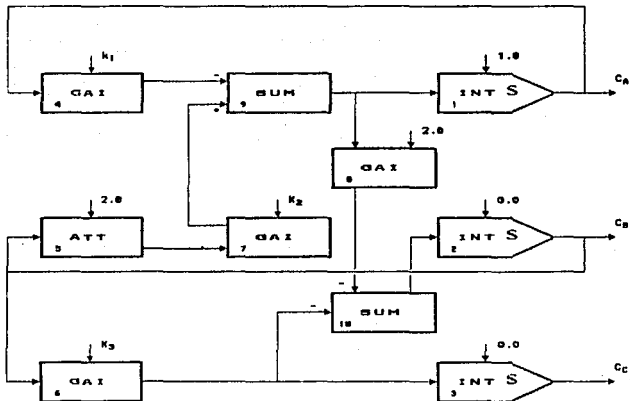
Desarrollando el modelo cinético se tiene:

$$\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A + \frac{1}{2} k_2 C_B$$

$$\frac{dC_B}{dt} = 2 k_1 C_A - k_2 C_B - k_3 C_B$$

$$\frac{dC_C}{dt} = k_3 C_B$$

## SIMULACION DE UN MODELO CINETICO



Model File: BATCHTOT  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 30  
 Timing: 0.0500000 ,DELTA ; 40.0000 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0	0.0000	40.0000	Time
Y1: 1	0.0000	1.5000	CONCENTRACION CR
Y2: 2	0.0000	2.0000	CONCENTRACIONB CR
Y3: 3	0.0000	2.0000	CONCENTRACIONc CR
Y4:			
1.0000	1 INT	9	CONCENTRACION CR
0.0000	2 INT	10	CONCENTRACIONB CR
0.0000	3 INT	6	CONCENTRACIONc CR
0.5000000	4 GAI	1	VELREACa CR
2.0000	5 ATT	2	VELREACB CR
1.1000	6 GAI	2	VELREACc CR
2.3000	7 GAI	5	VELREACd CR
2.0000	8 GAI	9	CAMCONCA CR
	9 SUM	-4	CAMCONCAA CR
	10 SUM	-6	CAMCONCb CR

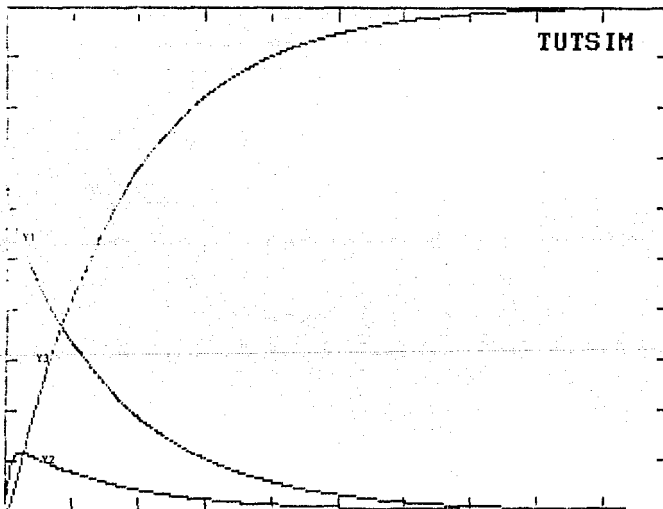
## LISTADO DEL MODELO

## SIMULACION NUMERICA

0.4500000	0.8626400	0.2080080	0.0667127
4.5000	0.4664800	0.1433790	0.9236610
8.4500	0.2614990	0.0803755	1.3966
12.4500	0.1455210	0.0447279	1.6642
16.4500	0.0809805	0.0248905	1.8131
20.5000	0.0447356	0.0137501	1.8967
24.4999	0.0248948	0.0076517	1.9425
28.4999	0.0138536	0.0042581	1.9680
32.4998	0.0077093	0.0023695	1.9822
36.4997	0.0042901	0.0013186	1.9901
39.9997	0.0025689	789.588E-06	1.9940

Model File: BATCHTOT  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 29  
 Timing: 0.0500000 ,DELTA ; 40.0000 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:

BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	40.0000	Time
Y1: 1	0.0000	1.5000	CONCENTRACION CR
Y2: 2	0.0000	2.0000	CONCENTRACIONB CR
Y3: 3	0.0000	2.0000	CONCENTRACIONc CR
Y4:			



SIMULACION GRAFICA

## RTAC'S ISOTERMICOS DE VOLUMEN CONSTANTE EN SERIE

El sistema consta de tres reactores de tanque agitado en serie, los cuales presentan una reacción de primer orden en fase líquida; la reacción es:



Las temperaturas y los volúmenes de los tanques se consideran constantes, al igual que la densidad a través de todo el sistema.

Con estas consideraciones se puede formular el modelo. Si el volumen y la densidad de cada tanque es constante, la masa total de cada uno también lo es. Por lo tanto, la ecuación de continuidad para el primer reactor es:

$$\frac{d(\rho V_1)}{dt} = \rho F_0 - \rho F_1 = 0 \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

$$\text{ó} \quad F_1 = F_0$$

De la misma forma los balances totales en los tanques 2 y 3 dan:

$$F_2 = F_3 = F_1 = F_0 = F \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Como el balance es binario y se conoce el balance de masa total de cada tanque, solo se necesita la ecuación de continuidad de un

componente. Si se escoge A, las ecuaciones que describen los cambios dinámicos de la cantidad del reactivo A en cada tanque son (con unidades de Kg mol de A/min):

$$\left. \begin{aligned} V_1 \frac{dC_{A1}}{dt} &= F(C_{A0} - C_{A1}) - V_1 k_1 C_{A1} \\ V_2 \frac{dC_{A2}}{dt} &= F(C_{A1} - C_{A2}) - V_2 k_2 C_{A2} \\ V_3 \frac{dC_{A3}}{dt} &= F(C_{A2} - C_{A3}) - V_3 k_3 C_{A3} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Las constantes de reacción  $k_n$  están dadas por la ecuación de Arrhenius:

$$k_n = a e^{-E/RT_n} \quad (4)$$

Si la temperatura de los reactores es diferente, las  $k$ 's son diferentes. La  $n$  se refiere al número de tanque.

Las tres ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales dadas en (3) son el modelo matemático del sistema. Los parámetros que deben conocerse son  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$ , las variables que deben especificarse antes de resolver estas ecuaciones son  $F$  y  $C_{A0}$ .

Las condiciones iniciales de las tres concentraciones (sus valores en el tiempo igual a cero) también deben conocerse.



Si el flujo  $F$  es constante y los volúmenes y temperaturas son los mismos en los tres tanques, la ecuación (3) es:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d C_{A1}}{dt} + \left(k + \frac{1}{\tau}\right) C_{A1} &= \frac{1}{\tau} C_{A0} \\ \frac{d C_{A2}}{dt} + \left(k + \frac{1}{\tau}\right) C_{A2} &= \frac{1}{\tau} C_{A1} \\ \frac{d C_{A3}}{dt} + \left(k + \frac{1}{\tau}\right) C_{A3} &= \frac{1}{\tau} C_{A2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

donde  $\tau = V/F$  con unidades de minutos. De esta forma solo queda una variable de entrada:  $C_{A0}$ .

#### PROBLEMA.

Se tiene el modelo matemático de los reactores:

$$\frac{d C_{A1}}{dt} = \frac{1}{\tau} (C_{A0} - C_{A1}) - k C_{A1}$$

$$\frac{d C_{A2}}{dt} = \frac{1}{\tau} (C_{A1} - C_{A2}) - k C_{A2}$$

$$\frac{d C_{A3}}{dt} = \frac{1}{\tau} (C_{A2} - C_{A3}) - k C_{A3}$$

a tiempo  $t=0$

$$C_{A1} = 0.4$$

$$C_{A2} = 0.2$$

$$C_{As} = 0.1$$

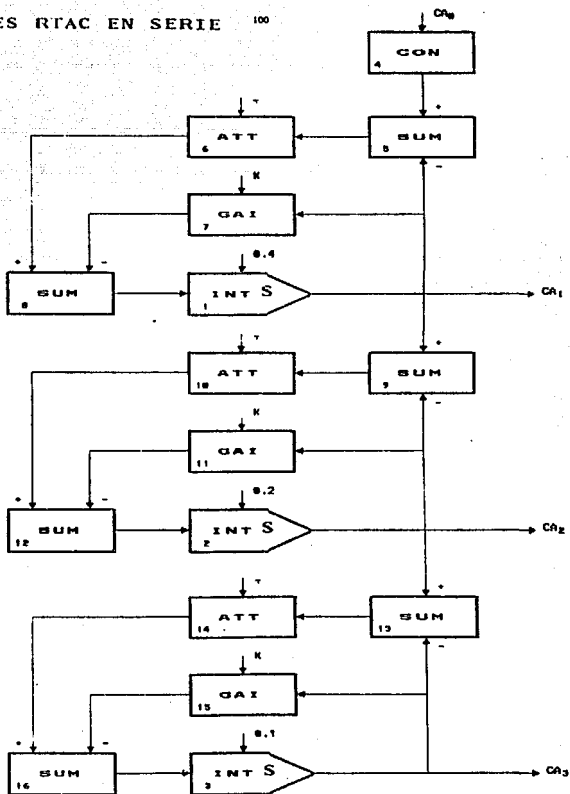
$$C_{A0} = 1.8$$

los valores de los parámetros son:

$$\tau = 2 \text{ min}$$

$$k = 0.5$$

TRES RTAC EN SERIE 100



Model File: RTAC'S

Date: 2 / 27 / 1992

Time: 15 : 40

Timing: 0.1000000 , DELTA ; 3.0000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0 ,	0.0000 ,	3.0000 :	Time
Y1: 1 ,	0.0000 ,	1.0000 :	CA1
Y2: 2 ,	0.0000 ,	1.0000 :	CA2
Y3: 3 ,	0.0000 ,	1.0000 :	CA3
Y4: ,	,	,	,

0.4000000	1 INT	8		: CA1
0.2000000	2 INT	12		: CA2
0.1000000	3 INT	16		: CA3
1.8000	4 CON			: CA0
2.0000	5 SUM	-1	4	: CA0-CA1
0.5000000	6 ATT	5		:
	7 GAI	1		: CA1*K
	8 SUM	6	-7	: dCA1/dt
	9 SUM	1	-2	: CA1-CA2
2.0000	10 ATT	9		:
0.5000000	11 GAI	2		: CA2*K
	12 SUM	10	-11	: dCA2/dt
	13 SUM	2	-3	: CA2-CA3
2.0000	14 ATT	13		:
0.5000000	15 GAI	3		: CA3*K
	16 SUM	14	-15	: dCA3/dt

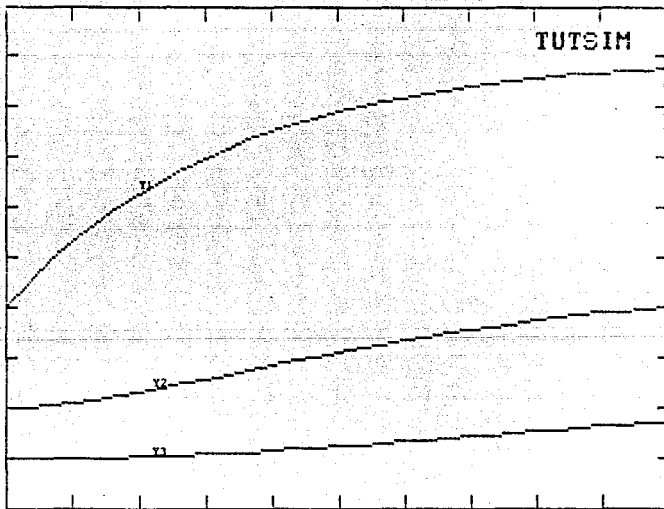
## LISTADO DEL MODELO

## SIMULACION NUMERICA

0.0000	0.4000000	0.2000000	0.1000000
0.3000000	0.5311250	0.2088750	0.1002810
0.6000000	0.6263710	0.2308390	0.1027350
0.9000000	0.6970240	0.2572390	0.1077910
1.2000	0.7494330	0.2847270	0.1150900
1.5000	0.7883110	0.3108720	0.1239870
1.8000	0.8171500	0.3345340	0.1338030
2.1000	0.8385420	0.3552520	0.1439380
2.4000	0.8544110	0.3729700	0.1539210
2.7000	0.8661820	0.3878540	0.1634120
3.0000	0.8749140	0.4001880	0.1721920

Model File: RTAC'S  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 39  
 Timing: 0.1000000 DELTA : 3.0000 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0	0.0000	3.0000	: Time
Y1: 1	0.0000	1.0000	: CA1
Y2: 2	0.0000	1.0000	: CA2
Y3: 3	0.0000	1.0000	: CA3
Y4:			:



SIMULACION GRAFICA

## COMPORTAMIENTO DE TRES RTAC'S EN SERIE CON CONTROLADOR INTEGRAL

El sistema es el mismo que el anterior, sólo que ahora los reactores tienen un controlador tipo integral. El modelo matemático de los reactores es:

$$\frac{d C_{A1}}{dt} = \frac{1}{\tau} (C_{A0} - C_{A1}) - k C_{A1}$$

$$\frac{d C_{A2}}{dt} = \frac{1}{\tau} (C_{A1} - C_{A2}) - k C_{A2}$$

$$\frac{d C_{A3}}{dt} = \frac{1}{\tau} (C_{A2} - C_{A3}) - k C_{A3}$$

$$C_{A0} = C_{AM} + C_{AD}$$

$$C_{AM} = 0.8 + K_c \left( E + \frac{1}{\tau_I} \int E(t) dt \right)$$

$$E = C_{A3}^{set} - C_{A3}$$

donde:

$C_{AM}$  = variable manipulada que es cambiada por el controlador

$C_{AD}$  = variable de disturbio

$C_{A3}^{set}$  = set point

$K_c$  = ganancia del controlador feedback

$\tau_I$  = constante de tiempo del controlador feedback

a tiempo  $t=0$

$$C_{A1} = 0.4$$

$$C_{AS} = 0.2$$

$$C_{AS} = 0.1$$

$$C_{AS} \text{ sat} = 0.1$$

$$E = 0$$

$$C_{AD} = 0.2$$

los valores de los parámetros son:

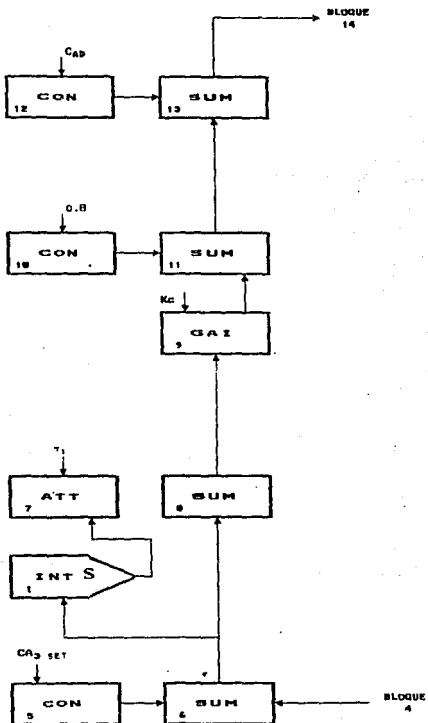
$$K_c = 30$$

$$\tau_i = 5 \text{ min}$$

$$\tau = 2 \text{ min}$$

$$k = 0.5$$

# TRES RTAC EN SERIE CON CONTROLADOR INTEGRAL







Model File: RTAC'S1  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 44  
 Timing: 0.0100000 ,DELTA : 10.0000 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0 ,	0.0000	10.0000	: Time
Y1: 2 ,	0.0000	1.0000	: CA1
Y2: 3 ,	0.0000	1.0000	: CA2
Y3: 4 ,	0.0000	1.0000	: CA3
Y4: 11 ,	0.0000	1.0000	: CAM
0.0000	1 INT	6	: INT ERROR
0.4000000	2 INT	17	: CA1
0.2000000	3 INT	21	: CA2
0.1000000	4 INT	25	: CA3
0.1000000	5 CON		: CA3 SET
	6 SUM	-4	5
5.0000	7 ATT	1	
	8 SUM	6	7
30.0000	9 GAI	8	
0.8000000	10 CON		: 0.8
	11 SUM	9	10
0.2000000	12 CON		: CAD
	13 SUM	11	12
	14 SUM	-2	13
2.0000	15 ATT	14	
0.5000000	16 GAI	2	: CA1*K
	17 SUM	15	-16
	18 SUM	2	-3
2.0000	19 ATT	18	
0.5000000	20 GAI	3	: CA2*K
	21 SUM	19	-20
	22 SUM	3	-4
2.0000	23 ATT	22	
0.5000000	24 GAI	4	: CA3*K
	25 SUM	23	-24

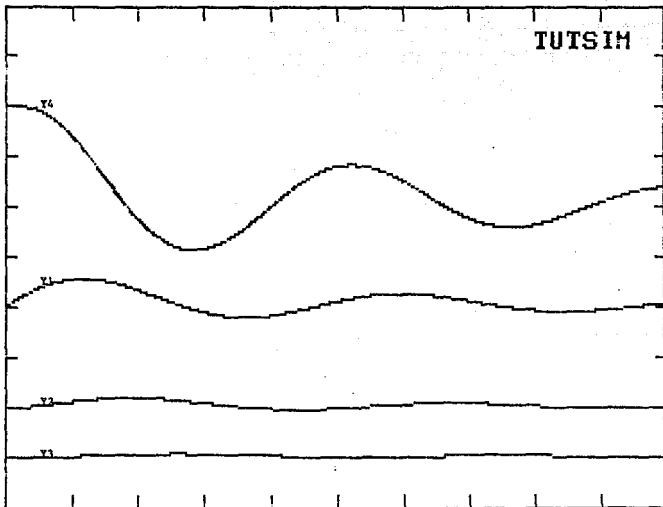
## LISTADO DEL MODELO

## SIMULACION NUMERICA

0.1200000	0.4113090	0.2003310	0.1000060	0.7998080
1.1200	0.4568720	0.2142890	0.1024890	0.7202790
2.1200	0.4284290	0.2193420	0.1068810	0.5594300
3.1200	0.3858180	0.2076120	0.1067300	0.5201890
3.3400	0.3813910	0.2044610	0.1059900	0.5339890
5.1200	0.4142310	0.1994600	0.1001580	0.6821730
6.1200	0.4260640	0.2073390	0.1013980	0.6416920
7.1200	0.4089330	0.2082480	0.1032540	0.5713250
8.1200	0.3913130	0.2021920	0.1027570	0.5668870
9.1201	0.3947980	0.1981670	0.1008100	0.6145680
9.9901	0.4069150	0.1997470	0.0999757	0.6381810

Model File: RTAC'S1  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 41  
 Timing: 0.0100000 , DELTA : 10.0000 , RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:

BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz: 0	0.0000	10.0000	Time
Y1: 2	0.0000	1.0000	CA1
Y2: 3	0.0000	1.0000	CA2
Y3: 4	0.0000	1.0000	CA3
Y4: 11	0.0000	1.0000	CAM



SIMULACION GRAFICA

## COMPORTAMIENTO DE UN CRISTALIZADOR BATCH POR EVAPORACION

Este caso considera un sistema de evaporación a temperatura y presión constantes. El sistema es sembrado inicialmente y los cristales crecen a una razón de crecimiento constante,  $G$ . No ocurren nucleaciones significantes.

Las ecuaciones básicas son las siguientes

$$\frac{-d\phi}{dZ} = Z^2 + 2Z + 1 \quad \dots \quad (1)$$

donde

$$\phi = \frac{V C}{3 K_v \rho_c L_s^3 N} = \frac{V C}{3 M_s}$$

y

$$Z = \frac{G t}{L_s}$$

además

$V$  = volumen del solvente

$C$  = solubilidad a la temperatura del cristalizador

$K_v$  = factor de forma volumétrica del cristal

$\rho_c$  = densidad del cristal

$L_s$  = longitud de la semilla

$N$  = número de semillas

$M_s$  = masa de las semillas

$t$  = tiempo

$G$  = razón de crecimiento del cristal

La ecuación (1) da la razón de evaporación de solvente requerido para obtener la razón de crecimiento deseada,  $G$ . El valor final del tiempo adimensional,  $Z_f$ , es una medida del aumento de tamaño de los cristales sembrados:

$$Z_f = \frac{G t}{L_s} = \frac{L_f - L_s}{L_s} \quad (2)$$

donde  $L_f$  es el tamaño del producto final.

#### PROBLEMA.

Diseño de un cristalizador- evaporador-batch agitado que debe operar bajo las siguientes condiciones:

Tamaño del cristal producto, $L_f$	360 $\mu\text{m}$
Producción por lote, $W_p$	2000 lb
Solubilidad a la temperatura del cristalizador, $C$	20 lb/ft <sup>3</sup> solv.
Máxima densidad de suspensión permisible, $M$	20 lb/ft <sup>3</sup> solv.
Densidad del cristal, $\rho_c$	100 lb/ft <sup>3</sup>
Factor de forma del cristal, $K_v$	1
Máxima razón de crecimiento permisible, $G$	0.1 $\mu\text{m/s}$
Tamaño de semilla, $L_s$	60 $\mu\text{m}$
Máxima supersaturación permisible	0 lb/ft <sup>3</sup> solv.

## SOLUCION

1. Determinar el volumen del cristalizador

$$\text{volumen final de solvente} = \frac{2000 \text{ lb}}{20 \text{ lb/ft}^3} = 100 \text{ ft}^3$$

$$\text{solvente evaporado} = \frac{2000}{20} = 100 \text{ ft}^3$$

$$\text{solvente total en lote} = 200 \text{ ft}^3$$

2. Determinar número de semillas,
- $N$
- , y masa de las semillas,
- $M_s$

$$\begin{aligned} N &= \frac{W_p}{L_f^3 K_v \rho_c} \\ &= \frac{2000 \text{ lb}}{(360)^3 \mu\text{m}^3 (10^{-6})^3 \frac{\text{m}^3}{\mu\text{m}^3} (35.31 \text{ ft}^3/\text{m}^3) 100 \text{ lb/ft}^3} \\ &= 1.22 \times 10^{10} \text{ semillas} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_s &= N L_s^3 K_v \rho_c \\ &= (1.22 \times 10^{10}) (60)^3 \mu\text{m}^3 (10^{-6})^3 \frac{\text{m}^3}{\mu\text{m}^3} \left[ 35.31 \frac{\text{ft}^3}{\text{m}^3} \right] 100 \text{ lb/ft}^3 \\ &= 9.3 \text{ lb de semillas} \end{aligned}$$

3. Determinar tiempo del lote

$$Z_f = \frac{L_f - L_e}{L_e} = \frac{360 - 60}{60} = 5$$

tiempo de lote:

$$t_f = \frac{Z_f L_e}{G}$$

$$= \frac{(5)(60 \mu\text{m})}{0.1 \mu\text{m/s}} = 3000 \text{ s} = 0.833 \text{ h}$$

4. Determinar el programa de evaporación de la ecuación (1)

$$Z = \frac{0.1 t}{60} = (1.67 \times 10^{-3}) t$$

$$\frac{d\phi}{dZ} = \frac{d \left[ \frac{V C}{3 M_e} \right]}{dZ} = \frac{C}{3 M_e} \frac{dV}{d(1.67 \times 10^{-3}) t}$$

$$= \frac{20}{(3)(9.3)} (1.67 \times 10^3) \frac{dV}{dt}$$

Razón de evaporación:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(3)(9.3)}{(20)(1.67)} (10^{-3}) \left[ (2.78 \times 10^{-6}) t^2 + (2)(1.67 \times 10^{-3}) t \right]$$

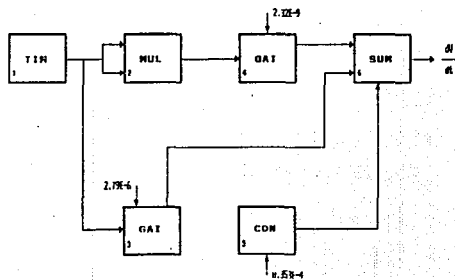
+ 1

$$\frac{dV}{dt} = (2.32 \times 10^{-9}) t^2 + (2.79 \times 10^{-6}) t + (8.353 \times 10^{-4})$$

Con la última ecuación se puede graficar la evaporación como función del tiempo y obtener la razón de evaporación en cualquier momento de la cristalización.



### COMPORTAMIENTO DE UN CRISTALIZADOR BATCH POR EVAPORACION



Model File: CRISTAL  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 33  
 Timing: 60.0000 , DELTA ; 3.000E+03 , RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum,	Comment
Horz: 0 ,	0.0000 ,	3.000E+03 ;	Time
Y1: 6 ,	0.0000 ,	0.0400000 ;	dV/dt
Y2: ,	, ,	, ;	
Y3: ,	, ,	, ;	
Y4: ,	, ,	, ;	

	1	TIM				;TIEMPO
	2	MUL	1	1		;t^2
2.790E-06	3	GAI	1			; ,
2.320E-09	4	GAI	2			; ,
835.300E-06	5	CON				;8.353E-4
	6	SUM	3	4	5	;dV/dt

LISTADO DEL MODELO

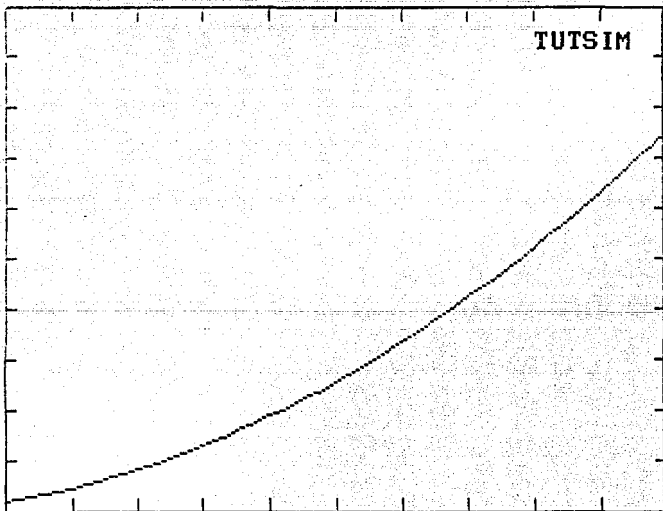
## SIMULACION NUMERICA

0.0000	835.300E-06
300.0000	0.0018811
600.0000	0.0033445
900.0000	0.0052255
1.200E+03	0.0075241
1.500E+03	0.0102403
1.800E+03	0.0133741
2.100E+03	0.0169255
2.400E+03	0.0208945
2.700E+03	0.0252811
3.000E+03	0.0300853

Model File: CRISTAL  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 15 : 32  
 Timing: 60.0000 ,DELTA ; 3.000E+03 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:

Format:  

	BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum,	Comment
Horz:	0	0.0000	3.000E+03	Time
V1:	6	0.0000	0.0400000	dv/dt
V2:				
V3:				
V4:				



SIMULACION GRAFICA

## COMPORTAMIENTO DE UN CRISTALIZADOR BATCH POR ENFRIAMIENTO

La máxima razón de crecimiento permisible es determinada por experimentación. El balance de masa para cristalización por enfriamiento puede expresarse como:

$$V \frac{dC}{dt} + \frac{dM}{dt} = 0 \quad (1)$$

La concentración de saturación está dada como una función lineal de la temperatura por:

$$C^* = a + b t \quad (2)$$

donde  $t$  está en  $^{\circ}\text{C}$  y la solubilidad en lb soluto/lb solución.

La siguiente ecuación da la razón de enfriamiento programada para mantener la velocidad de crecimiento constante requerida,  $G$

$$-\frac{d\phi}{dz} = Z^2 + 2Z + 1 \quad (3)$$

donde

$$\phi = \frac{b V T}{3 K_v \rho_c L_s^3 N} = \frac{h V T}{3 M_s}$$

y

$$Z = \frac{G t}{L_s}$$

además  $b$  es la pendiente de la curva de solubilidad

T es la temperatura del cristalizador.

Los demás términos son como se describieron en cristalización por evaporación.  $Z_f$  es definida en la ecuación (2).

#### PROBLEMA

Diseñar un cristalizador batch de tanque agitado por enfriamiento que debe operar bajo las siguientes condiciones:

Tamaño del cristal producto, $L_f$	1000 $\mu\text{m}$
Producción por lote, $W_p$	2000 lb
Densidad del cristal, $\rho_c$	100 lb/ft <sup>3</sup>
Densidad de la solución, $\rho_s$	70 lb/ft <sup>3</sup>
Tamaño de la semilla, $L_s$	100 $\mu\text{m}$
Temperatura de la alimentación	95 °C
Temperatura de saturación de la alimentación	90 °C
Temperatura final de la solución	25 °C
Factor de forma del cristal, $K_v$	1
Máxima razón de crecimiento permisible, $G$	0.1 $\mu\text{m/s}$
Solubilidad de soluto en lbs/lb solución	

$$C^* = 0.250 + (2.75 \times 10^{-3}) T$$

#### SOLUCION

1. Determinación del volumen del cristalizador:

Alimentación @  $0.250 + 2.75 \times 10^{-3}$  (90) = 0.4975 lb/lb solución

Solución final @  $0.250 + 2.75 \times 10^{-3}$  (25) = 0.3190 lb/lb solución

Cristalización por libra de solución =  $0.4975 - 0.3190 = 0.1785$  lb

$$\text{Slurry density} = (0.1785) \left[ \frac{0.1785}{100} + \frac{1.0}{70} \right]^{-1} = 11.1 \text{ lb/ft}^3$$

$$\text{Volumen del cristalizador} = \frac{2000}{11.1} = 180 \text{ ft}^3 \hat{=} 1347 \text{ gal}$$

2. Determinación del número de semillas,  $N$ , y masa de las semillas,  $M_s$

$$\text{Número : } N = \frac{W_p}{L^3 K_v \rho_c}$$

$$= \frac{2000 \text{ lb}}{(1000)^3 \mu\text{m}^3 (10^{-6})^3 \frac{\text{m}^3}{\mu\text{m}^3} \left[ 35.31 \frac{\text{ft}^3}{\text{m}^3} \right] \left[ 100 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right]}$$

$$= 5.7 \times 10^8 \text{ semillas}$$

masa:

$$M_s = (5.7 \times 10^8) (100)^3 \mu\text{m}^3 (10^{-6})^3 \frac{\text{m}^3}{\mu\text{m}^3} \left[ 35.31 \frac{\text{ft}^3}{\text{m}^3} \right] \left[ 100 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right]$$

$$= 2.0 \text{ lb}$$

3. Determinación del tiempo de lote:

$$Zf = \frac{1000 - 100}{100} = 9$$

$$\text{Tiempo de lote : } t_f = \frac{(9)(100)}{0.10 \text{ } \mu\text{m/seg}} = 9000 \text{ seg} = 2.5 \text{ h}$$

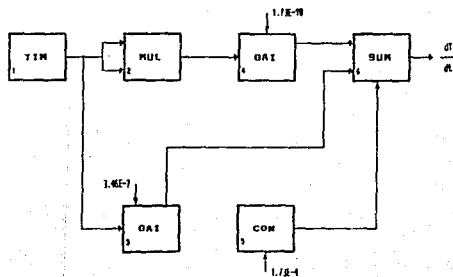
4. Determinación del programa de enfriamiento a partir de la ecuación (3)

$$\frac{b V L_s dT}{3 M_s G dt} = \left[ \frac{G}{L_s} \right]^2 t^2 + 2 \left[ \frac{G}{L_s} \right] t + 1$$

$$\frac{(2.75 \times 10^{-3}) (70) (180) (100)}{(3) (2) (0.10)} \frac{dT}{dt} = \left[ \frac{0.10}{100} \right]^2 t^2 + 2 \left[ \frac{0.10}{100} \right] t$$

$$\frac{dT}{dt} = (1.73 \times 10^{-10}) t^2 + (3.46 \times 10^{-2}) t + (1.73 \times 10^{-4})$$

### COMPORTAMIENTO DE UN CRISTALIZADOR BATCH POR ENFRIAMIENTO







Model File: CRIS'1

Date: 2 / 27 / 1992

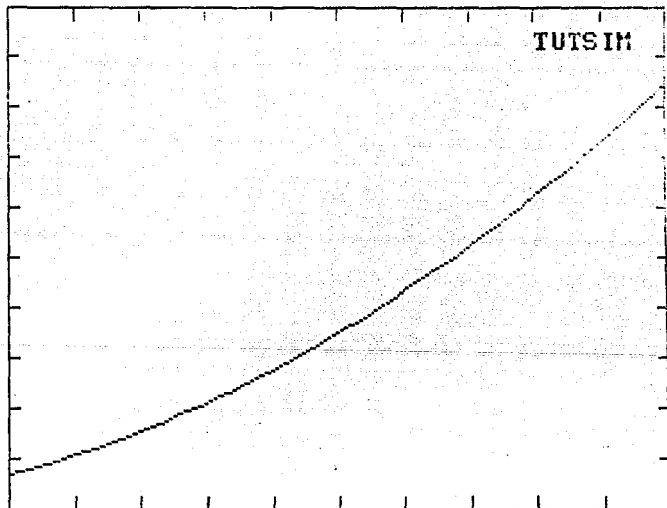
Time: 15 : 33

Timing: 50.0000 , DELTA : 2.500E+03 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

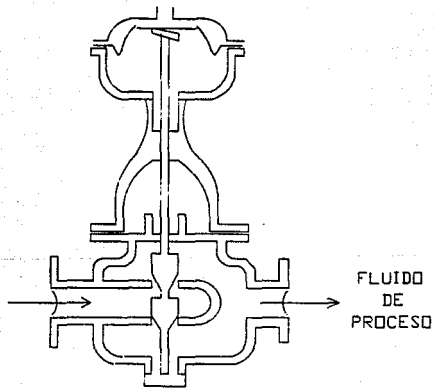
Format:

	BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum,	Comment
Horz:	0	0.0000	2.500E+03	Time
Y1:	6	0.0000	0.0025000	dT/dt
Y2:	.	.	.	.
Y3:	.	.	.	.
Y4:	.	.	.	.



SIMULACION GRAFICA

## RESPUESTA DINAMICA DE UNA VALVULA DE DIAFRAGMA



Las fuerzas involucradas en este mecanismo son:

1. La fuerza ejercida por la presión del aire aplicada en lo alto del diafragma, actuando hacia abajo. Esta fuerza es

$$F(t) = P A$$

donde  $P$  = presión del aire (manométrica)

$A$  = Área del diafragma

2. La fuerza ejercida por el resorte, actuando hacia arriba. Esta es igual a  $-H L$ , donde

$H$  = constante de Hook (fuerza/longitud)

$L$  = distancia recorrida por el extremo del resorte en la parte inferior del diafragma

El signo negativo indica que esta fuerza opera en dirección opuesta a la del diafragma.

3. La fuerza para vencer la fricción viscosa actuante en las guías de la válvula y en el sello de ésta. Esta fuerza es igual a  $-CdL/dt$  donde

$C$  = coeficiente de fricción bajo condiciones de flujo laminar (viscoso)

4. La fuerza para vencer la inercia de las partes móviles. Esta fuerza es igual a  $-M d^2L/dt^2$ , donde

$M$  = masa de las partes móviles (vástago de la válvula y diafragma)

5. Fuerzas de la caída de presión actuando a través de los tapones de la

válvula. Con una válvula de doble-asiento como la mostrada, las fuerzas a través de los asientos actúan en oposición uno del otro y puede considerarse que se tiene una resultante de cero.

La suma de las fuerzas 1 a 3 resulta en la aceleración de la masa

M:

$$M \frac{d^2L}{dt^2} = F(t) - HL - C \frac{dL}{dt}$$

PROBLEMA.

Una válvula de control es operada por un motor de diafragma accionado con aire que tiene un área efectiva de  $6.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ . El peso de las partes móviles es 140 Kg; la rigidez del resorte es  $10^5 \text{ N m}^{-1}$ ; el coeficiente de fricción es  $3 \times 10^3 \text{ N s m}^{-1}$ .

Determinar la respuesta de la válvula para los siguientes disturbios:

- Un cambio del paso en la presión del aire de  $2.1 \times 10^5 \text{ N m}^{-2}$  a  $2.7 \times 10^5 \text{ N m}^{-2}$ ,
- Un cambio en la presión del aire de  $2.1 \times 10^5$  a  $3.2 \times 10^5 \text{ N m}^{-2}$  durante 0.2 segundos

$$M = 140 \text{ Kg}$$

$$H = 10^5 \text{ N m}^{-1}$$

$$C = 3 \times 10^3 \text{ N s m}^{-1}$$

## RESPUESTA DINAMICA DE UNA VALVULA DE DIAFRAGMA

INCISO a)



Model File: VALCON3'

Date: 2 / 27 / 1992

Time: 16 : 7

Timing: 0.010000 ,DELTA ; 0.400000 ,RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

	BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz:	0 ,	0.0000	0.4000000 ;	Time
Y1:	2 ,	-0.0050000	0.0200000 ;	
Y2:	,	,	,	
Y3:	,	,	,	
Y4:	,	,	,	

0.0000	1 PLS	
0.2000000		
0.0143000		
0.0000	2 SEO	1
0.4050000		
4.3014		
0.0000		

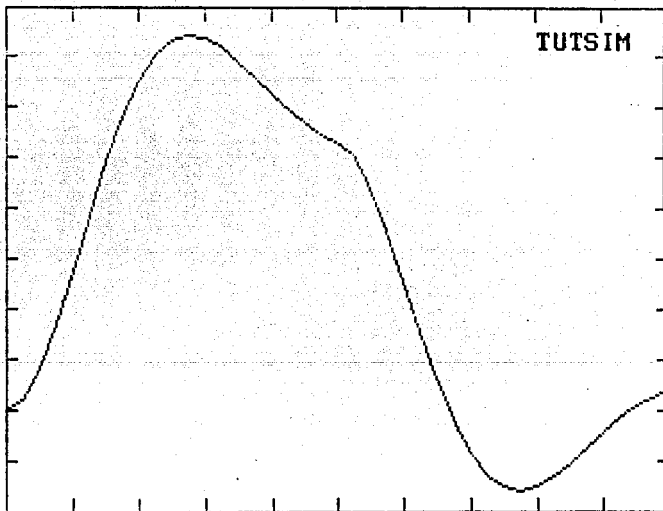
LISTADO DEL MODELO (INCISO A)

SIMULACION NUMERICA (INCISO A)

0.0000	0.0000
0.0400000	0.0068673
0.0800000	0.0162591
0.1200000	0.0184039
0.1600000	0.0156396
0.2000000	0.0133029
0.2400000	0.0063555
0.2800000	-0.0021107
0.3200000	-0.0037374
0.3600000	-0.0010847
0.4000000	978.889E-06

Model File: VALCON3'  
 Date: 2 / 27 / 1992  
 Time: 16 : 6  
 Timing: 0.0100000 ,DELTA : 0.4000000 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:

	BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MANimum	Comment
Horz:	0	0.0000	0.4000000	Time
V1:	2	-0.0050000	0.0200000	
V2:	.	.	.	.
V3:	.	.	.	.
V4:	.	.	.	.

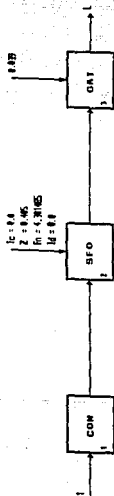


SIMULACION GRAFICA (INCISO A)



RESPUESTA DINAMICA DE UNA VALVULA DE DIAFRAGMA

INCISO b)



Model File: valcon2

Date: 4 / 2 / 1992

Time: 15 : 57

Timing: 0.0010000 ,DELTA ; 0.5000000 ,RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0 ,	0.0000 ,	0.5000000 ;	Time
Y1: 3 ,	0.0000 ,	0.0600000 ;	Y(t)
Y2: ,	, ,	, ;	,
Y3: ,	, ,	, ;	,
Y4: ,	, ,	, ;	,

1.0000	1 CON		;1
0.0000	2 SEO	1	;Y(s)/X(m)
0.4050000			
1.3014			
0.0000			
0.0190000	3 GAI	2	;Y(t)

LISTADO DEL MODELO (INCISO B)

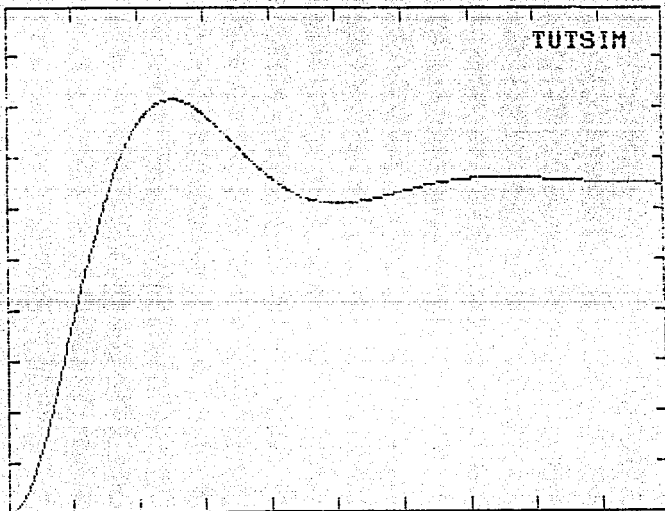
## SIMULACION NUMERICA (INCISO B)

0.0060000	498.903E-06
0.0560000	0.0263043
0.1060000	0.0472080
0.1560000	0.0462037
0.2060000	0.0388819
0.2560000	0.0385595
0.2920000	0.0375913
0.3559990	0.0395053
0.4059980	0.0394650
0.4559980	0.0390005
0.4999970	0.0388450

Model File: valcon2  
 Date: 4 / 2 / 1992  
 Time: 15 : 51  
 Timing: 0.0010000 ,DELTA : 0.5000000 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:

Format:  

	BlockNo.	Plot-MINimum	Plot-MAXimum	Comment
Horz:	0	0.0000	0.5000000	Time
Y1:	3	0.0000	0.0600000	Y(t)
Y2:				
Y3:				
Y4:				



SIMULACION GRAFICA (INCISO B)

## CONCLUSIONS

## CONCLUSIONES

A través del desarrollo del presente trabajo se cumplieron los objetivos planteados al inicio. Cabe señalar, por otro lado, las ventajas y desventajas que representa trabajar con un paquete de simulación, así como, las limitaciones que representa el uso del simulador TUTSIM.

En principio, como se observó, el simulador es una buena herramienta para reducir el tiempo de análisis de un problema determinado, ya que lo que podría significar una considerable cantidad de horas-hombre en dicho análisis, usando el simulador se reduce significativamente. Así mismo, el costo del análisis también se reduce. Estos dos aspectos representan las principales ventajas del uso de un simulador.

Entre las desventajas de trabajar con simuladores se pueden señalar, que un simulador solo usa los datos que se le alimentan y que los resultados que este arroja, en ocasiones son difíciles de interpretar. Se requiere tener conocimientos básicos sobre el problema, ya que el simulador es solamente una herramienta y no toma decisiones por sí mismo.

Ahora bien, las limitaciones que se pudieron apreciar al utilizar el simulador TUTSIM son las siguientes:

- Al resolver problemas demasiado complejos se dificulta el

análisis matemático y su interpretación en diagrama de bloques se vuelve confusa conforme aumenta el número de estos.

- Algunos bloques tienen rangos de aplicación muy bajos, siendo el caso de los bloques LOG y EXP. De tal forma que su uso resulta inadecuado para las cifras manejadas en Ingeniería Química.

- El número de salidas de bloques de los que puede desplegarse su simulación gráfica o numérica es un poco reducido, solo 4 salidas. Lo que significa que no podemos ver el comportamiento de más de cuatro variables simultáneamente.

- La variable independiente es interpretada por el simulador como el tiempo de simulación, dado que se trata específicamente de un simulador diseñado para análisis a régimen dinámico; si se quiere analizar un sistema cuya variable independiente sea otra, se necesita realizar un cambio de variables y el análisis de los resultados puede ser complicado o confuso.

- El simulador únicamente maneja una variable independiente.

## BIBLIOGRAFIA

## BIBLIOGRAFIA

1. "Computer Programming Examples for Chemical Engineers"  
George Ross, Ed. Elsevier Science Publishers B.V.  
1987, Netherlands
2. "Process Systems Analysis and Control"  
Donald R. Coughanowr, Lowell B. Koppel  
Ed. Mc Graw-Hill, Chemical Engineering Series  
1985, U.S.A.
3. "Mass Transport Phenomena"  
Christie J. Geankoplis  
Ed. John Wiley & Sons, Inc.  
1980, U.S.A.
4. "Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers"  
William L. Luyben  
Ed. Mc Graw-Hill, Chemical Engineering Series, 3rd  
1989, U.S.A.
5. "Digital Computation for Chemical Engineers"  
Lapidus, Leon  
Ed. Mc Graw-Hill, Chemical Engineering Series  
1962. U.S.A.



6. "Introduction to Control Systems Design"

Virgil W. Eveleigh

Ed. Mc Graw-Hill

1972, U.S.A.

7. "Modeling, Analysis and Control of Dynamics Systems"

Pala III, Ed. John Wiley & Sons

1983, U.S.A.

8. "Control Cristal Size Distribution From Batch Crystallizers"

Wayne J. Genck, Chemical Processing

April 1991, Vol 54, No. 5, pp 50-55

## APENDICES

## APENDICE A. COMANDOS TUTSIM

## COMANDOS PARA REALIZAR CAMBIOS

CS Cambiar la estructura del modelo  
CC Cambiar los comentarios de una línea de la estructura  
CP Cambiar los parámetros del modelo  
CB Cambiar los bloques graficados en la pantalla y rangos  
CT Cambiar los parámetros de tiempo

## EMPEZAR SIMULACION

SD Empezar simulación con gráfica en la pantalla  
SI Empezar simulación con resultado numérico en pantalla  
NP Empezar simulación con resultados numéricos en impresora  
SP Empezar simulación con gráfica numérica en pantalla  
SPP Empezar simulación con gráfica numérica en impresora  
MR Empezar simulación con corrida múltiple

## PROCEDER CON SIMULACION DESPUES DE UNA INTERRUPCION

PD Proceder con gráfica en pantalla  
PN Proceder con resultados numéricos en pantalla  
PNP Proceder con resultados numéricos en impresora  
PP Proceder con gráfica numérica en pantalla  
PPP Proceder con gráfica numérica en impresora

## COMANDOS PARA LISTAR

L Lista el modelo en pantalla

LP Lista el modelo en impresora  
L:n,m Lista un rango de bloques en pantalla  
LP:n,m Lista un rango de bloques en impresora

#### COMANDOS DE DETERMINACION

TI(P) Determina datos de tiempo  
TH(P) Determina información del título del modelo  
TS(P) Determina una línea de la estructura

#### COMANDOS DE ARCHIVO

DF Salva un modelo en forma de archivo en disco

#### COMANDOS DE VERIFICACION

V Verifica el último valor calculado de un bloque  
VP Verifica el último valor calculado en impresora

#### OTROS COMANDOS UTILES

S Señala paso de simulación  
A Aborta el programa TUTSIM (regresa a DOS)  
H Ayuda en los comandos disponibles  
I Reemplaza las condiciones iniciales por las salidas  
E Restablece el programa TUTSIM  
(barra espaciadora) Interrumpe una corrida de simulación  
CL Limpia la gráfica de la pantalla  
HC Imprime la gráfica de la pantalla

M5 Regresa la pantalla a modo gráfico

TECLAS DE FUNCION PARA ETIQUETAR LA PANTALLA

F1 Etiqueta la curva Y1 y despliega el comentario del bloque graficado

F2 Etiqueta la curva Y2

F3 Etiqueta la curva Y3

F4 Etiqueta la curva Y4

F5 Etiqueta la escala horizontal

F6 Sobrepone la última pantalla salvada con F7 en la pantalla actual

F7 Salva la pantalla actual. No salvará otra pantalla hasta que no sea llamada con F6

F8 Limpia la pantalla

F9 Da un resumen de 10 puntos de los valores simulados

F10 Permite al usuario introducir un título en la presente pantalla

## APENDICE B. BLOQUES DEL TUTSIM

INDICE RAPIDO PARA SINTAXIS DE BLOQUES

NOMBRE	TIPO
ABS	función
ACC	histórico
ATT	función
CON	fuentes
COS	función
DIF	histórico
DIV	función
EUL	histórico
EXP	función
FIO	histórico
GAI	función
INT	histórico
LME	histórico
LMI	histórico
LOG	función
MUL	función
PLS	fuentes
PWR	función
SEO	histórico
SIN	función

SQT	función
SUM	función
TIM	fuentes

## INDICE DE BLOQUES TUTSIM POR GRUPOS FUNCIONALES

### BLOQUES DE ALIMENTACION

Nombre del bloque	No. de parámetros	Mínimo de entradas	
CON	1	0	fuentes constante
PLS	3	0	pulso o paso de alimentación
TIM	0	0	fuentes de tiempo

FUNCIONES MATEMATICAS

Nombre del bloque	No. de parametros	Minimo de entradas	
ABS	0	1	valor absoluto
ATT	1	1	divide las entradas entre el parámetro
COS	0	1	coseno de la suma de entradas
DIV	0	2	divide entrada 1 entre entrada 2
EXP	0	1	exponencial
GAI	1	1	multiplica las entradas por el parámetro
LOG	0	1	logaritmo natural
MUL	0	2	multiplica las entradas
PWR	1	1	eleva a la P potencia
SIN	0	1	seno de las entradas
SQT	0	1	raiz cuadrada de entradas
SUM	0	2	suma de las entradas



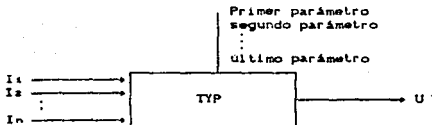
BLOQUES HISTORICOS

Nombre del bloque	No. de parametros	Minimo de entradas	
ACC	1	1	acumula la suma de las entradas
DIF	2	1	diferenciador
EUL	1	1	integrador Euler
FIO	3	1	bloque de primer orden
INT	1	1	integrador Adams-Bashford
LME	3	1	Min/Max integrador Euler
LMI	3	1	Min/Max integrador Adams-Bashford
SEO	4	1	Laplace, bloque de segundo orden

## DESCRIPCION DE LOS BLOQUES

## TYP

Descripción de un bloque típico de TUTSIM, ejemplo: TYP.  
 Bloque para usar las convenciones usadas en esta sección:



## Función:

$U(t) = f(CI, In, t, \dots)$  El algoritmo del bloque se da aquí.  
 Muchos bloques TUTSIM tienen entradas múltiples sumadas. Estas  
 entradas se suman antes de realizar la función que indica el  
 bloque.

## Notas:

Notas, avisos y precauciones se dan cuando es necesario. Algunos  
 bloques requieren un número específico de entradas y/o parámetros.  
 Aquí se dan comentarios para ayudar a evitar errores.

Las entradas pueden especificarse positivas o negativas. Si el  
 usuario las especifica negativas, el valor es negado antes de  
 sumar o realizar la función.

Los parámetros se muestran en la parte superior del bloque. Los  
 parámetros sin especificar toman el valor de cero.

Ejemplo: Cuando es disponible, el usuario es referido a un ejemplo.

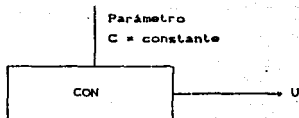
Entrada de la estructura:

4. TYP, -3, 2      Se da un ejemplo de cómo introducir la estructura.

Entrada de parámetros:

1. 0.5      Ejemplo de cómo introducir parámetros.

**CON** BLOQUE DE FUNCION CONSTANTE



**Función:**

$U(t) = \text{constante}$

**Notas**

El bloque CON tiene un parámetro y no tiene entradas.

La constante es un parámetro que puede cambiarse rápidamente con el comando "CP", Change Parameter. Además, si la constante representa un factor físico de diseño (tamaño de un vat, factor de aislamiento de un material, tamaño de una partícula, etc), se puede cambiar y correr otra vez el modelo para determinar el efecto del cambio.

**Ejemplo:** ALTAN B3 y TAN-ORI

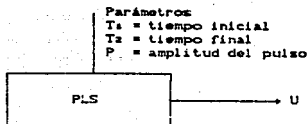
**Entrada de la estructura:**

10, CON                      El bloque 10 es un bloque constante

**Entrada de parámetros:**

10, 0.1                      La constante tiene asignado el valor de 0.1

## PLS      BLOQUE DE FUNCION PULSO



### Función:

$$U(t) = P \text{ si } T_s \leq t < T_z$$

$$U(t) = 0 \text{ de lo contrario}$$

### Notas:

El bloque PLS es una función de entrada que puede usarse para crear un pulso simple o una función escalón. Si  $T_z$  se establece mayor o igual que el tiempo de simulación, PLS representa un escalón que empieza en  $T_s$ .

El bloque PLS no tiene entradas, tiene tres parámetros.  $T_z$  debe ser mayor que  $T_s$ .

Ejemplo: ABSOR-DI y VALCON3'

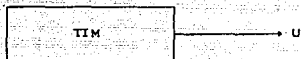
Entrada de estructura :

3, PLS      El bloque 3 es un bloque PLS

Entrada de parámetros:

3, 5, 10, 1      El pulso de altura unitaria empieza en  $t = 5$   
y termina en  $t = 10$ .

**TIM BLOQUE DE FUNCION TIEMPO**



**Función :**

La salida del bloque TIM es la base de tiempo presente de la simulación como se especifica en el comando "CT".

**Notas:**

TIM da acceso al tiempo presente de simulación, permitiendo la generación de funciones dependientes del tiempo, tal como SIN (ft), etc.

TIM es una función de alimentación. No tiene entradas ni parámetros.

**Ejemplo:** CRIS'1

**Entrada de estructura:**

17, TIM

El bloque 17 es un bloque de tiempo. Sin entradas, sin parámetros.

## ABS VALOR ABSOLUTO



## Función :

$U(t) =$  Valor absoluto de la suma algebraica de las entradas,  $I_1$   $I_2$   $I_n$

## Notas:

El bloque ABS no tiene parámetros y debe tener al menos una entrada.

El rango cercano a 2, para entradas  $-1 < I_1 I_2 I_n < 1$ , se convierte en cero.

## Entrada de estructura:

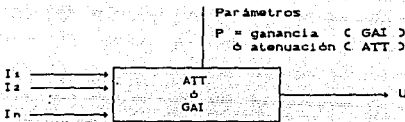
29, ABS, 1

El bloque 29 es un bloque ABS.

La entrada proviene del bloque 1.

## ATT

## GAI BLOQUES GANANCIA Y ATENUADOR



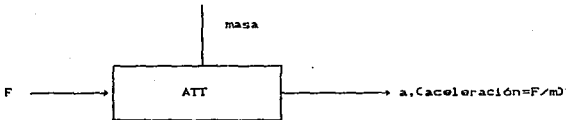
Función :

$$\text{ATT} \quad U(t) = C \cdot 1/P \cdot \Sigma I_n$$

$$\text{GAI} \quad U(t) = P \cdot \Sigma I_n$$

Notas:

Usualmente  $P$  es un valor físico del modelo. Por ejemplo, la relación de Newton,  $F = m \cdot a$ , tiene la masa como parámetro. Un diagrama de bloque que representa esto es:



Ejemplo: para ATT son KETILE y RTAC'SI, para GAI es CRIS'1



**Entrada de estructura:**

S, GAI, 4

El bloque 5 es un bloque de ganancia, la entrada proviene del bloque 4.

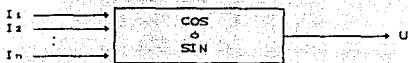
**Entrada de parámetros:**

S, 0.001

Se multiplican todas las entradas por 0.001.  
En un bloque ATT con parámetro 1000 se obtiene exactamente el mismo resultado.

COS

SIN BLOQUES DE FUNCIONES TRIGONOMETRICAS



Función :

COS  $U(t) = \cos(\sum I_n)$ SIN  $U(t) = \text{sen}(\sum I_n)$ 

Las salidas de U(t) caen entre -1 y +1.

Notas:

Las bloques SIN y COS no tienen parámetros pero deben tener al menos una entrada.

$\sum I_n$  es INTERPRETADA EN RADIANES, NO EN GRADOS.

Entrada de estructura:

4, SIN, 3

El bloque 4 es un bloque seno, su entrada proviene del bloque 3.

EXP

LOG BLOQUES DE FUNCION EXPONENCIAL Y LOGARITMO



Función:

$$\text{EXP} \quad U(t) = e^{\sum I_n}$$

$$\text{LOG} \quad U(t) = \ln \left( \sum I_n \right)$$

Notas:

$-30 < \sum I_n < +30$  es el rango permitido de las entradas. EXP y LOG no tienen parámetros y deben tener al menos una entrada. Para LOG, la  $\sum I_n$  debe ser  $> 0$ . Resultará un error si la entrada es 0 o menos.

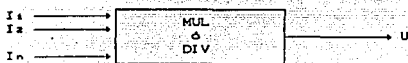
Introducción de estructura:

1, LOG, 2

El bloque 1 es un bloque LOG, la entrada proviene del bloque 2

MUL

DIV BLOQUES DE FUNCION MULTIPLICACION Y DIVISION



Función:

MUL  $U(t) = I_1 * I_2 * I_3 * \dots * I_n$

MUL puede tener varias entradas

DIV  $U(t) = I_1 / I_2$

El orden de las entradas debe darse en la estructura y se limita a dos entradas.

Notas:

MUL y DIV no tienen parámetros.

El bloque MUL debe tener al menos dos entradas. El bloque DIV solo tiene dos entradas; si se asignan más de dos, las demás quedan indeterminadas.

Ejemplo: para MUL es CRISTAL, para DIV se tienen ABSOR y FLUX

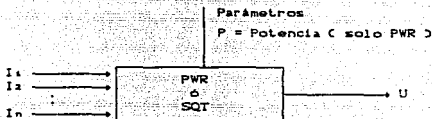
Entrada de estructura:

2, DIV, 4, 5

El bloque 2 es un bloque DIV, el valor de la salida del bloque 4 será dividido entre la salida del bloque 5.

## PWR

## SQT BLOQUES DE FUNCIÓN POTENCIA Y RAIZ CUADRADA



## Función:

$$\text{PWR} \quad U(t) = C \sum I_n^P \quad (\text{elevado a la } P\text{-ésima potencia})$$

$\sum I_n$  debe ser  $\geq 0$

$$\text{SQT} \quad U(t) = \sqrt{\sum I_n} \quad \sum I_n \text{ debe ser } \geq 0$$

## Notas:

P puede ser cualquier número real. Para cuadrados y cubos es preferible usar el bloque MUL, asignando dos o tres entradas respectivamente al bloque.

Las ecuaciones químicas y termodinámicas comúnmente usan exponentes fraccionarios, de aquí la ventaja de usar estos bloques.

El bloque PWR debe tener un parámetro y al menos una entrada. El bloque SQT debe tener al menos una entrada; no tiene parámetros.

Ejemplo: para PWR está ALTAN B2, para SQT está ALTAN A1

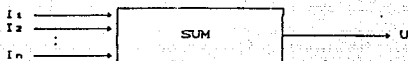
## Entrada de estructura:

2. PWP. 1 El bloque 2 es un bloque PWR, su entrada proviene del bloque 1.

## Entrada de parámetros:

2. 1. 4 La entrada del bloque 2 se elevará a la potencia 1.4

## SUM BLOQUE DE FUNCION SUMA



Función:

$$U(t) = \sum I_n \quad \text{Suma de las entradas}$$

Notas:

La mayoría de los bloques tienen una función sumadora. Sin embargo, algunas veces es deseable tener acceso a la sumatoria que entra. En estos casos se recomienda usar este bloque.

El bloque SUM debe tener al menos dos entradas. No tiene parámetros.

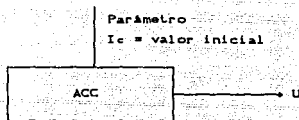
Ejemplo: se tiene BATCHTOT y TANFLUGB

Entrada de estructura:

2, SUM, 4, 8, -3

El bloque dos es un bloque SUM. El valor de este bloque sumador será la suma de las salidas de los bloques 4 y 8, menos la salida del bloque 3.

## ACC BLOQUE DE FUNCION ACUMULADORA



## Función:

$$U(t) = \sum (I_n)$$

$$U(0) = I_c$$

El bloque ACC calcula una suma de las entradas, es una función "Sigma". Se calcula la suma de las entradas en cada iteración normal, y ésta se adiciona al valor anterior del bloque ACC. Aquí no hay multiplicación por el paso de tiempo  $\Delta t$  como en los bloques integradores INT o EUL.

## Notas:

ACC es un bloque histórico. El graficado del valor de salida, como en todos los bloques históricos, es posible solamente en el intervalo de tiempo que comprende cuando las entradas se han establecido y después que se ha realizado el cálculo.



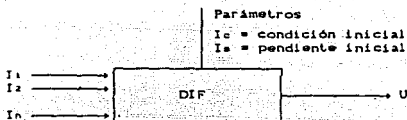
## Entrada de estructura:

10. ACC. 6, 7, -8 El bloque 10 es un bloque ACC. El valor de la suma de las entradas es adicionado al valor de la salida anterior del mismo bloque.

## Entrada de parámetros:

10, 20 El valor inicial del bloque 10 es igual a 20

## DIF BLOQUE DIFERENCIAL.



## Función:

$$U(t) = (2/3) * \left[ I In - I In(t-\Delta) \right] \frac{1}{\Delta} + (1/3) U(t-\Delta)$$

La  $I In(t-\Delta)$  se considera como  $Ic$ .

## Notas:

Los parámetros dan el valor inicial, y un valor a tiempo  $t-1$ , para determinar la pendiente después del primer paso. Después los parámetros no tienen efecto.

DIF es un bloque tipo histórico.

## Precaución:

Asegurarse de introducir las condiciones iniciales correctamente. Si no se tiene cuidado pueden generarse pasos grandes o detenerse la simulación.

Una buena simulación prácticamente NUNCA usa una función diferencial para resolver una ecuación diferencial lineal. Puede resolverse con integradores. Esto se debe a que la función diferencial produce ruido y desestabiliza.

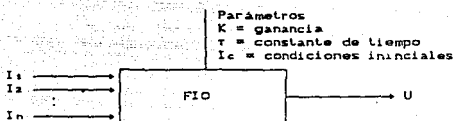
## Entrada de la estructura:

7, DIF. 2, 3 El bloque 7 es un bloque diferencial. Las entradas provienen de los bloques 2 y 3.

## Entrada de parámetros:

7, 6.7, 6.1 Al tiempo cero la salida será 6.7, en el tiempo 1 la salida estará afectada fuertemente por el parámetro 6.1.

## FIO BLOQUE DE FUNCION DE PRIMER ORDEN



## Función:

La salida,  $U(t)$ , es la solución en el espacio del tiempo para  $\Sigma I_n$  veces la función de transferencia descrita por:

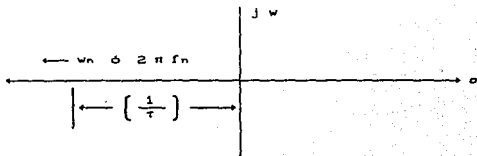
$$U(s) = K \left[ \frac{1}{(1 + s \tau)} \right]$$

## Notas:

FIO es un bloque histórico.

Este es un pequeño filtro de paso. La "frecuencia de 3 db" es  $1 / (2 \pi \tau)$  donde las unidades de tiempo son unidades de la simulación, y la frecuencia es ciclos por unidad de tiempo (usualmente Hz).

El diagrama de polos y ceros de la función de transferencia FIO es:



La función FIO debe tener al menos una entrada.

**Precaución:**

Usar  $T \leq 0$  puede predecir un modelo físicamente irrealizable.

**Ejemplo:** KETTLE

**Entrada de parámetros:**

3, 0.005, 2.3

Los parámetros en blanco se toman como cero.

por lo tanto:

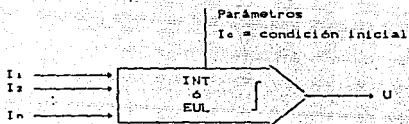
$K = 0.005$

$r = 2.3$

$I_c = 0$

INT

EUL BLOQUES FUNCION INTEGRADOR



Función:

$$U(t) = \int \sum I_n$$

Ambos bloques tienen como salida la integral, con respecto al tiempo, de la suma de las entradas.

INT produce la integral con un paso de integración de segundo orden tipo Adams-Bashford.

EUL produce la integral con un paso de integración tipo Euler.

Notas:

El integrador INT produce mayor exactitud en aproximaciones para funciones de entrada continua.

Sin embargo para entradas discontinuas o que cambian abruptamente, el integrador EUL da mejores resultados en la región de discontinuidad.

Ambos son bloques históricos.

Ejemplo: para INT está BATCHTOT, para el bloque EUL no hay ejemplo

## Entrada de estructura:

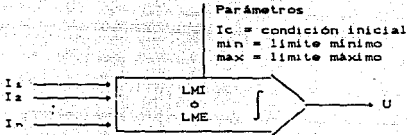
4. EUL, 2, 5      El bloque 4 es un integrador Euler, sus  
entradas provienen de los bloques 2 y 5.

## Entrada de parametros:

- 4, 1.25      La condición inicial del bloque 4 es 1.25

LMI

LME BLOQUE INTEGRADOR CON LIMITES



Función:

$$U(t) = \int \sum I_n, \quad \min \leq U(t) \leq \max$$

Notas:

LMI es similar a la integral INT, LME es similar a la integral EUL excepto que hay límites. Las salidas están limitadas por los parámetros dados. Si se satura una condición límite, la entrada cambia de signo y la salida tiende a regresar al límite inmediatamente.

Entrada de estructura:

4, LME, 2, 5

El bloque 4 es un integrador con límites. Las entradas vienen de los bloques 2 y 5.

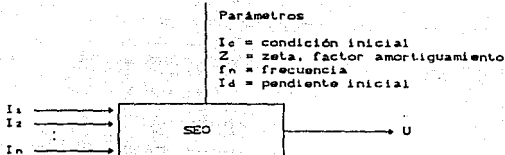
Entrada de parámetros:

4, 0, -25, 25

La condición inicial es cero. Las salidas estarán comprendidas entre -25 y +25.



## SEO BLOQUE DE SEGUNDO ORDEN



Función:

La salida,  $U(t)$ , es la solución en el tiempo para la  $\Sigma I_n$  de las funciones de transferencia descritas por:

$$U(s) = \frac{\alpha^2 + \beta^2}{(s + \alpha)^2 + \beta^2}$$

o en términos  $f_n$  y  $Z$

$$U(s) = \frac{1}{1 + 2z s / 2\pi f_n + s^2 / (2\pi f_n)^2}, \text{ donde } 2\pi f_n = \omega_n$$

Notas:

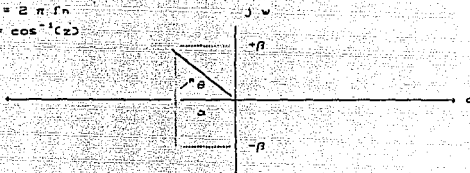
La frecuencia es en ciclos por unidad de tiempo. Si la base de tiempo es en segundos, la frecuencia será en ciclos por segundo. Este bloque contiene integradores, e internamente tiene velocidades de cambio. Por lo que la condición inicial y la razón de cambio inicial de la salida deben especificarse. Si no están especificadas se toman como cero.

SEO es un bloque histórico y debe tener al menos una entrada.

La representación en el plano S es:

$$\omega_n = 2 \pi f_n$$

$$\theta = \cos^{-1}(z)$$



Ejemplo: VALCON2

Entrada de estructura:

2, SEC, 1

2 es un bloque de segundo orden, su entrada proviene del bloque 1.

Entrada de parámetros:

2, 0, 0.405, 4.3014, 0

El bloque 2 tiene los siguientes parámetros:

$$I_c = 0$$

$$Z = 0.405$$

$$f_n = 4.3014$$

$$I_d = 0$$

## APENDICE C. MENSAJES DE ERROR

### C.1. MENSAJES DE ERROR AL INICIAR.

THIS TUTSIM PROGRAM MUST BE INICIALIZED WITH THE PROGRAM

El programa TUTSIM debe inicializarse antes de usarlo. Para esto hay que colocar el disco con el paquete en el drive A y tipear "TUTINIT".

### C.2. ERRORES EN EL MANEJO DE ARCHIVOS.

MODEL FILE NOT FOUND

El nombre del archivo no es válido, el archivo no existe en el disco. Por default es mostrado el directorio del disco, para que se elija un nombre correcto.

NOT ENOUGH MEMORY SPACE FOR MODEL

Si se realizó un modelo muy grande en una máquina con bastante memoria y ahora se quiere usar en una máquina de menor capacidad la pantalla despliega este mensaje después de haber llamado al modelo.

ERROR. DISK MAY BE FULL. REDO

Cuando se use el comando DF y se encuentre este error, indica que la escritura del archivo no fue completa y debe repetirse usando otro disco con mas espacio libre.

### C.3. MENSAJES DE ERROR EN MODO COMANDO.

ILLEGAL COMMAND. REPEAT

( or M for HELP )

El comando no es un comando válido. Todos los comandos válidos son desplegados usando HELP/

#### C.4. MENSAJE DE ERROR EN MODO INTRODUCCION DEL MODELO.

##### C.4.1. MODO ENTRADA DE ESTRUCTURA, CAMBIO DE ESTRUCTURA O CAMBIO DE COMENTARIOS.

###### INVALID BLOCK NUMBER

El primer número del bloque introducido no es un valor numérico válido.

###### INVALID BLOCK TYPE

El tipo de bloque (por ejemplo: GAE) no fue reconocido como un bloque TUTSIM.

###### INVALID INPUT BLOCKNUMBER

Uno de los números del bloque de entrada no es un valor numérico válido.

###### TOO FEW INPUTS FOR BLOCK

El número de entradas del bloque requiere que se introduzcan mayor número de bloques.

###### INCORRECT PUNCTUATION. CANNOT PARSE

Revisar la existencia y localización de comas y punto-y-comas.

UNDEFINED INPUT BLOCKS

IMPROPER ESTRUCTURE

ALGEBRAIC LOOP

C.4.2. MODO DE ENTRADA DE PARAMETROS O CAMBIO DE PARAMETROS.

INVALID BLOCKNUMBER

El número dado al bloque no es un valor numérico válido.

BLOCK NOT PRESENT IN MODEL

El bloque donde se va a cambiar el parámetro no existe en el modelo.

INCORRECT PUNCTUATION. CANNOT PARSE

INVALID PARAMETER VALUE

El valor que se le dió al parámetro no es un valor numérico válido.

DISCARDED EXTRA PARAMETERS

Se introdujeron demasiados parámetros para el tipo de bloque. Los parámetros extra no son tomados en cuenta.

C.4.3. MODO DE ENTRADA DE BLOQUES GRAFICADOS O DE CAMBIO DE BLOQUES GRAFICADOS.

INVALID BLOCKNUMBER

**BLOCK NOT PRESENT IN MODEL**

El bloque designado como bloque para graficarse no existe en el modelo.

**INCORRECT PUNCTUATION. CANNOT PARSE****INVALID MINIMUM VALUE**

El valor introducido como mínimo para el rango de la gráfica no es un valor numérico válido.

**INVALID MAXIMUM VALUE**

El valor introducido como máximo para el rango de la gráfica no es un valor numérico válido.

**FORMAT ERROR. REENTER**

Los valores máximo y mínimo para el rango de la gráfica no se metieron en el orden apropiado.

**C.4.4. MODO DE ENTRADA DE TIEMPO O DE CAMBIO DE TIEMPO.****INVALID DELTA TIME. REENTER**

El valor introducido para el paso de tiempo no es un valor numérico válido.

**INVALID FINAL TIME. REENTER**

El valor introducido para el tiempo final de simulación no es un

valor numérico válido.

## C.5. MENSAJES DE ERROR DURANTE LA SIMULACION.

### C.5.1. EN TODAS LAS SIMULACIONES.

#### ILLEGAL STRUCTURE

Usualmente resulta al usar un archivo que no es un modelo TUTSIM.

#### CANNOT CALCULATE UNSORTED MODEL

Este mensaje puede aparecer después del mensaje ILLEGAL STRUCTURE que indica un modelo mal estructurado.

#### DIVIDED BY ZERO

#### OVERFLOW

#### CALCULATION ERROR

#### CALCULATION ERROR IN BLOCK #

Si hay problemas durante el cálculo del valor de un bloque, usualmente, se indica el bloque problema.

Si la simulación es en modo gráfico, el mensaje de error no aparece en la pantalla, sólo una letra indica el mensaje.

El comando V es útil después de tales errores. Con este comando se obtiene la última salida evaluada de cada bloque.

## C.5.2. SIMULACIONES DE CORRIDA MULTIPLE.

## INVALID BLOCKNUMBER

Se introdujo un valor negativo, cero o no numérico. El TUTSIM aparecerá el cursor para reintroducir el número de bloques.

## BLOCK NOT PRESENT IN MODEL

El bloque designado como el bloque variable no existe en el modelo.

## INVALID PARAMETER NUMBER

Se introdujo un valor negativo, cero o no numérico. El TUTSIM aparecerá el cursor para reintroducir el número del parámetro.

## BLOCK DOES NOT HAVE THIS NUMBER PARAMETER

El bloque designado como el bloque variable no tiene tantos parámetros como indica el NUMERO DE PARAMETROS que se introdujo.

## INVALID START VALUE

Se introdujo un valor no numérico. El TUTSIM aparecerá el cursor para reintroducir el valor inicial del parámetro.

## INVALID END VALUE

Se introdujo un valor no numérico. El TUTSIM aparecerá el cursor para reintroducir el valor final del parámetro.

## INVALID STEP SIZE



Se introdujo un valor no numérico. El TUTSIM aparecerá el cursor para reintroducir el tamaño de paso del parámetro.

**STEP SIZE MUST BE POSITIVE**

Se introdujo un valor negativo o de cero para el tamaño de paso. Este valor debe ser positivo.

**C.6. COMANDO VERIFY**

**BLOCK NOT PRESENT IN MODEL**

Se refiere a un bloque inexistente después de un comando "V".

**NOTHING CALCULATED YET**

Hay alguna prioridad de simulación para pedir valores de bloques.

**C.7. COMANDOS LIST O TYPE**

**INVALID BLOCKNUMBER**

El número de bloque introducido no era un valor numérico válido.

**BLOCK NOT PRESENT IN MODEL**

El número de bloque designado para listar no existe en el modelo.

**NO MODEL**

No hay modelo para simular en el espacio del modelo. Regresar con "E" para llamar un modelo.