



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

SIMULACION PARA CALENTADORES
VERTICALES DE BAJA PRESION DE
UNA CENTRAL TERMOELECTRICA
NORMALIZADA.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO-ELECTRICISTA

(AREA ELECTRICA-ELECTRONICA)

P R E S E N T A N:

ALBERTO A. ALONSO BARRAGAN

DANIEL ORTIZ TREJO

GUSTAVO A. FLORES PEREZ

DIRECTOR: ING. FRANCISCO RODRIGUEZ R.



MEXICO, D F.

1996

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6
2ij



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimiento.

Queremos hacer público nuestro agradecimiento al Ing. Francisco J. Rodríguez Ramírez, nuestro director de tesis, por su valiosa aportación, así como el empeño y tiempo dedicado para el desarrollo del presente trabajo.

I N D I C E

	Pag.
INTRODUCCION	1
CAPITULO I. CENTRALES TERMoeLECTRICAS	3
I.1 Generalidades	3
I.2 Elementos principales de una Planta Termoeléctrica	5
I.2.1. Generador de vapor	5
I.2.2. Turbina de vapor	7
I.2.3. Generador eléctrico	7
CAPITULO II. SISTEMA DE CONDENSADO	12
II.1. Función del sistema	12
II.2. Descripción del sistema	12
II.3. Descripción y función de los componentes del sistema	14
II.3.1. Condensador principal	14
II.3.2. Bombas de condensado	14
II.3.3. Unidades pulidoras	14
II.3.4. Tanque de almacenamiento de condensado	14
II.3.5. Inter-condensador y post-condensador del eyector principal de aire	14
II.3.6. Condensador de vapor de sellos de la turbina	15
II.3.7. Enfriador de drenes de los calentadores de B.P.	15
II.3.8. Calentadores de B.P.	15
II.4. Instrumentación y control	15
II.4.1. Circuitos de medición	15
II.4.1.1. Nivel en el tanque de almacenamiento de condensado	15
II.4.1.2. Temperatura en chumaceras y devanados de bombas de condensado	15
II.4.1.3. Presión diferencial en el filtro de succión de las bombas de condensado	16
II.4.1.4. Presión de descarga en las bombas de condensado	16
II.4.1.5. Totalización del flujo de repuesto	16
II.4.1.6. Temperatura en la entrada y salida de condensado de los calentadores de B.P.	16
II.4.2. Circuitos de control analogico	16
II.4.2.1. Nivel en el pozo caliente del condensador principal	16
II.4.2.2. Nivel del tanque desgasificador para el control de recirculación de flujo mínimo	16
II.4.3. Circuitos de control lógico y protección	16
II.4.3.1. Control del grupo del sistema de condensado	16

	Pag.
II.4.3.2. Control del subgrupo de bombas de condensado A y B	17
II.4.3.3. Controles parciales de los calentadores 1 y 2, 3 y 4	17
II.4.4. Mediciones para indicación local	18
II.5 Interfases con otros sistemas	18
II.5.1 Sistema de agua de circulación	18
II.5.2 Sistema de agua desmineralizada	18
II.5.3 Sistema de vapor auxiliar	18
II.5.4 Sistemas de vapor principal y turbina	18
II.5.5 Sistema cerrado de agua de enfriamiento	18
II.6 Modos de operación del sistema	19
II.6.1. Pruebas preoperacionales	19
II.6.2. Arranque o puesta en marcha	20
II.6.3. Operación normal	21
II.6.4. Paro normal	21
CAPITULO III. CALENTADORES DE BAJA PRESION	22
III.1. Generalidades	22
III.2. Modos de operación	22
III.2.1. Arranque en frío	22
III.2.2. Operación normal	23
III.2.3. Paro normal para calentadores	24
III.3. Problemas de operación	25
III.3.1. Ventilación insuficiente	25
III.3.2. Caída de presión en la línea de vapor	25
III.3.3. Nivel de líquido excesivo en cubierta	26
III.3.4. Choque hidráulico	26
III.3.5. Ensuciamiento de la superficie del tubo	26
III.4. Puesta en servicio de un calentador	26
III.5. Paro de un calentador	28
III.6. Control de lazo cerrado de los calentadores de B.P.	29
CAPITULO IV. MODELADO Y SIMULACION	31
IV.1. Generalidades	32
IV.2. Relaciones dinámicas para calentadores verticales	33
IV.3. Obtención del modelo lineal en variables de estado del sistema	35
IV.5. Controladores y sintonización	49
IV.6. Métodos de sintonización	50
IV.7. Método de oscilaciones sostenidas	51
IV.8. Simulación y ajustes óptimos	53

CAPITULO V. CONCLUSIONES	65
APENDICE A. VALVULAS DE CONTROL	66
APENDICE B. NOMENCLATURA	69
APENDICE C. TABLAS DE VALORES	71
BIBLIOGRAFIA	74

I N T R O D U C C I O N

En el comportamiento de todo sistema dinámico se involucran una gran cantidad de parametros, así como de varias disciplinas de la ingeniería como lo son la termodinámica, mecánica, electricidad, hidráulica, etc., y por otro lado las matemáticas en general.

Un ejemplo muy claro de esto lo vemos en una Central Termoeléctrica, lugar donde se produce la electricidad, dentro de una Planta generadora de electricidad se encuentra una gran variedad de sistemas dinámicos interactuando entre sí, el presente trabajo tiene por objeto hacer un análisis de una sección específica de una Central Termoelectrica, que es el comportamiento del nivel de condensado dentro de los calentadores de baja presión, que están localizados en el sistema de condensado.

Primeramente en el capítulo I se presenta una breve descripción de lo que es una Central Termoeléctrica, su principio de operación y un resumen de los principales componentes.

En el capítulo II se describirá la función y principales componentes del sistema de condensado, que es donde se encuentran físicamente los calentadores de baja presión.

El capítulo III abordará el tema de calentadores de baja presión, dando una breve explicación de los modos de operación, así como problemas de operación.

En el capítulo IV se hará la simulación de los calentadores, el sistema primeramente se linealizara, se verá su controlabilidad y observabilidad, y se propondrá un controlador para el sistema, para ver el comportamiento del sistema.

Posteriormente se trabajará con el sistema no linealizado con el método de oscilaciones sostenidas (Ziegler-Nichols).

Para finalmente hacer una comparación entre el análisis hecho entre el sistema linealizado y el no linealizado

Por último en el capítulo V se presentan las conclusiones y comentarios del trabajo.

C A P I T U L O

I

C E N T R A L E S T E R M O E L E C T R I C A S

1.1. Generalidades

Una Planta Termoeléctrica es una instalación que tiene por objeto 'convertir o transformar el calor en electricidad' para su empleo en la industria o en usos domésticos.

Desde luego, la transformación del calor (energía calorífica) en energía eléctrica no se efectúa en forma directa, sino escalonada; para ello, en las Plantas Termoeléctricas, se hace necesario recurrir al empleo de cuatro órganos principales y su correspondiente equipo auxiliar, sin el cual no sería posible el funcionamiento de los componentes principales que, en orden, son los siguientes :

- a) Un generador de vapor o caldera.
- b) Una turbina de vapor.
- c) Un generador de corriente alterna.
- d) Agua como agente de la transformación de energía.

La caldera es un dispositivo que convierte el agua en vapor. El vapor hace girar los álabes de la turbina y a su vez al generador. Una representación sencilla de esto, se muestra en la figura siguiente.

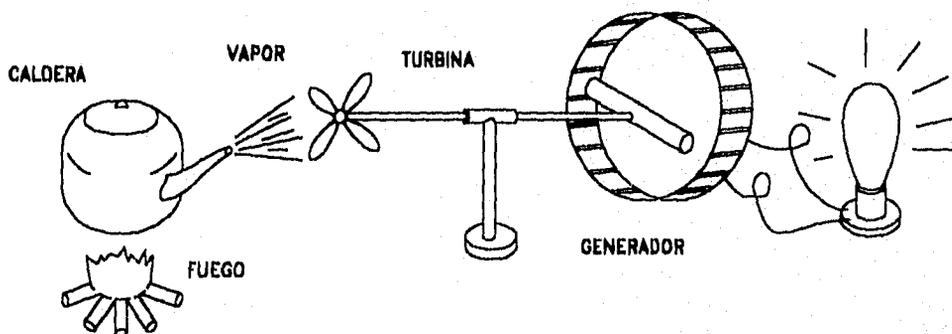


FIGURA 1. ILUSTRACION BASICA DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA TERMOELECTRICA.

Para mucha gente, el proceso de generación de electricidad es un misterio, pero en realidad el proceso es fácil de entender. Como se muestra en la figura anterior, el generador consiste en una pequeña barra magnética girando dentro de una bobina estática. Esto puede parecer muy simple pero el generador realmente está constituido de esta manera. Como el campo magnético está girando a través de la bobina, esta induce una corriente eléctrica en el conductor.

Ahora nos preguntamos ¿por qué, si el funcionamiento de una planta es tan simple como se describió anteriormente, se tienen que construir plantas termoeléctricas más complejas?. La respuesta a esta pregunta es muy simple; una planta como la anterior no es muy eficiente, su eficiencia tiende a cero, y como queremos obtener tanta energía posible de salida como cantidad de combustible, esto es necesario para hacer nuestras plantas lo más eficientes posible.

Hace 70 años, las plantas generadoras de electricidad usaban arriba de 3 libras de carbón de buena calidad para producir un kilowatt/hora de electricidad. Hoy en día, el promedio es menor a una libra de carbón por kilowatt/hora. En otras palabras, en 1922 usábamos tres veces más carbón para producir un kilowatt/hora que en la actualidad.

La razón de este decrecimiento en el consumo de carbón se debe al gradual mejoramiento de nuestras plantas, tanto de piezas individuales del equipo como del mismo sistema.

En la operación de una Planta Termoeléctrica se hace necesario considerar los siguientes pasos fundamentales para que, partiendo del calor, se llegue a la generación o producción de la electricidad.

El primer paso consiste en realizar el encendido del combustible, el cual puede ser: carbón, petróleo crudo o gas natural. Este primer paso se realiza en el horno u hogar de la caldera.

El segundo paso se realiza también en la caldera y consiste en el calentamiento del agua hasta su conversión en vapor.

El tercer paso se realiza en la turbina al girar la parte móvil o rotor por efecto de la acción del vapor procedente de la caldera.

El cuarto y último paso se realiza en el generador, en donde la potencia mecánica de la turbina se transforma en potencia eléctrica.

En la figura 2 se muestra la transformación de energía hasta obtener la electricidad.

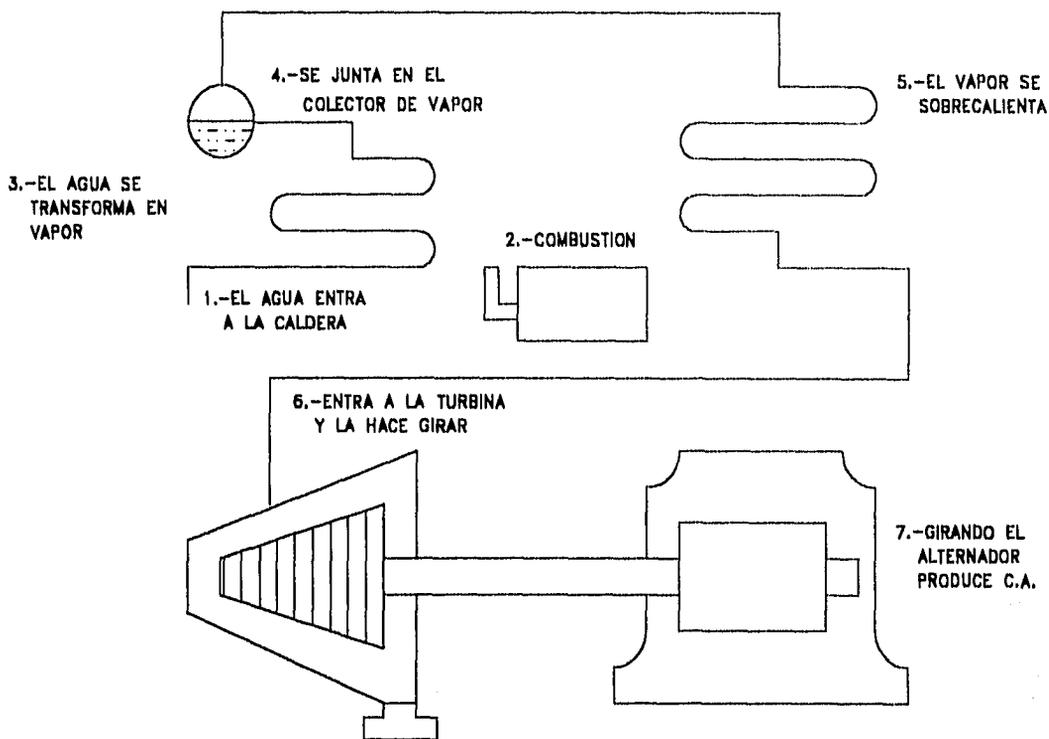


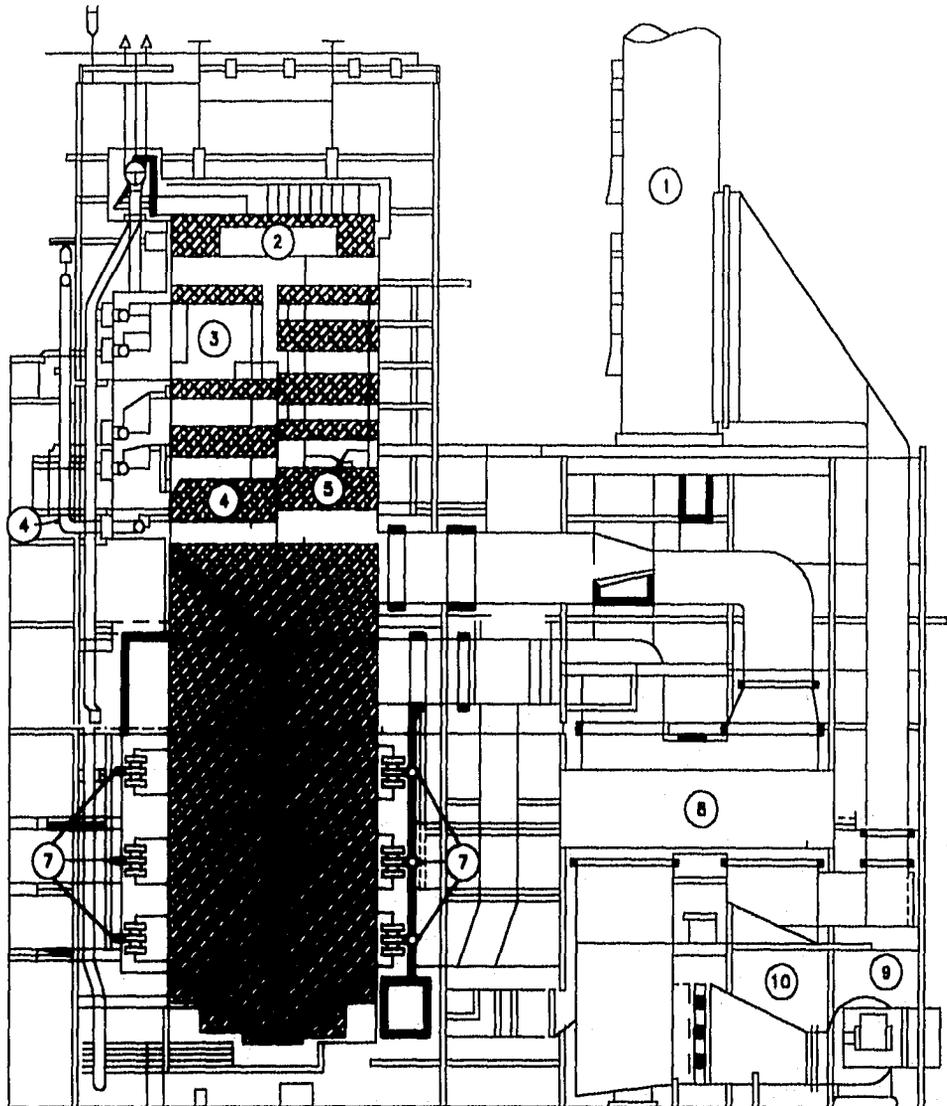
FIG. 2 DIAGRAMA BASICO DE UNA PLANTA TERMoeLECTRICA.

I.2. Elementos principales de una Planta Termoeléctrica

Los elementos principales de una Planta Termoeléctrica se describirán brevemente a continuación, con objeto de dar la ubicación del lugar donde se encuentra el objetivo del presente estudio.

I.2.1. GENERADOR DE VAPOR.

También conocido como caldera, tiene como principales componentes: la chimenea, sobrecalentador primario, recalentador, sobrecalentador secundario, economizador, atemperador, quemadores, precalentador de aire, ventilador y recalentador de aire con vapor.



- | | | | |
|---|----------------------------|----|-----------------------------|
| 1 | CHIMENEA | 6 | ATEMPERADOR |
| 2 | SOBRECALENTADOR PRIMARIO | 7 | QUEMADORES |
| 3 | RECALENTADOR | 8 | PRECALENTADOR DE AIRE |
| 4 | SOBRECALENTADOR SECUNDARIO | 9 | VENTILADOR TIRO FORZADO |
| 5 | ECONOMIZADOR | 10 | RECALENTADOR AIRE CON VAPOR |

FIG. 3 GENERADOR DE VAPOR O CALDERA.

1.2.2. TURBINA DE VAPOR.

Es una máquina de flujo continuo cuyos elementos principales son: entrada de vapor, toberas, álabes, eje y rotor. Su funcionamiento consiste en introducir vapor a través de las toberas, el cual se expande hasta una presión menor; al hacerlo el chorro de vapor adquiere una gran velocidad (energía cinética) y cede parte de ella a los álabes de la turbina, provocando que el rotor gire.

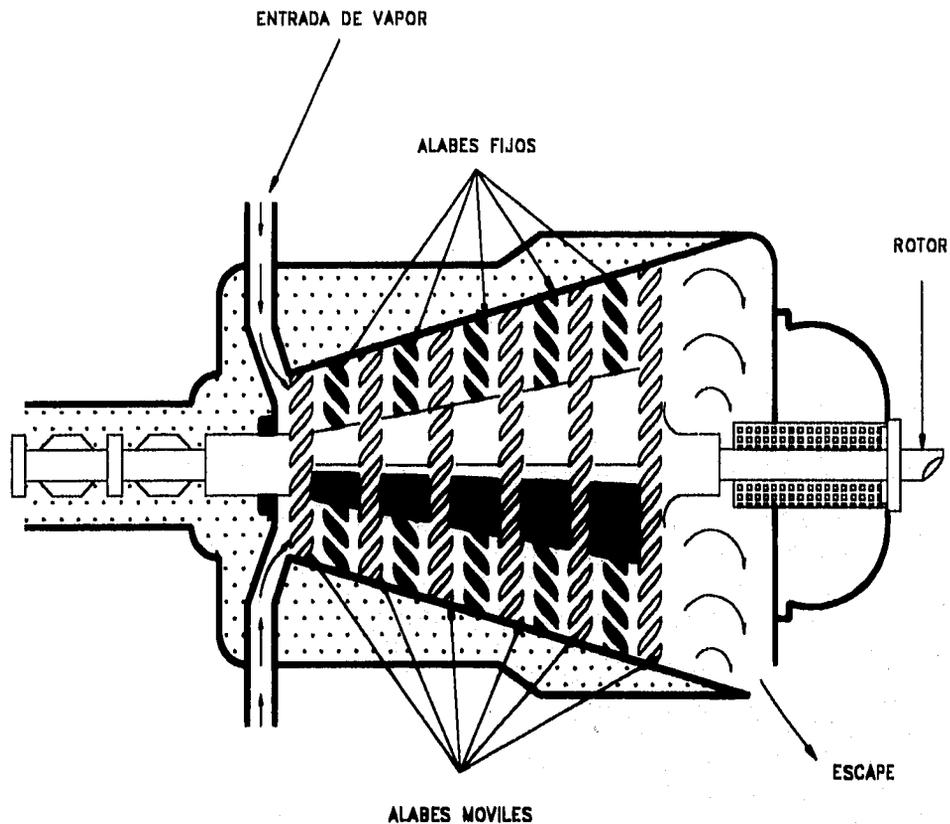
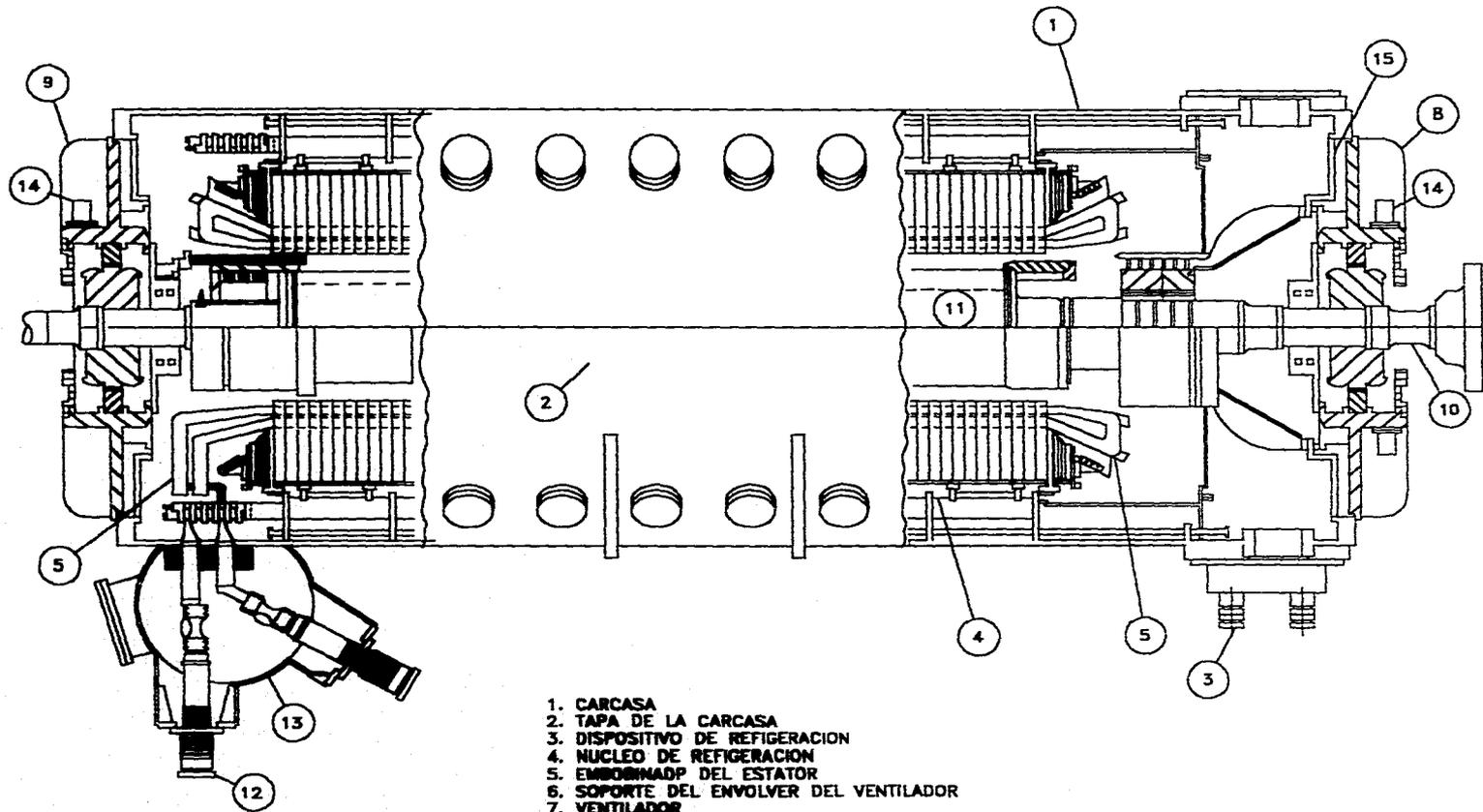


FIG. 4 TURBINA DE VAPOR.

1.2.3. GENERADOR ELECTRICO.

Este equipo es el encargado de la conversión de energía mecánica en energía eléctrica; está compuesto por bobinas con núcleo de hierro dulce montadas sobre un eje, llamado rotor, que al girar produce un campo magnético que barre a los conductores induciendo una corriente eléctrica, la cual es enviada a los transformadores para su distribución. Como se muestra en la fig. 5.

FIG. 5 GENERADOR ELECTRICO.



1. CARCASA
2. TAPA DE LA CARCASA
3. DISPOSITIVO DE REFRIGERACION
4. NUCLEO DE REFRIGERACION
5. ENBOBINADO DEL ESTATOR
6. SOPORTE DEL ENVOLVER DEL VENTILADOR
7. VENTILADOR
8. VAPOR DE SELLOS, CHUMACERA Y ABRASADERA
9. VAPOR DE SELLOS, CHUMACERA Y ABRASADERA
10. EJE
11. ENBOBINADO DEL ROTOR
12. BUJE GUJA PRINCIPAL
13. BUJE GUJA PRINCIPAL
14. SENSOR DE VIBRADOR CUANDO SE SUMINISTRA
15. MANPARAS DEL ENFRIADOR
16. ESPACIO DEL AIRE DE LOS BAFLES

Con el objeto de obtener una mejor eficiencia, se hace necesario condensar el vapor que sale de las turbinas para reciclarlo a la caldera y seguir el proceso, como se muestra en la figura 6.

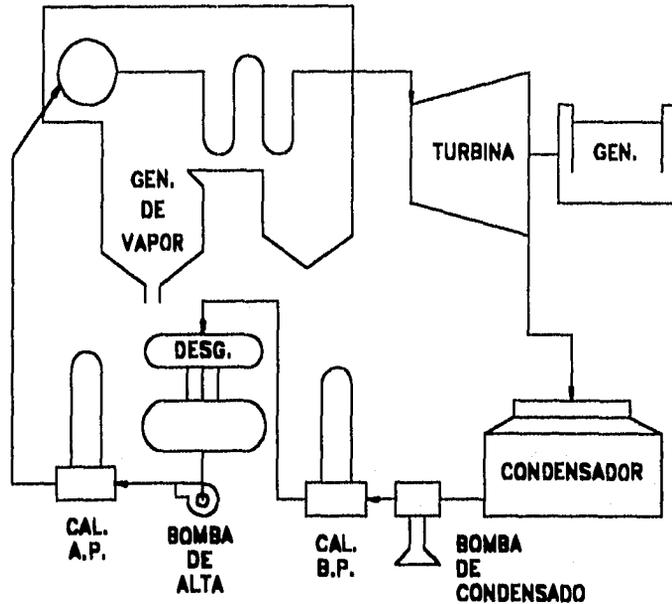


FIG. 6 DIAGRAMA GENERAL DE UNA PLANTA TERMOELECTRICA.

Para mejorar el rendimiento de la Planta Termoeléctrica el condensado que se envía a la caldera, es calentado mediante una extracción de vapor a la turbina, ahorrando con esto combustible de calentamiento. Este proceso se realiza empleando calentadores de vapor; como el que se representa esquemáticamente de la siguiente manera:

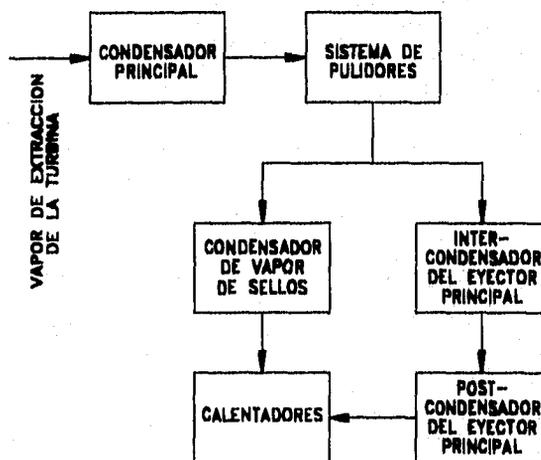


FIG. 7 ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONDENSADO.

Como se observa en la fig.8, es necesario controlar el nivel de condensado dentro del calentador, ya que la demanda de energía eléctrica no es constante, lo cual provoca una variación en el gasto de vapor introducido a la turbina, y con ello una alteración en el nivel de condensado dentro del calentador, mismo que al aumentar más allá de ciertos límites podría alcanzar la entrada del vapor de la extracción, provocando que el condensado se mezcle con éste convirtiéndose en vapor húmedo.

El efecto descrito es causa de severos daños a la turbina, por lo cual es indispensable prevenirlo y evitarlo, a través de una estricta regulación de la variable 'nivel de condensado' en los calentadores.

Por otro lado, si éste nivel disminuyera por debajo del límite de referencia, provocaría daños al mismo calentador, ya que la temperatura dentro de él mismo aumentaría considerablemente por la presencia del vapor de la extracción.

Por lo anterior se hace notar que es de suma importancia el control del condensado en los calentadores de las Plantas Termoeléctricas. Es por ello que Comisión Federal de Electricidad ha decidido realizar un análisis de las diferentes estrategias de control aplicables a la solución de este problema.

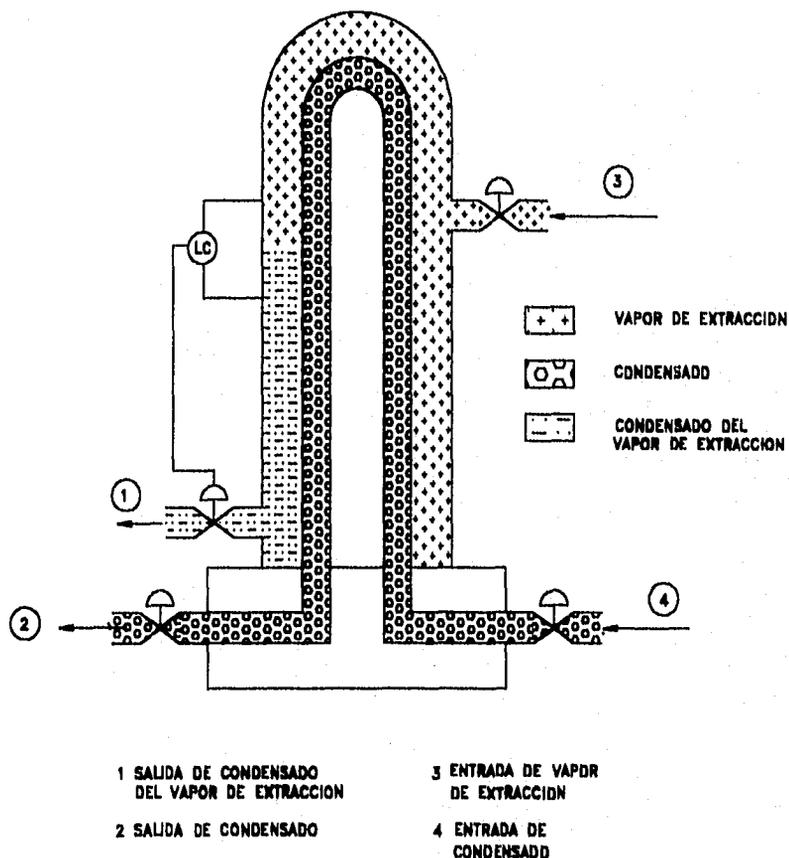


FIG. 8 ESQUEMA DE UN CALENTADOR

El objetivo de este trabajo es llevar a cabo dicho análisis, incluyendo modelos del proceso y simulación de los esquemas y estrategias propuestos, con el objeto de establecer la mejor práctica relativa a éste proceso.

Cabe mencionar que el presente análisis sera desarrollado sobre una Planta Termoeléctrica Normalizada; entendiendose por normalizada al hecho de estar diseñada bajo normas de operación y control preestablecidas por Comisión Federal de Electricidad.

C A P I T U L O

I I

S I S T E M A D E C O N D E N S A D O

II.1 FUNCION DEL SISTEMA

El sistema de condensado tiene como función principal condensar el vapor de escape procedente de la turbina de baja presión y enviarlo, desde el pozo caliente, ubicado en la parte inferior del condensador principal, hasta el desgasificador a través de un ciclo regenerativo.

Así mismo se encarga del almacenamiento del repuesto de condensado al ciclo, además de dar servicio a diferentes atemperadores, sellos y enfriadores del sistema.

II.2 DESCRIPCION DEL SISTEMA

En la figura 9, se muestran los componentes principales del sistema de condensado.

El condensador principal (5), recibe directamente el vapor de escape de la turbina de baja presión, en donde es condensado, para posteriormente bombearlo al 'sistema pulidor de condensado' (8). Enseguida el flujo de condensado es desviado en tres direcciones, la primera de ellas va al cabezal de servicios, la segunda va al inter-condensador (11) y de éste al post-condensador (10) del eyector principal, y la tercera se dirige al condensador de vapor de sellos (9). A continuación, el condensado pasa al enfriador de drenes (7) para de ahí enviarlo a los calentadores de baja presión (B.P. 2, 3, 4), y por último se descarga al desgasificador, el cual ya pertenece al sistema de agua de alimentación.

Para el caso de que alguno de los equipos falle, el sistema cuenta con derivaciones (by-pass), con el fin de poder aislarlo y con ello evitar daños mayores.

Dado a que hay pérdidas de condensado debidas, principalmente, a las purgas del generador de vapor, el sistema cuenta con un tanque de almacenamiento de condensado para reponer esta pérdida y mantener el nivel que asegure la operación normal en el pozo caliente.

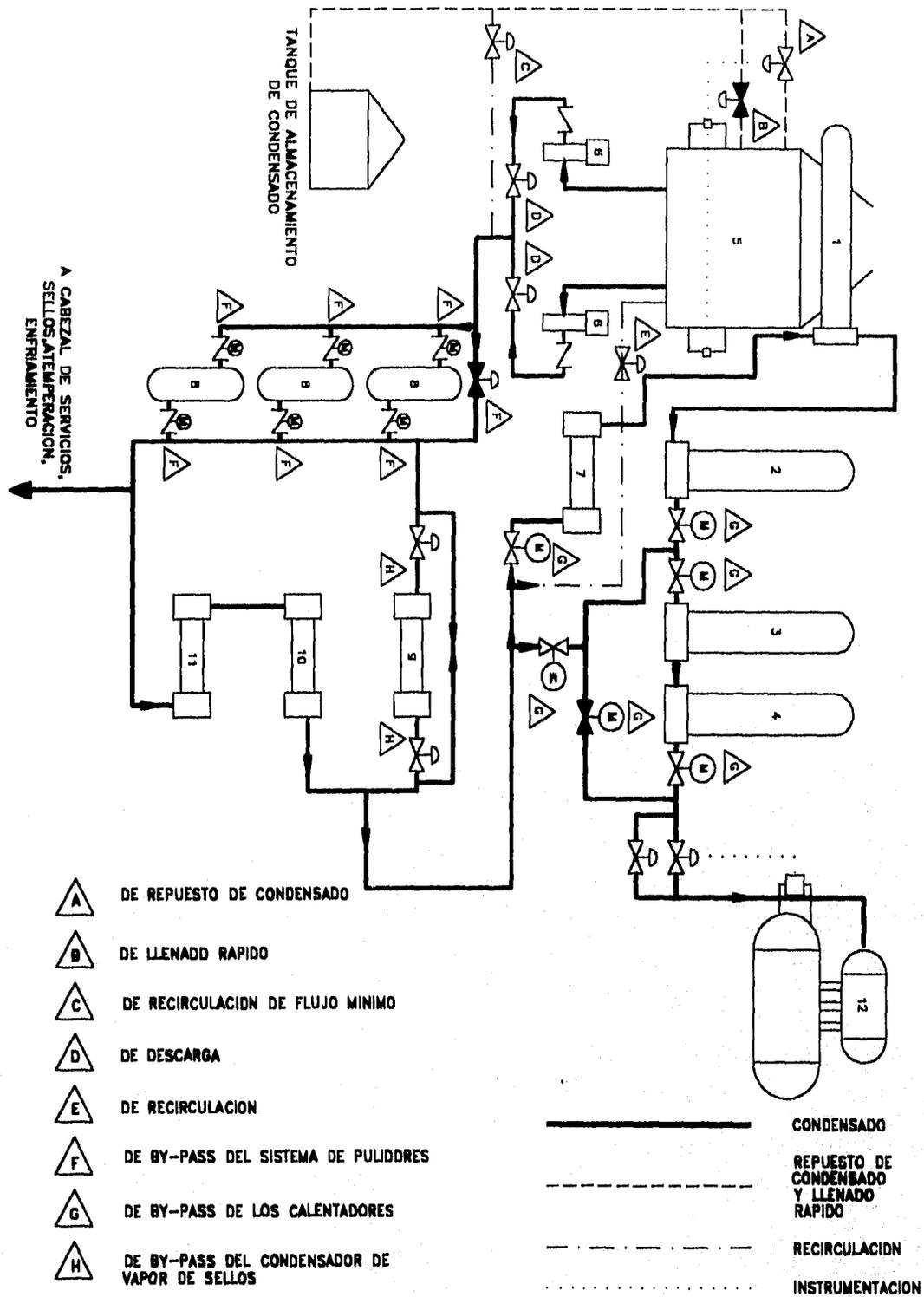


FIG. 9 DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA DE CONDENSADO

II.3 DESCRIPCION Y FUNCION DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

El sistema está compuesto principalmente por tubería, instrumentación, controles y equipos; éstos últimos según la siguiente descripción:

II.3.1 CONDENSADOR PRINCIPAL.

El tipo de condensador utilizado en las Centrales Normalizadas es el de superficie, el cual proporciona una baja presión de escape y es capaz de recuperar el condensado ya que éste no se mezcla con el agua de refrigeración debido a que cuenta con cajas de agua divididas, teniendo una zona integral de condensado (pozo caliente).

Como se mencionó anteriormente, la función de éste equipo es condensar el vapor de escape de la turbina de B.P.

II.3.2 BOMBAS DE CONDENSADO.

Generalmente en las Termoeléctricas Normalizadas se trabaja con 2 bombas, una en operación normal y la otra de respaldo, ver figura 9, las cuales bombean el condensado del pozo caliente al sistema de pulidores.

Estas bombas son del tipo centrífuga vertical, de pasos múltiples, sumergidas y suspendidas en un tanque de succión.

II.3.3 UNIDADES PULIDORAS.

Estas unidades pulidoras de condensado son las encargadas de eliminar al máximo los arrastres de hierro y otros elementos, aumentando con ello la confiabilidad del generador de vapor.

II.3.4 TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE CONDENSADO.

El tipo de tanque de almacenamiento de condensado utilizado es del tipo cilíndrico vertical, atmosférico, de fondo plano, de techo cónico.

Este tanque sirve para almacenar el agua desmineralizada de repuesto y proporcionarla, cuando sea necesario, al pozo caliente.

II.3.5 INTER-CONDENSADOR Y POST-CONDENSADOR DEL EYECTOR PRINCIPAL DE AIRE.

Estos equipos son condensadores del tipo superficie, de tubos rectos y de un solo paso.

Ambos equipos son los encargados de condensar la parte de vapor que se quedó en la parte alta del condensador principal, misma que se extrae por medio del eyector principal.

II.3.6 CONDENSADOR DE VAPOR DE SELLOS DE LA TURBINA.

Este condensador al igual que los anteriores es del tipo superficie, de tubos rectos y de un solo paso.

Su función es condensar el vapor que se utiliza para sellar la turbina.

II.3.7 ENFRIADOR DE DRENES DE LOS CALENTADORES DE B.P.

Este equipo también es del tipo superficie, de tubos rectos y de un solo paso.

Su función consiste en disminuir la temperatura del condensado que se obtiene al drenar los calentadores de B.P., y que es enviado al pozo caliente del condensador principal.

II.3.8 CALENTADORES DE B.P.

Todos los calentadores son del tipo superficie, de tubos en 'U' y de dos pasos.

A excepción del calentador No 1, que se localiza en la entrada del condensador principal, los otros calentadores son verticales con caja de agua en la parte inferior.

Los calentadores (2),(3) y (4) utilizan la extracción de vapor que se hace a la turbina de B.P. para calentar el condensado; mientras que el calentador (1) aprovecha el vapor de escape de la turbina que entra al condensador principal.

II.4 INSTRUMENTACION Y CONTROL.

La medición y el control de las variables del Sistema de Condensado, se divide de la siguiente manera :

II.4.1. CIRCUITOS MEDICION DE :

II.4.1.1 NIVEL EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE CONDENSADO.

Cuenta con un transductor de nivel el cual manda una señal al tablero de control principal y al Sistema de Adquisición de Datos (SAD). Además, genera otra señal que va al sistema de alarmas del mismo tablero de control y al SAD.

II.4.1.2 TEMPERATURA EN CHUMACERAS Y DEVANADOS DE BOMBAS DE CONDENSADO.

Cada una de las bombas tiene dos transductores: un termopar (para las chumaceras) y otro del tipo RTD (para los devanados); los cuales envían, en forma

independiente, una señal al SAD; cada vez que cualquiera de ellas sobrepase la temperatura preestablecida, el SAD generará una señal al sistema de alarmas.

II.4.1.3 PRESION DIFERENCIAL EN EL FILTRO DE SUCCION DE LAS BOMBAS CONDENSADO

Este circuito tiene un interruptor el cual enviará una señal al sistema de alarmas y al SAD, en caso de presentarse una presión diferencial alta en el filtro de succión.

II.4.1.4 PRESION DE DESCARGA EN LAS BOMBAS DE CONDENSADO.

El transductor genera una señal al tablero principal y al SAD, cuando detecta una presión baja en la descarga de las bombas.

II.4.1.5 TOTALIZACION DEL FLUJO DE REPUESTO.

Cuenta con un transductor de flujo que envía una señal al totalizador de flujo del tablero principal y al SAD.

II.4.1.6 TEMPERATURA EN LA ENTRADA Y SALIDA DE CONDENSADO DE LOS CALENTADORES DE B.P.

Este circuito consta de dos termopares, uno a la entrada y otro a la salida, que envían solamente señal al SAD.

II.4.2. CIRCUITOS DE CONTROL ANALOGICO DE :

II.4.2.1 NIVEL EN EL POZO CALIENTE DEL CONDENSADOR RINCIPAL.

Cuenta con un transductor de nivel; con el se controla el nivel normal del condensador principal, generando una señal al tablero principal y al SAD cuando hay un bajo nivel en el pozo caliente.

II.4.2.3 NIVEL DEL TANQUE DESGASIFICADOR PARA EL CONTROL DE RECIRCULACION DE FLUJO MINIMO.

Se tienen tres transmisores de flujo de condensado los cuales actúan con una lógica de dos de tres y que envían señal a un indicador de flujo instalado en el tablero principal de control, al SAD, así como para el control analógico.

II.4.3. CIRCUITOS DE CONTROL LOGICO Y PROTECCION DE :

II.4.3.1 CONTROL DEL GRUPO DEL SISTEMA DE CONDENSADO.

Una vez que se pone en marcha el grupo, se verifica que las dos bombas de condensado estén disparadas. A continuación, mediante una secuencia preestablecida, se pone en operación la bomba de condensado correspondiente.

II.4.3.2 CONTROL DEL SUBGRUPO DE BOMBAS DE CONDENSADO A Y B.

Este control es el encargado de poner en operación automática a los controles parciales de los siguientes elementos: bomba de transferencia de agua desmineralizada, válvula de calentadores y controles analógicos (nivel del desgasificador y recirculación de flujo mínimo de agua de condensado, nivel alto y bajo del pozo caliente).

II.4.3.3 CONTROLES PARCIALES DE LOS CALENTADORES 1 Y 2, 3 Y 4.

El control parcial de los calentadores 1 y 2 entra en operación al detectar un segundo nivel alto, ya sea en el tanque de evaporación instantánea o en el calentador 1 o 2.

Primero abre la válvula de derivación y simultáneamente cierra las válvulas aisladoras de entrada y salida. En caso de que los niveles indicados sean adecuados, permite abrir las válvulas aisladoras de entrada y salida, cerrando la válvula de derivación.

El control parcial de los calentadores 3 y 4 opera de la misma forma que el anterior, abriendo la válvula de derivación y cerrando las válvulas aisladoras de entrada y salida, al presentarse un segundo nivel alto.

En caso de tener problemas de control interno en el grupo o en la lógica, el operador podrá poner en operación, manualmente, cada uno de los siguientes elementos:

- Válvulas aisladoras de entrada y salida de los calentadores 1 y 2, 3 y 4.
- Válvulas de derivación de los calentadores 1 y 2, 3 y 4.
- Bombas de condensado.

La lógica de protección siempre actúa sobre cada uno de los elementos anteriores, ya sea en el modo de operación manual o automático.

II.4.4 MEDICIONES PARA INDICACION LOCAL :

Existen determinadas variables que deben ser registradas localmente, con el fin de proporcionar al operador local el comportamiento del equipo correspondiente; dichas variables se mencionan a continuación:

- a). Nivel en tanque de almacenamiento de condensado y pozo caliente condensador principal.
- b). Presión a la descarga de ambas bombas de condensado; en válvula auto-operada de agua de sellos; en válvula rompedora de vacío; a la entrada y salida del grupo inter y post-condensador del eyector principal, y de cada uno de los calentadores de agua de alimentación de baja presión.
- c). Temperatura en pozo caliente del condensado.
- d). Presión de vacío del condensador principal que envía la señal de proceso a un vacuómetro instalado en el tablero de control.

II.5 INTERFASES CON OTROS SISTEMAS.

Para el correcto funcionamiento del sistema de condensado, se requiere que los siguientes sistemas estén en condiciones normales de operación :

II.5.1. SISTEMA DE AGUA DE CIRCULACION.

La operación de éste sistema es de vital importancia dado que la falla del mismo provocaría problemas de vacío en el condensador principal.

II.5.2. SISTEMA DE AGUA DESMINERALIZADA.

Este sistema cuenta con un tanque de almacenamiento de agua desmineralizada, dado que si éste llega a fallar el efecto es directo en el sistema de condensado.

II.5.3 SISTEMA DE VAPOR AUXILIAR.

Se utiliza con el objeto de mantener el vacío dentro del condensador principal.

II.5.4. SISTEMA DE VAPOR PRINCIPAL Y TURBINA.

Para poder alimentar al condensador principal con el vapor de escape de la turbina de B.P., es necesario que éste sistema esté en operación normal.

II.5.5. SISTEMA CERRADO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO.

Este sistema es utilizado para lubricar las chumaceras de las bombas.

II.6 MODOS DE OPERACION DEL SISTEMA.

II.6.1. PRUEBAS PREOPERACIONALES.

Básicamente, estas pruebas consisten en verificar que tanto el equipo como la tubería, la instrumentación y los controles del sistema estén correctamente instalados y listos para entrar en operación, de acuerdo con las recomendaciones de los manuales del proveedor, a la información generada con el proyecto y con la colaboración de la Coordinadora de Puesta en Servicio.

Algunas de estas pruebas son :

a) PARA EL CONDENSADOR PRINCIPAL:

- Verificar que el condensador esté limpio.
- Verificar que esté cerrado herméticamente.
- Verificar el sistema de vacío.
- Verificar el correcto funcionamiento de los controles y la instrumentación.
- Verificar el funcionamiento de la válvula de vacío.

b) PARA LAS BOMBAS DE CONDENSADO:

- Verificar que el filtro de succión esté limpio.
- Verificar el sentido de rotación de las bombas.
- Verificar la lógica de control.
- Verificar el funcionamiento de los sellos.
- Verificar la operación de recirculación para flujo mínimo.
- Verificar los puntos de ajuste (calibración).

c) PULIDORES DE CONDENSADO:

- Prueba hidrostática de todos los recipientes.
- Prueba electrostática del recubrimiento interno de los tanques.
- Prueba de funcionamiento y estanqueidad de válvulas neumáticas.
- Verificar flujos y distribución de agua en los internos de cada intercambiador de iones.
- Verificar alineación, rotación y lubricación de todos los motores.
- Verificar suministro de agua, aire y energía eléctrica.
- Verificar el ajuste de las válvulas de seguridad.
- Verificar el funcionamiento del tablero de control e instrumentación, así como sus secuencias automáticas.
- Soplar las tuberías de aire comprimido para eliminar materiales extraños.
- Verificar que los tanques de substancias químicas que se utilizarán en la regeneración contengan un volumen adecuado.

d) GENERAL:

- Prueba hidráulica.
- Suministro eléctrico y aire.
- Calibración de instrumentos y controles.
- Puntos de ajuste.
- Verificación del suministro de agua al tanque de almacenamiento de condensado.

II.6.2 ARRANQUE O PUESTA EN MARCHA.

- a)** Primeramente se energiza y suministra aire al control e instrumentación.
- b)** Se verifica que el sistema de suministro de agua al tanque de condensado esté y tenga el nivel normal de operación.
- c)** Verificar que todas las válvulas que se conectan al condensador principal, tengan su correspondiente sello de agua.
- d)** Establecer el nivel normal en el pozo caliente del condensador principal, de la siguiente manera :
- Verificando que la válvula de corte, a la salida del tanque de almacenamiento de condensado, esté abierta.
 - Abriendo la válvula de llenado rápido del condensador principal; una vez que se ha alcanzado el nivel normal de operación, se cierra ésta válvula y se abren las de corte de la válvula
- e)** Verificar que las válvulas de corte de las bombas de condensado en succión, estén abiertas y las de descarga a un cuarto de la apertura; deben abrirse las válvulas de venteo y de agua de sellos.

Abrir las válvulas de corte del condensador del vapor de sellos, del inter y post-condensador del eyector de aire y las válvulas de corte de la válvula de control de flujo mínimo de recirculación.

Cerrar las válvulas de corte a la entrada del enfriador de drenes del calentador de B. P. 1 y la válvula de derivación de los demás calentadores de B.P., de tal forma que queden aislados del sistema.

- f)** Arrancar la bomba de condensado, manualmente, y proceder a abrir totalmente la válvula de descarga, verificando que, la válvula de flujo mínimo, esté funcionando correctamente.
- g)** Abrir todas las válvulas de corte de la válvula de control de nivel del

desgasificador, y accionar el actuador para abrir las válvulas de corte del enfriador de drenes, asegurándose de que estén abiertas las del resto de los calentadores.

El condensado entrará al desgasificador a través de la válvula de control de nivel, la cual estará operada en forma manual hasta llegar al nivel normal de operación del desgasificador.

- h)** Durante el arranque todo el sistema deberá ser venteado, cerrándose éstos al estar totalmente lleno; los venteos de operación normal deberán permanecer abiertos.

Después de que se hayan realizado todas las acciones anteriores, el sistema de condensado estará en condiciones para operar en forma normal.

II.6.3. OPERACION NORMAL.

La operación normal del sistema es la descrita en la sección II.2 de éste capítulo.

II.6.4. PARO NORMAL.

Considerando las precauciones que se deben tener durante el paro correcto del sistema, los pasos a seguir son los siguientes:

- a)** Se verifica a través de indicadores remotos y/o locales el correcto nivel en el desgasificador y en el pozo caliente del condensador principal.
- b)** Se verifica que la válvula de derivación de los calentadores de B.P. esté cerrada.
- c)** Se cierran parcialmente las válvulas de corte de la válvula de control de nivel del desgasificador y gradualmente se van cerrando las válvulas de corte de los calentadores de B.P. con objeto de que no se incremente súbitamente el nivel de pozo caliente.
- d)** Se verifica que la válvula de recirculación de flujo mínimo de las bombas de condensado está funcionando correctamente.
- e)** Se verifica que el sistema de vacío quede fuera de servicio.
- f)** Una vez que está fuera el sistema de vacío, se para manualmente la bomba de condensado.
- g)** Bajo estas condiciones, el sistema de condensado estará parado totalmente para un mantenimiento preventivo o correctivo.

C A P I T U L O

I I I

C A L E N T A D O R E S D E B A J A P R E S I O N

III.1 GENERALIDADES.

Los calentadores de agua de alimentación han contribuido a aumentar el rendimiento de las centrales de vapor; ya que su empleo significa un ahorro en el consumo de combustible, al suministrar a la caldera agua de alimentación previamente calentada.

Su funcionamiento consiste en hacer fluir condensado a través de tubos, éste es calentado por medio de vapor de extracción desde una etapa de la turbina.

Por lo general se instala una sección integral de drenes, con objeto de subenfriar el vapor condensado a una temperatura de aproximadamente 10 grados Fahrenheit arriba de la temperatura de entrada del agua de alimentación. Esto disminuirá la cantidad de extracción de vapor utilizado para calentar el agua de alimentación. Los drenes pueden ser instalados en cascada al siguiente calentador de más baja presión. Al subenfriar el condensado se disminuye la posibilidad de evaporación instantánea (flasheo) y los consecuentes problemas de desgaste por erosión de la tubería interconectante y del regulador utilizado para controlar el flujo de los drenes.

III.2 MODOS DE OPERACION

III.2.1. ARRANQUE EN FRIO.

El procedimiento a seguir en el arranque inicial o después de una parada prolongada será el siguiente.

a) Se cierran todas las válvulas, excepto las válvulas de aislamiento del registrador de nivel de líquido, tubo indicador y alarmas.

b) Se abre la válvula de desvío del agua de alimentación y se establece el flujo del agua de alimentación.

c) Las válvulas de cierre del agua de alimentación serán abiertas parcial y muy lentamente para permitir el paso del agua de alimentación a través del lado de tubos del calentador.

d) Se abren completamente las válvulas de cierre del agua de alimentación.

f) Se cierra la válvula de desvío del agua de alimentación.

g) Se abre parcialmente la válvula de vapor de extracción después del desagüe de condensado acumulado.

h) Se abren las válvulas de aislamiento, se cierra la válvula de desvío y se pone la válvula de control de drenaje en control automático.

i) Se abre la válvula de cierre de salida de drenes.

j) Se abren las válvulas de otras entradas.

k) Después de que todo el condensado ha sido drenado desde la línea de extracción de vapor, la válvula de cierre deberá ser abierta lentamente hasta estar completamente abierta.

III.2.2. OPERACION NORMAL.

Los drenajes de cubierta son conducidos generalmente al siguiente calentador de presión más baja y finalmente al pozo caliente del condensador principal, por medio de un regulador de nivel. La válvula de control generalmente se localiza cerca de la conexión de entrada de drenaje en la cubierta del calentador siguiente de más baja presión. En ésta localización se intenta minimizar la distancia; el flujo tendrá que correr en forma de dos fases ya que podría ocurrir evaporización (flasheo) en el lado de la descarga de la válvula de control. Ocasionalmente los drenajes de cubierta son bombeados a una presión más alta y reintroducidos al sistema por medio de una bomba de drenaje. En éste caso también un regulador de nivel es requerido para mantener el nivel propio de la cubierta.

Es esencial que sea ajustado el regulador de nivel de líquido para mantener el nivel en la cubierta lo más estrechamente posible al nivel normal. Un nivel demasiado bajo permitirá al vapor entrar al enfriador de drenaje, resultando rápidamente en daños irreparables a los tubos por erosión. Un nivel demasiado alto causará la inundación de tubos en la sección de condensación y reduce la capacidad de calentamiento del agua de alimentación.

Los venteos de calentadores de baja presión son entubados al condensador de superficie. Básicamente hay tres métodos para entubar sistemas de venteo del calentador. El método más conveniente y recomendable es el venteo individual de cada calentador al condensador de superficie según se requiera. El sistema de venteo en cascada tiene algunas ventajas económicas, pero tiene una desventaja de operación potencial que puede llegar a ser molesta. La desventaja básica es que es difícil localizar un problema de venteo con éste sistema si el funcionamiento empieza a caer por alguna razón, y esto puede afectar al conjunto de calentadores más que a un calentador individual. El sistema de venteo interconectado está entre los dos sistemas previos. Esto, no obstante, requiere considerable atención de detalle en el diseño del sistema. El problema de desbalanceo potencial del sistema siempre se presenta, resultando un venteo inadecuado de algún calentador o calentadores especialmente los de baja presión. Lo anterior más el hecho de que la tubería de venteo sea instalada y decidida en el campo, hace del diseño e instalación de dicho sistema una tarea difícil.

III.2.3. PARO NORMAL PARA CALENTADORES DE TUBO DE ACERO INOXIDABLE Y NO-FERROSO.

a) Se cierra la válvula de suministro de vapor, procurando la circulación del agua a través del lado de tubos hasta que la unidad se enfríe lo más posible.

b) Se abre la válvula de desvío del suministro de agua.

c) Se cierran las válvulas de suministro de agua.

Los pasos arriba mencionados se requieren para cerrar completamente la corriente del calentador. De cualquier forma para hacer una inspección y/o mantenimiento del calentador, los siguientes pasos serán requeridos:

d) Se cierra la válvula de la salida de drenes.

e) Se abre cualquier conexión próxima a la parte superior de la cubierta hacia la atmósfera.

f) Se abren todas las conexiones de drenaje de la cubierta, incluyendo aquellos de la tubería corriente arriba del drén de salida.

g) Se drena la cubierta y lados de tubos completamente, para permitir el acceso para inspección y/o mantenimiento.

III.3. PROBLEMAS DE OPERACION

Cuando los calentadores de agua de alimentación fallan en su funcionamiento correcto, para las condiciones de diseño especificadas, uno o más de los siguientes problemas pueden existir:

III.3.1 VENTILACION INSUFICIENTE.

La presencia de una excesiva cantidad de gases no condensables causa una reducción en la transferencia de calor y resulta en una temperatura menor de la salida del agua de alimentación. Las válvulas de ventilación deberán abrirse más, y por consiguiente estos pasos requerirán atención:

a) Debido a que casi siempre el camino de la tubería de venteo es establecido en el campo, se considera más adecuado trazarlo desde la etapa de diseño para establecer que las piernas verticales de condensado del sello hidráulico o las trampas de vapor no excedan la presión diferencial disponible. Esta contingencia tiene más posibilidades de ocurrir cuando la tubería de venteo no está aislada.

b) En calentadores que normalmente operan abajo de la presión atmosférica (vacío), será necesario checar las uniones bridadas para evitar las posibles entradas de aire, incluyendo aquellas uniones en el punto de extracción de la turbina. En algunos casos, la tubería de interconexión al punto de extracción de la turbina, es también bridada y se deberá revisar buscando entradas de aire.

c) En sistemas de venteo interconectado será necesario verificar que la caída de presión cruce cada válvula y orificio de venteo y sea suficiente para mantener el flujo de venteo requerido.

d) En un sistema de venteo interconectado durante el arranque del enfriador de drenes, los venteos deberán ser checados para verificar que estén cerrados.

III.3.2 CAIDA DE PRESION EN LA LINEA DE VAPOR.

Esto resultará de una temperatura baja del condensador de vapor y baja temperatura de la salida de agua de alimentación. Puede ser causada por una cantidad excesiva de vapor fluyendo a través de las válvulas de venteo de la cubierta. Las válvulas de venteo deberán ser estranguladas para reducir el flujo y aún permitir el venteo adecuado.

Otras posibilidades pueden ser que la válvula de vapor no este completamente abierta, puede haber una restricción en la línea, como desechos que no hayan sido completamente removidos durante la instalación, o que la línea haya quedado muy pequeña para la presión diferencial disponible.

III.3.3 NIVEL DE LIQUIDO EXCESIVO EN CUBIERTA.

Esto puede ser ocasionado por una excesiva caída de presión en la línea de drenes debido al taponamiento o tamaño impropio de la línea o la válvula de control. Si esto sucede, tratar de abrir la válvula de desvío de la válvula de control. Si esto no soluciona el problema, será necesario limpiar la línea o instalar una línea más grande de drenes o una válvula de control adecuada. El nivel excesivo en cubierta también podrá deberse a una fuga en el tubo, vertiendo una gran cantidad de agua de alimentación dentro del lado de la cubierta.

En los calentadores de B.P. operando bajo condiciones de carga reducida, podría ser insuficiente la presión diferencial entre etapas para elevar los drenes a través de la sección de enfriamiento de drenes. Esto ocasionará que el nivel de cubierta suba arriba del punto normal hasta que una condición de carga más alta se establezca. Si este nivel de líquido excesivo temporal se considera indeseable, deben tomarse las medidas necesarias para el desvío de drenes sin pasar por la sección del enfriador de drenes a cargas bajas a través de una conexión de vertedero de emergencia, descargando de la cubierta a un calentador de más baja presión o a otro punto.

Una variación o inestabilidad continua del nivel del agua es normalmente un indicativo de una condición de sensibilidad excesiva que existe entre el controlador del nivel del líquido y la válvula de control de drenes. Estas condiciones son, generalmente, el resultado de estrechar una banda de ajuste proporcional de los controles.

III.3.4 CHOQUE HIDRAULICO.

Esto puede eliminarse con una línea de vapor, purgando continuamente todo lo condensado de la línea. Donde esto exista, con la línea de agua, deben de hacerse los arreglos necesarios para ventear la línea.

III.3.5 ENSUCIAMIENTO DE LA SUPERFICIE DEL TUBO.

Después de un largo período de servicio, si la temperatura de la salida de agua de alimentación cae considerablemente bajo el punto de diseño y ninguno de los problemas previamente mencionados existen, probablemente es tiempo de limpiar los tubos. En la mayoría de los casos, el medio más satisfactorio de limpiar ambos, el interior y el exterior, de la superficie del tubo, es por métodos químicos. Se sugiere se tomen las medidas necesarias en la tubería para que los calentadores puedan ser periódicamente aseados químicamente.

III.4 PUESTA EN SERVICIO DE UN CALENTADOR.

1) Verificar que existan las siguientes condiciones:

(a) Las siguientes válvulas deben estar cerradas:

- La válvula abastecedora de vapor.
- La válvula de cierre de la salida de drenes.
- La válvula de desvío de la válvula de control de drenes.
- Las válvulas de cierre de entrada de drenes y cualquier otra válvula de entrada.
- Todas las conexiones atmosféricas de la cubierta.
- Todas las conexiones de desagüe de la cubierta.
- Las válvulas de cierre de agua de alimentación.

(b) Las siguientes válvulas deben estar abiertas:

- Las válvulas de aislamiento de la válvula de control de drenes.
- Las válvulas de aislamiento para el control del nivel de líquido, cristales de nivel y alarmas.
- Las válvulas de paso de agua de alimentación.
- La válvula de la tubería de salida de agua de alimentación.

2) Se verifica que la válvula de control de drenes esté ajustada para trabajar automáticamente.

3) Se abre ligeramente la válvula de suministro de vapor de extracción y, gradualmente, presurizar la cubierta a una presión de 15 psi abajo de la presión de saturación correspondiente a la temperatura existente en el agua de alimentación (en el lado de tubos) del calentador que está entrando en operación.

4) Se abre la válvula de cierre de drenes de la sección de sobrecalentamiento en los calentadores verticales con el cabezal en el extremo inferior.

5) Se cierra la válvula abastecedora de vapor de extracción.

6) Se abre ligeramente la válvula de cierre de la entrada de agua de alimentación y gradualmente se llena el lado de tubos del calentador.

7) Se cierra la válvula de la entrada del agua de alimentación.

8) Se abre, ligeramente, la válvula de la salida del agua de alimentación y se ventila el aire restante de la tubería a través del venteo de arranque de la tubería de la salida del agua de alimentación.

9) Se abre la válvula de cierre de entrada del agua de alimentación.

10) Se abre la válvula de cierre de la salida de agua de alimentación.

- 11) Se cierran las válvulas de desvío del agua de alimentación.
- 12) Se abre la válvula abastecedora de vapor de extracción.
- 13) Se abre la válvula de cierre de la salida de drenes.
- 14) Se abre la válvula de cierre de la entrada de drenes o cualquier otra válvula de entrada.
- 15) Después de que la temperatura de operación normal ha sido establecida, la válvula de cierre de drenaje de la sección de sobrecalentamiento debe ser completamente cerrada en un calentador vertical con el cabezal colocado en el extremo inferior.

III.5 PARO DE UN CALENTADOR.

- 1) Se cierra la válvula de entrada de drenes y cualquier otra conexión de entrada.
- 2) Se cierra la válvula de suministro de vapor.
- 3) Se cierra la válvula de salida de drenes.
- 4) Se continúa circulando agua de alimentación a través del lado de tubos hasta que la unidad se enfríe lo más posible.
- 5) Se abren las válvulas de paso del agua de alimentación.
- 6) Se cierran las válvulas de cierre de agua de alimentación del calentador.
- 7) Se abren todas las conexiones de drenaje incluyendo aquellas de la tubería corriente, arriba de la válvula de cierre de drenes.
- 8) Se drena la cubierta y el lado de tubos completamente para permitir el acceso para su inspección y mantenimiento.

III.6 CONTROL DE LAZO CERRADO DE LOS CALENTADORES DE B.P.

La manera de operación de los calentadores de B.P. consiste en hacer fluir agua de alimentación por el lado de tubos y calentarla mediante vapor de extracción; a cada calentador le corresponde una extracción, esto es, se hace una extracción para cada calentador.

En la siguiente figura se indica la forma de operación de los calentadores de B.P. y la manera de interconectarse uno con otro, para aprovechar al máximo el calor del vapor obtenido por medio de las extracciones hechas a la turbina de B.P.; además de dar una visión más clara del objetivo del presente trabajo en cuanto a la importancia de controlar el nivel de condensado dentro de los mismos calentadores, ya que, como se puede observar, los calentadores se encuentran conectados en cascada lo cual indica que si existe una variación en el nivel del calentador No. 4 se alterará el nivel de los calentadores 2 y 3.

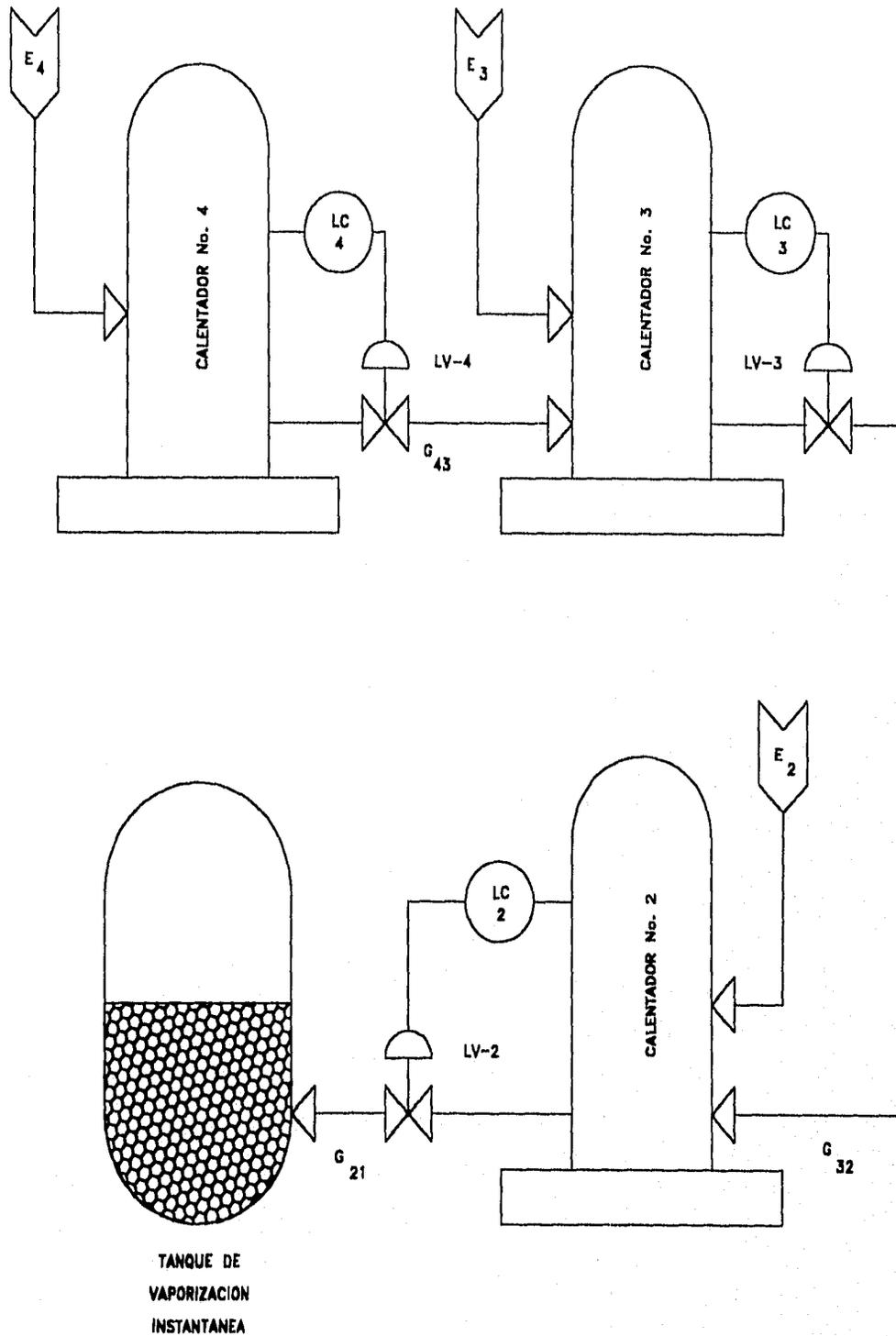


FIG.10 FORMA DE INTEROPERACION DE LOS CALENTADORES DE B.P.

C A P I T U L O

IV

M O D E L A D O Y S I M U L A C I O N

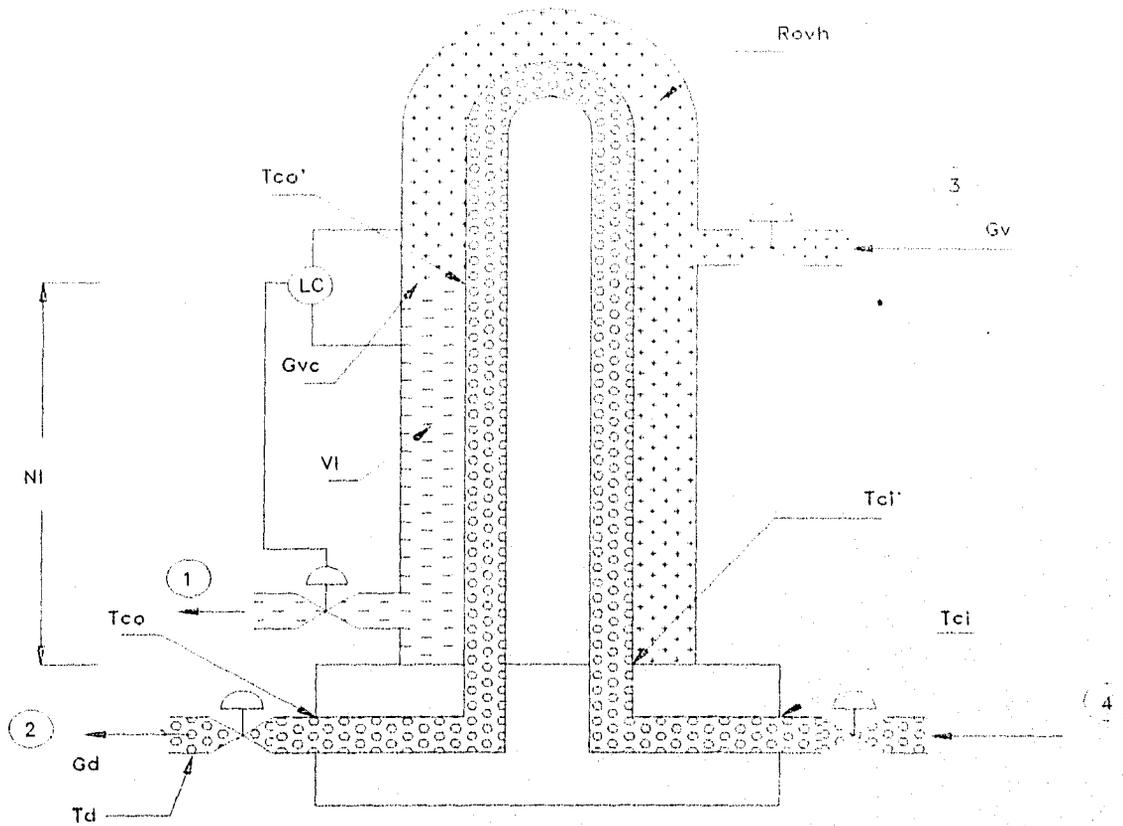
IV.1. Generalidades

El modelo matemático que se utilizará para el desarrollo del presente trabajo se tomó del estudio del comportamiento dinámico del sistema de condensado de la unidad normalizada de la Central Termoeléctrica "San Luis", trabajo realizado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas, División de Estudios de Ingeniería, Departamento de Instrumentación.

Para el cual se han tomado las siguientes consideraciones más importantes:

- a) La transferencia de calor se toma como un proceso de parámetros concentrados.
- b) El retraso del tiempo en el equipo de control es despreciable con respecto al del proceso.
- c) Se incluye en el análisis tanto el lado de tubos, como el lado del vapor de extracción utilizado para calentar el condensado.

Para ilustrar los parámetros más importantes de los calentadores de baja presión podemos basarnos en la siguiente figura.



1 SALIDA DE CONDENSADO
DEL VAPOR DE EXTRACCION

2 SALIDA DE CONDENSADO

3 ENTRADA DE VAPOR
DE EXTRACCION

4 ENTRADA DE
CONDENSADO

Fig. 11 Variables del calentador

Observando la figura 11, se tiene que las variables más importantes en la variación del nivel de los calentadores son las siguientes

- Densidad de vapor en la carcasa, ρ_{vh}
- Gasto total de condensado, GT
- Gasto de vapor, Gv
- Presión de vapor en la carcasa, P_{vh}
- Temperatura del condensado dentro de los tubos cuando sale de la zona de vapor, T_{co}'

- Temperatura del dren, T_d
- Temperatura del condensado dentro de los tubos cuando entra a la zona de vapor, T_{ci}
- Temperatura del condensado a la salida del calentador, T_{oc}
- Gasto del vapor condensado, G_{vc}
- Nivel del liquido N_i

Representando la figura 11 en un diagrama a bloques se tiene:

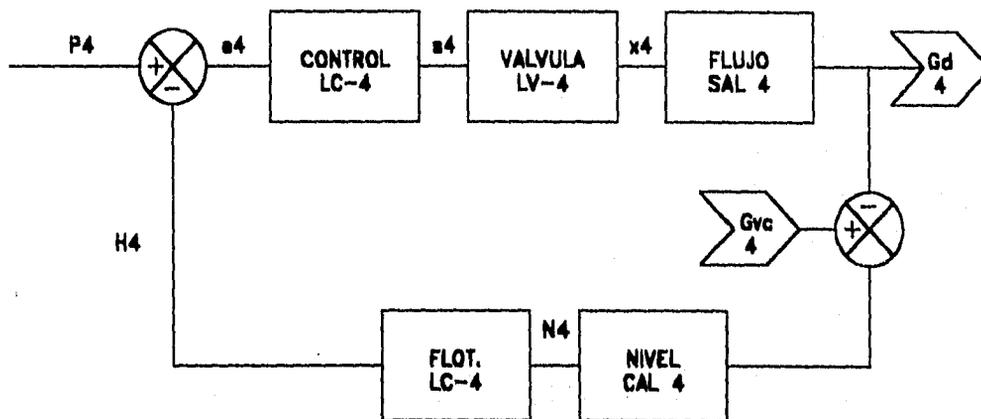


Fig. 12 Diagrama a bloques

El diagrama anterior muestra la relación del calentador con el sistema de control de nivel de condensado. En primer término existe un controlador que recibe la señal del comparador, para éste saber cual es la variación del nivel en el calentador con respecto al punto de ajuste, y así mandar una señal para abrir o cerrar la válvula de control.

Al abrirse o cerrarse la válvula se tiene una variación en el gasto de salida en el dren del calentador, el cual al sumarse con el gasto de vapor condensado (G_{vc}) de la extracción de la turbina, creando una variación en el nivel de condensado dentro del calentador, misma que es comparada con el punto de ajuste preestablecido, cerrando con esto el proceso de control.

IV.2 RELACIONES DINAMICAS PARA CALENTADORES VERTICALES

Densidad del vapor en la carcasa

$$\frac{d\rho_{hi}}{dt} = \frac{G_v - G_{vc}}{V_h - V_l} + \frac{\rho_{hi} * G_T}{\rho(V_h - V_l)} \quad \text{----- (f1)}$$

donde

$$G_T = G_{vc} + G_{d(n+1)} + G_f - G_d$$

Flujo de vapor

$$G_v^2 = \frac{2k * P_{ex} * \rho_{vh}^2 A_{sex}^2}{(k-1)(C\tau+1)\rho_{ex}} \left(1 - \frac{P_{vh}}{P_{ex}}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

donde

$$P_{vh} = P_{ex} \left(\frac{\rho_{vh}}{\rho_{ex}}\right)^k$$

P_{ex} y p_{ex} son variables de perturbación.

El nivel de los calentadores verticales está dado por

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{G_T}{\rho * A_a} \quad \text{----- (f2)}$$

Temperatura de condensado a la salida

$$\frac{dT_{co'}}{dt} = \frac{G_{vc}(h_v - h_{vc}) - G_c * C_{pl}(T_{co'} - T_{ci'})}{2 * C_{pl} * \rho_l * n_l * (L_t - N_t)} + \frac{T_{co'} * G_T}{(L_t - N_t)\rho * A_a} \quad \text{----- (f3)}$$

La temperatura del dren está representada mediante la siguiente expresión

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{1}{C_{pl} * A_a * N_l * \rho} [U_l * A_w (T_d - T_{ci'} - T_{co}) - C_{pl} * G_{vc} (T_s - T_d) - G_{d(n+1)} * C_{pl} (T_{d(n+1)} - T_d)] \quad \text{----- (f4)}$$

La temperatura con la que el condensado dentro de los tubos entra a la zona de vapor está dada por:

$$\frac{dT_{ci}}{dt} = \frac{G_c \cdot C_{pl}(T_{ci} - T_{ci}) - U_i \cdot A_u \cdot (T_d - T_{ci})}{C_{pl} \cdot \rho \cdot A_s \cdot n_i \cdot N_i} - \frac{T_{ci} \cdot G_T}{N_i \cdot \rho \cdot A_u} \quad \text{----- (f5)}$$

La temperatura con la que el condensado dentro de los tubos sale a la zona de vapor esta dada por:

$$\frac{dT_{co}}{dt} = \frac{G_c \cdot C_{pl}(T_{co} - T_{co'}) - U_i \cdot A_u \cdot (T_d - T_{co})}{C_{pl} \cdot \rho \cdot A_s \cdot n_i \cdot N_i} - \frac{T_{co} \cdot G_T}{N_i \cdot \rho \cdot A_u} \quad \text{----- (f6)}$$

El gasto de vapor condensado, esta dado por:

$$G_{vc} = \frac{U_i \cdot A_u \cdot (T_s - T_{co'})}{h_v - h_{vc}}$$

donde:

$$A_u = 2\pi \cdot D_i \cdot n_i \cdot (L_i - N_i)$$

$$U_i = U_{ev} \left(\frac{G_c}{G_{cev}} \right)^b$$

$$h_v - h_{vc} = h_{ev} - C_{pl}(T_s - 273)$$

IV.3 Obtención del modelo lineal en variables de estado del sistema.

Ya que no existen procesos generales para resolver analíticamente ecuaciones diferenciales no lineales, en la mayoría de los casos es preciso recurrir a métodos numéricos. Sin embargo, a diferencia de lo que sucede en los sistemas lineales, en los no lineales, para cada entrada y cada estado inicial se debe recurrir a los métodos numéricos a fin de encontrar la salida, porque esta no puede inferirse a partir del conocimiento de las salidas debidas a otras entradas y otros estados iniciales.

Ante la dificultad de conocer el comportamiento de un sistema no lineal bajo todas las entradas posibles y todos los estados iniciales, se trata de describir su comportamiento alrededor de una solución; esto es, que una vez conocida la salida $y^*(t)$ del sistema debida a una entrada $u^*(t)$ y un estado inicial $x^*(t_0)$ se requiere conocer la salida $y(t)$ debida a una entrada $u(t)$ "parecida" a $u^*(t)$ y un estado inicial "cercano" a $x^*(t)$.

Como se verá a continuación, es posible obtener una descripción lineal del sistema cuya salida $y^*(t)$ debida a la entrada $u^*(t) = u(t) - u^*(t)$ y el estado inicial $x^*(t_0) = x(t_0) - x^*(t_0)$ es aproximadamente igual a la diferencia $y(t) - y^*(t)$.

De esta forma

$$\mathbf{y}(t) \cong \mathbf{y}^*(t) + \mathbf{y}^-(t)$$

Considerese un sistema no-lineal, invariable con el tiempo descrito por las ecuaciones

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))]$$

$$\mathbf{y}(t) = [\mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))]$$

La función de evolución de los estados para este sistema, $\varphi(t, \mathbf{u}, \mathbf{x}_0, t_0)$, de satisfacer:

i) la ecuación diferencial

$$\partial \varphi / \partial t = \mathbf{f}(\varphi, \mathbf{u})$$

ii) la condición inicial

$$\varphi(t_0, \mathbf{u}, \mathbf{x}_0, t_0) = \mathbf{x}_0.$$

Supóngase que la evolución del estado del estado se ha determinado cuando el estado inicial es \mathbf{x}_0^* y la entrada es $\mathbf{u}^*(t)$, esto es

$$\varphi(t, \mathbf{u}^*, \mathbf{x}_0^*, t_0) = \mathbf{x}^*(t)$$

La función $\mathbf{x}^*(t)$ debe satisfacer las dos condiciones

$$d\mathbf{x}^*(t)/dt = \mathbf{f}[\mathbf{x}^*(t), \mathbf{u}^*(t)]$$

y

$$\mathbf{x}^*(t_0) = \mathbf{x}_0$$

así que

$$\mathbf{y}^*(t) = \mathbf{g}[\mathbf{x}^*(t), \mathbf{u}^*(t)]$$

Ahora si la entrada que se aplica al sistema es $\mathbf{u}(t)$ y el estado inicial es \mathbf{x}_0 , pueden definirse las nuevas funciones

$$\mathbf{u}^-(t) = \mathbf{u}(t) - \mathbf{u}^*(t)$$

y

$$\mathbf{x}_0^-(t_0) = \varphi(t, \mathbf{u}, \mathbf{x}_0, t_0) - \mathbf{x}^*(t)$$

$$\mathbf{y}_0^-(t) = \mathbf{f}(\varphi, \mathbf{u}) - \mathbf{y}^*(t)$$

Cuando las funciones f y g pueden expresarse en una serie de Taylor alrededor de $\mathbf{u}^*(t)$ y $\mathbf{x}^*(t)$, entonces las siguientes relaciones son válidas.

$\partial f / \partial \mathbf{x}$ y $\partial f / \partial \mathbf{u}$ son las formas abreviadas de escribir las matrices

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} & \frac{\partial f}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f}{\partial u_1} & \frac{\partial f}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f}{\partial u_m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} & \frac{\partial f}{\partial u_n} & \dots & \frac{\partial f}{\partial u_n} \\ \frac{\partial f}{\partial x_1} & \frac{\partial f}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial u_1} & \frac{\partial f}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f}{\partial u_m} \\ \frac{\partial f}{\partial x_1} & \frac{\partial f}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f}{\partial x_n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial f}{\partial u_n} & \frac{\partial f}{\partial u_n} & \dots & \frac{\partial f}{\partial u_n} \\ \frac{\partial f}{\partial u_1} & \frac{\partial f}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f}{\partial u_m} \end{bmatrix}$$

$$f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) = f(\mathbf{x}^*(t), \mathbf{u}^*(t)) + [\partial f / \partial \mathbf{x}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*)][(\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}^*(t))] + [\partial f / \partial \mathbf{u}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*)][(\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}^*(t))] + \dots$$

$$g(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) = g(\mathbf{x}^*(t), \mathbf{u}^*(t)) + [\partial g / \partial \mathbf{x}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*)][(\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}^*(t))] + [(\partial g / \partial \mathbf{u}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*))][(\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}^*(t))] + \dots$$

Las series que aparecen en las dos ecuaciones anteriores pueden aproximarse por los primeros términos cuando las diferencias $[\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}^*(t)]$ y $[\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}^*(t)]$ son suficientemente pequeñas, lo que equivale a decir que $\mathbf{u}(t)$ y $\mathbf{x}(t)$ son pequeñas.

Si es el caso, entonces es factible obtener un sistema lineal que describa la evolución de $\mathbf{x}^*(t)$ y $\mathbf{y}^*(t)$. Dicho proceso se denomina linealización del sistema.

A continuación se determina el modelo lineal mencionado.

Restando las ecuaciones diferenciales que satisfacen las funciones, φ y x^* se obtiene

$$\varphi^o - x^{o*} = f[\varphi, u] - f[x^*, u^*]$$

pero como $x(t) = \varphi - x^*$ y utilizando la aproximación de la expresión de $f(\varphi^*, u^*)$, se obtiene

$$x^{o-}(t) = [\partial f / \partial x(x^*, u^*)] x^-(t) + [\partial f / \partial u(x^*, u^*)] u^-(t).$$

Nótese que una vez determinada la función $x^*(t)$, los coeficientes de $x^-(t)$ y $u^-(t)$ son funciones del tiempo que no depende de $x^-(t)$. De esta manera se obtiene una ecuación del tipo $x^{o-}(t) = A(t)x^-(t) + B(t)u^-(t)$ que es lineal.

Para determinar la ecuación que satisface $y^-(t)$ se procede de manera análoga:

Restando las ecuaciones que determinan $y(t)$ y $y^*(t)$ se obtiene

$$y^-(t) = y(t) - y^*(t) = g(\varphi, u) - g(x^*, u^*)$$

y utilizando la expresión de $g(y, u)$ se logra la ecuación lineal

$$y^-(t) = [\partial g / \partial x(x^*, u^*)] x^-(t) + [\partial g / \partial u(x^*, u^*)] u^-(t)$$

que es de la forma

$$y^-(t) = C(t)x^-(t) + D(t)u^-(t).$$

Para el proceso de los calentadores de baja presión se utilizará el método de linealización visto anteriormente (explicación teórica) para la obtención de las ecuaciones de estado

$$x^-(t) = Ax^-(t) + Bu^-(t)$$

$$y^-(t) = Cx^-(t) + Du^-(t)$$

donde:

$x(t)$: es el vector de estado del sistema y es de dimensión 6

$u(t)$: es el vector de entradas aplicadas al sistema y es de dimensión 1

$y(t)$: es el vector de salidas producidas por el sistema y es de dimensión 1

A, B, C, D: son las matrices de coeficientes constantes y son de orden 6x6, 6x1, 1x6, 1x1, respectivamente.

Las ecuaciones anteriores son la representación matemática que define el comportamiento de los sistemas dinámicos lineales, continuos, de parámetros concentrados e invariantes con el tiempo en el espacio de estados.

** Tomado integro del libro "Análisis de Sistemas Dinámicos y Control Automático" del autor R. Canales Ruiz. y R. Barrera Rivera.

Regresando a nuestro sistema observamos que las variables de estado que forman el vector \underline{x} son ρ_{vh} , N_l , T_{co} , T_d , T_{ci} y T_{co} .

En tanto que el vector de entradas al sistema tiene solo un elemento que es el gasto de condensado (G_c).

El vector de salidas tiene como unico elemento al nivel de condensado dentro de la carcasa (N_l).

Esto es:

$$\begin{aligned} \underline{x} &= [\rho_{vh} \ N_l \ T_{co} \ T_d \ T_{ci} \ T_{co}] \\ \underline{u} &= [G_c] \\ \underline{Y} &= [N_l] \end{aligned}$$

La obtención de la matriz "A" se hace a partir de hacer la derivación parcial de cada una de las ecuaciones que contengan las variables de estado. Dicha matriz sera de orden 6x6, en donde :

$$A_{11} = \left. \frac{\partial \dot{q}_1}{\partial \rho_{vh}} \right|_{x^*}$$

en donde x^* es el punto de operación alrededor del cual se va a linealizar.

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{\left(\frac{2k * P_{ex} * \rho_{vh}^2 * AS_{ex}^2}{(k-1)(C\tau+1)\rho_{ex}} \right) \left(\frac{k-1}{-k} \left(\frac{\rho_{vh}}{\rho_{ex}} \right)^k \right)^{\frac{k-2}{k}} \left(\frac{k * \rho_{vh}}{\rho_{ex}} \right)^{k-1} \left(\frac{\rho_{ex}}{\rho_{ex}^2} \right)}{2 \left(\left(\frac{2k * P_{ex} * \rho_{vh}^2 * AS_{ex}^2}{(k-1)(C\tau+1)\rho_{ex}} \right) \left(1 - \left(\frac{\rho_{vh}}{\rho_{ex}} \right)^k \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)^{\frac{1}{2}}} + \\ &+ \left(1 - \left(\frac{\rho_{vh}}{\rho_{ex}} \right)^k \right)^{\frac{k-1}{k}} \left(\frac{4k * P_{ex} * \rho_{vh} * AS_{ex}^2}{(k-1)(C\tau+1)\rho_{ex}} \right) \end{aligned}$$

$$A_{12} = \left. \frac{\partial \dot{q}_1}{\partial N_l} \right|_{x^*}$$

$$A_{12} = \frac{U_i(2\pi * D_i * n_i')(T_{co}' - T_s)}{h_v - h_{vc}}$$

$$A_{13} = \left. \frac{\partial \dot{q}_1}{\partial T_{co}'} \right|_{x^*}$$

$$A_{13} = \frac{U_i(2\pi * D_i * n_i' * T_s)}{h_v - h_{vc}}$$

$$\Lambda_{14} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}_1}{\partial T_d} \right|_{X^*}$$

$$\Lambda_{14} = 0$$

$$\Lambda_{15} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}_1}{\partial T_{cf}} \right|_{X^*}$$

$$\Lambda_{15} = 0$$

$$\Lambda_{16} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}_1}{\partial T_{co}} \right|_{X^*}$$

$$\Lambda_{16} = 0$$

$$\Lambda_{21} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}_2}{\partial \rho_{nl}} \right|_{X^*}$$

$$\Lambda_{21} = 0$$

$$\Lambda_{22} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}_2}{\partial N_l} \right|_{X^*}$$

$$\Lambda_{22} = \frac{U_l * 2\pi * D_l * n_l'}{\rho_l * \Lambda_{a'}(h\nu - h\nu_c)} (T_{co}' - T_s)$$

$$\Lambda_{23} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}_2}{\partial T_{co}} \right|_{X^*}$$

$$\Lambda_{23} = \frac{U_l * 2\pi * D_l * n_l'}{\rho_l * \Lambda_{a'}(h\nu - h\nu_c)} (N_l - L_l')$$

$$\Lambda_{24} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}_2}{\partial T_d} \right|_{X^*}$$

$$\Lambda_{24} = 0$$

$$\Lambda_{25} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}_2}{\partial T_{cf}} \right|_{X^*}$$

$$\Lambda_{25} = 0$$

$$A_{20} = \left. \frac{\partial J_2}{\partial T_{co}} \right|_X$$

$$A_{20} = 0$$

$$A_{31} = \left. \frac{\partial J_3}{\partial \rho_{th}} \right|_X$$

$$A_{31} = 0$$

$$A_{32} = \left. \frac{\partial J_3}{\partial N_l} \right|_X$$

$$A_{32} = \frac{U_l \cdot \pi \cdot D_l \cdot L_l (T_{co}' - T_s)}{C_{pl} \cdot \rho_l (L_l - N_l)^2} + \frac{U_l \cdot 2 \pi \cdot D_l \cdot n_l' \cdot T_{co}' (L_l - L_l \cdot T_s - N_l + N_l \cdot T_{co}')}{\Lambda_{a'} \cdot \rho_l (L_l - N_l)^2}$$

$$A_{33} = \left. \frac{\partial J_3}{\partial T_{co}'} \right|_X$$

$$A_{33} = \frac{U_l \cdot \pi \cdot D_l (N_l - L_l)}{C_{pl} \cdot \rho_l (L_l - N_l)} - \frac{G_c}{2 \rho_l \cdot n_l' (L_l - N_l)} + \frac{U_l \cdot 2 \pi \cdot D_l \cdot n_l'}{(h_v - h_{vc})(L_l - N_l) \rho_l \cdot \Lambda_{a'}} \cdot$$

$$* (L_l \cdot T_s - 2 L_l \cdot T_{co}' - N_l \cdot T_s + 2 N_l \cdot T_{co}') + \frac{G_{d(n+1)}}{(L_l - N_l) \rho_l \cdot \Lambda_{a'}} - \frac{G_d}{(L_l - N_l) \rho_l \cdot \Lambda_{a'}}$$

$$A_{34} = \left. \frac{\partial J_3}{\partial T_d} \right|_X$$

$$A_{34} = 0$$

$$A_{35} = \left. \frac{\partial J_3}{\partial T_{cl}'} \right|_X$$

$$A_{35} = \frac{G_c}{2 \rho_l \cdot n_l' (L_l - N_l)}$$

$$A_{36} = \left. \frac{\partial J_3}{\partial T_{co}} \right|_X$$

$$A_{36} = 0$$

$$A_{41} = \left. \frac{\partial J_4}{\partial \rho_{th}} \right|_X$$

$$A_{41} = 0$$

$$A_{42} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}_4}{\partial N_l} \right|_X$$

$$A_{42} = \frac{U_l \cdot A_{ll} \cdot T_d}{C_{pl} \cdot A_{a'} \cdot N_l^2 \cdot \rho_l} + \frac{U_l \cdot A_{ll} \cdot T_{cl'}}{C_{pl} \cdot A_{a'} \cdot N_l^2 \cdot \rho_l} + \frac{U_l \cdot A_{ll} \cdot T_{co}}{C_{pl} \cdot A_{a'} \cdot N_l^2 \cdot \rho_l} + \frac{G_{d(n-1)} \cdot C_{pl} \cdot T_{d(n-1)}}{C_{pl} \cdot A_{a'} \cdot N_l^2 \cdot \rho_l} +$$

$$+ \frac{C_{pl} \cdot T_d \cdot G_{d(n-1)}}{C_{pl} \cdot A_{a'} \cdot N_l^2 \cdot \rho_l} +$$

$$+ \frac{\left(T_d \cdot U_l \cdot 2\pi \cdot D_l \cdot n_l' (L_l' \cdot T_s - L_l' \cdot T_{co'} - N_l \cdot T_s + N_l \cdot T_{co}) \frac{A_{a'} \cdot \rho_l}{h\nu - h\nu_c} \right)}{(A_{a'} \cdot N_l \cdot \rho_l)^2} +$$

$$+ \frac{(T_d \cdot U_l \cdot 2\pi \cdot D_l \cdot n_l') (-T_s + T_{co}) \left(\frac{A_{a'} \cdot N_l \cdot \rho_l}{(h\nu - h\nu_c)} \right)}{(A_{a'} \cdot N_l \cdot \rho_l)^2}$$

$$- \frac{\left(T_s \cdot U_l \cdot 2\pi \cdot D_l \cdot n_l' (L_l' \cdot T_s - L_l' \cdot T_{co'} - N_l \cdot T_s + N_l \cdot T_{co}) \frac{A_{a'} \cdot \rho_l}{h\nu - h\nu_c} \right)}{(A_{a'} \cdot N_l \cdot \rho_l)^2} +$$

$$+ \frac{(T_s \cdot U_l \cdot 2\pi \cdot D_l \cdot n_l') (-T_s + T_{co}) \left(\frac{A_{a'} \cdot N_l \cdot \rho_l}{(h\nu - h\nu_c)} \right)}{(A_{a'} \cdot N_l \cdot \rho_l)^2}$$

$$A_{43} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}_4}{\partial T_{co'}} \right|_X$$

$$A_{43} = \frac{T_s \cdot U_l \cdot 2\pi \cdot D_l \cdot n_l' \cdot L_l}{A_{a'} \cdot N_l \cdot \rho_l} - \frac{T_d \cdot U_l \cdot 2\pi \cdot D_l \cdot n_l' \cdot L_l}{A_{a'} \cdot N_l \cdot \rho_l} \frac{h\nu - h\nu_c}{h\nu - h\nu_c}$$

$$A_{44} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}_4}{\partial T_d} \right|_X$$

$$A_{44} = \frac{U_l \cdot A_{ll}}{C_{pl} \cdot A_{a'} \cdot N_l \cdot \rho_l} + \frac{\frac{U_l \cdot 2\pi \cdot D_l \cdot n_l' (L_l' \cdot T_s - L_l' \cdot T_{co'} - N_l \cdot T_s + N_l \cdot T_{co})}{(h\nu - h\nu_c)}}{(A_{a'} \cdot N_l \cdot \rho_l)}$$

$$- \frac{G_{d(n+1)}}{A_{a'} \cdot N_l \cdot \rho_l}$$

$$A_{45} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}_4}{\partial T_{cl'}} \right|_X$$

$$\Lambda_{45} = -\frac{U_i \cdot \Lambda_{ii'}}{C_{pi} \cdot \Lambda_{a'} \cdot N_i \cdot \rho_i}$$

$$\Lambda_{46} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}^4}{\partial T_{co}} \right|_{X^*}$$

$$\Lambda_{46} = -\frac{U_i \cdot \Lambda_{ii'}}{C_{pi} \cdot \Lambda_{a'} \cdot N_i \cdot \rho_i} - \frac{T_s \cdot U_i \cdot 2\pi \cdot D_i \cdot n_i' \cdot N_i}{\Lambda_{a'} \cdot N_i \cdot \rho_i} - \frac{T_d \cdot U_i \cdot 2\pi \cdot D_i \cdot n_i' \cdot N_i}{\Lambda_{a'} \cdot N_i \cdot \rho_i}$$

$$\Lambda_{51} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}^5}{\partial \rho_{ii}} \right|_{X^*}$$

$$\Lambda_{51} = 0$$

$$\Lambda_{52} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}^5}{\partial N_i} \right|_{X^*}$$

$$\Lambda_{52} = -\frac{G_c \cdot C_{pi} \cdot T_{ci'} - C_{pi} \cdot T_{ci} - U_i \cdot \Lambda_{ii'} \cdot T_d - U_i \cdot \Lambda_{ii'} \cdot T_{co} (C_{pi} \cdot \rho_i \cdot \Lambda_s \cdot n_i')}{(C_{pi} \cdot \rho_i \cdot \Lambda_s \cdot n_i' \cdot N_i)^2} - \frac{N_i \cdot \rho_i \cdot \Lambda_{a'} \left(\frac{U_i \cdot 2\pi \cdot D_i \cdot n_i'}{h_v - h_{ve}} \right) T_s \cdot T_{ci} - \frac{T_{ci'} \cdot U_i \cdot 2\pi \cdot D_i \cdot n_i'}{h_v - h_{ve}} (L_{i'} \cdot T_s - L_{i'} \cdot T_{co'} - N_i \cdot T_s + N_i \cdot T_{co})}{(N_i \cdot \rho_i \cdot \Lambda_{a'})^2}$$

$$\Lambda_{53} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}^5}{\partial T_{co'}} \right|_{X^*}$$

$$\Lambda_{53} = \frac{T_{ci'} \cdot U_i \cdot 2\pi \cdot D_i \cdot n_i' (L_{i'} \cdot T_s - L_{i'} - N_i \cdot T_s + N_i)}{h_v - h_{ve} (N_i \cdot \rho_i \cdot \Lambda_{a'})}$$

$$\Lambda_{54} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}^5}{\partial T_d} \right|_{X^*}$$

$$\Lambda_{54} = \frac{G_c \cdot C_{pi} \cdot T_{ci'} - C_{pi} \cdot T_{ci} - U_i \cdot \Lambda_{ii'} - U_i \cdot \Lambda_{ii'} \cdot T_{ci'} (C_{pi} \cdot \rho_i \cdot \Lambda_s \cdot n_i')}{(C_{pi} \cdot \rho_i \cdot \Lambda_s \cdot n_i' \cdot N_i)^2}$$

$$\Lambda_{55} = \left. \frac{\partial \mathcal{J}^5}{\partial T_{ci'}} \right|_{X^*}$$

$$\Lambda_{55} = \frac{G_c}{\rho_i \cdot \Lambda_s \cdot n_i' \cdot N_i} - \frac{\left(\frac{U_i \cdot 2\pi \cdot D_i \cdot n_i'}{h_v - h_{ve}} \right) (L_{i'} \cdot T_s - L_{i'} \cdot T_{co'} - N_i \cdot T_s + N_i \cdot T_{co'})}{(N_i \cdot \rho_i \cdot \Lambda_{a'})}$$

$$A_{50} = \frac{\partial \mathcal{J}_5}{\partial T_{co}} \Big|_X$$

$$A_{50} = 0$$

$$A_{61} = \frac{\partial \mathcal{J}_6}{\partial \rho_{th}} \Big|_X$$

$$A_{61} = 0$$

$$A_{62} = \frac{\partial \mathcal{J}_6}{\partial N_l} \Big|_X$$

$$A_{62} = - \frac{G_c \cdot C_{pl} \cdot T_{co} - C_{pl} \cdot T_{co'} - U_l' \cdot A_{ll'} \cdot T_d - U_l' \cdot A_{ll'} \cdot T_{co} (C_{pl} \cdot \rho_l \cdot A_s \cdot n_l')}{(C_{pl} \cdot \rho_l \cdot A_s \cdot n_l' \cdot N_l)^2} \\ - \frac{N_l \cdot \rho_l \cdot A_a' \left(\frac{U_l \cdot 2\pi \cdot D_l \cdot n_l'}{h_v - h_{ve}} \right) T_s \cdot T_{co'} - \frac{T_{co} \cdot U_l \cdot 2\pi \cdot D_l \cdot n_l'}{h_v - h_{ve}} (L_l' \cdot T_s - L_l' \cdot T_{co'} - N_l \cdot T_s + N_l \cdot T_{co})}{(N_l \cdot \rho_l \cdot A_a')^2}$$

$$A_{63} = \frac{\partial \mathcal{J}_6}{\partial T_{co'}} \Big|_X$$

$$A_{63} = \frac{C_{pl}^2 \cdot \rho_l \cdot A_s \cdot n_l' \cdot N_l \cdot G_c \cdot C_{pl} \cdot T_{co} - C_{pl} - U_l' \cdot A_{ll'} \cdot T_d - U_l' \cdot A_{ll'} \cdot T_{co}}{(C_{pl} \cdot \rho_l \cdot A_s \cdot n_l' \cdot N_l)^2}$$

$$A_{64} = \frac{\partial \mathcal{J}_6}{\partial T_d} \Big|_X$$

$$A_{64} = \frac{G_c \cdot C_{pl} \cdot T_{co} - C_{pl} \cdot T_{co'} - U_l' \cdot A_{ll'} - U_l' \cdot A_{ll'} \cdot T_{co} (C_{pl} \cdot \rho_l \cdot A_s \cdot n_l')}{(C_{pl} \cdot \rho_l \cdot A_s \cdot n_l' \cdot N_l)^2}$$

$$A_{65} = \frac{\partial \mathcal{J}_6}{\partial T_{cl'}} \Big|_X$$

$$A_{65} = 0$$

$$A_{66} = \frac{\partial \mathcal{J}_6}{\partial T_{co}} \Big|_X$$

$$A_{66} = \frac{G_c \cdot C_{pl} - U_l' \cdot A_{ll'}}{C_{pl} \cdot \rho_l \cdot A_s \cdot n_l' \cdot N_l} - \left(\frac{U_l \cdot 2\pi \cdot D_l \cdot n_l'}{h_v - h_{ve}} \right) (L_l' \cdot T_s - L_l' \cdot T_{co'} - N_l \cdot T_s + N_l \cdot T_{co})$$

Evaluando las ecuaciones anteriores (ver valores en el apéndice "C"), y sustituyendo en:

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix}$$

obtenemos los valores de la matriz "A", esto es:

$$[A] = \begin{bmatrix} -2.9310e3 & 1.5562 & 49.6298 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9778 & -0.2473 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -9.5675e6 & -44.3129 & 0 & 0.0050 & 0 \\ 0 & 5.5913e5 & 1.1658 & 2.1987e3 & -2.2004e3 & -2.2012e3 \\ 0 & 2.9172e6 & 1.2691e4 & -1.3796e6 & 14.6943 & 0 \\ 0 & 1.5358e6 & -3.3542e6 & -1.5377e6 & 0 & -2.4829e4 \end{bmatrix}$$

De igual forma se obtiene la matriz "B":

$$B_{11} = \left. \frac{\partial J_1}{\partial T_c} \right|_{X^*}$$

$$B_{11} = \frac{G_{cvc} \cdot b \left(\frac{G_c}{G_{cvc}} \right)^{b-1} \cdot A_{11} \cdot (T_s - T_{co'})}{h_v - h_{vc}}$$

$$B_{21} = \left. \frac{\partial J_2}{\partial T_c} \right|_{X^*}$$

$$B_{21} = 0$$

$$B_{31} = \left. \frac{\partial J_3}{\partial T_c} \right|_{X^*}$$

$$B_{31} = \frac{T_{co'} - T_{ci'}}{2\rho_i \cdot n_{1i} \cdot (L_i - N_i)}$$

$$B_{41} = \frac{\mathcal{Q}'_4}{\alpha_{Te}} \Big|_{X^*}$$

$$B_{41} = 0$$

$$B_{51} = \frac{\mathcal{Q}'_5}{\alpha_{Te}} \Big|_{X^*}$$

$$B_{51} = \frac{T_{ci}' - T_{ci}}{\rho \cdot A_s \cdot m' \cdot N_i}$$

$$B_{61} = \frac{\mathcal{Q}'_6}{\alpha_{Te}} \Big|_{X^*}$$

$$B_{61} = \frac{T_{co} - T_{co}'}{\rho \cdot A_s \cdot m' \cdot N_i}$$

Evaluando las ecuaciones anteriores y sustituyendo en:

$$[B] = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \\ B_{31} \\ B_{41} \\ B_{51} \\ B_{61} \end{bmatrix}$$

obtenemos los valores de la matriz "B", esto es:

$$[B] = \begin{bmatrix} -2.8795e3 \\ 0 \\ 0.0057 \\ 0 \\ 4.8630 \\ -1.6210 \end{bmatrix}$$

Y la matriz "C" está dada por:

$$[C] = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Teniendo que la función de transferencia se puede obtener a partir de las matrices A,B,C,D con la siguiente expresión:

$$H(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s + 2.93e3 & -1.5562 & -49.629 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s - 0.978 & 0.2473 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 9.568e6 & s + 44.313 & 0 & -0.0050 & 0 \\ 0 & -5.591e5 & -1.1658 & s - 2.2e3 & 2.20e3 & 2.2e3 \\ 0 & -2.917e6 & -1.269e4 & 1.38e6 & s - 14.69 & 0 \\ 0 & -1.536e6 & 3.354e6 & 1.538e6 & 0 & s + 2.483e4 \end{bmatrix}^{-1} *$$

$$* \begin{bmatrix} -2.8795e3 \\ 0 \\ 0.0057 \\ 0 \\ 4.8630 \\ -1.6210 \end{bmatrix}$$

Haciendo las operaciones con las matrices, la función de transferencia obtenida es:

$$H(s) = \frac{-36s^3 - 9065824s^2 + 13.34e12s + 3.124e14}{-6e9s^4 - 94640e9s^3 - 209.641e15s^2 + 2.14e20s + 5.223e23}$$

Normalizando ambos polinomios de la función de transferencia, tenemos:

$$H(s) = \frac{s^3 + 251828.4s^2 - 3.71e11s - 8.7e12}{s^4 + 15.77e3s^3 + 34.94e6s^2 - 3.567e10s - 8.705e13}$$

Obteniendo las raíces del numerador tenemos:

$$\begin{aligned} Z_1 &= 4.885e7 \\ Z_2 &= -8.674e4 \\ Z_3 &= 7.574e4 \\ Z_4 &= -1.141e4 \\ Z_5 &= -2.931e3 \end{aligned}$$

donde Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 y Z_5 son los ceros del sistema

Analogamente, obteniendo las raíces del denominador, se conoce la ubicación de los polos.

$P_1 = -8.706e4$
 $P_2 = 7.585e4$
 $P_3 = -1.141e4$
 $P_4 = -20931e3$
 $P_5 = -1.5595e3$
 $P_6 = 1.5168e4$

A partir de este modelo lineal se evaluarán 2 técnicas de control, a saber:

- 1.-Realimentación del estado sin estimación (observación) del estado.
- 2.-Realimentación de la salida mediante un observador de orden completo.

Para llevar a cabo esto es necesario primero verificar la controlabilidad y observabilidad del sistema $S = \{A, B, C\}$.

Después de hacer las pruebas mencionadas y la simulación del sistema, se llega a la conclusión de que el modelo lineal que se obtuvo no es confiable, debido a:

- 1.-Las variables que intervienen en el modelo están fuertemente acopladas.
- 2.-El modelo lineal no es controlable ya que $R(P)=2$ y para tener controlabilidad completa se debe de cumplir que $R(P)=6$ (rango de la matriz P), esto es:

$$P = [B \quad AB \quad A^2B \quad A^3B \quad A^4B \quad A^5B]$$

- 3.-El modelo lineal no es observable debido a que $R(Q)=3$ y para tener observabilidad completa se debe de cumplir que $R(Q)=6$ (rango de la matriz Q), esto es:

$$Q = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ CA^4 \\ CA^5 \end{bmatrix}$$

Q=matriz de observabilidad

- 4.-Este es altamente sensible a variaciones en los parámetros del propio sistema.

Por lo anterior se optó retomar el modelo no lineal original y elegir los parámetros del controlador con base en la técnica que se presenta a continuación.

Primeramente se dará una explicación breve de controladores PID y sintonización

IV.5 Controladores y sintonización

Los controladores PID han sido utilizados a nivel industrial durante casi 60 años con gran éxito en la mayoría de los problemas que se presentan en plantas de procesos industriales.

Aún hoy en día con las facilidades que se obtienen con la implantación de algoritmos de control en forma digital, muchos lazos a nivel industrial están siendo controlados con versiones discretas del controlador PID básico.

Controladores PID en tiempo continuo

Considérese un sistema de control con la topología mostrada en la siguiente figura:

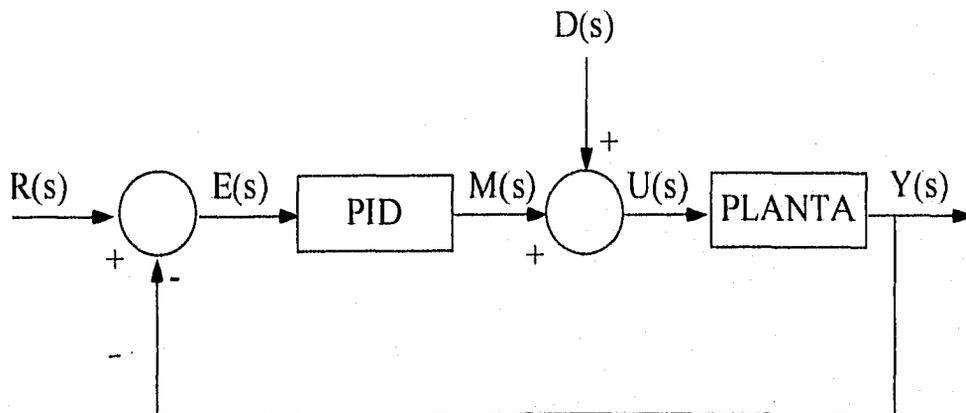


Fig. 13 Diagrama de un controlador PID

donde:

$R(s)$: Es la señal de referencia o punto de ajuste (set point)

$E(s)$: Es la señal de error

$M(s)$: Es la señal de salida del controlador

$D(s)$: Es la señal de perturbación

$U(s)$: Es la señal o variable de control (variable manipulada)

$Y(s)$: Es la señal de salida (variable controlada)

La planta o proceso a ser controlada está caracterizada mediante una función de transferencia, que en general puede ser de cualquier orden, siendo en este caso $G(s)$

El controlador PID en este caso, puede tener la estructura ideal que a continuación se describe.

La estructura ideal está caracterizada mediante la relación entrada-salida:

donde:

$$M(s) = Kc \left[1 + \frac{1}{Tis} + Tds \right] E(s)$$

Kc : Es la constante del modo proporcional

Ti : Es el tiempo del modo integral

Td : Es el tiempo del modo derivativo

El diagrama de bloques queda en este caso como:

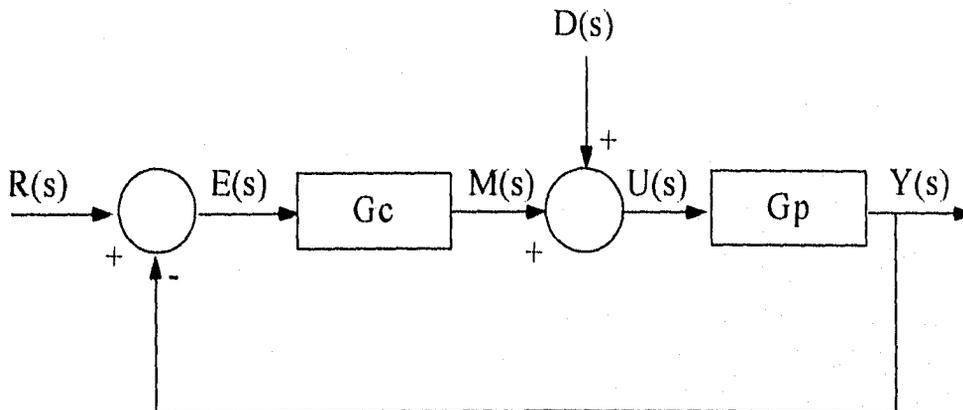


Fig. 14 Diagrama de un controlador con estructura ideal

donde

$$Gc(s) = Kc \left[1 + \frac{1}{Tis} + Tds \right]$$

IV.6 Metodos de sintonización

El proceso de sintonización de controladores, consiste en ajustar los parámetros del controlador para producir una respuesta de lazo cerrado deseada. La sintonización de lazo de control es análogo al procedimiento que se sigue al afinar la máquina de un automóvil o al de ajuste (sintonización) de una televisión. La sintonización de un controlador proporcional integral derivativo (PID o controlador de tres modos), presenta algunas dificultades puesto que son tres los parámetros que se deben ajustar; la ganancia (Kc), el tiempo integral (Ti) y el tiempo derivativo (Td). El ajuste de los parámetros del controlador se puede llevar a cabo para satisfacer un juego de especificaciones de diseño, éste es quizá uno de los procedimientos que mayor dificultad, puesto que son tres los parámetros a ajustar y necesariamente sería un procedimiento de prueba y error. Otra forma

alternativa de hacerlo sería mediante la técnica de CONTORNOS DE LAS RAICES, que es la misma del Lugar Geométrico de las Raíces pero con variación múltiple de parámetros.

Por otra parte, existen algunos procedimientos estándar, que están basados en criterios para minizar la función de error de varias maneras distintas. Es necesario mencionar que los resultados que se obtienen al aplicar estos procedimientos, son los parámetros óptimos, sin embargo, sólo dan una indicación de los parámetros iniciales (base) y a partir de éstos es todavía necesario hacer un ajuste de los mismos en caso de no obtener la respuesta de lazo cerrado deseada. A continuación se mencionan los procedimientos de uso frecuente, siendo éstos:

- Método de oscilaciones sostenidas (Ziegler-Nichols)
- Método de oscilaciones amortiguadas
- Método de la curva de reacción
- Cohen-Coon
- Criterios de desempeño

Para nuestro caso se empleará el método de oscilaciones sostenidas.

IV.7 Método de oscilaciones sostenidas (Ziegler-Nichols)

En este método los parámetros del controlador se calculan a partir de las características dinámicas del proceso a controlar. Estas características son representadas por la "ganancia límite (de un controlador proporcional) y el período de oscilación, esto es, el sistema (proceso) se retroalimenta con un controlador proporcional, de acuerdo a la siguiente figura:

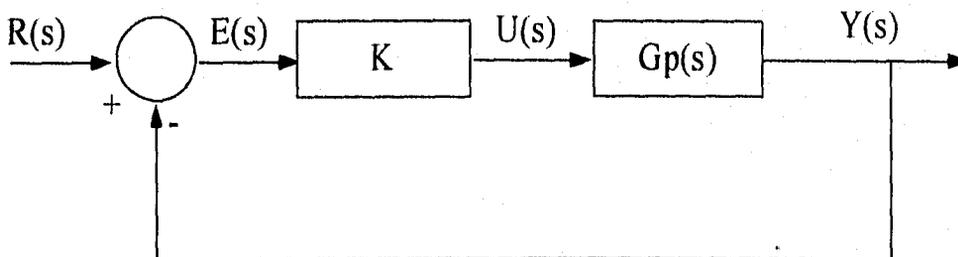
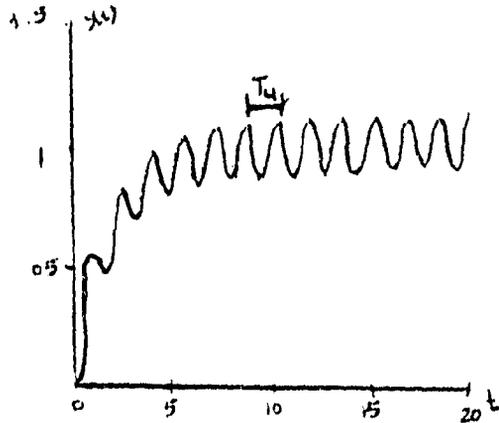


Fig. 15 Diagrama de un controlador con el método de oscilaciones sostenidas (Ziegler-Nichols)

La ganancia del controlador proporcional se varía (incrementa) hasta que el sistema realimentado presenta oscilaciones sostenidas y se evalúa el período de oscilación, es decir, la respuesta escalón de lazo cerrado es de la forma:



donde, las características dinámicas del proceso son:

K_u : Es el valor de K para el cual el sistema realimentado presenta oscilaciones sostenidas.

T_u : Es el período de oscilación de la señal de salida del sistema en segundos

Las fórmulas de sintonización son en este caso:

Tipo de controlador	K_c	T_i	T_d
P	$\frac{K_u}{2}$		
PI	$\frac{K_u}{2.2}$	$\frac{T_u}{1.2}$	
PID	$\frac{K_u}{1.7}$	$\frac{T_u}{2}$	$\frac{T_u}{8}$

Para la simulación del sistema no lineal, en el volumen de masas, se tiene una suma algebraica que esta representada por un lado, por el flujo de entrada, es decir, el flujo de vapor de extracción que se condensa, más el flujo de drenaje del calentador posterior, y por otro lado, el flujo de salida representado por el drenaje del mismo calentador.

$$G_T = G_{vc} + G_{d(n+1)} - G_d$$

En el caso del calentador 4, solo se considera para este balance el vapor que se condensa (entrada) y el drenaje al calentador 3 (salida), pues al calentador 4 no llega ningún drenaje.

El nivel se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{Gr}{\Lambda_w \cdot \rho}$$

El cálculo del drenaje depende de la apertura de la válvula (valor que es calculado por las gráficas de flujo figura 16, válvula del calentador 2, figura 17, válvula del calentador 3, y figura 18, válvula del calentador 4 estas gráficas representan, cada vez que la apertura se incrementa el valor del gasto se incrementa también, esto debido al incremento del Cv de la válvula, la gravedad específica, y la diferencia de presiones como se muestra en el apéndice A, obteniendo esto, para varios valores de apertura se obtiene la tabla de puntos, para después obtener la gráfica correspondiente y con el método de Gauss-Jordan el polinomio característico correspondiente a cada válvula de cada uno de los calentadores.) y también depende de la diferencia de presiones cuyo cálculo está contenido en las siguientes expresiones:

$$G_d = \frac{(2.4008 \times 10^{-5}) * C_{vmax} * X * \rho * Raiz}{\sqrt{FLP}}$$

en donde:

$$Raiz = \sqrt{\frac{P_d - P_v}{0.96}}$$

$$P_d = P_h + 981 * L_t * 0.96 + 9.81 * N_i * 0.96$$

$$FLP = \frac{P_{dc} - P_v}{P_{dc} - P_{ds}} + \frac{Kc}{2.14 * 10^{10} D_t^2} C_{vmax}^2 * X^2$$

De las figuras 16, 17 y 18 obtenemos el polinomio característico de la válvula, para ser utilizado en la simulación, de acuerdo con lo visto en la figura 12.

IV.8 Simulación y ajustes óptimos

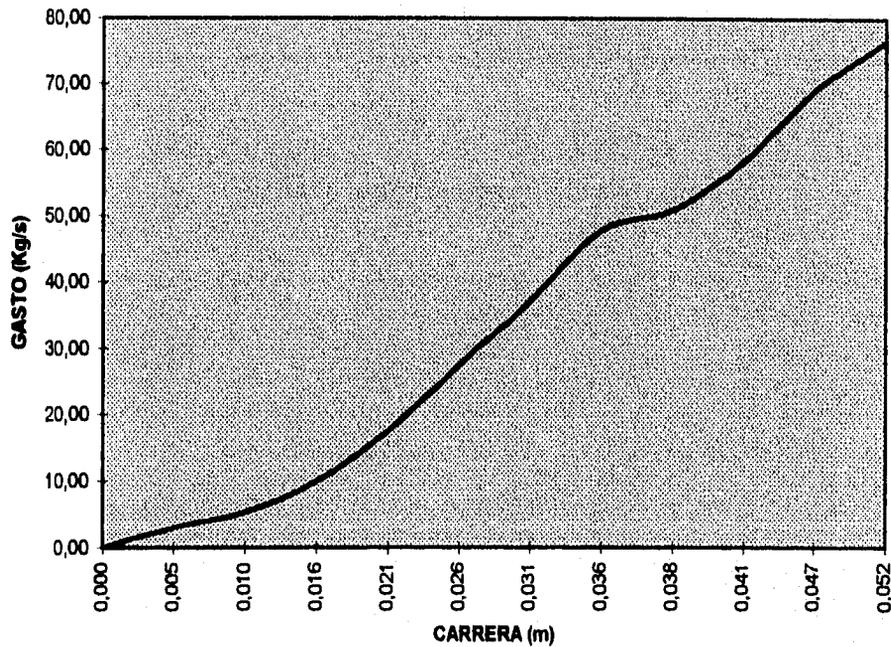
El control de nivel en los calentadores de baja presión se lleva a cabo mediante el uso de controladores PID. La sintonía óptima de estos se logra utilizando el criterio de Ziegler-Nichols, el cual hace uso de la sensibilidad última (Kc).

Con las ecuaciones anteriores se consiguió encontrar la sensibilidad última (Kc) lo cual se logra dando un disturbio escalón en G_{d2} y G_{d3} (gastos de drenaje 2 y 3) dando diferentes valores de banda proporcional y manteniendo la acción integral inhibida hasta encontrar un valor de ganancia K_u tal, que el nivel en el calentador presente una oscilación permanente con amplitud constante.

TABLA PARA LA OBTENCION DE LA CURVA CARACTERISTICA DE LV-427 (CAL 2)

x (%)	x (m)	cv (%)	cv gal/min	Q (Kg/min)	Q (Kg/s)
0	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,005	4,00	16,40	183,89	3,06
20	0,010	7,00	28,70	321,81	5,36
30	0,016	13,00	53,30	597,84	9,96
40	0,021	23,00	94,30	1057,36	17,62
50	0,026	36,00	147,60	1655,00	27,58
60	0,031	48,50	198,85	2229,65	37,16
70	0,036	62,50	256,25	2873,26	47,89
73	0,038	66,50	272,65	3067,15	50,95
80	0,041	76,00	311,60	3493,89	58,23
90	0,047	90,00	369,00	4137,50	68,96
100	0,052	100,00	410,00	4597,22	76,62

CURVA CARACTERISTICA LV-427 (CAL 2)



El polinomio característico es:

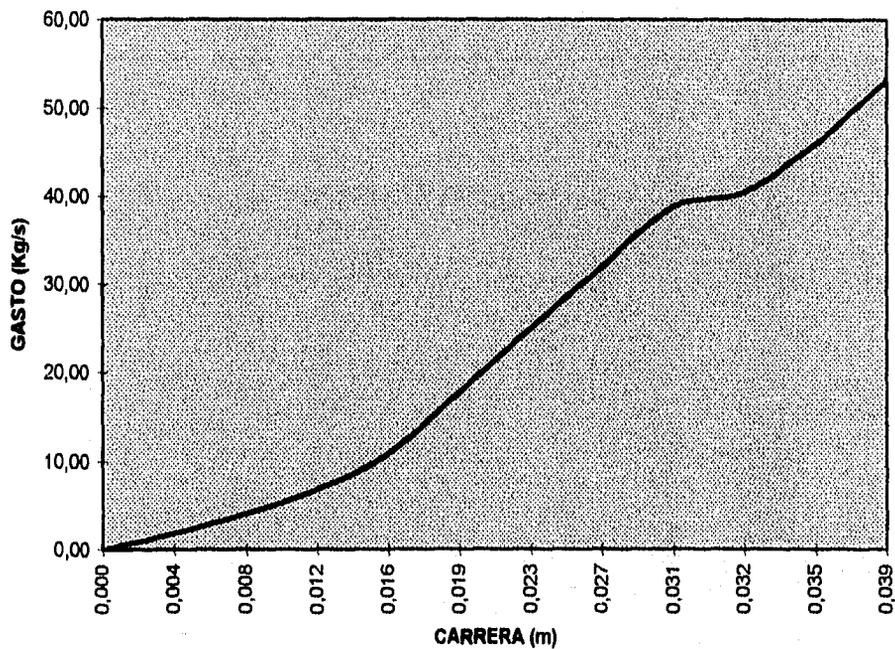
$$-361093,9X^3 + 39136,25X^2 - 254,2278X + 0,979 = 0$$

Fig. 16 Características válvula LV-427

TABLA PARA LA OBTENCION DE LA CURVA CARACTERISTICA DE LV-421 (CAL 3)

x (%)	x (m)	cv (%)	cv gal/min	Q (Kg/min)	Q (Kg/s)
0	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,004	3,50	8,40	111,70	1,86
20	0,008	7,80	18,72	248,94	4,15
30	0,012	13,00	31,20	414,89	6,91
40	0,016	20,50	49,20	654,26	10,90
50	0,019	33,50	80,40	1069,15	17,82
60	0,023	47,00	112,80	1500,00	25,00
70	0,027	60,00	144,00	1914,89	31,91
80	0,031	73,00	175,20	2329,79	38,83
82,5	0,032	76,00	182,40	2425,53	40,43
90	0,035	86,50	207,60	2760,64	46,01
100	0,039	100,00	240,00	3191,49	53,19

CURVA CARACTERISTICA LV-421 (CAL 3)



El polinomio característico es:

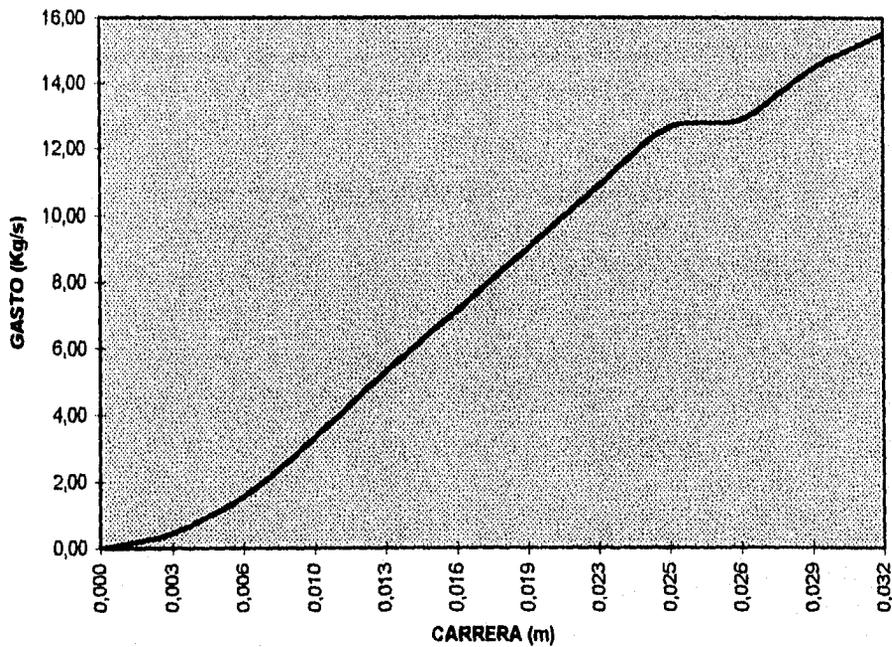
$$-245779.3X^3 + 12878.99X^2 + 36.815X - 0.14031 = 0$$

Fig. 17 Características válvula LV-421

TABLA PARA LA OBTENCION DE LA CURVA CARACTERISTICA DE LV-417 (CAL 4)

x (%)	x (m)	cv (%)	cv gal/min	Q (Kg/min)	Q (Kg/s)
0	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,003	3,00	1,50	27,93	0,47
20	0,006	10,00	5,00	93,11	1,55
30	0,010	21,50	10,75	200,18	3,34
40	0,013	34,00	17,00	316,56	5,28
50	0,016	46,00	23,00	428,29	7,14
60	0,019	58,00	29,00	540,01	9,00
70	0,023	70,00	35,00	651,74	10,86
78	0,025	81,50	40,75	758,81	12,65
80	0,026	83,00	41,50	772,78	12,88
90	0,029	93,00	46,50	865,88	14,43
100	0,032	100,00	50,00	931,06	15,52

CURVA CARACTERISTICA LV-417 (CAL 4)



El polinomio característico es:

$$-1917900X^3 - 132723.7X^2 + 3171.8X - 18.2853 = 0$$

Fig. 18 Características válvula LV-417

Cuando se logra esto el valor de K_u será la sensibilidad última (K_c) y el período último (T_u) se tomará del tiempo que tarda en dar una oscilación el nivel en el calentador. Conociendo K_u y T_u se introducen en las fórmulas de sintonía óptima según el criterio de Ziegler-Nichols para controladores PID que son las siguientes:

$$K_c = K_u / 2.2$$

$$T_i = T_u / 1.2$$

$$T_d = T_u / 8$$

Las gráficas del nivel de los calentadores bajo el disturbio escalón del 75% al 100% de carga, figuras 20, 21 y 22 corresponden respectivamente al calentador 2, 3 y 4. En dichas gráficas la curva "a" representa la oscilación de amplitud constante del nivel del calentador, situación en la cual el valor de la ganancia es igual a la sensibilidad última (K_u). De esa misma curva se ha obtenido el período último (T_u) que nos sirve para calcular la constante integral (T_i).

La curva "b" es el comportamiento del nivel del calentador cuando los ajustes del controlador son los óptimos, lo cual se puede comprobar comparando la curva "b" con la "c" que son los ajustes más altos o con la curva "d" que son los ajustes más bajos.

En resumen los ajustes óptimos obtenidos de los controladores se utilizarán en la simulación, en la cual se observará el comportamiento global del sistema bajo un disturbio establecido. La figura 19 se muestra los valores de ganancia y constante integral óptimos obtenidos.

	CALENTADOR 2	CALENTADOR 3	CALENTADOR 4
GANANCIA DEL CONTROLADOR K_c	0.563	1.8	2.7
REPETICIONES POR MINUTOS DEL CONT. T_i	30	29.388	29.874

Figura 19 Tabla de ajustes óptimos obtenidos para cada controlador de nivel normal

Para la simulación se tiene un disturbio escalón del 75% al 100% de carga.

Los disturbios en una planta difícilmente ocurren en forma de escalón, sin embargo para propósitos de probar la estabilidad de los sistemas lo más

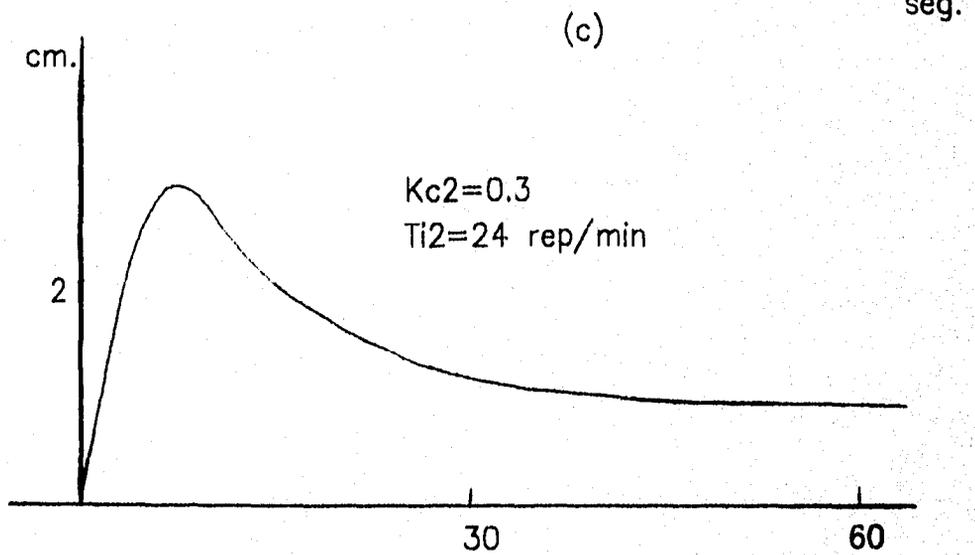
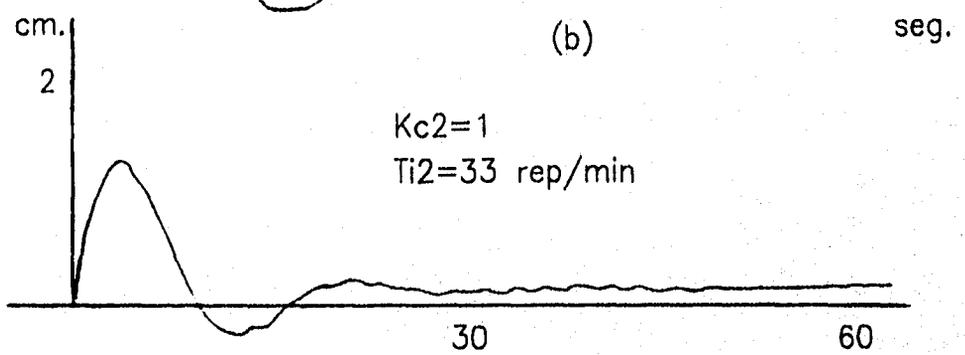
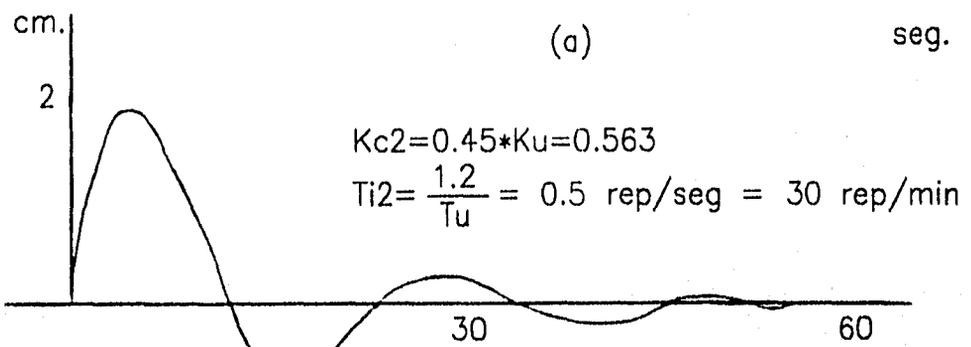
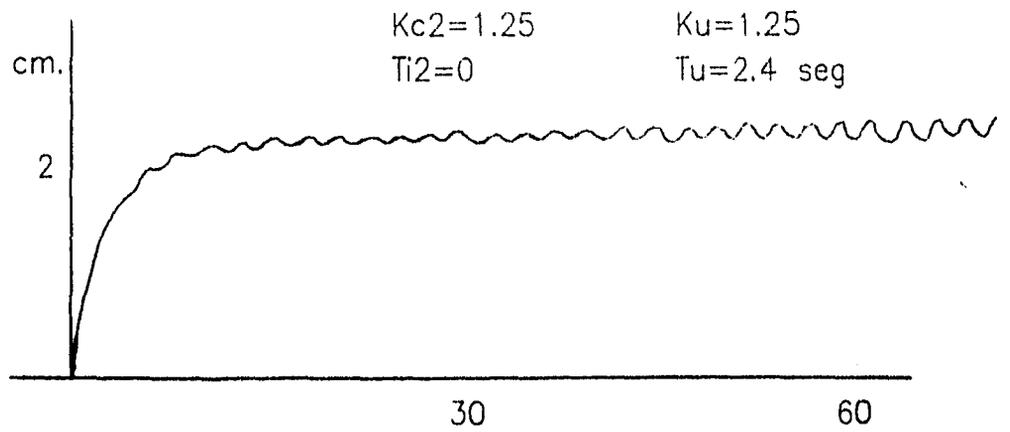


Figura 20

(d)

seg.

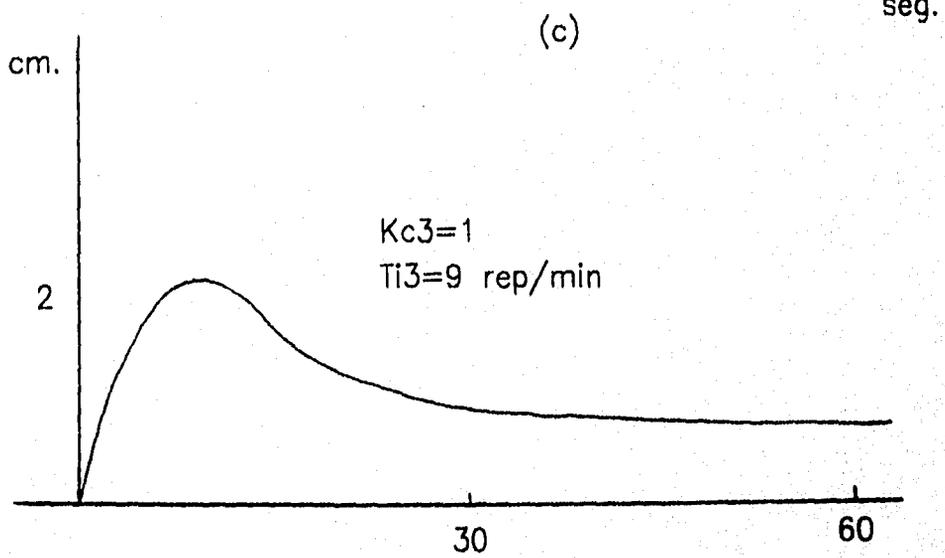
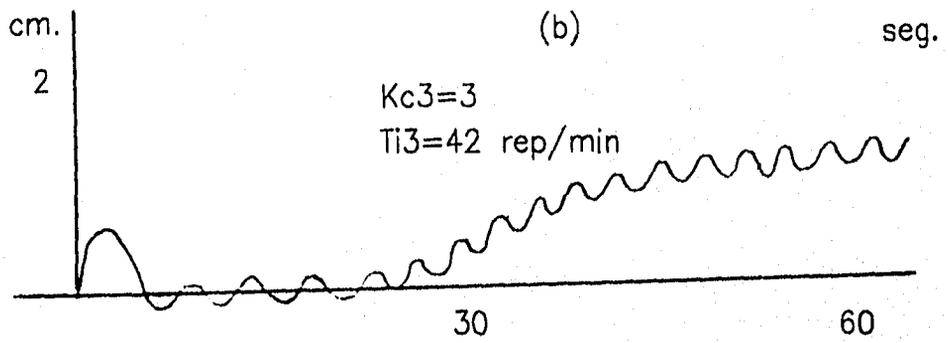
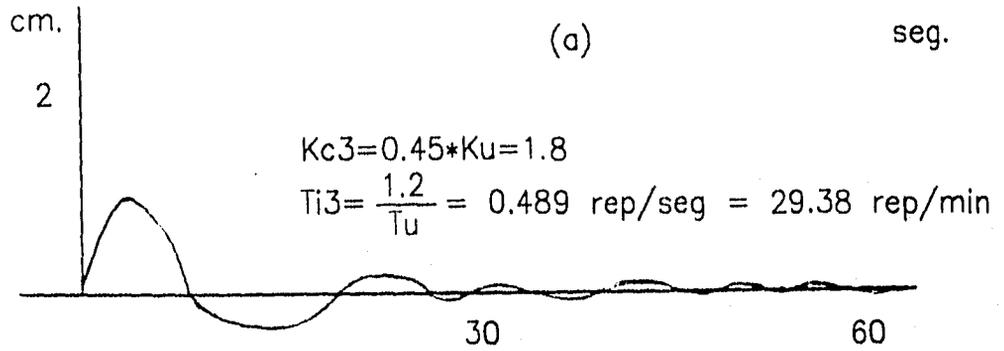
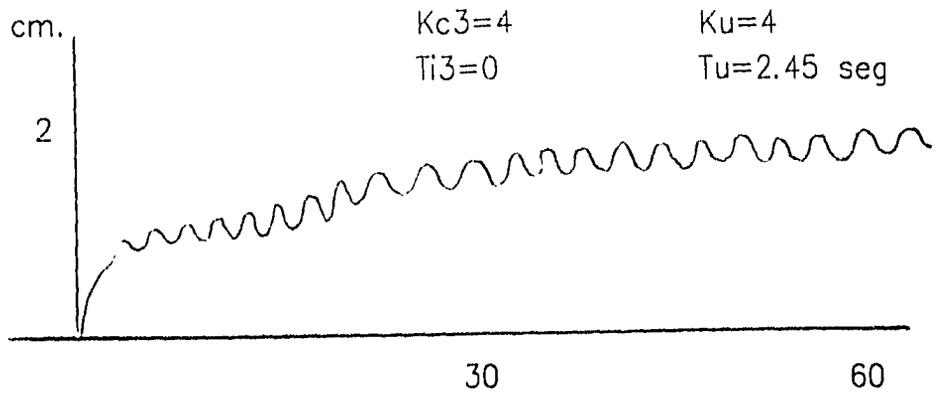


Figura 21

(d)

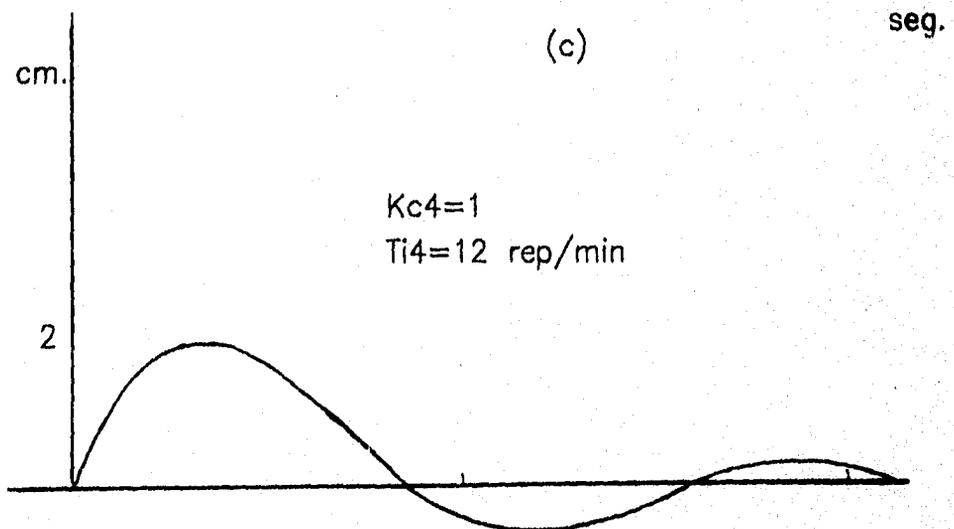
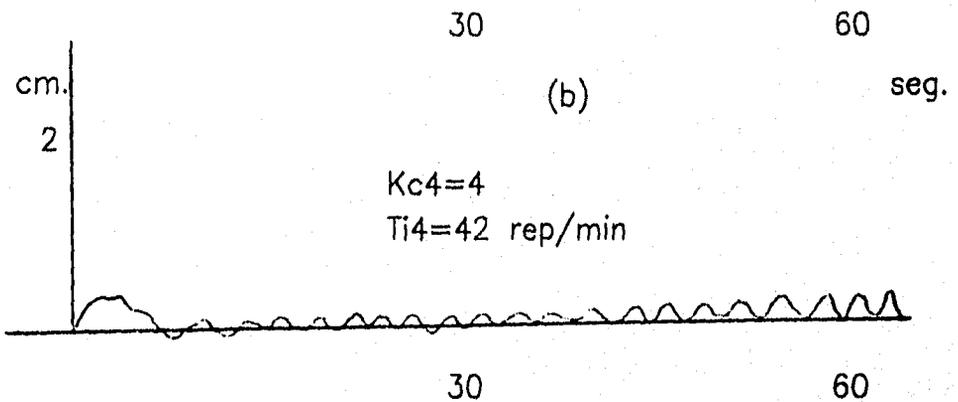
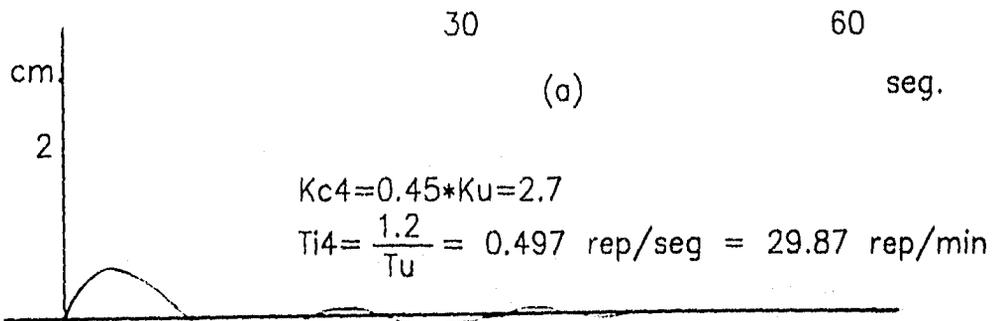
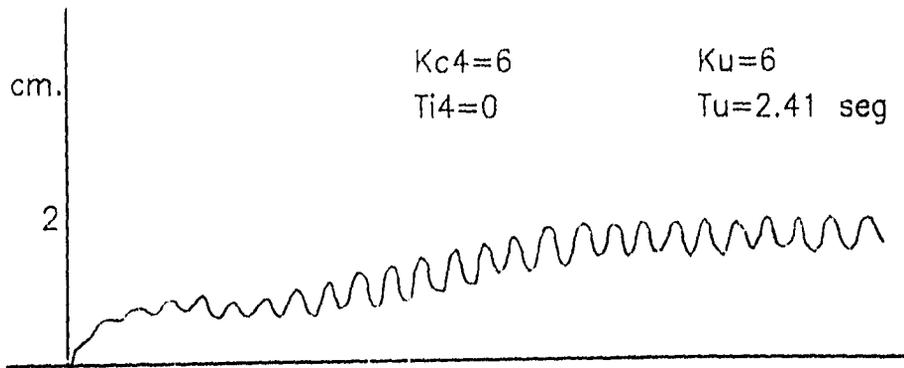


Figura 22 60
 (d) seg.

recomendable es introducir disturbios fuertes, y el escalón es uno de estos, para ver si el sistema es capaz de asimilarlo. En una planta termoeléctrica es muy frecuente hacer cambios de carga sobre todo cuando se arranca la unidad y por etapas (cambios de carga) se va llevando hasta el 100% de carga de la unidad.

Cada cambio de carga lleva consigo un cambio en las condiciones de operación de la unidad; dichos cambios suceden más o menos simultáneamente aunque no en forma de escalón, pero como hemos dicho antes, esto asegurará que los circuitos de control pueden soportar disturbios severos.

A continuación se presentan las gráficas obtenidas de la variable nivel, de cada uno de los calentadores.

En la figura 23 el calentador 2, muestran oscilaciones fuertes porque llegan los drenajes de los calentadores anteriores..

En la figura 24 el calentador 3, vemos que la estabilidad va en aumento y se observa que el nivel, con el ajuste bajo óptimo tiende a estabilizarse cuando ya han transcurrido 90 seg. El ajuste alto muestra fuertes oscilaciones y con el bajo se observa un período largo, y la estabilidad, de lograrse, sería bastante más tardada.

En la figura 25 el calentador 4, no recibe drenaje de ningún otro calentador, razón por la cual la estabilidad se logra rápidamente tanto en el ajuste alto como en el óptimo y para el ajuste bajo todavía se tiene un tiempo de reposición largo. El drenaje normal aunque oscila muestra una clara tendencia a la estabilización.

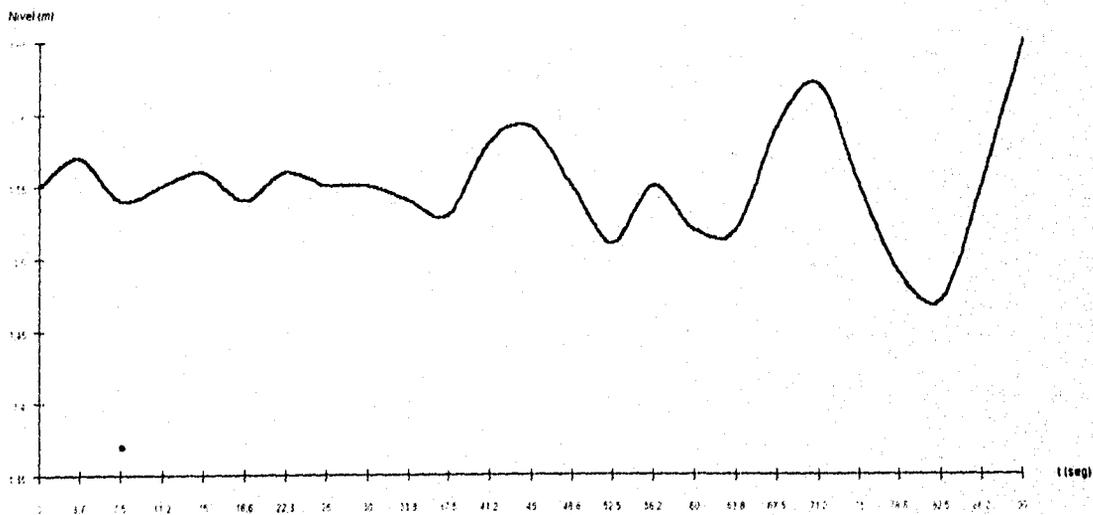
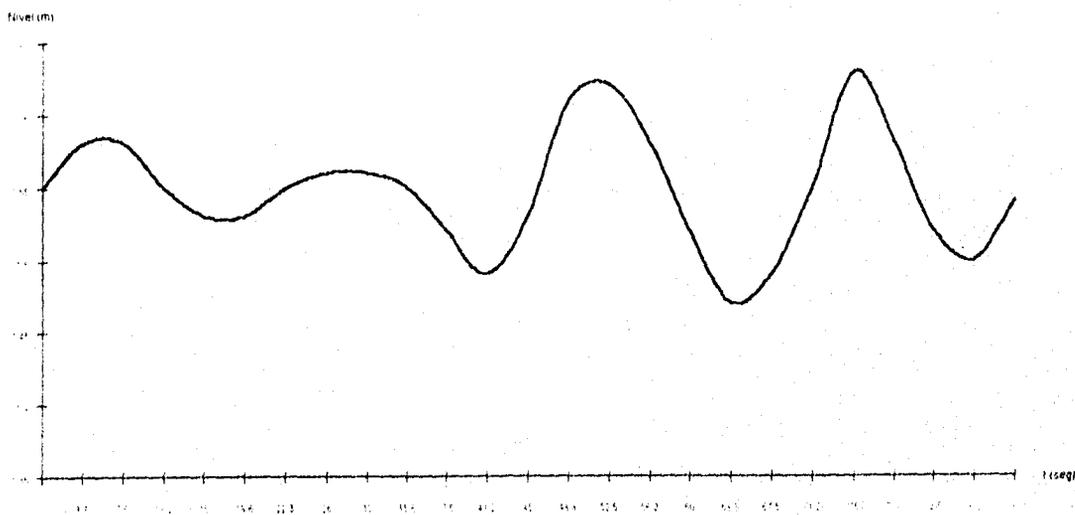
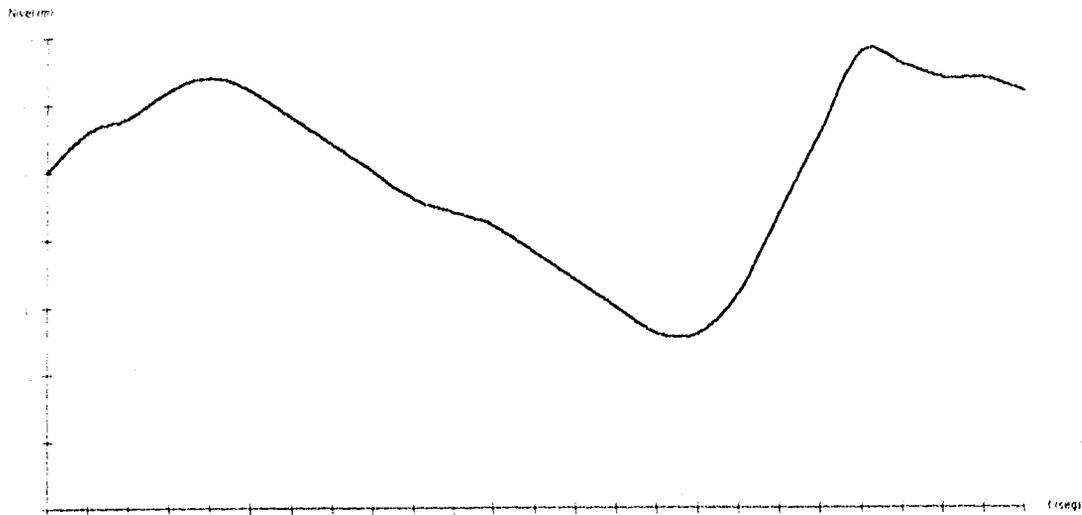


Fig. 23 Nivel calentador 2

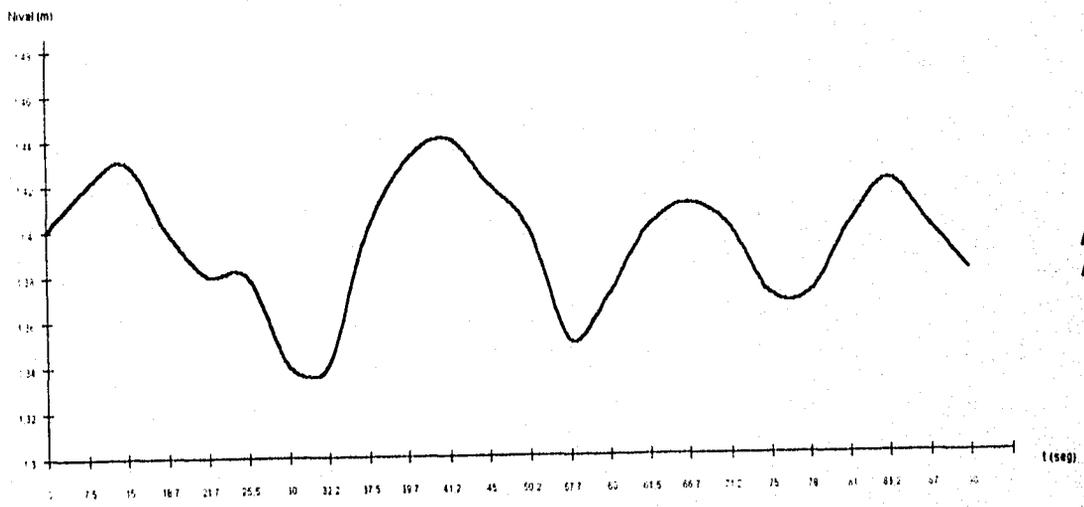
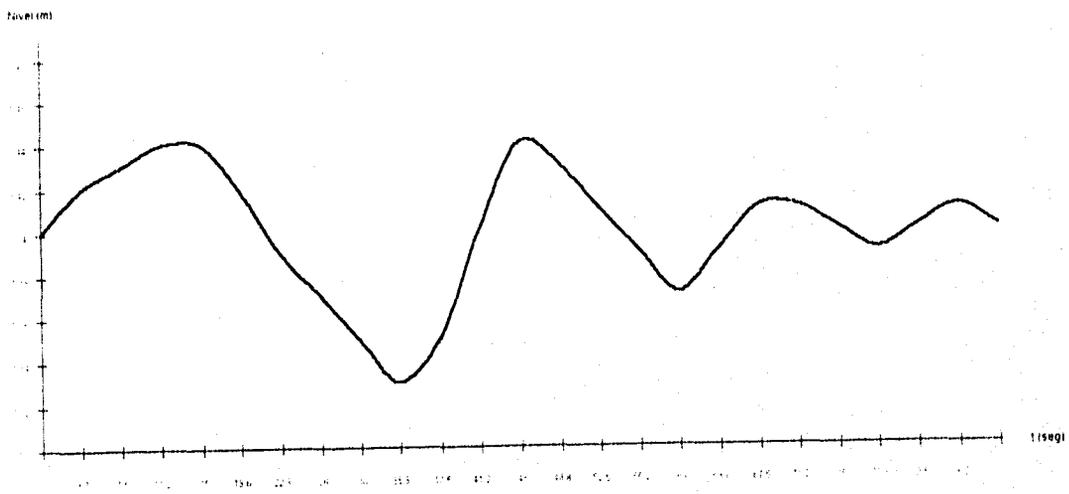
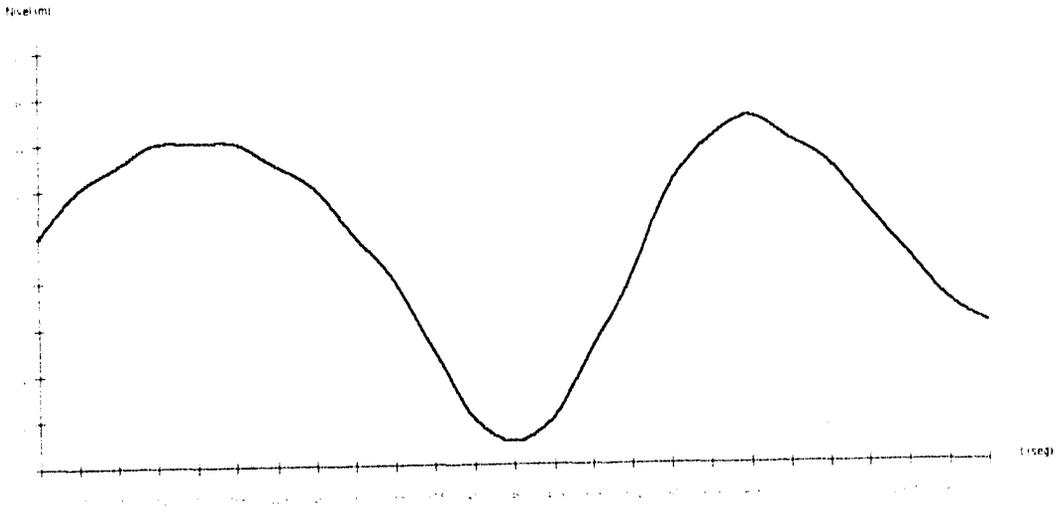
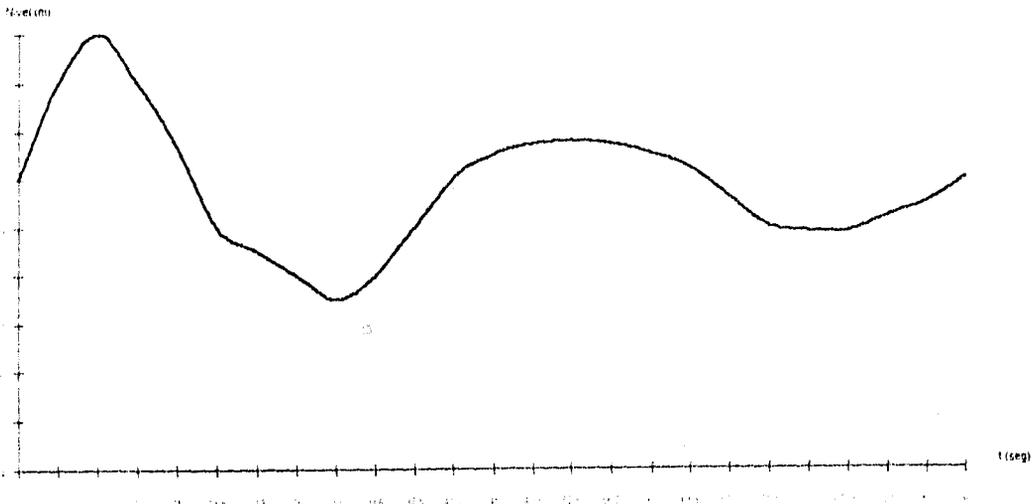
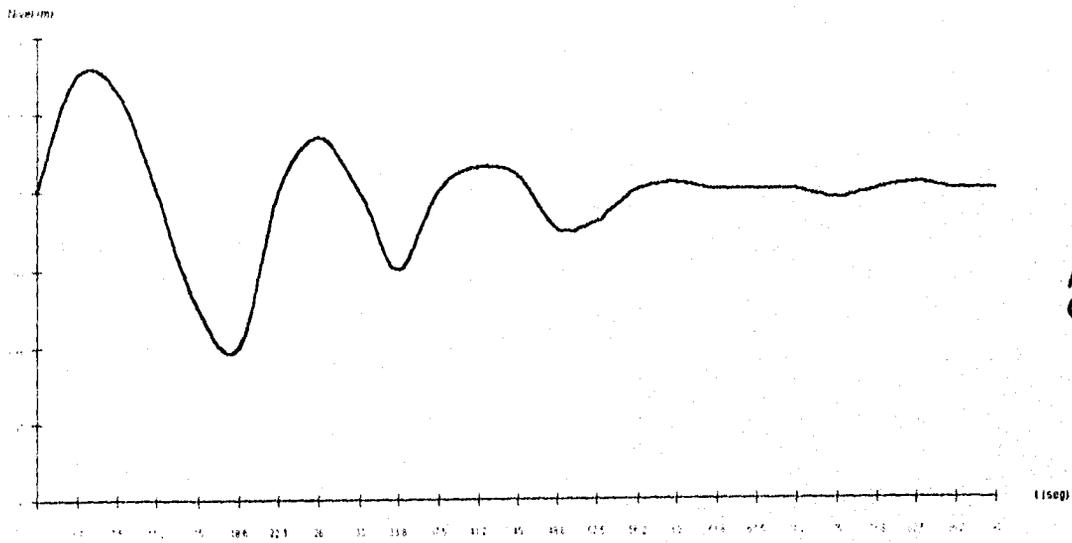


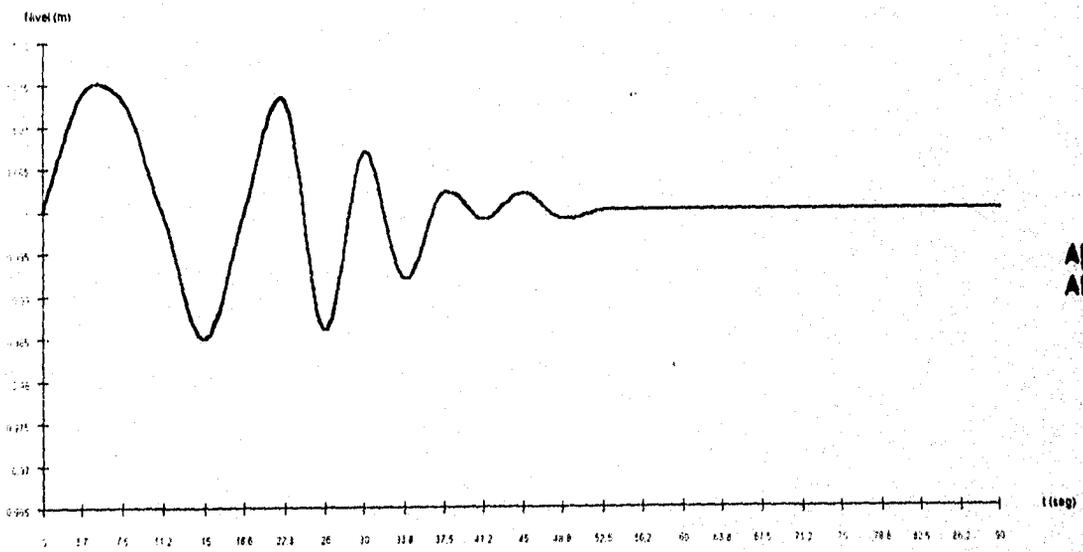
Fig. 24 Nivel calentador 3



Ajuste Bajo



Ajuste Optimo



Ajuste Alto

Fig. 25 Nivel calentador 4

C A P I T U L O

V

C O N C L U S I O N E S

Observando las graficas obtenidas, podemos decir que el sistema estudiado tiene el punto de mayor estabilidad en el calentador 4, y donde hay más problemas con la estabilidad es en el calentador 2, esto se debe a que el calentador 2 es el último calentador receptor de la cascada de drenes anteriores, por lo que aquí se suman todas las inestabilidades producidas en los calentadores anteriores.

El sistema presenta una gran cantidad de problemas en la simulación lineal, ya que las variables que intervienen en el modelo están fuertemente acopladas, además de que el modelo es altamente sensible a pequeñas variaciones en los parámetros.

El control mediante el PI resultó ser el óptimo puesto que el controlador PID no sería aplicable debido a los grandes cambios para pequeñas variaciones en el punto de ajuste, el modo derivativo produciría una gran salida que traería como consecuencia la saturación de los actuadores (válvulas) y se tendría una condición de inestabilidad.

A P E N D I C E A

VALVULAS

Las válvulas realizan la función de variar el caudal del fluido de control, que a su vez modifica el valor de la variable medida, comportándose como un orificio de área continuamente variable. En la figura 1 puede verse una válvula de control típica. Se compone básicamente del cuerpo del servomotor.

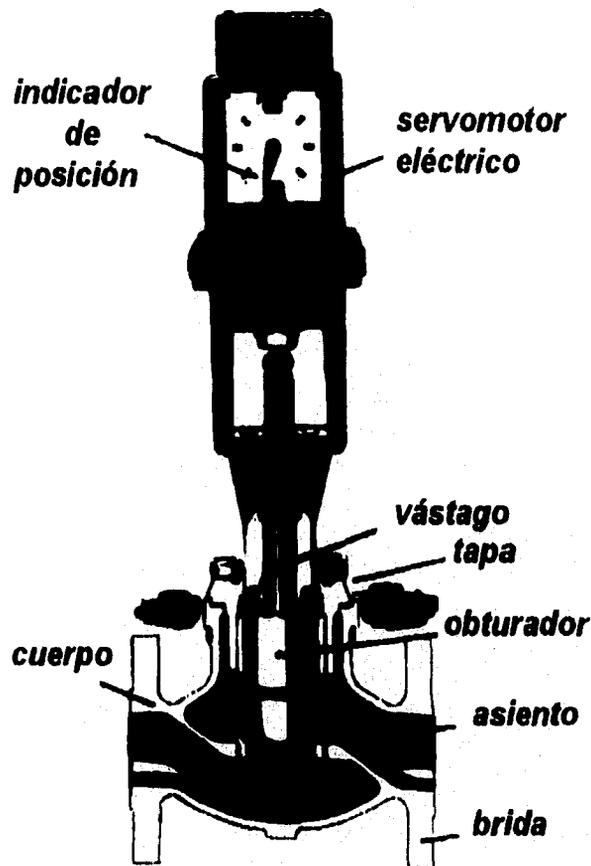


Fig. 1 Válvula de control

El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y los asientos y está provisto de rosca ó de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador realiza la función de control de paso de fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o

bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que atraviesa la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor.

Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el obturador. Las válvulas en las que el obturador se mueve en la dirección de su propio eje se clasifican en :

- Válvula de globo
- Válvula de ángulo
- Válvula de tres vías
- Válvula jaula
- Válvula de cuerpo partido
- Válvula de Saunders

Las válvulas en las que el obturador tiene un movimiento circular se clasifican en

- Válvula obturador excéntrico, rotativo
- Válvula de obturador cilíndrico excéntrico
- Válvula de bola

La determinación correcta del tamaño de las válvulas es importante. Una válvula demasiado grande representa un gasto innecesario, mientras que una válvula de tamaño reducido da lugar a un mal comportamiento afectando el rendimiento estándar necesario para el control del proceso.

Las válvulas utilizadas en los calentadores de baja presión son las de globo y existen en dos formas, de asiento simple y asiento doble. A continuación se ilustran dichas válvulas.

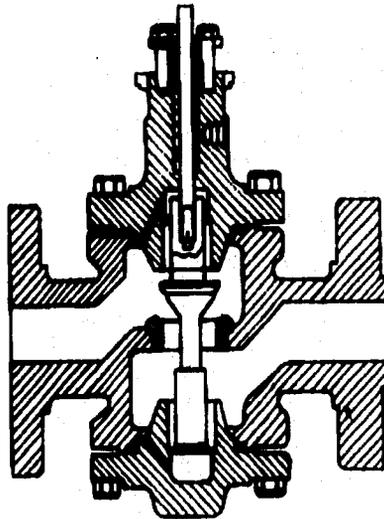


Fig. 2 Válvula de globo de asiento simple

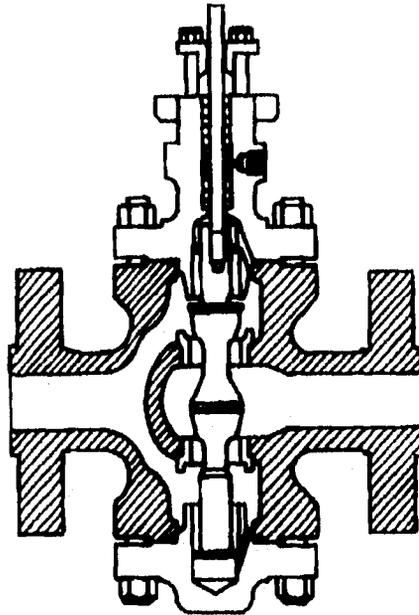


Fig. 3 Válvula de globo de asiento doble

La válvula de control se caracteriza por el coeficiente asignado por el fabricante y registrado en sus tablas de características.

Este coeficiente, denominado c_v , y empleado inicialmente en E.U. se define como :

"Caudal de agua en galones (USA) por minuto que pasa a través de la válvula y con una pérdida de carga de una libra por pulgada cuadrada (psi)."

En los países que emplean unidades métricas se suele utilizar además el coeficiente k_v , que la norma VDI/VDE define del sig. modo :

"Caudal de agua (de 5 °C a 30 °C) en m^3/h que pasa a través de la válvula para una apertura dada y con una pérdida de carga de $1Kg/cm^2$.

La equivalencia entre los coeficientes K_v y c_v para válvula totalmente abierta es :

$$k_v = 0.86 c_v (m^3/h)$$

$$c_v = 1.17 k_v (\text{galones por minuto})$$

La ecuación para determinar el coeficiente necesario en la válvula para que cumpla las características del proceso es la mostrada a continuación.

$$C_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}$$

Donde:

Q = Caudal en m^3 / h

ρ = Kg / dm^3

Δp = Presión diferencial en Kg / cm^2

ESTA RESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

A P E N D I C E B

N O M E N C L A T U R A

- A. Area (m^2)
- a. Constante de recta
- As. Area de la sección transversal de un tubo (m^2)
- At. Area de transferencia de calor
- b. Profundidad de la tapa elipsoidal (m) o constante de la recta
- C. Constante o coeficiente
- Cp. Calor específico a presión constante
- Cv. Coeficiente de flujo de válvula (gpm)(pulg) / lb^{0.5}
- D. Diámetro interior de un tubo
- d. Derivada
- G. Gasto másico (kg/s)
- g. Aceleración de la gravedad (m/s^2)
- h. Entalpía (Kj / Kg)
- k. Relación de calores específicos del vapor (adim)
- L. Longitud (m)
- M. Masa (Kg)
- N. Nivel (m)
- n. Número o cantidad
- P. Presión
- R. Constante del vapor (=0.4619 Kj / kg. °K)
- Re. Número de Reynolds (adim)
- S. Gravedad específica o sumatoria
- T. Temperatura (°K)
- t. Tiempo (s)
- U. Coeficiente de transferencia de calor (Kw / Kg °K)
- V. Volumen (m^3)
- X. Levantamiento del vástago de la válvula (%)

L E T R A S G R I E G A S

- Δ Diferencia
- ζ Factor de atenuación (adim)
- μ Viscosidad (Kg/m.s)
- ρ Densidad (Kg/ m^3)
- τ Constante de tiempo (s)
- ω_n Frecuencia natural.

S U B I N D I C E S

O.	Inicial o mínimo
1,2,3,4	Distinguen a los diferentes constantes o calentadores 1,2,3,4,
a.	Ramal "a"
a'.	Sección anular del calentador
aa.	Agua de alimentación
acc.	Accesorios
b.	Ramal "b"
c.	Condensado que entra al desgacificador
c'.	Condensado antes de la recirculación mínima
cs.	Condensador de vapor de sellos
d.	Drenaje del calentador
dd.	Enfriador de drenes
e.	Emergencia
ee.	Estado estable
eq.	Equivalente (longitud)
ex.	Extracción de vapor
f.	Fuga
ff.	Enfriador de drenes
fg.	Cambio de fase de líquido a vapor
gg.	Desgacificador
h.	Calentador o carcasa
i.	Entrada
i'.	Entrada de condensado, por los tubos, a la zona de vapor
l.	Líquido en la carcasa
M.	Máximo
m.	Mínimo o recirculación mínima
n.	Calentador "n"
o.	Salida
o'.	Salida de condensado, por los tubos, de la zona vapor
p.	Bomba
q.	Tubos cubiertos por el líquido en el calentador, contados como perforaciones en el espejo.
r.	Resistencia al flujo
s.	Vapor saturado
t.	Tubo o tubería en general, también tubo sencillo mitad de una U en calentadores

A P E N D I C E C

LISTA DE VALORES DE LOS PARAMETROS DE LOS
CALENTADORES DE BAJA PRESION 2, 3 Y 4.

CALENTADOR No. 2

C_{pl} :4.1868	"Calor específico a presión constante del líquido en la carcasa
A_a :1.5948	"Área de la sección anular del calentador
ρ_l :0.998	"Densidad del líquido en la carcasa
L_t :8.86	"Longitud del tubo
n_t :1041	"No. de tubos en "U" sumergidos
T_s :360.69	"Temperatura de vapor saturado
D_i :0.015875	"Diámetro interior del tubo
D_o :0.015875	"Diámetro exterior del tubo
U_{ee} :3.36	"Coeficiente de transferencia de calor en estado estable
G_{cee} :34.065	"Gasto másico de condensado en estado estable
b :0.46	"Profundidad de la tapa elipsoidal
h_{ex} :2.7333e3	"Entalpía del vapor de extracción
K :1.4	"Relación de calores específicos del vapor
P_{ex} :75.9e3	"Presión del vapor de extracción
A_{sex} :0.12	"Área de la sección transversal del tubo de "extracción
C_t :0.75	"Constante de tiempo
ρ_{ex} :0.415	"Densidad de extracción
U_t :3.356	"Coeficiente de transferencia de calor de los
$A_{tt}=2\pi*D_i*T_{co}*n_t$	"Área de transferencia de calor de "los tubos en "U" sumergidos
$A_s=\pi*D_i^2/4$	"Área de la sección transversal de un tubo
N_i :1.55	"Nivel de condensado dentro del calentador
V_i :1.6	"Volumen de la carcasa
ρ_{vh} :0.41	"Densidad del vapor dentro del calentador
T_{cl} :332	"Temperatura del condensado a la entrada del calentador
T_{cl} :338	"Temperatura del condensado a la entrada a la zona de vapor
T_{co} :370	"Temperatura del condensado a la salida del calentador
T_{co} :372	"Temperatura del condensado a la salida de la zona de vapor
G_c :30	"Gasto de condensado
G_d :20	"Gasto del dren
T_d :332	"Temperatura del dren
U_{tt} :2.29	"Coeficiente de transferencia de calor en los tubos
G_{dn+1} :25	"Gasto del dren del calentador anterior
T_{dn+1} :363	"Temperatura del dren del calentador anterior

CALENTADOR No. 3

C_{pl} :4.1868	"Calor específico a presión constante del líquido en la carcasa
A_a :1.5948	"Area de la sección anular del calentador
ρ_l :0.998	"Densidad del líquido en la carcasa
L :8.86	"Longitud del tubo
n_t :1041	"No. de tubos en "U" sumergidos
T_s :385.35	"Temperatura de vapor saturado
D_i :0.015875	"Diámetro interior del tubo
D_r :0.015875	"Diámetro interior del tubo
U_{ee} :3.36	"Coeficiente de transferencia de calor en estado estable
G_{cee} :34.065	"Gasto másico de condensado en estado estable
b :0.409	"Profundidad de la tapa elipsoidal
h_{ex} :2.8905e3	"Entalpía del vapor de extracción
K :1.4	"Relación de calores específicos del vapor
P_{ex} :75.9e3	"Presión del vapor de extracción
A_{sex} :0.3534	"Area de la sección transversal del tubo de "extracción
C_t :0.75	"Constante de tiempo
ρ_{ex} :0.7319	"Densidad de extracción
U :3.9519	"Coeficiente de transferencia de calor de los
$A_{tt}=2\pi*D_i*T_{co}*n_t$	"Area de transferencia de calor de
	"los tubos en "U" sumergidos
$A_s=\pi*D_i^2/4$	"Area de la sección transversal de un tubo
N :1.4	"Nivel de condensado dentro del calentador
V :1.4495	"Volumen de la carcasa
ρ_{vh} :0.7039	"Densidad del vapor dentro del calentador
T_{cl} :357	"Temperatura del condensado a la entrada del calentador
T_{cl} :365	"Temperatura del condensado a la entrada a la zona de vapor
T_{co} :382	"Temperatura del condensado a la salida del calentador
T_{co} :392	"Temperatura del condensado a la salida de la zona de vapor
G_c :28	"Gasto de condensado
G_d :25	"Gasto del dren
T_d :363	"Temperatura del dren
U_{tt} :2.292	"Coeficiente de transferencia de calor en los tubos
G_{dn+1} :20	"Gasto del dren del calentador anterior
T_{dn+1} :388.1	"Temperatura del dren del calentador anterior

CALENTADOR No. 4

C_{pl} :4.1868	"Calor específico a presión constante del líquido en la carcasa
A_a :1.5948	"Area de la sección anular del calentador
ρ_l :0.998	"Densidad del líquido en la carcasa
L_t :8.86	"Longitud del tubo
n_t :1041	"No. de tubos en "U" sumergidos
T_s :360.69	"Temperatura de vapor saturado
D_i :0.015875	"Diámetro interior del tubo
D_o :0.015875	"Diámetro interior del tubo
U_{ee} :3.36	"Coeficiente de transferencia de calor en estado estable
G_{ce} :34.065	"Gasto másico de condensado en estado estable
b :0.46	"Profundidad de la tapa elipsoidal
h_{ex} :3.0387e3	"Entalpía del vapor de extracción
K :1.4	"Relación de calores específicos del vapor
P_{ex} :75.9e3	"Presión del vapor de extracción
A_{sex} :0.12	"Area de la sección transversal del tubo de "extracción
$C\tau$:0.75	"Constante de tiempo
ρ_{ex} :0.415	"Densidad de extracción
U_t :3.356	"Coeficiente de transferencia de calor de los
$A_{tt}=2\pi*D_i*T_{co}*n_t$	"Area de transferencia de calor de "los tubos en "U" sumergidos
$A_s=\pi*D_i^2/4$	"Area de la sección transversal de un tubo
N_i :1	"Nivel de condensado dentro del calentador
V_i :0.995	"Volumen de la carcasa
ρ_{vh} :0.82	"Densidad del vapor dentro del calentador
T_{cl} :382.5	"Temperatura del condensado a la entrada del calentador
T_{cl} :394	"Temperatura del condensado a la entrada a la zona de vapor
T_{co} :403.8	"Temperatura del condensado a la salida del calentador
T_{co} :409	"Temperatura del condensado a la salida de la zona de vapor
G_c :27	"Gasto de condensado
G_d :20	"Gasto del dren
T_d :388.1	"Temperatura del dren
U_{tt} :4.31	"Coeficiente de transferencia de calor en los tubos

BIBLIOGRAFIA

DELGADILLO, JOSE
"ESTUDIO DE SISTEMA DE CONDENSADO
DE UNA CENTRAL TERMoeLECTRICA"
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS

R. CANALES, RUIZ Y R. BARRERA, RIVERA
"ANALISIS DE SISTEMAS DINAMICOS Y CONTROL AUTOMATICO"
LIMUSA

OGATA, KATSUIKO
"INGENIERIA DE CONTROL MODERNA"
PRENTICE, HALL

CARLOS A SMITH
"CONTROL AUTOMATICO DE PROCESOS"
NORIEGA, LIMUSA

DALE E. SEBORG
"PROCESS DYNAMICS AND CONTROL"
WILEY SERIES

LUTHE, OLIVERA, SHUTZ
"METODOS NUMERICOS"
LIMUSA

RODRIGUEZ RAMIREZ FRANCISCO
"APUNTES DE SISTEMAS DINAMICOS"
FACULTAD DE INGENIERIA