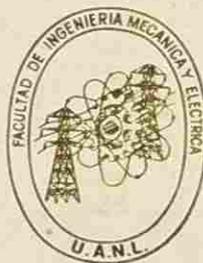


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



SIMULADOR DE CALDERAS

UANL

TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA
ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN CONTROL.

P R E S E N T A

Rogelio Treviño Garza

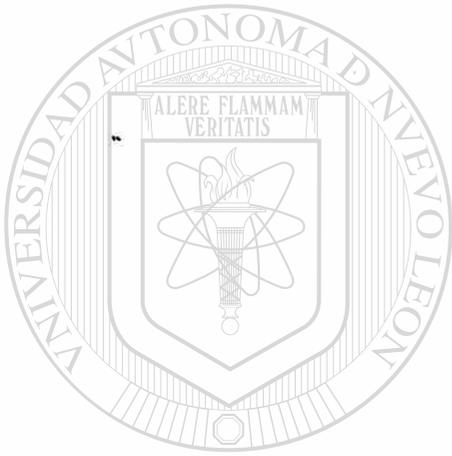
MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE DE 1985

TM
Z58
.M2
FIM
198
T7



1020070578

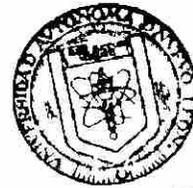
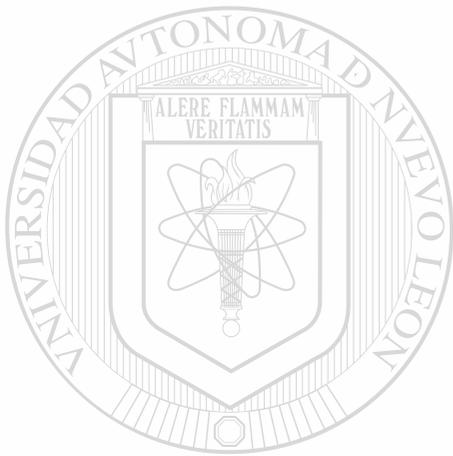


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



DIRECCIÓN GENERAL DE
ESTUDIOS DE POSGRADO

UANL

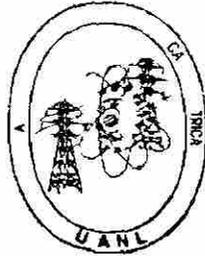
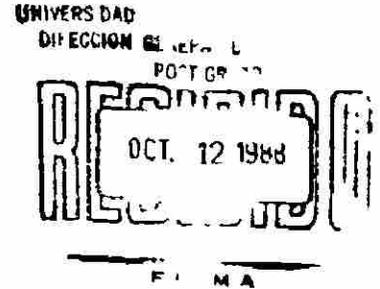
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

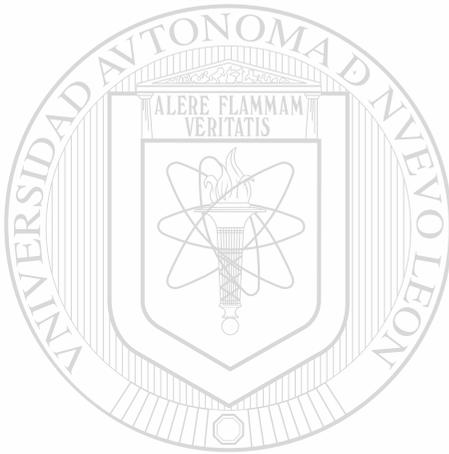
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



SIMULADOR DE CALDERAS



DIRECCION GENERAL DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO



UANL

TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

U A A OBTENER EL GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA
ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN CONTROL

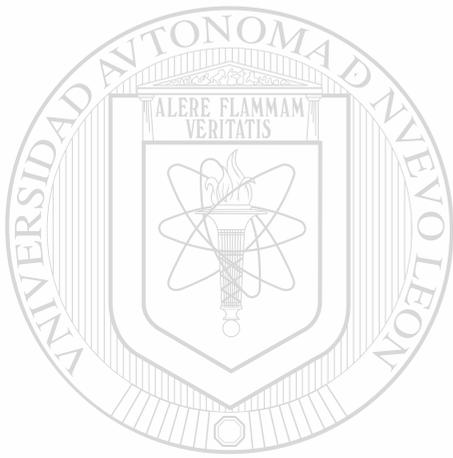
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

P R E S E N T A

Rogelio Treviño Garza

MONTERREY, N. L.

D E M E D E 85



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



162102

SIMULADOR DE CALDERAS

INDICE

1.- Definición y Alcance de la Simulación	2
1.1 Introducción	2
1.2 Alcance	3
1.2.1 Objetivos	3
1.2.2 La Planta	5
1.2.3 Los Instrumentos	5
1.2.4 Gráficas e Indicadores Dinámicos	5
2.- Operación del Simulador	7
2.1 Generalidades	7
2.1.1 Conocimientos previos	7
2.1.2 Participantes	7
2.1.3 Equipo	7
2.1.4 Como iniciar una sesión	8
2.2 Controladores, Indicadores y Mensajes	9
2.2.1 Abreviaturas y su significado	10
2.2.2 Controladores	12
2.2.3 Indicadores	12
2.2.4 Mensajes	13
2.3 Grabación de Resultados en Disco	14
2.4 Como Cerrar una Sesión	14
3.- Documentación de Datos del Simulador, Variables de Grabación y Graficación	16
3.1 Lazos de Control	16
3.2 Parámetros de la Caldera	21
3.3 Parámetros de Válvulas y Controladores	25
3.4 Teclas Programables	38
3.5 Grabación de Variables en Disco	39
3.6 Graficación	40
4.- Diagramas y Datos para el Desarrollo del Simulador	41
4.1 Diagrama de Tuberías e Instrumentación	42
4.2 Datos de la Caldera	43
4.3 Características de los Instrumentos	45
4.4 Diagrama de Flujo del Simulador	47
5.- Balances, Ecuaciones de Diferencias y Constantes	49
6.- Corridas Típicas	61
7.- Desarrollos Futuros y Conclusión	68
7.1 Otras computadoras	68
7.2 Otros procesos	69
7.3 Conclusión	70

1.- Definición y Alcance de la Simulación.

1.1 Introducción.- Al hablar de simulaciones en computadoras, se establecen al menos las siguientes alternativas:

a) Según el tipo de computadora una simulación puede desarrollarse en computadoras digitales o en computadoras analógicas.

b) Según el propósito de la simulación las simulaciones pueden plantearse con fines de entrenamiento, investigación, educación o diseño.

En general "la simulación es la experimentación con modelos. La simulación para la investigación, el diseño, la educación, el entrenamiento y pruebas de sistemas... es dramáticamente efectiva en costo". Las simulaciones se resuelven "prácticamente siempre con la ayuda de una computadora electrónica".

En este escrito se describe un simulador de calderas resuelto en una computadora digital. Se pretende obtener un sistema de mínimo costo para mostrar a clientes potenciales los servicios que la Facultad puede prestar en el diseño e implementación de simuladores para entrenamiento.

Al plantearse el problema de una simulación se observaron como obstáculos implícitos:

-el desarrollo en tiempo real de los modelos de los equipos a simular.

-la programación de interrupciones que el 'operador' de los equipos simulados debe generar a fin de establecer comunicación efectiva con el modelo programado.

-la presentación de la información que tradicionalmente se da a través de controladores e indicadores en la instrumentación de plantas o equipos.

Para concretar el proyecto de un simulador, se eligió una caldera generadora de vapor de las llamadas calderas paquete por ser un equipo completo con un grado de dificultad adecuado a una tesis.

Además se escogió realizarlo en una computadora personal para enfatizar el bajo costo del equipo necesario y por la disponibilidad inmediata y continua de este equipo.

Para que un simulador como el que hasta aquí se ha definido sea factible se requiere:

-reducir el tiempo de ciclo de cálculo del modelo a un valor menor al 'crítico'. Este valor 'crítico' puede ser determinado mediante la ejecución del modelo con tiempos de ciclo variables. Para una gama de tiempos de ciclo, los resultados obtenidos, además de ser lógicos son relativamente invariables; pero llegados a un cierto tiempo de ciclo t , cualquier incremento para el período de un ciclo implicará resultados diferentes. Este valor t es el máximo tiempo de ciclo que podemos permitirnos en el cálculo del modelo.

-programar el modelo de simulación de modo que cuente

con interrupciones del operador y despliegue de variables como los equipos reales a fin de contar con una presentación que se asemeje a la que existe en situaciones convencionales.

Definido lo anterior, el modelo de la caldera paquete debía correr en un tiempo de ciclo estimado en menos de nueve segundos. La presentación de las variables controladas, manipuladas, señales de control e indicaciones se eligió de modo que fuera similar a la que tienen las computadoras de control de procesos como son TDC-2000 de Honeywell, Centum de YEW, Diógenes de Rosemount etc. Esto significa que el despliegue de estas variables se hace en el monitor de la microcomputadora. Implica además la presentación tanto de valores digitales como de gráficas de barras para los controladores. El operador debe contar además con facilidades para modificar los parámetros relativos a la ganancia y las constantes para afectar la integración y la derivación del error y desarrollar la señal de control. Los controladores deben poder trabajar tanto en forma automática como manual según lo disponga el operador.

El simulador se desarrolló en Basic. Esto significó una 'facilidad' relativa si se toma en cuenta que programar en Basic es más simple que programar en lenguaje de máquina. Si el programa se hubiera desarrollado en lenguaje de máquina los tiempos de ciclo se habrían reducido pero el desarrollo de la programación se habría dificultado.

En definitiva al programar en Basic los problemas del modelaje se enfatizan mientras que las dificultades propias de la programación se mantienen en un margen 'adecuado'.

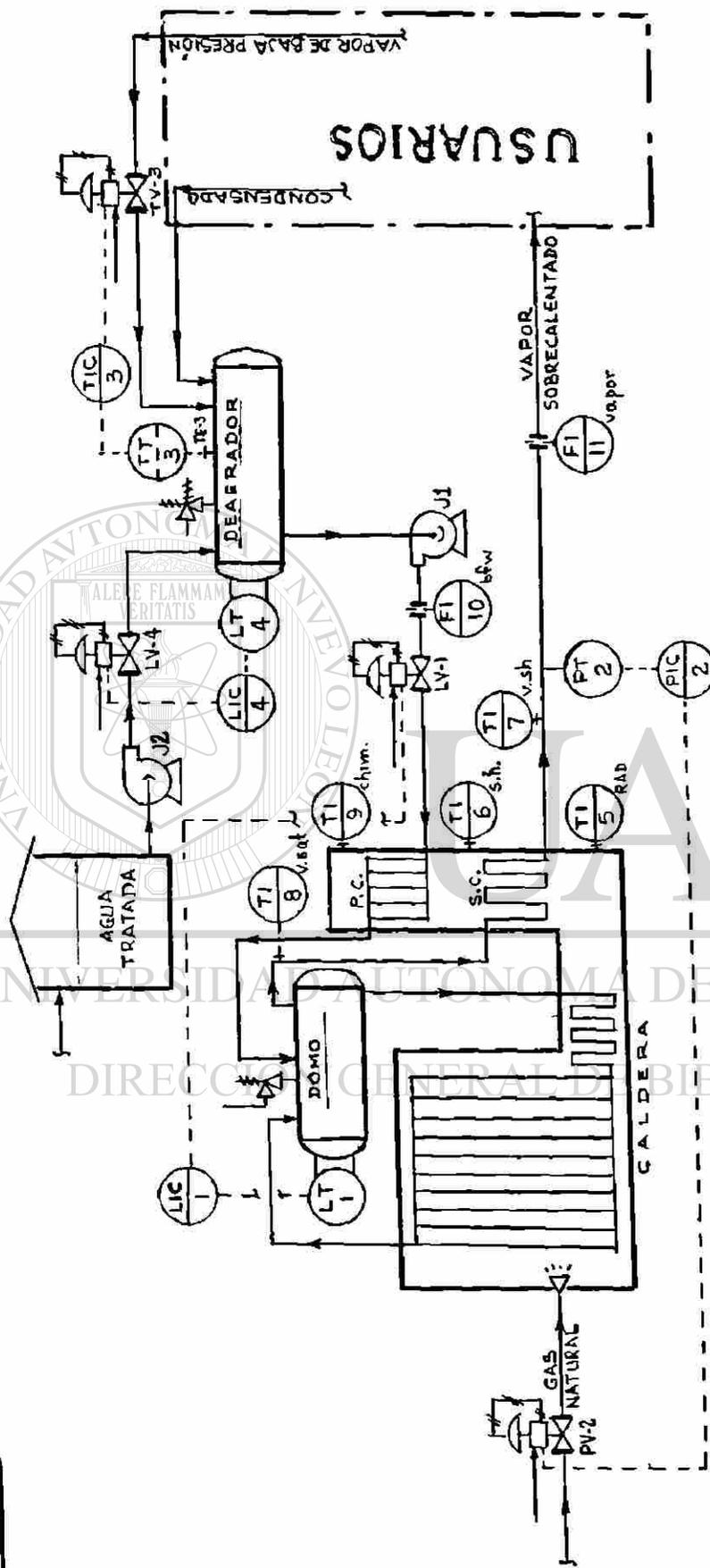
Básicamente la tesis se ha escrito como si fuera el manual de operación del simulador para entrenamiento. Este manual está enfocado al instructor.

1.2 Alcance.- Se simula una caldera generadora de vapor con capacidad nominal de 50,000 Kgs/Hr de vapor sobrecalentado de 400 grados Cent. y 45 Kg/cm². La simulación incluye modelos matemáticos para la planta, los instrumentos, así como algoritmos para generar gráficas e indicadores digitales dinámicos.

1.2.1 Objetivos.- En esta simulación, la caldera paquete es considerada desde el punto de vista de su operación, es decir enfatizando el comportamiento de los lazos de control que manipula el operador. Se da especial importancia a la indicación de variables que pueden servir de retroalimentación en las decisiones que debe efectuar el operador.

El simulador está hecho de modo que una persona pueda fungir como entrenador. El entrenador podrá plantear diferentes comportamientos en la planta mediante la modificación de sus parámetros: Para las válvulas de control el entrenador puede simular condiciones

FIG. No 1



P.C. = PRECALENTADOR
 S.C. = SOBRECALENTADOR

FIGURA No. 1

DIAGRAMA DE CALDERA
 PAQUETE 50TON/HR, 45Kg/cm²
 FECHA: OCTUBRE 1985
 ALUMNO: R.T.G. FIME - UANL
 SIMULADOR DE CALDERAS

anormales afectando las banderas correspondientes. Para evaluar la participación del operador el entrenador puede juzgar las gráficas pertinentes. Además, puesto que los parámetros de los controladores pueden ser modificados, el simulador es una herramienta de apoyo en los cursos de control de procesos.

También, puesto que algunos parámetros de los elementos de la caldera, como los coeficientes de transferencia térmica y las áreas de los paquetes de tubos de la caldera, el flujo de gas combustible, etc, son valores modificables, entonces, es posible apreciar los efectos que pueden tener sobre el comportamiento del equipo. Esto ya es en sí un objetivo que sin embargo no se contempla para este simulador. Tómese en cuenta que un simulador para efectos de diseño de equipos está obligado a ser más preciso aún a costa de no correr como programa en tiempo real. En cambio un simulador para entrenamiento de operadores, obligado a correr en tiempo real debe aminorar la carga de cálculos de un modelo complejo para hacer rápida su ejecución.

1.2.2 La Planta.- Mostrada en la figura No. 1, la planta consta de caldera y deaerador.

En la sección de convección la caldera tiene serpentines generadores y sobrecalentadores de vapor. En la cámara de radiación del tipo de 'paredes de agua' se genera la mayor parte del vapor.

Los quemadores son de gas natural. El flujo de gases de combustión se desaloja mediante el tiro natural de la chimenea.

El vapor generado se separa del líquido saturado en el domo superior de la caldera y ya sobrecalentado se entrega a los usuarios quienes emplean este vapor y lo condensan. El condensado es enviado por los usuarios hacia el deaerador.

El deaerador debe mantener un nivel mínimo para garantizar un suministro adecuado a las bombas de agua. Además, a fin de deaerar eficientemente el agua, ésta debe estar a una temperatura cercana al punto de ebullición.

1.2.3 Los Instrumentos.- Los instrumentos que intervienen para el desarrollo del control de la planta se muestran en la figura No. 1. Contamos con medidores de flujo, nivel, presión y temperatura. Los controladores son de nivel, presión y temperatura; todos ellos del tipo PID. Los flujos regulados por válvulas de control son los de agua al domo, agua al deaerador, gas a quemadores y vapor al deaerador. Las variables controladas son la presión y el nivel del domo y la temperatura y nivel del deaerador.

1.2.4 Gráficas e Indicadores Digitales Dinámicos.- Con respecto a las variables controladas y sus puntos de referencia ('setpoints') se muestran en gráficas de barras, de modo similar al acostumbrado en los

SIMULADOR DE CALDEPAS

equipos de control de procesos por computadora. Otras variables son indicadas a través del despliegue numérico (digital) de sus valores. Las gráficas y valores desplegados corresponden a valores en tiempo real renovados durante cada ciclo de cálculos del simulador (ver figura 2 en página 12).

Mediante 'mensajes' generados por el operador es posible modificar las características de los controladores. En esto se emula lo resuelto en las estaciones de operador de las computadoras de control de procesos (ver lista de mensajes en página 13).

De las variables renovadas cíclicamente todas las indicaciones gráficas y alfanuméricas se presentan en la pantalla (llamada también monitor) de la microcomputadora donde se desarrolla la simulación.

Para observar la historia del comportamiento de las variables en el tiempo, se graba (cada 36 segundos aproximadamente) en disco un conjunto de hasta 25 variables. Esta grabación es graficable fuera de línea. Esto permite analizar la operación para corregir errores y establecer opciones de operación.

Se incluyen también entre las indicaciones señales y mensajes para alarma y bote respectivamente. Tanto la alarma como el bote se producen por condiciones alta o baja de las señales a controlar: presión de domo, nivel de domo, temperatura de deaerador y nivel de deaerador.

En síntesis las características de la instrumentación simulada son:

- consta de controladores e indicadores digitales.
- las señales de los controladores y los indicadores se despliegan en monitor tipo pantalla de rayos catódicos.
- las indicaciones digitales y las gráficas de barras de los controladores son dinámicas o renovables en tiempo real.
- el operador puede modificar los parámetros de los controladores mediante mensajes o interrupciones con teclas programables.
- se obtienen gráficas fuera de línea para las variables previamente grabadas en disco.
- se tienen indicaciones de alarma preventiva y alarma de bote.

2.- Operación del Simulador.

2.1 Generalidades.- Se describen en estos párrafos las condiciones, requerimientos y recomendaciones par iniciar una simulación mediante el programa simulador existente.

2.1.1 Conocimientos Previos.- Para utilizar eficientemente el simulador es recomendable tener nociones de:

-El diagrama de tuberías e instrumentación.

-La operación de controladores PID.

2.1.2 Participantes.- Al utilizar el simulador se contempla la participación de:

-El operador que tratará de mantener bajo control a la caldera.

-El instrumentista que a través del ajuste de los controladores, las válvulas y los indicadores puede participar en la 'puesta a punto', 'comisionamiento y arranque' o 'sintonización' de los instrumentos.

-El entrenador que planteará alternativas de funcionamiento de planta y controles, evaluará la participación de operadores e instrumentistas y los orientará en el aprendizaje requerido.

2.1.3 Equipo.- El programa ha sido elaborado para correr en una microcomputadora Commodore 128B equipada con discos (floppy disk-Commodore 8050), monitor (Zenith data systems) e impresora (Commodore 4023).

Cada equipo cuenta con cableado de energización para 120 VCA aterrizable. El aterrizaje es obligado. Cada equipo cuenta también con un conector cableado para señales de o hacia el teclado-microprocesador.

El monitor o pantalla debe conectarse mediante un cable que aunque es multiconductor de cinco hilos y blindaje, solo emplea el hilo de color blanco y su blindaje en el extremo que se conecta al monitor. En el extremo del teclado la entrada para este cable viene señalada con la palabra VIDEO y esta preparada para aceptar un conector con muesca en la parte superior y cinco patas terminales en la parte inferior.

La impresora y el gabinete de discos (floppy) se interconectan entre si y con el teclado mediante un cable multiconductor a través de puertos tipo IEEE 488. La comunicación aquí es en paralelo (daisy chain). Estos cables deben ir conectados de modo que del teclado se dirija un primer cable hacia el gabinete de discos y el segundo cable se monte sobre la conexión del primero al gabinete de discos y se conecte por su otro extremo a la impresora. En el teclado la conexión aquí descrita se hace a través del puerto señalado con la palabra IEEE 488. En la impresora y discos solo hay un conector posible para

SIMULADOR DE CALDERAS

el cable correspondiente.

Una vez que se han conectado los cables de señales, pueden conectarse los de 120 VCA de energización. Solo hasta entonces deben accionarse los interruptores para energizar cada uno de los equipos. En una secuencia típica deberán registrarse los siguientes eventos:

-al energizarse el teclado y el monitor aparece en el monitor el letrero

```
***comodore basic 128, v4.0***  
ready.
```

-al energizar el gabinete de discos los indicadores (LED's) del frente centellarán dos ocasiones en color rojo y después solo quedará encendido el indicador central superior con luz verde.

-al energizar la impresora el mecanismo impresor se desplazará de izquierda a derecha y viceversa hasta quedar en el extremo izquierdo. El indicador del frente quedará iluminado.

2.1.4 Como Iniciar una Simulación.- El programa de simulación ha sido grabado en disco ('diskette' de 5 1/2") con los nombres de TESIS y CALDERA. Para iniciar una simulación se requiere:

- cablear y energizar los equipos según lo descrito en el párrafo 2.1.3
- cargar en memoria central el programa grabado en disco.
- iniciar la corrida del programa simulador.

Para cargar el programa de disco a memoria se monta en la unidad 1 ('drive 1') el disco que contiene el programa. El disco se introduce de modo que la etiqueta quede hacia arriba y del lado del operador. Una vez introducido el disco, la puertecilla correspondiente (esto es la de la unidad 1) deberá ser cerrada mediante un movimiento hacia abajo. Hecho lo anterior se teclea el comando siguiente:

```
dload "tesis",d1
```

Para enviar el comando, después de teclearlo se oprime la tecla de "RETURN". Con esto se inicia una secuencia en la que :

-aparece en la pantalla el letrero

```
searching for 1: tesis  
loading
```

-se ilumina el indicador inferior izquierdo del gabinete de discos correspondiente a la unidad 1 ('drive 1') y se escucha el sonido del movimiento del disco y la cabeza lectora.

SIMULADOR DE CALDERAS

-al concluir el cargado del programa aparece en la pantalla el letrero

ready.

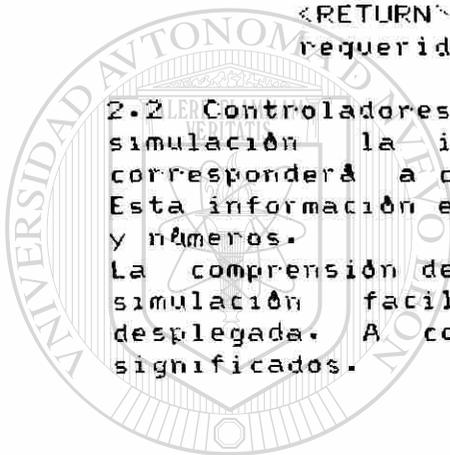
casi simultáneamente se apaga el indicador (LED) de la unidad 1 de discos.

Finalmente para iniciar una simulación es necesario:

- teclea el comando <RUN> seguido de la tecla de <RETURN>.
- al aparecer el letrero "teclea un 1 para arranque desde última condición, 0 para arranque en cero" deberá teclearse un 1 ó un 0 dependiendo que se desee o no partir de las condiciones grabadas "ex profeso" de una corrida anterior. Además del 0 ó 1 deberá teclearse <RETURN>. Con esto se concluyen los pasos requeridos para iniciar una simulación.

2.2.2 Controladores, Indicadores y Mensajes.- Durante la simulación la información desplegada en la pantalla corresponderá a controladores, indicadores y mensajes. Esta información es una combinación de gráficas, letreros y números.

La comprensión de las abreviaturas empleadas durante una simulación facilitará el manejo de la información desplegada. A continuación se listan abreviaturas y sus significados.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

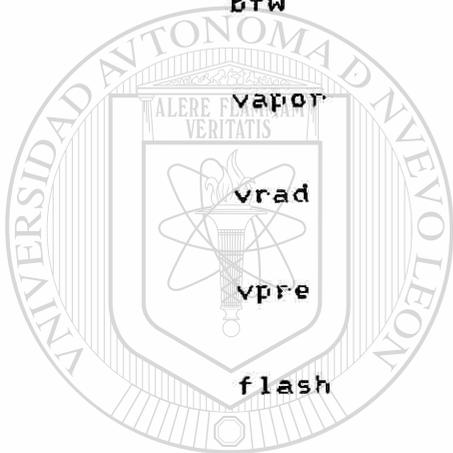
SIMULADOR DE CALDERAS

2-2.1 Abreviaturas y su Significado.

Abreviatura	Significado
ENT	Señal de entrada de un controlador. Debajo de esta abreviatura aparece el valor numérico correspondiente a tal señal. Sobre la abreviatura está su gráfica de barras.
SP	Punto de referencia ('setpoint'). Se acompaña de una gráfica y una cifra que colocadas encima y abajo de la abreviatura la describen.
AUTO/MAN	Automático/Manual. Se refiere al modo de operación del controlador. A la derecha de la abreviatura se despliega el valor numérico de la salida del controlador como fracción de la unidad.
NIVEL DOMO	Para hacer referencia al controlador No. 1, primero de izquierda a derecha, el cual controla el nivel del domo.
PRESION VAPOR	Para hacer referencia al controlador No. 2, segundo de izquierda a derecha, el cual controla la presión del vapor.
TEM DESAER	Para hacer referencia al controlador No. 3, tercero de izquierda a derecha, el cual controla la temperatura del deaerador.
NIVEL DESAER	Para hacer referencia al controlador No. 4, cuarto de izquierda a derecha, y que controla el nivel del deaerador.
flama	Temperatura de flama en grados centígrados.
rad	Temperatura de gases a la salida de la cámara de radiación en grados centígrados.
s.h.	Temperatura de gases a la salida del sobrecalentador en grados centígrados.

SIMULADOR DE CALDERAS

Abreviatura	S i g n i f i c a d o
v.sh	Temperatura de vapor sobrecalentado en grados centigrados.
v.sat	Temperatura de vapor saturado en grados centigrados.
chim	Temperatura de chimenea en grados centigrados.
flue	Flujo de gases de combustión en Kg/Hr.
bfw	Flujo de agua de alimentación al domo en Kg/Hr.
vapor	Flujo de vapor sobrecalentado en Kg/Hr.
vrad	Flujo de vapor generado en radiación en Kg/Hr.
vpre	Flujo de vapor generado en serpentines de convección en Kg/Hr.
flash	Flujo de vapor generado por depresurización del domo en Kg/Hr.
vapor(kg/Hr)	Mediante este letrero generado por el operador se indica y controla el flujo de vapor sobrecalentado entregado a los usuarios.
Kp	Ganancia del controlador.
Ki	Constante de modo integral en repeticiones por segundo.
Kd	Constante de modo derivativo en segundos por repetición.
A	Alarma para señal 'alta'.
B	Alarma para señal 'baja'.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SIMULADOR DE CALDERAS

2.2.2 Controladores.- En la pantalla se despliega información de cuatro controladores.

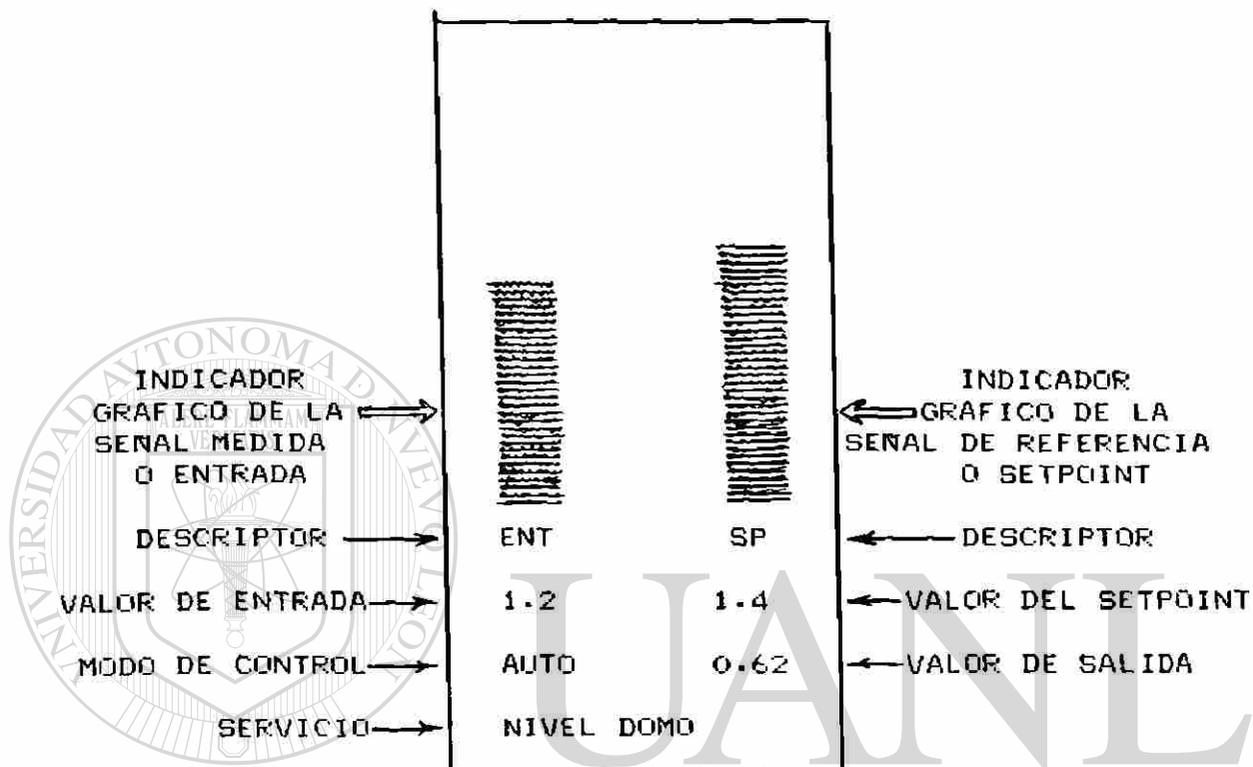


Figura No. 2.- Aspecto de la información desplegada para un controlador en el monitor del microprocesador.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Cada controlador es representado en la pantalla como se muestra en la figura No. 2. Para cada controlador se tiene:

- indicador gráfico de 'entrada'--barra Izq.--
- indicador gráfico de 'setpoint'--barra derecha--
- descriptores de gráficas: ENT y SP
- valores numéricos de 'entrada' y 'setpoint'.
- descriptor de modo de control: AUTO/MAN
- valor numérico de 'salida'.
- servicio a que está dedicado el controlador.

2.2.3 Indicadores.- En la pantalla se despliega información correspondiente a 12 indicadores. En este caso la información consiste del valor numérico de 12 variables. Este valor numérico es calculado por el simulador para desplegarse con su última expresión cada 6 segundos aproximadamente. Cada valor va

SIMULADOR DE CALDERAS

acompañado de una abreviatura cuyo significado ha sido explicado en el párrafo 2.2.1

Los valores desplegados en los indicadores son muy útiles al operador para tomar decisiones respecto a la forma de manipular los controladores y las válvulas pues dependiendo de las cifras que se indiquen para las variables de la caldera se deberá efectuar alguna maniobra a juicio del operador.

2.2.4 Mensajes.- El operador tiene la opción de generar 'mensajes' para hacer explícitos y comprobables los cambios que desee generar en los controladores y en el flujo de vapor sobrecalentado. A este efecto, el operador puede manipular las teclas F1 a F10 que en combinación con la tecla de mayúsculas/minúsculas permiten hasta 20 'mensajes' diferentes, de los cuales se emplean 14 como se indica a continuación.

Con minúsculas se generan los mensajes siguientes:

Tecla	M e n s a j e
F1	controlador=1 modo=man
F2	controlador=2 modo=man
F3	controlador=3 modo=man
F4	controlador=4 modo=man
F5	salida=
F6	fp=
F7	ki=
F8	Kd=
F9	setpoint=
F10	vapor (Kg/Hr)=

Con mayúsculas se generan los siguientes mensajes:

Tecla	M e n s a j e
<SHIFT> F1	controlador=1 modo=auto
<SHIFT> F2	controlador=2 modo=auto
<SHIFT> F3	controlador=3 modo=auto
<SHIFT> F4	controlador=4 modo=auto
<SHIFT> F5-F10	-vacantes-

Mientras que las teclas F1 a F4 no requieren sino teclearse a fin de enviar una 'instrucción' o 'mensaje' completo, las teclas F5 a F10 deben acompañarse de un valor numérico y un teclazo de <RETURN>.

Las teclas F5 a F8 deben ir precedidas por la selección de un controlador y su modo de operación. Esto implica que antes de teclear cualquier tecla de F5 a F8, se debe teclear alguna de entre F1 a F4.

SIMULADOR DE CALDERAS

2.3 Grabación en Disco de Resultados de la Simulación.- Se tienen dos formas de grabar resultados; éstas se describen en los párrafos siguientes.

2.3.1 Se graban periódicamente en línea y en forma automática 25 variables. Esto ocurre cada 36 segundos aproximadamente. De esta manera se tiene grabada la 'historia' de la operación para ser listada o graficada según sea decidido. La graficación es posible mediante un programa que corre fuera de línea con respecto al simulador por ejemplo al concluir una sesión de simulación. El archivo que contiene la historia de la operación lleva el nombre de "registro".

2.3.2 Al concluir una sesión y si se desea, es posible optar por grabar la condición final de la planta y sus controladores. Esto se consigue mediante la grabación de alrededor de 800 variables que representan el 'status' de la planta y sus instrumentos así como las variables propias del programa simulador. La grabación de estas variables toma un tiempo de aproximadamente 2 minutos.

Al iniciar una sesión y si se desea, es posible optar por arrancar a partir de condiciones iniciales grabadas en disco como resultados de una corrida previa o bien a partir de condiciones iniciales dadas en el programa simulador. Para ello deberá teclearse un 1 o un 0 según se indica en la pantalla al iniciar la sesión de entrenamiento.

Si se eligen las condiciones iniciales grabadas en disco, entonces se leerán del disco las aproximadamente 800 variables grabadas previamente. Esto tomará un tiempo de aproximadamente 7 minutos.

2.4 Como Cerrar una Sesión.- Para finalizar una sesión deberá teclearse en dos ocasiones consecutivas el signo = y enviarse esta información mediante el tecleo de <RETURN>. Puesto que el programa estaba grabando en disco, un archivo estaba permanentemente abierto y deberá ser cerrado. Esto se resuelve por programación después de teclear los signos de igual (=). Deberá entonces darse el tiempo necesario para que los disketes resuelvan el cierre del archivo en mención. Por esta causa, el programa hace un alto que deberá ser mantenido por el operador hasta que el diskete cierre tal archivo lo cual es observable pues el indicador de la unidad de discos deberá apagarse y unos

SIMULADOR DE CALDEPAS

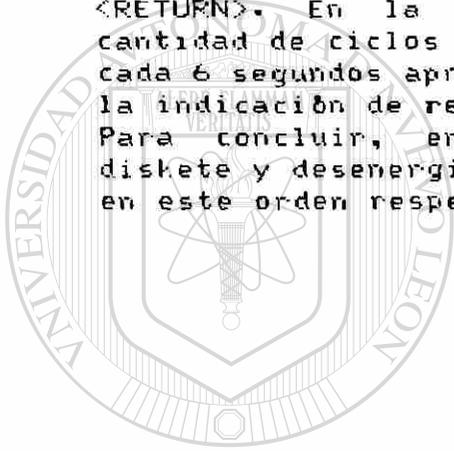
10 segundos después se dejará de escuchar el sonido típico del diskete en movimiento.

Después que lo anterior haya ocurrido, el operador tecleará <cont> y <RETURN> si decide grabar las aproximadamente 800 variables del status de la planta. Esto tomará aproximadamente 2 minutos.

Si el operador no desea grabar el status final, sino que desea mantener como status final el de una sesión previamente grabada, entonces no debe teclear cont sino que puede proceder a descargar el diskete y a desenergizar impresora, disco, monitor y teclado en este orden respectivamente.

Si el operador decidió grabar en disco, deberá esperar los 2 minutos aproximadamente requeridos. Nuevamente el programa hará un alto en espera de cierre de archivo. El operador observará y esperará por señalización de cierre resuelto como ya se describió y tecleará entonces <cont> y <RETURN>. En la impresora se dará información de la cantidad de ciclos de grabación periódicamente efectuados cada 6 segundos aproximadamente y en la pantalla aparecerá la indicación de ready.

Para concluir, en caso de desearlo, deberá descargar el diskete y desenergizar impresora, disco, monitor y teclado en este orden respectivamente.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

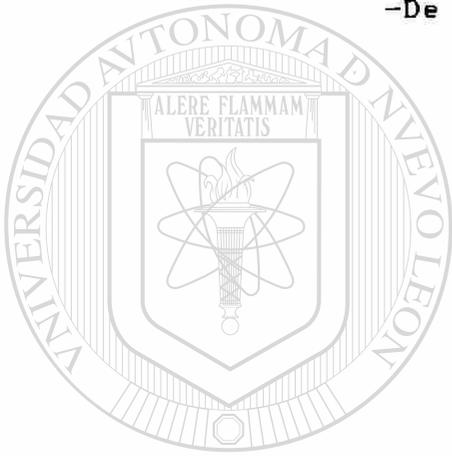


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

3.- Documentación de Datos del Simulador, Variables de Grabación y Graficación.

3.1 Lazos de Control.- En las siguientes páginas se tendrán los dibujos de los lazos de control. Estos lazos de control cubren la documentación mínima requerida para comprender las interconexiones entre los instrumentos. Cada lazo comprende el conjunto de instrumentos agrupados con el fin de desarrollar un control determinado, de modo que los cuatro controles de que consta la instrumentación se describen en cuatro lazos de control:

- De nivel del domo
- De presión del vapor
- De temperatura del deaerador
- De nivel del deaerador



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



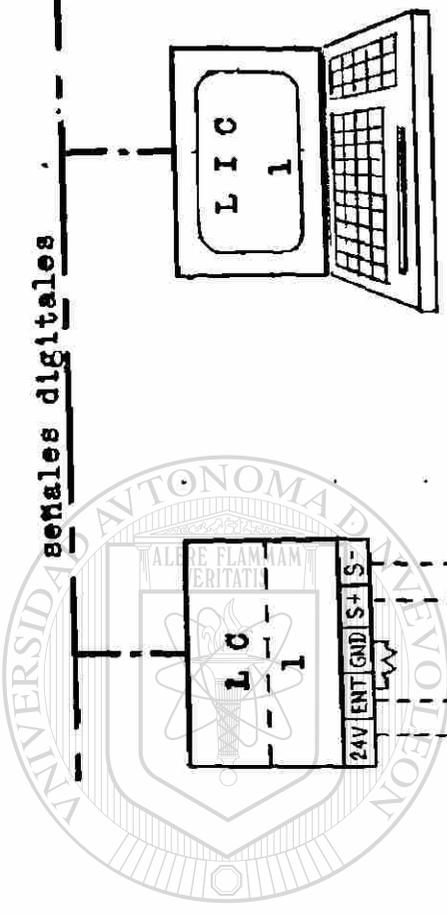
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LISTA DE INSTRUMENTOS

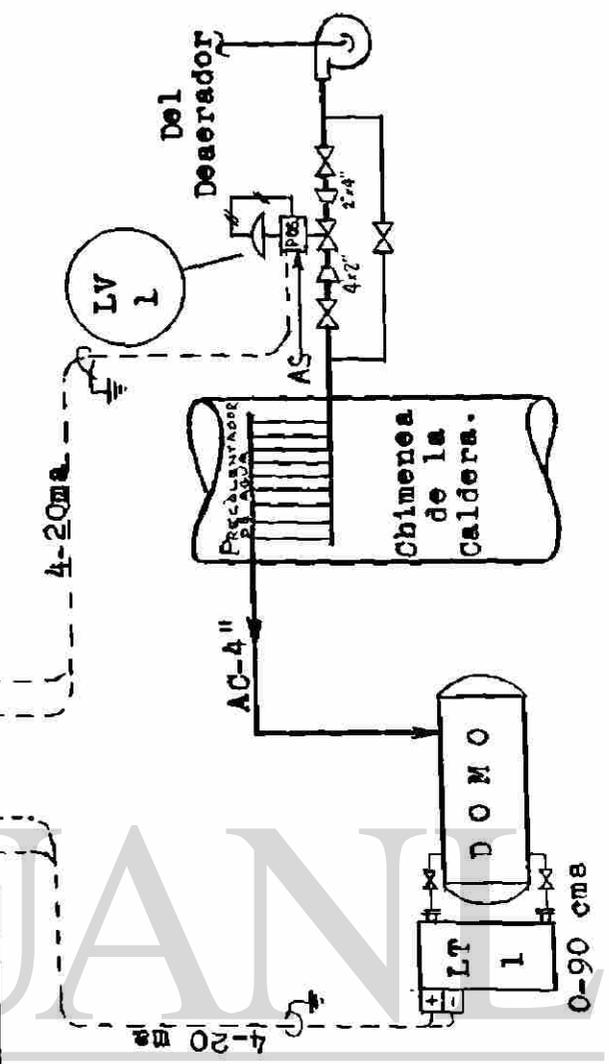
IDENT	DESCRIPCION
LT-1	Transmisor de nivel
LC-1	Controlador digital Elect.
LIC-1	Controlador en monitor
LV-1	Válvula de control

SALA DE CONTROL

senales digitales



CAMP O



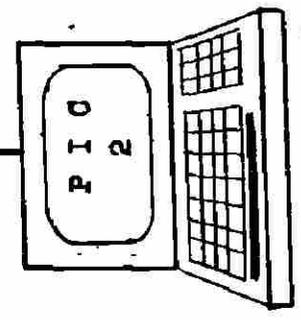
CONTROL DE NIVEL DEL DOMO	
L A Z O N O . 1	OCT 85
CALDERA PAQUETE	

LISTA DE INSTRUMENTOS

IDENT	DESCRIPCION
PT-2	Transmisor de presión 0-70 Kg/cm ²
PC-2	Controlador digital Elect.
PIC-2	Controlador en monitor
PV-2	Válvula de control

SALA DE CONTROL
CAMPO TBS

señales digitales

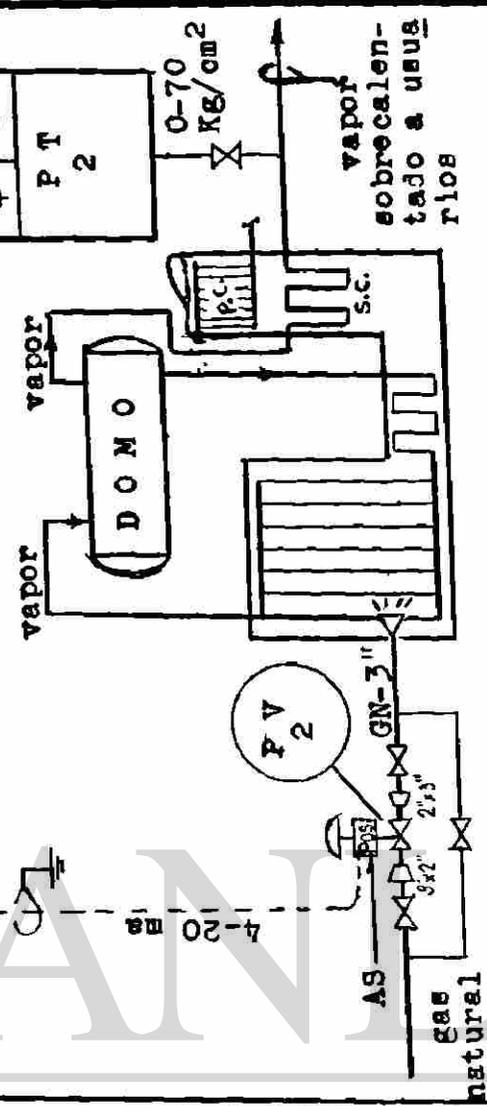


4-20 mA

PT2+
PT2-

PV2+
PV2-

4-20 mA



CONTROL DE PRESION DEL VAPOR

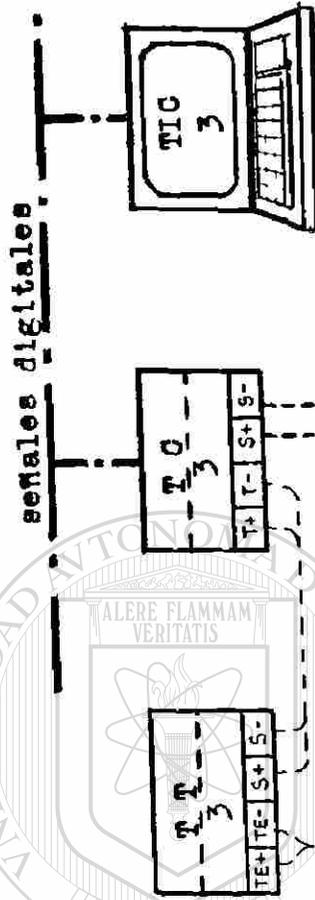
L A Z O N O . 2

CALDERA PAQUETE OCT 85

LISTA DE INSTRUMENTOS

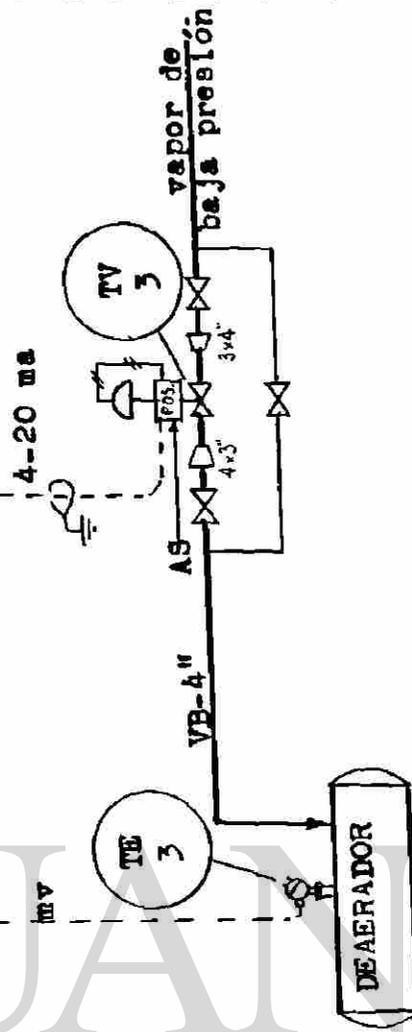
IDENT.	DESCRIPCION
TE-3	Termopar y termopozo
TT-3	Transmisor Temp. 0-540°C
TC-3	Controlador digital Elect.
TIC-3	Controlador en monitor
TV-3	válvula de control

SALA DE CONTROL



TBS

CAMPO



CONTROL DE TEMPERATURA
DEL DEAERADOR

L A Z O N O . 3

CALDERA PAQUETE

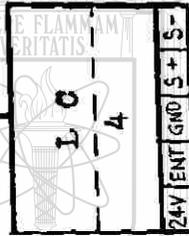
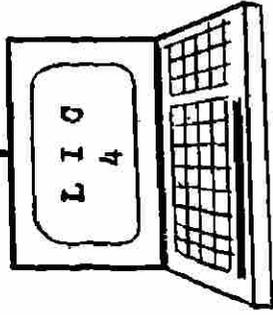
OCT 85

LISTA DE INSTRUMENTOS

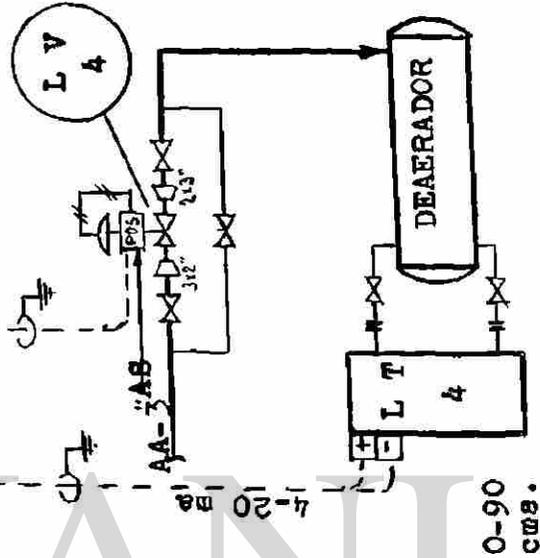
IDENT	DESCRIPCION
LT-4	Transmisor de nivel
LC-4	Controlador digital Elect.
LIC-4	Controlador en monitor
LV-4	Válvula de control

SALA DE CONTROL

señales digitales



TBA



CONTROL DE NIVEL
DEL DEAERADOR

L A Z O N O . 4

CALDERA PAQUETE OCT 85

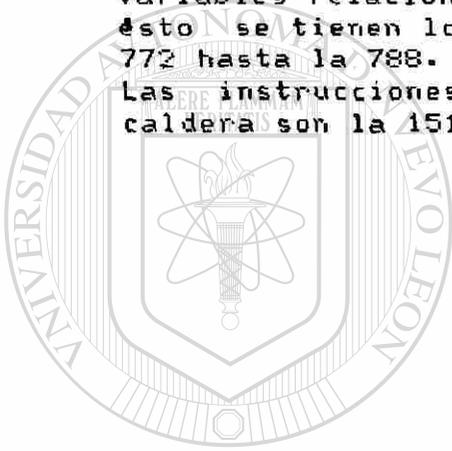
3.2 Parámetros de la Caldera.- La tabulación siguiente enlista los parámetros de la caldera que se proporcionan como datos y que eventualmente pueden ser modificados. Todos estos parámetros son alimentados como datos mediante instrucciones 'DATA'.

Algunos valores se proporcionan como datos iniciales que durante la ejecución del programa serán requeridos para ser después modificados, tal es el caso por ejemplo del flujo de gas a combustión que será variable dependiente de la apertura de la válvula correspondiente. Otros valores permanecen fijos pues son características del equipo invariables como el área de tubos o el volumen contenido en ellos.

La modificación que se desee hacer a estos datos debe ser resuelta en el momento de iniciar el programa.

En el programa de simulación se documentan brevemente las variables relacionadas con la caldera y el deaerador. Para esto se tienen los comentarios dados desde la instrucción 772 hasta la 788.

Las instrucciones 'data' que alimentan variables para la caldera son la 151, 152 y 153.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SIMULADOR DE CALDERAS

3.- Documentación de Datos Básicos

Variable	Instrucción	Descripción
AB(719)	1500/240	Temperatura de tubos de radiación en grados Fahrenheit.
AB(720)	1700000/900000	Flujo de aire a combustión en pies cúbicos standard por hora.
AB(721)	9.6/9.6	Relación estequiométrica de aire/gas para mezcla
AB(722)	136200/15000	Flujo de gas a combustión en pies cúbicos standard por hora.
AB(723)	110000/110000	Vapor generado en operación normal en libras por hora.
AB(724)	3400/3200	Temperatura inicial de flama en grados Fahrenheit.
AB(725)	2400/300	Temperatura inicial de salida de gases de radiación en grados Fahrenheit.
AB(726)	1950/220	Temperatura inicial de salida de gases del sobrecalentador en grados Fahrenheit.
AB(727)	500/115	Temperatura inicial de gases de chimenea en grados Fahrenheit.
AB(729)	22.5/22.5	Coefficiente de transferencia <u>U</u> de convección en BTU/hr-ft ² -Gr F.
AB(730)	23.8/23.8	Coefficiente de transferencia <u>U</u> del sobrecalentador en BTU/hr-ft ² -Gr F
AB(731)	750/220	Temperatura de vapor sobrecalentado en grados Fahrenheit

SIMULADOR DE CALDERAS

3.2 Parámetros de la Caldera y el Generador. Variable	Instrucción	Descripción
AB(732)	500/212	152: dato No. 3 Temperatura de vapor saturado del domo en grados Fahrenheit.
AB(735)	180/180	152: dato No. 6 Temperatura de agua de alimentación al domo en grados Fahrenheit.
AB(736)	140000/140000	152: dato No. 7 Consumo nominal de gas combustible en pies cúbicos standard por hora.
AB(738)	110000/2000	152: dato No. 9 Flujo de vapor en el sobrecalentador en libras por hora.
AB(739)	100000/9	Vapor generadp en radiación en libras por hora.
AB(740)	110000/200	152: dato No. 10 Agua de alimentación al domo en libras por hora.
AB(764)	-30/-30	153: dato No. 1 Diferencial de temperatura para iteración inicial en grados Fahrenheit.
AB(765)	544/544	153: dato No. 2 Area de transferencia del sobrecalentador en pies cuadrados.
AB(766)	4130/4130	153: dato No. 4 Area de transferencia en convección en pies cuadrados.
AB(779)	1400/1400	153: dato No. 5 Agua en tubos bajo el domo en libras.
AB(780)	50/50	153: dato No. 6 Densidad del fluido saturado en el domo en libras por pie cúbico.
AB(781)	2/2	153: dato No. 7 Radio del domo en pies.

SIMULADOR DE CALDERAS

3.2 Parámetros de la Caldera y el Generador. Variable	Instrucción	Descripción
AB(782)	153: dato No. 8	Nivel del domo en pies.
AB(783)	153: dato No. 9	Longitud del domo en pies.
AB(792)	157: dato No. 1	Temperatura de agua de repuesto al generador en grados Fahrenheit.
AB(793)	157: dato No. 2	Masa de agua en el generador en libras.
AB(794)	157: dato No. 3	Calor específico del agua del generador en BTU/Lb-Gr F.
AB(796)	157: dato No. 4	Temperatura del generador en grados Fahrenheit.
AB(797)	157: dato No. 5	Nivel del generador en pies.
AB(798)	157: dato No. 6	Radio del generador en pies.

SIMULADOR DE CALDERAS

3.3 Parámetros de Válvulas y Controladores del

FC(1) 30.48/30.48 157: dato No. 7 Factor de conversión del controlador No. 1.

FC(2) 0.07/0.07 157: dato No. 8 Factor de conversión del controlador No. 2.

FC(3) 0.5555/0.5555 157: dato No. 9 Factor de conversión del controlador No. 3.

FC(4) 30.48/30.48 157: dato No. 10 Factor de conversión del controlador No. 4.

FC(5) 0/0 157: dato No. 11 Factor de conversión del controlador No. 5.

SM(1) 0/0 157: dato No. 12 Sumando de conversión del controlador No. 1.

SM(2) 0/0 157: dato No. 13 Sumando de conversión del controlador No. 2.

SM(3) -17.777/-17.777 157: dato No. 14 Sumando de conversión del controlador No. 3.

SM(4) 0/0 157: dato No. 15 Sumando de conversión del controlador No. 4.

SM(5) 0/0 157: dato No. 16 Sumando de conversión del controlador No. 5.

SIMULADOR DE CALDERAS

3.3 Parámetros de Válvulas y Controladores.

3.3.1 Parámetros de la válvula de agua al domo

AB(406)	200/10	134: dato No. 1	Flujo inicial de válvula No. 1 en galones por minuto.
AB(419)	1/1	134: dato No. 2	Bandera para falla de energía (0), o condición normal (1) de válvula No. 1.
AB(421)	212/212	134: dato No. 3	Temperatura del fluido en grados Fahrenheit.
AB(422)	740/740	134: dato No. 4	Presión de entrada en libras por pulgada cuadrada absolutas.
AB(423)	720/14	134: dato No. 5	Presión de salida en libras por pulgada cuadrada absolutas.
AB(424)	500/500	134: dato No. 6	Flujo máximo para primera iteración en galones por minuto.
AB(425)	0.4/0.0006	134: dato No. 7	Fracción de apertura inicial.
AB(426)	91/91	134: dato No. 8	Coefficiente de flujo máximo (Cv).
AB(427)	5/5	134: dato No. 9	Clave para tipo de válvula y tipo de fluido.
AB(428)	0.00002/0.00002	134: dato No. 10	Fracción de apertura de fuga.
AB(429)	0/0	134: dato No. 11	Bandera para operar by-pass (1).
AB(430)	1/1	134: dato No. 12	Bandera para atorón (0) o normal (1).
AB(431)	0.8/0.8	134: dato No. 13	Gravedad específico.
AB(432)	1/1	134: dato No. 14	Bandera de posición a falla de energía (-1=A/A, 0=último, 1=A/C)

SIMULADOR DE CALDERAS

3.3.2 Parámetros de la válvula de gas a quemadores.

AB(407)	136000/50	135: dato No. 1	Flujo inicial de válvula No. 2 en pies cúbicos standard por hora.
AB(439)	1/1	135: dato No. 2	Bandera para falla de energía (0) o condición normal (1) de válvula No. 2.
AB(441)	85/85	135: dato No. 3	Temperatura del gas en grados Fahrenheit.
AB(442)	50/50	135: dato No. 4	Presión de entrada en libras por pulgada absolutas.
AB(443)	25/25	135: dato No. 5	Presión de salida en libras por pulgada absolutas.
AB(444)	175000/175000	135: dato No. 6	Flujo máximo para primera iteración en pies cúbicos standard por hora.
AB(445)	0.5/0.006	135: dato No. 7	Fracción de apertura inicial.
AB(446)	91/91	135: dato No. 8	Coefficiente de flujo máximo (Cv).
AB(447)	1/1	135: dato No. 9	Clave para tipo de válvula y tipo de fluido.
AB(448)	0.00002/0.00002	135: dato No. 10	Fracción de apertura de fuga.
AB(449)	0/0	135: dato No. 11	Bandera para operar (1) ó no (0) bypass.
AB(450)	1/1	135: dato No. 12	Bandera para atorón (0) o condición normal (1).
AB(451)	0.6/0.6	135: dato No. 13	Gravedad específica.
AB(452)	-1/-1	135: dato No. 14	Bandera para posición a falla de energía -1=A/A, 0=último, 1=A/C.

SIMULADOR DE CALDERAS

3.3.3 Parámetros de Válvula de Control de Vapor al Degenerador.		
AB(408)	1500/15	136: dato No. 1 Flujo inicial de válvula No. 3 en libras por hora.
AB(459)	1/1	136: dato No. 2 Bandera para falla de energía (0) ó condición normal (1) de válvula No. 3.
AB(461)	225/225	136: dato No. 3 Temperatura del vapor en grados Farenheit.
AB(462)	25/25	136: dato No. 4 Presión de entrada en libras por pulgada absolutas.
AB(463)	15/15	136: dato No. 5 Presión de salida en libras por pulgada absolutas.
AB(464)	1000/1000	136: dato No. 6 Flujo máximo para primera iteración en libras por hora.
AB(465)	0.5/0.006	136: dato No. 7 Fracción de apertura inicial.
AB(466)	203/203	136: dato No. 8 Coeficiente de flujo máximo (Cv).
AB(467)	9/9	136: dato No. 9 Clave para tipo de válvula y tipo de fluido.
AB(468)	0.00002/0.00002	136: dato No. 10 Fracción de apertura de fuga.
AB(469)	0/0	136: dato No. 11 Bandera para operar (1) ó no (0) bypass.
AB(470)	1/1	136: dato No. 12 Bandera para atorn (0) ó condición normal (1).
AB(471)	15/15	136: dato No. 13 Sobrecalentamiento en grados Farenheit.
AB(472)	-1/-1	136: dato No. 14 Bandera para posición a falla de energía -1=A/A, 0=último, 1=A/C.

SIMULADOR DE CALDERAS

3.3.4 Parámetros de Válvula de Agua al Generador.	
AB(409)	15/15
	137: dato No. 1 Flujo inicial de válvula No. 4 en galones por minuto.
AB(479)	1/1
	137: dato No. 2 Bandera para falla de energía (0) ó condición normal (1) de válvula No. 4.
AB(481)	86/86
	137: dato No. 3 Temperatura del agua en grados Fahrenheit.
AB(482)	54/54
	137: dato No. 4 Presión de entrada en libras por pulgada absolutas.
AB(483)	15/15
	137: dato No. 5 Presión de salida en libras por pulgada absolutas.
AB(484)	180/180
	137: dato No. 6 Flujo máximo para primera iteración en galones por minuto.
AB(485)	0.5/0.0001
	137: dato No. 7 Fracción de apertura inicial.
AB(486)	91/91
	137: dato No. 8 Coeficiente de flujo máximo (Cv).
AB(487)	5/5
	137: dato No. 9 Clave para tipo de válvula y tipo de fluido.
AB(488)	0.00002/0.00002
	137: dato No. 10 Fracción de apertura de fuga.
AB(489)	0/0
	137: dato No. 11 Bandera para operar (1) ó no (0) bypass.
AB(490)	1/1
	137: dato No. 12 Bandera para atarón (0) ó condición normal (1).
AB(491)	0.9/0.9
	Gravedad específica.
AB(492)	1/1
	137: dato No. 13 Bandera para posición a falla de energía -1=A/A, 0=última, 1=A/C.
	137: dato No. 14

SIMULADOR DE CALDERAS

3.3.5 Parámetros de Controlador	No. 1		
AB(120)	0/0	143: dato No. 1	Error antepenúltimo inicial.
AB(121)	0/0	143: dato No. 2	Error penúltimo inicial.
AB(122)	0/0	143: dato No. 3	Error último inicial.
AB(123)	0/1	143: dato No. 4	Bandera Auto (0)/ Man (1).
AB(124)	0.002/-	143: dato No. 5	Valor de K proporcional.
AB(125)	0.002/-	143: dato No. 6	Valor de K integral en repeticiones por segundo.
AB(126)	0/0	143: dato No. 7	Valor de K derivativa en segundos por repetición.
AB(127)	0.5/0.001	143: dato No. 8	Salida manual.
AB(128)	1.5/	143: dato No. 9	Setpoint.
AB(129)	1.5/	143: dato No. 10	Entrada.
AB(130)	0.5/0.001	143: dato No. 11	Salida automática.
AB(131)	3.0/	143: dato No. 12	Diferencia de límites de rangos (span).
AB(132)	0.5/	143: dato No. 13	Disparo para alarma baja.
AB(133)	1.8/	143: dato No. 14	Disparo para alarma alta.
AB(134)	0/0	143: dato No. 15	Décimas previas en gráfica anterior de la entrada (ENT).
AB(135)	0/0	143: dato No. 16	Décimas previas en gráfica anterior del setpoint (SF).

SIMULADOR DE CALDERAS

3.3.6 Parámetros de Controlador No. 2

AB(140)	0/0	144: dato No. 1	Error antependltimo inicial.
AB(141)	0/0	144: dato No. 2	Error pendltimo inicial.
AB(142)	0/0	144: dato No. 3	Error dltimo inicial.
AB(143)	0/1	144: dato No. 4	Bandera Auto (0)/ Man (1).
AB(144)	0.002/-	144: dato No. 5	Valor de K proporcional.
AB(145)	0.002/-	144: dato No. 6	Valor de K integral en repeticiones por segundo.
AB(146)	0/0	144: dato No. 7	Valor de K derivativa en segundos por repetición.
AB(147)	0.5/0.001.	144: dato No. 8	Salida manual.
AB(148)	150 +33.5/	144: dato No. 9	Setpoint.
AB(149)	+13.5/	144: dato No. 10	Entrada.
AB(150)	0.5/0.001	144: dato No. 11	Salida automática.
AB(151)	1000/	144: dato No. 12	Diferencia de límites de rangos (span).
AB(152)	25/	144: dato No. 13	Disparo para alarma baja.
AB(153)	550/	144: dato No. 14	Disparo para alarma alta.
AB(154)	0/0	144: dato No. 15	Décimas previas en gráfica anterior de la entrada (ENT).
AB(155)	0/0	144: dato No. 16	Décimas previas en gráfica anterior del setpoint (SP).

SIMULADOR DE CALDERAS

3.3.6 Parámetros de Controlador No. 2

AB(156)

-2/

de bote por condición

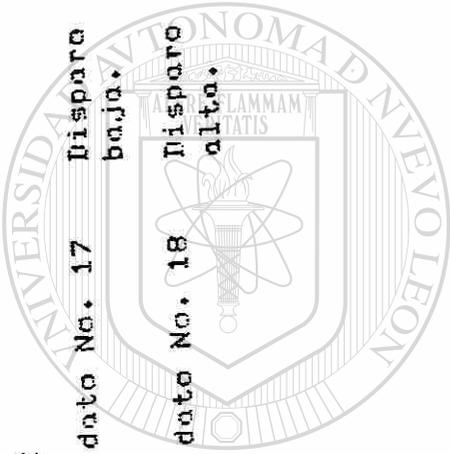
144: dato No. 17 Dispara
baja.

AR(157)

600/

de bote por condición

144: dato No. 18 Dispara
alta.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

SIMULADOR DE CALIERAS

3.3.7 Parámetros de Controlador No. 3

AB(160)	0/0	145: dato No. 1	Error antepéndltimo inicial.
AB(161)	0/0	145: dato No. 2	Error pependltimo inicial.
AB(162)	0/0	145: dato No. 3	Error último inicial.
AB(163)	0/1	145: dato No. 4	Bandera Auto (0)/ Man (1).
AB(164)	0.002/-	145: dato No. 5	Valor de K proporcional.
AB(165)	0.002/-	145: dato No. 6	Valor de K integral en repeticiones por segundo.
AB(166)	0/0	145: dato No. 7	Valor de K derivativa en segundos por repetición.
AB(167)	0.5/0.001	145: dato No. 8	Salida manual.
AB(168)	220/	145: dato No. 9	Setpoint.
AB(169)	220/	145: dato No. 10	Entrada.
AB(170)	0.5/0.001	145: dato No. 11	Salida automática.
AB(171)	1000/	145: dato No. 12	Diferencia de límites de rangos (span).
AB(172)	$\frac{0.5}{25}$	145: dato No. 13	Disparo para alarma baja.
AB(173)	$\frac{0.5}{550}$	145: dato No. 14	Disparo para alarma alta.
AB(174)	0/0	145: dato No. 15	Décimas previas en gráfico anterior de la entrada (ENT).
AB(175)	0/0	145: dato No. 16	Décimas previas en gráfico anterior del setpoint (SP).

SIMULADOR DE CALIFRAS

3.3.7 Parámetros de Controlador No. 3

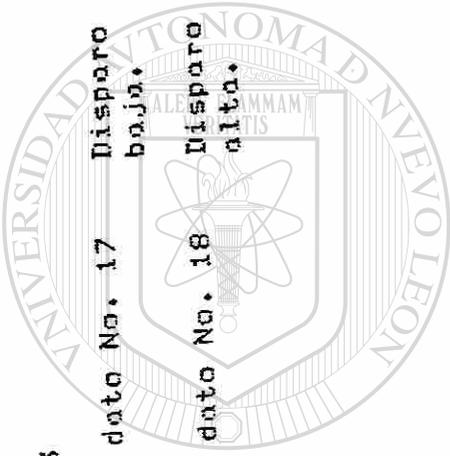
AB(176) -10/
AB(177) 260/

de bote por condición

145: dato No. 17 Dispara
 baja.

de bote por condición

145: dato No. 18 Dispara
 alta.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



SIMULADOR DE CALDERAS

3.3.8 Parámetros de Controlador No. 4

AB(180)	0/0	146: dato No. 1	Error antepenúltimo inicial.
AB(181)	0/0	146: dato No. 2	Error penúltimo inicial.
AB(182)	0/0	146: dato No. 3	Error último inicial.
AB(183)	0/1	146: dato No. 4	Bandera Auto (0)/ Man (1).
AB(184)	0.002/-	146: dato No. 5	Valor de K proporcional.
AB(185)	0.002/-	146: dato No. 6	Valor de K integral en repeticiones por segundo.
AB(186)	0/0	146: dato No. 7	Valor de K derivativa en segundos por repetición.
AB(187)	0.5/0.001	146: dato No. 8	Salida manual.
AB(188)	1.5/	146: dato No. 9	Setpoint.
AB(189)	1.5/	146: dato No. 10	Entrada.
AB(190)	0.5/0.001	146: dato No. 11	Salida automática.
AB(191)	3/	146: dato No. 12	Diferencia de límites de rangos (span).
AB(192)	0.5/	146: dato No. 13	Disparo para alarma baja.
AB(193)	1.8/	146: dato No. 14	Disparo para alarma alta.
AB(194)	0/0	146: dato No. 15	Décimas previas en gráfica anterior de la entrada (ENT).
AB(195)	0/0	146: dato No. 16	Décimas previas en gráfica anterior del setpoint (SP).

3.- Documentación de Datos Básicos.....

3.4 Teclas Programables.- El uso de teclas programables permite una comunicación rápida y explícita entre el operador y el simulador. La comunicación de interrupciones del operador debe ser rápida para conseguir un control efectivo, también debe ser explícita o desplegada. Para que la comunicación sea explícita o desplegada se utilizan 'mensajes' o letreros. Estos letreros se generan óptimamente mediante teclas programables ó teclas dedicadas; de otro modo debería hacerse uso del teclado alfanumérico y cada letrero requeriría del uso de una veintena de teclas en lugar de una sola tecla dedicada o programada.

La programación de las teclas dedicadas se resuelve en las instrucciones 4 a 8 del programa simulador.

A través de las teclas dedicadas F1 a F10 el operador cuenta con hasta 20 opciones posibles de las cuales se han definido y estarán en uso 14; éstas son:

-Como minúsculas:

Tecla	Opción seleccionada	Letrero desplegado
F1	Operación manual de Cont. #1	controlador=1 modo=man
F2	Operación manual de Cont. #2	controlador=2 modo=man
F3	Operación manual de Cont. #3	controlador=3 modo=man
F4	Operación manual de Cont. #4	controlador=4 modo=man
F5	Salida manual de último Cont.	salida=
F6	Modificar Kp del último Cont.	Kp=
F7	Modificar Ki del último Cont.	Ki=
F8	Modificar Kd del último Cont.	Kd=
F9	Modificar SP del último Cont.	setpoint=
F10	Definir consumo de vapor	vapor(Kg/Hr)=

-Como mayúsculas

Tecla	Opción seleccionada	Letrero desplegado
F1	Operación Auto. de Contr. #1	controlador=1 modo=auto
F2	Operación Auto. de Contr. #2	controlador=2 modo=auto
F3	Operación Auto. de Contr. #3	controlador=3 modo=auto
F4	Operación Auto. de Contr. #4	controlador=4 modo=auto

3.5 Grabación en Disco de Variables.

3.5.1 Grabación para Graficación.- Durante la ejecución del programa simulador, una vez cada 6 ciclos (40 segundos aproximadamente), se graba en disco un conjunto de hasta 25 variables.

La grabación que resulta de esta operación, contiene la 'historia' de la operación de la caldera. Esta grabación se hace en forma de archivo relativo y cada registro (grabado cada 40 seg. aprox.) consta de hasta 25 variables grabadas en un campo de 10 caracteres por variable. De los 10 caracteres, 6 corresponden a dígitos enteros, 3 a dígitos fraccionarios y 1 al punto decimal. La cantidad de registros grabados hasta el momento de suspender una simulación se almacena en una variable de nombre RG y se imprime (esta cantidad) al finalizar una sesión de simulación. El archivo es reconocido con el nombre de "REGISTRO".

Las variables grabadas son respectivamente:

- 1.- Setpoint del controlador de nivel de domo o controlador No. 1 en pies.
- 2.- Nivel del domo o señal de entrada del controlador No. 1 en pies.
- 3.- Setpoint del controlador de presión de vapor o controlador No. 2 en psias.
- 4.- Presión de vapor o señal de entrada del controlador No. 2 en psias.
- 5.- Setpoint del controlador de temperatura del deaerador o controlador No. 3 en grados Fahrenheit.
- 6.- Temperatura del deaerador o señal de entrada del controlador No. 3 en grados Fahrenheit.
- 7.- Setpoint del controlador de nivel del deaerador o controlador No. 4 en pies.
- 8.- Nivel del deaerador o señal de entrada del controlador No. 4 en pies.
- 9.- Temperatura de flama en grados Fahrenheit.
- 10.- Temperatura a la salida de radiación, lado de gases en grados Fahrenheit.
- 11.- Temperatura a la salida del sobrecalentador, lado de gases en grados Fahrenheit.
- 12.- Temperatura del vapor sobrecalentado en grados Fahrenheit.
- 13.- Temperatura del vapor saturado en grados Fahrenheit.
- 14.- Temperatura de chimenea en grados Fahrenheit.
- 15.- Flujo de gases de combustión en libras por hora.
- 16.- Flujo de agua de alimentación de calderas en libras por hora.
- 17.- Flujo de vapor sobrecalentado en libras por hora.
- 18.- Flujo de vapor generado en radiación en libras por hora.
- 19.- Flujo de vapor generado en el precalentador en

SIMULADOR DE CALDERAS

libras por hora.

- 20.-Flujo de vapor generado por depresurización del domo (flash) en libras por hora.
- 21.-Flujo de condensado al deaerador en libras por hora.
- 22.-Relación de flujo condensado/vapor sobrecalentado -adimensional-.

3.5.2 Grabación para reinicio de simulación a partir de condiciones finales de simulación previa.- Además de la grabación descrita en 3.5.1 de variables para graficación o listado de la historia de la operación de la caldera, también, al concluir una sesión y si se desea, es posible optar por grabar la condición o 'status' final de la planta, sus controles, gráficas e indicadores (ver 2.3.2). Esto permite 'congelar' las condiciones de la planta para reiniciar, a partir del 'status' final una nueva simulación.

Esta grabación se hace en un archivo relativo correspondiente a 800 elementos del arreglo dimensionado AB.

3.6 Graficación.- La graficación se hace fuera de línea para las variables grabadas en el archivo "REGISTRO", mismo que deberá estar disponible en la unidad de discos 1 (drive 1).

El programa para graficar se llama "GRAFICADOR" y está planteado para que se grafiquen simultáneamente la cantidad de variables que uno elija. Las gráficas se elaboran en la impresora mediante caracteres nominales.

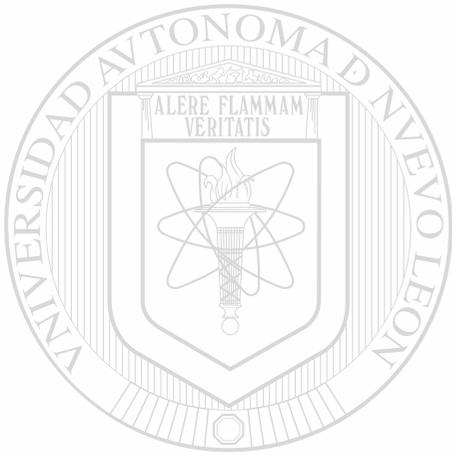
Las variables a graficar deben ser seleccionadas por los números ordinales que les correspondan en la lista dada en el párrafo 3.5.1. Esta selección se hace a través de números proporcionados como datos; así por ejemplo si los datos son 1,2,3,4,5,6 entonces las variables graficadas serán de la primera a la sexta. Los ordinales no deben ser necesariamente consecutivos.

En la instrucción No. 20 se proporcionan datos para los límites inferiores y superiores de las variables a graficar. Los rangos recomendados son los siguientes:

No. de variable	Rango	No. de variable	Rango
1	0-3	12	0-1000
2	0-3	13	0-800
3	0-1000	14	0-1000
4	0-1000	15	0-400000
5	0-300	16	0-200000
6	0-300	17	0-160000
7	0-3	18	0-160000
8	0-3	19	0-100000
9	0-4000	20	0-5000
10	0-4000	21	0-200000
11	0-3000	22	0-2

4.- Diagramas y Datos para el Desarrollo del Simulador.- En esta sección se pretende dar la información básica correspondiente a la caldera paquete, su instrumentación y el simulador.

El desarrollo del simulador partió de datos de una caldera paquete con características definidas dadas en el párrafo 4.2. Las válvulas y los controladores se definen en el párrafo 4.3. A partir de estos datos y según el diagrama de flujo dado en el párrafo 4.4 se desarrolló el simulador en forma de programa.



UANL

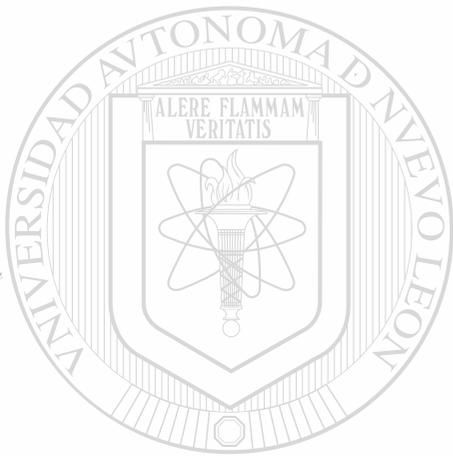
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.1 Diagrama de Tuberías e Instrumentación.— El diagrama de tuberías e instrumentación es fundamental para la comprensión del proceso y de los equipos e instrumentos de una planta.

Normalmente un diagrama de tuberías e instrumentación es el que en una representación gráfica constituye un tablero mímico que permite a los operadores comprender y recordar las características de la planta que operan. En nuestro caso la figura 1 descrita en la página 4 corresponde al diagrama de bloques de la caldera paquete.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.2 Datos de la Caldera Simulada.- En los siguientes párrafos se describen las características de una caldera paquete tal y como la que se simula mediante el programa de esta tesis.

Eventualmente los datos o parámetros de la caldera podrían ser modificados y eso significarían cambios al programa simulador. Con la siguiente documentación se facilitarían los cambios que deberían resolverse mediante:

- la modificación de datos proporcionados a través de instrucciones DATA en número de hasta 155 y listados como parámetros en páginas anteriores.
- la modificación de constantes que aparecen como factores, divisores, sumandos, minuendos, sustraendos o en general operandos en las expresiones aritméticas o en las instrucciones del programa. Las ecuaciones que rigen las relaciones entre variables y que se describen en páginas posteriores darán cuenta y razón de tales constantes. Estas constantes se derivan a su vez de alrededor de 60 características constantes relativas a la caldera, el combustible, las propiedades de los gases, etc.

4.2.1 Datos Generales

COMBUSTIBLE	Gas natural
VAPOR GENERADO	110,000 #/Hr.
PRESION DE VAPOR SOBRECALENTADO	650 psig
TEMPERATURA DE VAPOR SOBRECALENTADO	750oF.
TEMPERATURA DEL AGUA DE ALIMENTACION	210oF.
POTENCIA CALORIFICA DEL COMBUSTIBLE	1050 BTU/Ft3 Std.
CONSUMO DE GAS NATURAL	136200 Ft3 Std/Hr

CALOR CEDIDO POR COMBUSTION DE G.N.	143 MBTU/Hr.
EFICIENCIA ESPERADA	80 por ciento
SUPERFICIE DE TUBOS EQUIVALENTE	930 Ft2. ®
TEMPERATURA DE GASES DE SALIDA DE RAD.	2400oF.
TEMPERATURA DE GASES DE CHIMENEA	660oF.
PERDIDAS EN RADIACION	0.5 por ciento
PERDIDAS EN CONVECCION	18 por ciento

4.2.2 Datos de Convección.

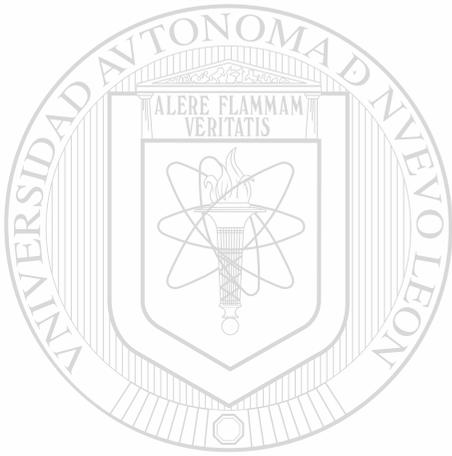
DIAMETRO EXTERIOR DE TUBERIA	2"
ESPESOR DE LA TUBERIA	0.150"
TEMPERATURA DE ENTRADA DEL GAS	1950oF.
TEMPERATURA DE GAS A LA SALIDA	660oF.
TEMPERATURA DE VAPOR SATURADO	503oF.
COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA	21 BTU/Hr-Ft2-oF
SUPERFICIE EFECTIVA	4100 Ft2.

4.2.3 Datos del Sobrecalentador.

DIAMETRO EXTERIOR DE LA TUBERIA	1 3/4"
TEMPERATURA DE ENTRADA DEL GAS	2400oF.
TEMPERATURA DE VAPOR SATURADO ENTRANDO	503oF.
TEMPERATURA DEL VAPOR A LA SALIDA	750oF.
TEMPERATURA DEL GAS A LA SALIDA	1950oF.

SIMULADOR DE CALDERAS

SUPERFICIE DE TUBOS	2
LONGITUD DE TUBOS	455 Ft .
PRESION DE VAPOR A LA SALIDA	110 Ft.
PRESION DEL DOMO	650 psig.
	680 psig.
4.2.4 Datos de Radiación.	
TEMPERATURA DE FLAMA	3400oF.
TEMPERATURA DE GAS A LA SALIDA	2400oF.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.3 Características de los Instrumentos.

4.3.1 Válvulas de Control.- Las válvulas de control se definen cuantitativamente según la característica y el coeficiente de flujo.

Para la caldera cuyos datos se han proporcionado, se tienen válvulas con las siguientes características:

SERVICIO	COEF. Cv	TIPO	DIAM.
Agua de alimentación al domo	91	igual porcentaje	2"
Gas natural a quemadores	91	igual porcentaje	2"
Vapor al deaerador	203	igual porcentaje	3"
Agua de repuesto al deaerador	91	igual porcentaje	2"

4.3.2 Controladores.- Los controladores simulados son del tipo PID, es decir generan una señal de control (S.C.) que es resultado de tres modos de control:

-El modo proporcional que se genera en forma proporcional al error actual. La constante de proporcionalidad es adimensional y se manipula desde la pantalla con el nombre Kp.

-El modo integral que se genera en forma proporcional a la suma de errores o área bajo la curva de error. La constante se da en repeticiones por segundo y se abrevia como Ki en la pantalla cuando lo solicita el operador.

-El modo derivativo que se genera en forma proporcional a la tendencia o derivada del error actual o último error registrado. La constante se da en segundos por repetición y se abrevia como Kd para manipularla desde la pantalla.

La ecuación para un controlador de este tipo es:

$$(1) \text{ Señal de control} = K_p \cdot E + K_i \int E dt + K_d \cdot dE/dt$$

donde: Kp=constante de modo proporcional adimensional.

Ki=constante de modo integral en repeticiones por segundo.

Kd=constante de modo derivativo en segundos por repetición.

E = error = setpoint - señal de entrada (en fracción de unidad).

t = tiempo en segundos.

A fin de calcular el error como fracción de unidad, es necesario que el setpoint y la señal de entrada se proporcionen como fracciones del rango de medición.

SIMULADOR DE CALDERAS

Los rangos de medición para las señales de los controladores son:

TRANSMISORES	RANGOS	SERVICIO
LT-1	0-3 ft	Nivel del domo.
PT-2	0-1000 psig	Presión del vapor.
TT-3	0-300oF	Temperatura del deaerador.
LT-4	0-3 ft	Nivel del deaerador.

Para el caso de la simulación de los controladores, la ecuación de diferencias equivalente a la ecuación (I) es la siguiente:

$$(II) \quad \text{señal de control} = K_p(E_u - E_p) + K_i(T(E_u + E_p)/2) + K_d(E_u - 2E_p + E_a)/T$$

En la ecuación (II) se mantiene la nomenclatura dada previamente, y además:

T=tiempo de ciclo del simulador en segundos.

u=subíndice para denotar último error.

p=subíndice para denotar penúltimo error.

a=subíndice para denotar antepenúltimo error.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

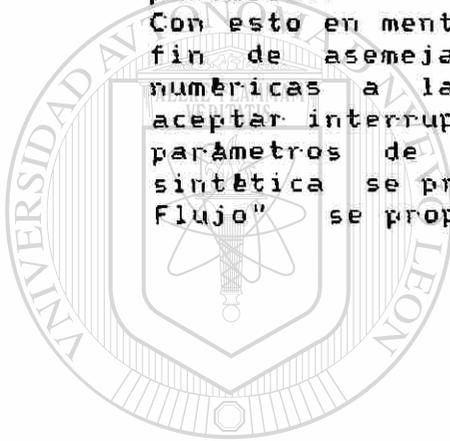


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.4 Diagrama de Flujo del Programa Simulador.- Un diagrama de bloques o diagrama de flujo como parte de la documentación de este programa se incluye a continuación. Para nuestro caso se deben simular el quemador, la transmisión de calor en radiación y convección, el balance de masa y energía del domo. También los controles deben simularse.

Dado que la instrumentación electrónica está desplazando a la tradicional neumática y puesto que la presentación en pantallas de tubos de rayos catódicos de los 'status' de controladores e indicadores está a la orden del día, entonces, resulta conveniente (porque además es adaptable a la microcomputadora), realizar dentro de la simulación de la caldera la presentación gráfica y numérica de controladores e indicadores a través de tal tipo de pantallas.

Con esto en mente, el programa simulador debe (y puede), a fin de asemejarse en sus representaciones gráficas y numéricas a las de los equipos de control existentes, aceptar interrupciones de parte del operador para afectar parámetros de planta y controles. Todo esto, en forma sintética se presenta en el cuadro que como "Diagrama de Flujo" se proporciona en la página siguiente.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SIMULADOR DE CALDERAS

4.4 Diagrama de Flujo del Programa Simulador.

Ordinal de Referencia	Función a Desarrollar	Instrucciones Correspondientes
1	Definición de Teclas Programables	4-8
2	Alimentación de Parámetros Generales	132
3	Alimentación de Parámetros de Válvulas	133-141
4	Alimentación de Parámetros de Controles	142-150
5	Alimentación de Parámetros de Caldera	151-156
6	Alimentación de Parámetros de Deaerador	157-158
7	Iteración de 6 ciclos	160
8	Grabación de 25 variables en disco al completar los 6 ciclos	1520-1534
9	Simulación de Válvulas de Control	162-396
10	Simulación de Controladores	492-570
11	Graficación de resultados en pantalla	1600-1970
12	Transferencia de variables de caldera a variables de controladores	584-590
13	Simulación de Generación de Vapor en radiación	840-922
14	Simulación del sobrecalentador	930-1050
15	Simulación serpentines de convección	1060-1152
16	Cálculo de flasheo y equilibrio de subenfriamiento	1180-1370
17	Simulación del deaerador	2000-2120
18	Impresión alfanumérica en pantalla	1374-1386
19	Captura de información en base a teclas programables	1390-1560
20	Regreso a iteración en ordinal 7	

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

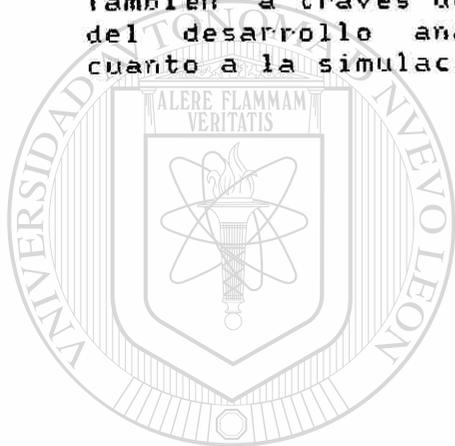
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SIMULADOR DE CALDERAS

5.- Balances, Ecuaciones de Diferencias y Constantes.

En esta sección se describen las ecuaciones y las suposiciones que se plantearon a fin de calcular los efectos de las variables entre sí y del tiempo sobre todas las demás variables.

Existen dentro del programa 'factores' correspondientes a algunas consideraciones respecto a las características de la planta. Estos factores no están siendo alimentados como datos, sino que se suponen derivados de las características relativamente invariables como áreas de tubos, calores específicos de los materiales, propiedades del vapor, etc. Esta sección pretende facilitar los posibles cambios que eventualmente podrían hacerse a la planta y que repercutirían en los factores que aparecen en las instrucciones señaladas. También a través de esta sección será posible la comprensión del desarrollo analítico para los cálculos programados en cuanto a la simulación se refiere.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SIMULADOR DE CALDERAS

5.1 Densidad del Gas Natural y el Aire.- La densidad del gas natural en condiciones estándar es de 0.044 #/ft³. La instrucción 870 refleja este valor a través de sus factores.

5.2 Vapor Generado en Radiación.- Para la generación de vapor en radiación se parte de considerar que se cumple la siguiente fórmula, referida como ecuación de Orrok-Hudson en la página 803 de PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR de Donald Q. Kern decimocuarta edición CECSA :

$$(1) \quad Q/Q_f = 1/(1+G' \sqrt[2]{Cr/27})$$

Donde: G' = relación aire/combustible
 Cr = flujo de gas en #/Hr-ft²
 Q = calor transmitido en radiación
 Q_f = calor liberado por combustión

En condiciones de operación normal el exceso de aire es de 20 por ciento y la relación $Q/Q_f=0.55$; con esto el valor de G' en operación normal es de 1.2 y la ecuación (1) se transforma en:

$$(2) \quad 0.55 = 1/(1+G' \sqrt[2]{Cr/27})$$

Además en operación normal se generan 110000 #/Hr de vapor.

También para encontrar una relación entre el vapor generado en radiación, el consumo de gas combustible y el exceso de aire, conviene reescribir la ecuación (1) considerando las siguientes variables:

V_{cn} = vapor en condiciones normales.
 V_x = vapor para un caso a calcular.
 F_{cn} = flujo de gas en condiciones normales.
 F_x = flujo de gas para un caso a calcular.
 $x = F_x/F_{cn}$ = fracción de flujo respecto a condiciones normales.

Si utilizamos los subíndices cn para condiciones normales y x para condición a calcular, entonces la ecuación (1) sería:

-Para condiciones normales

$$(3) \quad Q_{cn}/Q_{cn} = 1/(1+G' \sqrt[2]{k(F_{cn}/27)})$$

-Para una condición a calcular

$$(4) \quad Q_x/Q_x = 1/(1+G' \sqrt[2]{k(F_x/27)})$$

Tanto en (3) como en (4) se ha sustituido Cr por $k(F_x)$ donde k es una constante de proporcionalidad.

Dividiendo (4) entre (3) obtenemos:

SIMULADOR DE CALDERAS

$$(5) \quad (Q_x/Q_{Fx}) / (Q_{cn}/Q_{Fcn}) = (1+G\sqrt{k(Fcn/27)}) / (1+G\sqrt{k(Fx/27)}) = R$$

Si consideramos que el flujo de gas es proporcional al calor liberado por el, esto es:

$$Q_{Fcn}/Q_{Fx} = Fcn/Fx = x$$

entonces la ecuación (5) se puede simplificar incluyendo la variable x de fracción de flujo y quedaría:

$$(6) \quad Q_x / (x(Q_{cn})) = R$$

Pero además como $Q_x/Q_{cn} = \text{vapor}_x / \text{vapor}_{cn}$, entonces:

$$(7) \quad V_x / (x(V_{cn})) = R = 1 / (0.55(1+G\sqrt{k(Fx/27)}))$$

También de la ecuación (2) y a sabiendas de que en condiciones normales el valor de G es de $G=1.2$, es posible despejar el término $Cr/27$ ó $k(Fcn/27)$:

$$(8) \quad \begin{aligned} 0.55(1+1.2\sqrt{k(Fcn/27)}) &= 1 \\ 0.66\sqrt{k(Fcn/27)} &= 0.45 \\ \sqrt{k(Fcn/27)} &= 45/66 = 1/1.4666 \end{aligned}$$

Asimismo, puesto que $Fx = x(Fcn)$, entonces:

$$(9) \quad k(Fx/27) = (x)k(Fcn/27) = x k(Fcn/27) = x / 1.4666$$

Aplicando (8) y (9) en (7), se obtiene:

$$(10) \quad V_x / (x(V_{cn})) = (1+(1.2/1.4666)) / (1+((1+e.a.) x / 1.4666))$$

ó bien:

$$(10a) \quad V_x / (x(V_{cn})) = 1 / (0.55(1+((1+e.a.) x / 1.4666)))$$

donde: e.a. = exceso de aire como fracción de unidad

Simplificando (10) se obtiene:

$$(11) \quad V_x = (x(1.4666V_{cn})) / (0.55(1.466+(1+e.a.) x))$$

La ecuación (11) está aplicada en las instrucciones 900 y 910

5.3 Temperatura de Flama y Gases de Combustión.— La temperatura de flama se alimenta como dato AB(724) y es en este caso de 3700oF. Para los gases calientes de radiación se supuso $cp=0.7$ en BTU/# oF, valor que se emplea en las instrucciones 920 y 922.

5.4 Datos del Vapor Sobrecalentado.— Se emplea un valor

SIMULADOR DE CALDERAS

promedio del calor específico del vapor sobrecalentado, este valor se toma como de 0.7 BTU/# oF. En cuanto a la masa del vapor sobrecalentado en tubos, se estimó en un valor de 21.6#, de esto resulta que:

$$(\text{masa de vapor}) c_p / 2 = 7.56$$

Este factor de 7.56 aparece en la instrucción 930, en tanto que el factor de 0.7 en esta misma instrucción corresponde al calor específico del vapor.

5.5 Gases de Combustión.- Para los gases de combustión se tomó un calor específico promedio de 0.44 BTU/# oF. El volumen de gases de combustión en el sobrecalentador se estimó como de 200 pies cúbicos. La densidad a 520 oR se toma como de 0.075 #/ft³, de donde en términos de temperatura es posible calcular el valor $m c_p$ como:

$200(0.075)0.44(520)/(2(T_{\text{gas}}+460)5)$ donde el 2 del denominador es un factor para promediar, en tanto que el 5 es un factor derivado de la relación del volumen total al volumen de gases de combustión.

Este factor de $350/(460+T_g)$ es el que aparece en las instrucciones 932 y 934.

5.6 Tubos del Sobrecalentador.- La masa de los tubos del sobrecalentador y su calor específico son respectivamente considerados como de 432# y 0.46 BTU/# oF. El producto de ambos valores es de alrededor de 200. Este valor dividido entre 4, para promediar, se transforma en un factor de 50 que aparece en la instrucción 940. El factor 0.44 de esta misma instrucción corresponde al calor específico de los gases de combustión.

5.7 Coeficiente de Transferencia Térmica del Sobrecalentador.- Se estima a partir de la relación:

$$U = (0.4 + 0.6x) U_{cn}$$

donde:

U = Coeficiente a calcular en BTU/Hr ft² oF.

x = Relación de combustible actual/combustible en Cond. normal.

U_{cn} = Coeficiente de transferencia nominal = 23.8 BTU/Hr ft² oF.

Esta relación se establece en la instrucción 950.

5.8 Para la convergencia que se establece a fin de resolver un balance de energía en el sobrecalentador se emplearon las siguientes fórmulas:

(A) $UA \Delta T_{m \log} = UA((T_{gc} - T_{sat}) - (T_1 - T_{sh})) / \ln((T_{gc} - T_{sat}) / (T_1 - T_{sh}))$
la ecuación (A) corresponde al cálculo de calor cedido al vapor.

(B) calor cedido al vapor = $F_{sh}(c_{pv})(T_{sh} - T_{sat})t + \dots$
 $15.12(((T_{sh} + T_{sat}) - (T_{sh} + T_{sat})_{ant}) / 2)$

SIMULADOR DE CALDERAS

además:

$$(C) \quad m_c c_{pc} (T_{gc} - T_1)t = Fvsh (c_p) (T_{sh} - T_{sat})t + \dots \\ 15.12 \left(\frac{(T_{sh} + T_{sat}) - (T_{sh} + T_{sat})_{ant}}{2} \right) + \dots \\ m_{tub} c_{pt} (\Delta t \text{ prom tubos}) + \dots \\ 200 (Q_{gc}) 0.44 (\Delta T_{g \text{ comb}})$$

$$(D) \quad T_{g \text{ comb}} = \left((T_{gc} + T_1) - (T_{gc} + T_1)_{ant} \right) / 2$$

El calor cedido al vapor que aparece en las expresiones (B) y (C) se encuentra a partir de (B) en la instrucción 930 con un valor supuesto para la temperatura del vapor sobrecalentado. De la ecuación (C) se despeja la temperatura de salida de los gases de combustión T_{gc} en las instrucciones 932 a 940. La ecuación (A) se calcula en la instrucción 960. El valor calculado de la ecuación (A) se compara con el calculado de la ecuación (B), si ambos valores difieren por menos de un 2 por ciento entonces se considera resuelta la convergencia. Si la diferencia es mayor al 2 por ciento entonces se itera en base al mismo procedimiento pero a partir de un valor modificado de temperatura supuesta para el vapor sobrecalentado.

Otras consideraciones hechas son:

Los tubos son aletados con 3 aletas por pulgada, las aletas son de 7/8" de altura y 0.024" de espesor y contribuyen con un peso de 1.17072 #/ft de tubo. La longitud de tubo es de 120 ft, el tubo es de 1 3/4" de diámetro exterior y 0.135" de espesor. La superficie total de tubo y aletas es de alrededor de 400 ft².

En las fórmulas (A), (B), (C) se emplean las siguientes abreviaturas:

U=coeficiente de transferencia de calor en BTU/Hr ft² oF.

A=área de tubos y aletas en ft².

$\Delta T_m \log = \Delta T$ media logarítmica en oF.

Fvsh=flujo de vapor sobrecalentado en #/Hr.

c_{pv} =calor específico promedio del vapor sobrecalentado =0.7 BTU/#oF.

T_{sh} =temperatura del vapor sobrecalentado en grados Fahrenheit.

T_{sat} =temperatura del vapor saturado en grados Fahrenheit.

t=tiempo de ciclo del simulador en segundos.

15.12=factor según lo descrito en el párrafo 5.4

T_{gc} =temperatura de gases de combustión a la salida en grados Fahrenheit.

T_1 =temperatura de gases de combustión a la entrada en grados Fahrenheit.

m_c =masa de gases de combustión en #/Hr.

c_{pc} =calor específico de gases de combustión

SIMULADOR DE CALDERAS

°
en BTU/# F.

m_{tub} = masa de tubos en # = 432#
 c_{pt} = calor específico de tubos = 0.46 BTU/#oF
 ΔT_{gcomb} = decremento de temperatura promedio de gases de combustión en el área del sobrecalentador en grados Fahrenheit.
 ant = subíndice para señalar valores del ciclo anterior.

5.9 Coeficiente de Transferencia Térmica en Convección.-
 Para los serpentines de convección se estima un coeficiente U en base a un ajuste lineal en relación a la proporción de combustible quemado según la siguiente ecuación:
 $U = (0.33 + 0.67x) U_{cn}$

U = Coeficiente de transferencia a calcular en BTU/Hr ft² oF.

x = relación de combustible en condición a calcular entre combustible en condición nominal.

U_{cn} = Coeficiente de transferencia en condición nominal = 22.5 BTU/Hr ft² oF.

5.10 Para el cálculo convergente del balance de energía en el paquete de tubos de convección se emplean las siguientes ecuaciones:

$$(E) \quad \text{calor cedido} = \frac{U(A)(T_{gcomb} - T_{chim})t}{\ln((T_{gcomb} - T_{vsat}) / (T_{chim} - T_{vsat}))}$$

$$(F) \quad m_g c_{pg} (T_{gcomb} - T_{chim})t = (\text{calor cedido}) + \dots + m_{tub} c_{pt} (\Delta T_{promtub}) + m_{gs} c_{pg} (\Delta T_{gc})$$

$$(T_{gc} + T_{chim} + 2T_{vsat}) - (T_{gc} + T_{chim} + 2T_{vsat})$$

donde: $T_{promtub} = \dots$

4

$$T_{gc} = \frac{(T_{gc} + T_{chim}) - (T_{gc} + T_{chim})}{2}$$

2

m_{gs} = masa de gases en la zona de convección en #.

En este caso el valor desconocido es la temperatura de chimenea. Esta temperatura puede suponerse a fin de resolver iteraciones convergentes hasta encontrar un valor que resuelva simultáneamente las ecuaciones (E) y (F). Esto puede conseguirse así:

-de la ecuación (E) se calcula el calor cedido al

SIMULADOR DE CALDERAS

fluido a partir de una temperatura de chimenea supuesta.

-de la ecuación (F) se despeja y se calcula el calor cedido al fluido utilizando los valores de las variables conocidas y el valor supuesto de la temperatura de chimenea.

-Se comparan los valores calculados en los pasos anteriores, si la diferencia entre ambos es menor a un 2 por ciento se toma como válida la convergencia. Si la diferencia es mayor o igual a un 2 por ciento se repiten los cálculos pero con un nuevo valor supuesto para la temperatura de chimenea.

Los pasos anteriores se resuelven a través de las instrucciones dadas desde 1060 hasta 1152.

En las ecuaciones (E) y (F) se utilizan las siguientes abreviaturas:

U	Coefficiente de transferencia en BTU/Hr ft ² oF.
A	Area de los tubos de convección en ft ² .
Tgcomb	Temperatura de gases de combustión a la entrada de convección en oF.
Tchim	Temperatura de gases de combustión a la salida de chimenea en oF.
Tvsat	Temperatura del vapor saturado en convección en oF.
t	tiempo de ciclo del simulador en seg.
m _{gs}	flujo de gases de combustión en #/Hr.
c _{pg}	calor específico de gases de combustión en BTU/# oF.
m _{tub}	masa de tubos de convección en #.
c _{pt}	calor específico de los tubos de convección en BTU/# oF.
ant	subíndice para señalar valores de ciclo anterior.

Otros factores que aparecen en las instrucciones

correspondientes a cálculos de convección son:

-La instrucción 1060 se calcula con: $c_{pg}=0.36$, $m_t=3870$

$c_{pt}=0.46$. Al resolver $(m_t c_{pt})/4$ se obtiene el factor 450 que aparece en esta misma instrucción.

-Para la instrucción 1062 se estima el volumen de gases

contenidos en la zona de convección como una masa calculable en términos de su temperatura promedio y su volumen. En este caso el volumen se estima como 730 ft³ con una densidad de 0.075 #/ft³ a condiciones estándar (520oR) y con un $c_p=0.36$ BTU/# oF, por lo que el factor correspondiente al cálculo mencionado es:

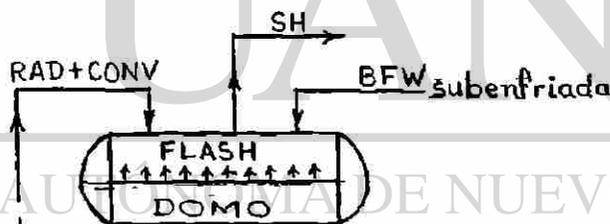
SIMULADOR DE CALDERAS

$$\frac{v_{gs} 520 \rho_{gstd} 0.36}{2} = \frac{730(520)0.075(0.36)}{2}$$

-Para convección se suponen 4129 pies cuadrados de superficie total de tubos y aletas, lo que implica una longitud de 430 pies de tubo de 2" de diámetro con aletas de 1 1/4" de altura y 0.031" de espesor, espaciadas en número de 6 aletas por pulgada. El peso correspondiente al tubo es de 3.6 #/ft y las aletas contribuyen con 5.4 #/ft para un total de 9 #/ft que en 430 ft dan una masa de 3870 #.

El espesor de los tubos es de 0.150". En base a esto se calcula que los tubos pueden almacenar 335 # de agua que aparecen como factor en la instrucción 1170 a fin de compensar la inercia correspondiente. Aquí se mantiene el factor como 335 bajo el supuesto de que el valor del calor específico es de 1 BTU/# of para el agua en tubos.

5.11 Para el balance de energía en el domo, se tomó en consideración el siguiente esquema:



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El balance que se establece implica que el subenfriamiento de agua de alimentación (BFW) y el vapor que se demanda (SH) sean compensados por la generación de vapor que ocurre:

- en radiación (RAD).
- en convección (CONV).
- en el espejo del nivel líquido (FLASH).

Lo anterior supone la siguiente relación:

$$(1) \quad RAD+CONV+FLASH = SH+(BFW)_{\text{equil subenf}}$$

Además se tienen las siguientes relaciones :

$$(2) \quad m_{to} = m_{tub} + r^2 L \left(\cos^{-1} \frac{r-h}{r} - \frac{(r-h) \sqrt{2rh-h^2}}{r} \right)$$

SIMULADOR DE CALDERAS

- (3) $T=800$ FLASH/m
- (4) $h_{fo} = h_{Tsat}$
- (5) $h_{fi} = h(Tsat - \Delta T)$
- (6) $h_{fgi} = h_{fg}(Tsat - \Delta T)$
- (7) $QQ = m_{lo} (h_{fo} - h_{fi}) / h_{fgi}$
- (8) $(BFW)_{equil} \text{ subenf} = 0.9 m_{bfw} (Tsat - 212) / h$

En estas ecuaciones la nomenclatura empleada es:

m_{lo}	masa liquida en tubos y en domo en #.
m_{tub}	masa liquida en tubos en #.
r	radio del domo en ft.
L	longitud del domo en ft.
h	nivel del agua en el domo en ft.
ΔT	disminución de temperatura por flasheo en °F.
h_{fo}	entalpia de liquido saturado antes del flasheo en BTU/#.
h_{fi}	entalpia del liquido saturado después del flasheo en BTU/#.
h_{fgi}	entalpia de evaporación después del flasheo en BTU/#.
QQ	flasheo calculado en #.
RAD	vapor generado en radiación en #/Hr.
CONV	vapor generado en convección en #/Hr.
FLASH	vapor generado por flasheo en #/Hr.
SH	vapor demandado por el sobrecalentador en #/Hr.
$(BFW)_{eq \text{ sub}}$	cálculo de vapor equivalente en #/Hr para compensar el subenfriamiento del agua de alimentación al domo.

La secuencia de cálculos para la convergencia del balance de masa y energía es:

-Se calcula el valor de flasheo requerido para el balance dado en la ecuación (1).

-Para estimar un ΔT inicial como disminución de temperatura por flasheo, se multiplica 800 (valor aproximado de h_{fg}) por el valor supuesto de flasheo y se divide entre la masa liquida que debe enfriarse para generar tal flasheo.

-Se calcula en base al ΔT estimado el valor exacto correspondiente al flasheo de tal ΔT . Si este valor difiere del valor calculado según el primer paso mediante la ecuación (1) entonces, si la diferencia es

SIMULADOR DE CALDERAS

menor de 5 # se considera como válida la convergencia.

Si este valor difiere por 5# o más entonces se repite el cálculo pero con un nuevo ΔT reestimado según una estrategia de convergencias en base a aproximaciones sucesivas.

Esta secuela para cálculos convergentes se da entre las instrucciones 1190 y 1360.

Para estos cálculos se tienen los siguientes factores en las instrucciones dadas entre la 1190 y la 1360:

-un valor de 0.9 para el calor específico del agua de alimentación en la instrucción 1190.

-El valor de 800 como aproximación de h_{fg} a fin de hacer un primer estimado de ΔT en la instrucción 1230.

-Los factores de las curvas de ajuste para los cálculos de entalpia y temperatura de saturación:

$$\text{para } T < 390 \quad \begin{aligned} h_f &= -55.6472 + 1.134476T - 0.00014223T \\ h_{fg} &= 1061.84 - 0.2593T - 0.000823T \end{aligned}$$

$$\text{para } T > 390 \quad \begin{aligned} h_f &= 21.44 + 0.68656T + 0.000493T \\ h_{fg} &= 935.22 + 0.4065T - 0.0016975T \end{aligned}$$

-El divisor 56 en la instrucción 1360 para calcular volumen corresponde a la densidad del agua para condiciones de saturación aproximadamente.

5.12 Nivel del Domo.- El incremento o disminución del nivel del domo se calcula en términos del volumen que debe aceptarse o liberarse del domo. Este volumen se divide entre el área del espejo líquido para obtener el diferencial de nivel correspondiente. El área del espejo líquido se puede calcular como $2L\sqrt{2rh-h^2}$ donde:

- L longitud del domo en ft
- r radio del domo en ft
- h nivel líquido en el domo en ft

Las instrucciones 1360 y 1370 corresponden a este cálculo.

5.13 Para el deaerador el balance correspondiente se da a través de las siguientes ecuaciones:

$$(G) \quad m_s (h_s - h_{sat})t = m_a c_p (T1 - T0) + m_c c_p (T1 - T_{sat})t + \dots + m_r (T1 - T_{rep})c_{pt}$$

$$(H) \quad m_a = r^2 L \left(\cos^{-1} \frac{r-h}{r} - \frac{(r-h)\sqrt{2rh-h^2}}{r^2} \right)$$

SIMULADOR DE CALDERAS

Aquí la nomenclatura empleada es:

m_s flujo de vapor de baja presión regulado según la
apertura de la válvula de control de temperatura.
 m esta dada en #/Hr.
 h_s entalpia del vapor de baja presión en BTU/#
 h_{sat} entalpia de saturación en BTU/#

-el valor h está determinado por la presión y ésta
tiene un valor fijo dado por el aerocondensador.

-el valor h será el correspondiente a la temperatura
 T_0 a que se encuentra el deaerador.

t tiempo de ciclo del simulador en segundos.
 m_a masa de agua residente en el deaerador en #.
 c_p calor específico del condensado en BTU/# oF.
 T_1 temperatura a calcular del deaerador en oF.
 T_0 temperatura anterior del deaerador en oF.
 m_c flujo de condensado saturado al deaerador en #/Hr.
 T_{sat} temperatura de saturación del condensado en oF.
 m_r flujo de agua de repuesto en #/Hr.
 T_{rep} temperatura de agua de repuesto en oF.
densidad del condensado en #/ft³.
 L longitud del deaerador en ft.
 r radio del deaerador en ft.
 h nivel del líquido en el deaerador en ft.

De la fórmula (G) se despeja el valor de T_1 .

5.14 Nivel del Deaerador.- Para el cálculo del incremento
de nivel en el deaerador, se deberá calcular primeramente
el volumen aceptado o desalojado del deaerador como
diferencia de los flujos a la entrada y a la salida, lo
cual se resuelve así:

$$(J) \quad \text{volumen} = (m_r + m_c - m_{bfw} + m_s)t / \text{densidad de líquido}$$

con volumen en ft³
 m en #/Hr
 t en horas
densidad en #/ft³

Luego el desplazamiento del nivel puede evaluarse
utilizando la ecuación (K):

$$(K) \quad \Delta \text{nivel} = \text{volumen} / \text{área de espejo líquido}$$

SIMULADOR DE CALDERAS

donde el Área del espejo líquido = $2L\sqrt{2hr-h^2}$ con:

h	nivel en ft
r	radio en ft
L	longitud en ft

En el programa estos cálculos se resuelven entre la instrucción 2000 y la 2120; en ellas aparecen varios factores que se explican a continuación:

-en la instrucción 2000 se calcula una fracción de unidad para suponer fugas al azar entre cero y diez por ciento, de modo que el condensado se calcule entre 90 y 100 por ciento del vapor sobrecalentado. La fracción calculada en la instrucción 2000 oscila entre 0.9 y 1.0 y se aplica como factor sobre el flujo de vapor sobrecalentado para estimar el flujo de condensado. El factor 0.1 que aparece en la instrucción 2000 corresponde al 10 por ciento de fugas.

-en la instrucción 2020 se calcula la entalpia del líquido saturado como igual a su temperatura en grados Fahrenheit menos 17

-en la instrucción 2030 el factor 400 corresponde al factor de conversión entre galones por minuto y libras por hora para el agua de repuesto.

-en la instrucción 2070 aparece un 56 como factor. Este valor corresponde a la densidad del condensado. La multiplicación de 2 por 8 corresponde a 2L con L=8 ft en el cálculo del Área de espejo líquido.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

5.15 Varias.- En las instrucciones 912 a 916 se estima un ajuste para el balance de energía en radiación. La estimación hecha presupone:

-una diferencia de temperaturas entre la pared externa de los tubos de radiación y la temperatura de vapor saturado de 1500 oF. Este valor aparece en la instrucción 914 y en la 916.

-una relación de 40000 calculada así:

$$\text{flujo de gases comb.} \cdot (c_{pgc})(T_{flama} - T_{salida \text{ radiación}})$$

$$\text{masa de tubos} \cdot (c_{p \text{ tubos}})$$

donde las unidades son:

unidades de flujo	#/Hr
c_p	BTU/# oF
temperatura	grados Fahrenheit
masa tubos	#

Este valor de 40000 aparece en la instrucción 916.

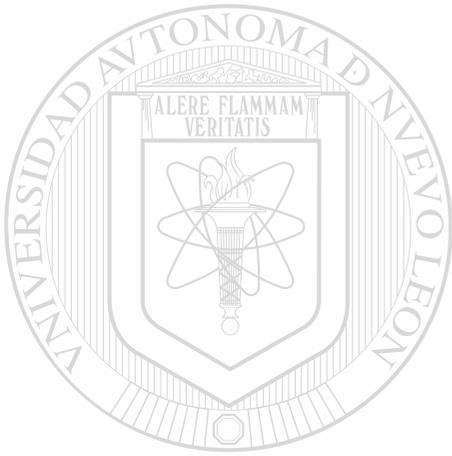
SIMULADOR DE CALDERAS

6.- Corridas Típicas.

En esta sección se presentan las gráficas resultantes de un "arranque" y de la operación a "plena carga" durante 3 horas aproximadamente.

De modo similar es posible considerar como corridas típicas las correspondientes a otras situaciones como por ejemplo:

- carga menor a la nominal
- carga mayor a la nominal
- paro programado
- paro de emergencia



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

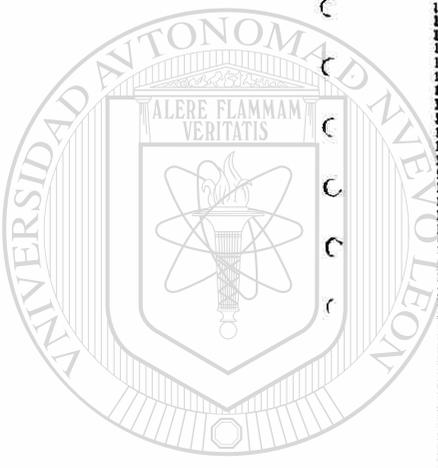
NIVEL DEL SON

PRESION 31 V

TEMPIER

VARIABLES GRAFICAS:

- 1.- Referencia del nivel del tono
- 2.- Nivel del tono
- 3.- Referencia de presión del vapor
- 4.- Presión del vapor
- 5.- Referencia de temperatura del reactor
- 6.- Temperatura del reactor

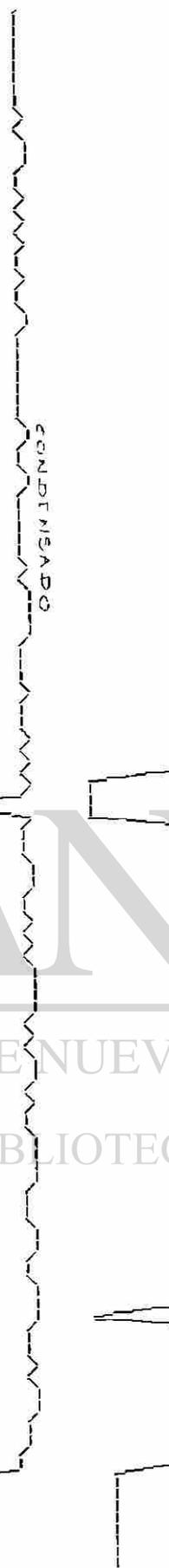




GRÁFICA DE SIMULACION
DE 10 OCT 1985



VAPORES CONDENSADOS



NIVEL DEL DEAERADOR

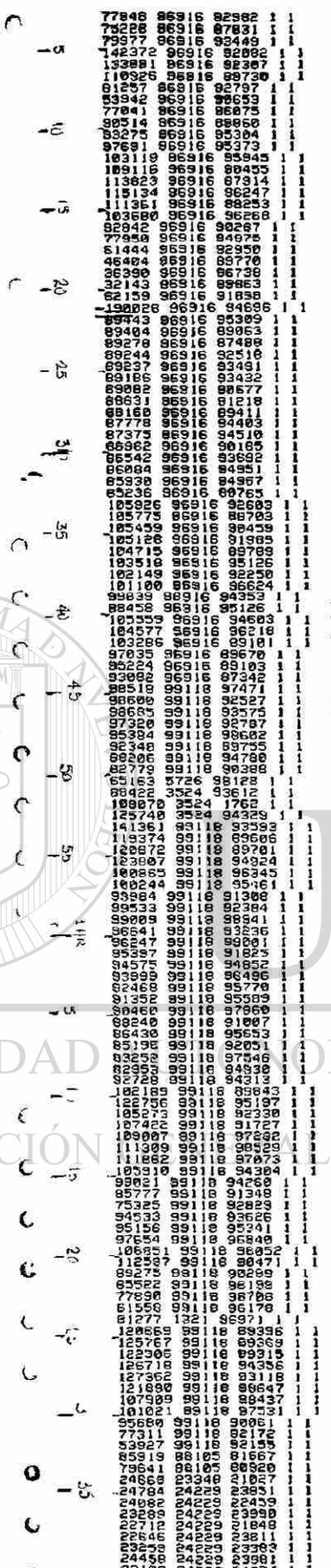
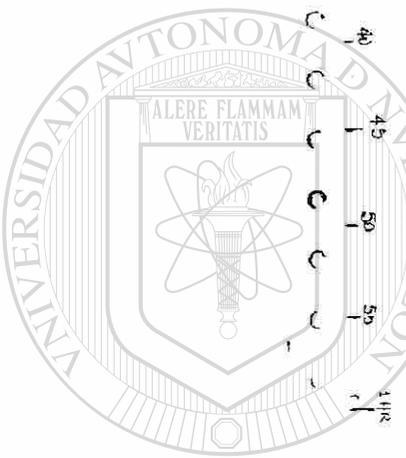


Table of numerical data corresponding to the graphs above. The data is organized into columns, with some values appearing to be in scientific notation or specific units. The columns are labeled with time intervals: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 1HR, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5.

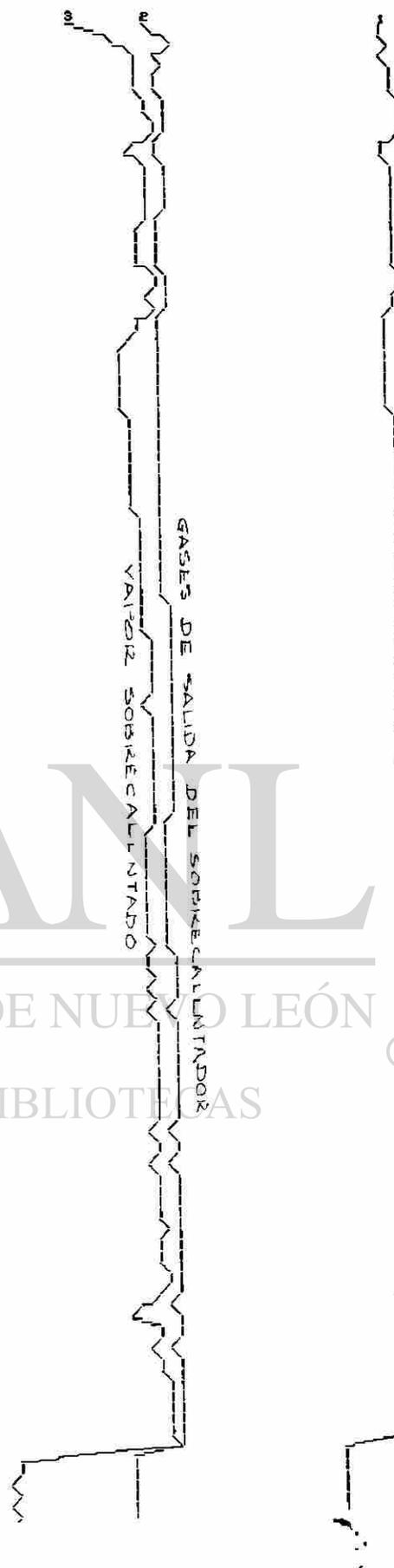


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

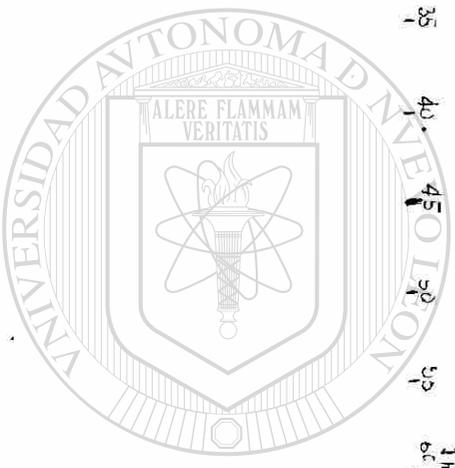
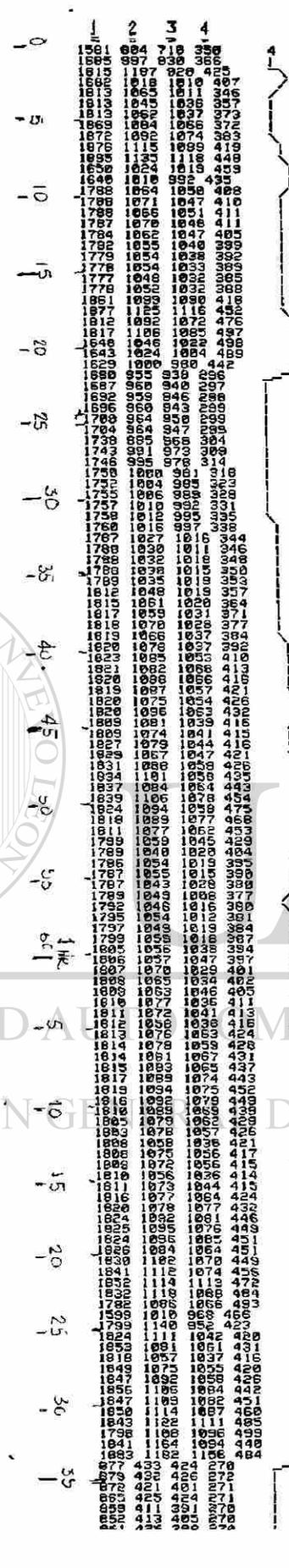
TEMPERATURA

GATA DE
SIMULACION
DE 19 DE OCT 1985

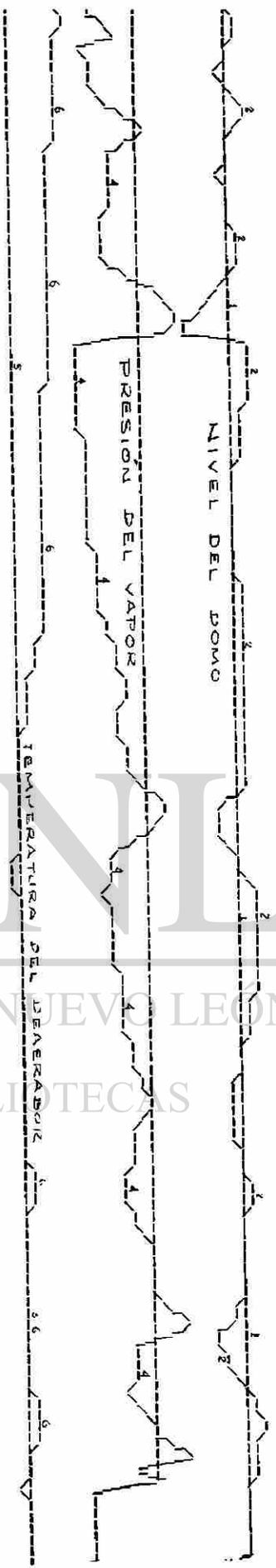
TEMPERATURA DE GASES DE SALIDA DEL CALENTADOR



VAPOR AJUJADO

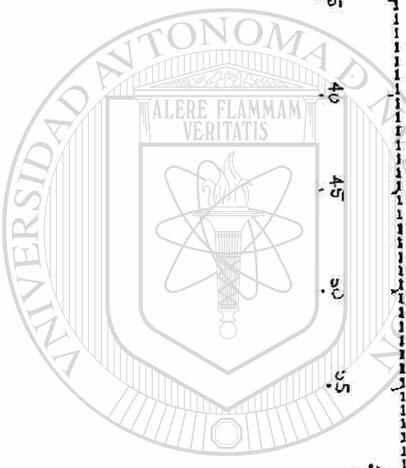


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



VARIABLES GRAFICADAS .

- 1 - Referencia del nivel del domo
- 2 - Nivel del domo
- 3 - Referencia de presión del vapor
- 4 - Presión del vapor
- 5 - Referencia de temperatura del condensador



7.- Desarrollo Futuro y Conclusión

7.1 Otras Computadoras.-- La simulación de calderas o en general de otro tipo de "plantas" podrá desarrollarse también en computadoras más o menos potentes que la Commodore 128B requerida en el caso del simulador de calderas presentado aquí. Es de esperarse que en equipos como el de la Escuela de Graduados (HP 1000) la simulación que se consiga sea superior en todos los aspectos dado que se cuenta con un equipo también superior.

En equipos de menor velocidad los tiempos de ciclo resultantes serán mayores mientras el programa corra en Basic.

El programa del simulador de calderas tal y como se presenta en esta tesis, está resuelto en Basic y ha sido grabado en Basic sin compilarse. Se contemplan como opciones para mejorar los tiempos de ciclo de cálculo:

- compilar el programa a lenguaje de máquina y ejecutarlo según el programa objeto resultante.

- reescribir el programa en lenguaje de máquina mediante la generación de las subrutinas requeridas.

Un simulador obtenido mediante el uso de lenguaje de máquina sería entonces uno de los próximos objetivos.

Dado que el lenguaje empleado es Basic, el programa es adaptable a los equipos que tengan opción de correr con Basic. Sin embargo, dado que las gráficas presentadas en la pantalla hacen referencia a memorias específicas para la Commodore 128B, se requerirá adaptar estas memorias según sea el caso de los monitores de otras computadoras en las que se desee correr el programa.

Otras Opciones de Programación.-- Se contempla también la posibilidad de dotar al simulador de opciones para hacerlo más útil y versátil, mediante:

- agregado de menús de ayuda que expliquen su utilización.

- grabación de datos para diferentes condiciones iniciales.

- escalamiento en el tiempo.

- repetición de condiciones previas para corregir o modificar las alternativas de operación empleadas.

- introducción de fallas en tiempo real.

7.2 Otros Procesos.-La planta y los controladores simulados en esta tesis son similares a las plantas de proceso en los que prevalece el manejo de fluidos y sus controladores en lo que respecta al Área de control regulatorio. Por esta razón se considera que el presente simulador mantiene una relación estrecha con gran cantidad de plantas industriales que tengan predominantemente manejo de fluidos.

Debe mencionarse también que aunque esta tesis se limita al control regulatorio de una caldera, podría desarrollarse de modo más cabal si se le agregara una simulación de su control secuencial.

En síntesis los procesos que se contemplarían como afines y con probabilidades de ser simulado serían los de plantas de la industria química y sus controles tanto en el Área de control secuencial como en el Área de control regulatorio, preferentemente en lo que respecta al manejo de fluidos.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SIMULADOR DE CALDERAS

7.3 Conclusión.- El simulador de calderas planteado aquí sirve para analizar el comportamiento de una planta en estado estable y sometida a perturbaciones que generen transitorios en sus variables.

El simulador podrá utilizarse en los laboratorios para el desarrollo de prácticas; aquí se contempla:

- la familiarización del estudiante del Área de Control con el manejo y ajuste de controladores PID.
- el análisis de fenómenos de transmisión de calor por el estudiante de Ingeniería Térmica interesado en generadores de vapor.
- la discusión y análisis de esquemas de control alternos como cascada, anteaalimentación, etc.
- el desarrollo de cálculos para Identificación de Procesos en Línea por parte de alumnos de la Escuela de Graduados del Área de Control.

Asimismo, el simulador de calderas podrá utilizarse con el fin de entrenar a los operadores de calderas en lo que respecta a familiarización con efectos transitorios de estabilidad, manejo de controladores del tipo PID y fenómenos típicos de operación de una caldera paquete. Para el entrenamiento de operadores podrían establecerse cursos en el Centro de Educación Continua de la Facultad.

El trabajo presentado en esta tesis demuestra la factibilidad de trabajos similares aún en microcomputadoras personales. De esto se derivan las siguientes implicaciones:

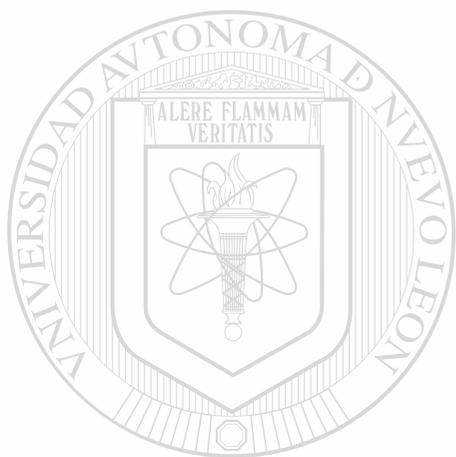
- 1) El simulador tal y como está planteado ha sido posible en base a un esfuerzo personal, luego, si se desarrolla un trabajo coordinado de un equipo los resultados serán mejores en cuanto a volumen y alcance.
- 2) A nivel de trabajo personal, los alumnos de las diferentes áreas de especialización podrán desarrollar trabajos similares que a nivel de subrutinas podrían ser coordinados en un todo organizado y de utilidad integrable, como esfuerzo en el tiempo, para su posterior utilización por parte de las nuevas generaciones o del Centro de Educación Continua, orientado hacia las necesidades de la industria.

Antes de iniciar un trabajo coordinado tendiente a generar múltiples simuladores, debe analizarse la conveniencia entre desarrollar un simulador general como el SAS III o uno específico como éste.

Los simuladores de propósitos generales tienen la ventaja de aplicarse a muchos casos de manera flexible. El simulador de calderas que se presenta en esta tesis podría ser llamado de "propósitos específicos". Los simuladores de propósitos específicos permiten profundizar en el conocimiento de los equipos simulados pues requieren del estudio de las áreas de ingeniería

involucradas.

Cualquier tipo de simulación, preferiblemente, debe contar con un esquema de datos que permitan configurar el modelo matemático que se plantee de modo que la planta simulada pueda tomar diferentes presentaciones según lo requiera el usuario. Esto permitirá utilizar más eficientemente el simulador.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS