

10  
2 es.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGON**

**"CONTROL DE COMBUSTION DE  
QUEMADORES POSTERIORES EN UNA  
UNIDAD DE GENERACION DE ENERGIA  
ELECTRICA DE CICLO COMBINADO"**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

( AREA ELECTRONICA Y COMUNICACIONES )

P R E S E N T A :

**RUBEN A, FLORES MEZA**



MEXICO, D. F.

DICIEMBRE 1993

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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

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

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

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

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN. . . . .	1
<b>CAPÍTULO I</b> . . . . .	<b>CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE CICLO COMBINADO</b>
I.1.- CONCEPTO. . . . .	5
I.2.- EQUIPOS PRINCIPALES. . . . .	6
I.2.1.- TURBINA DE GAS. . . . .	6
I.2.2.- TURBINA DE VAPOR. . . . .	6
I.2.3.- GENERADOR ELÉCTRICO. . . . .	6
I.2.4.- RECUPERADOR DE CALOR. . . . .	8
I.2.4.a) EVAPORADOR DE BAJA PRESIÓN. . . . .	9
I.2.4.b) ECONOMIZADOR. . . . .	9
I.2.4.c) EVAPORADOR DE ALTA PRESIÓN. . . . .	9
I.2.4.d) SOBRECALENTADOR. . . . .	9
I.2.5.- QUEMADORES POSTERIORES. . . . .	10
I.2.6.- DEAREADOR. . . . .	11
I.2.7.- DOHO. . . . .	11
I.2.8.- CONDENSADOR. . . . .	11
I.2.9.- TANQUE DE CONDENSADO. . . . .	11
I.2.10.- ATEMPERADOR. . . . .	12
I.2.11.- PLANTA DESMINERALIZADORA. . . . .	12
I.3.- QUEMADORES POSTERIORES . . . . .	13
I.3.1.- IMPORTANCIA DE LOS QUEMADORES POSTERIORES. . . . .	13
I.3.2.- CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES. . . . .	14
I.3.3.- SISTEMA DE VENTILADORES. . . . .	16
I.3.3.a) VENTILADOR DE AIRE DE AUMENTO . . . . .	16
I.3.3.b) VENTILADOR DE AIRE DE PURGA . . . . .	16
I.3.3.c) VENTILADOR DE AIRE DE ATOMIZACIÓN . . . . .	17
I.3.4.- OPERACIÓN. . . . .	17
I.3.4.1.- TRANSFERENCIA DE COMBUSTIBLE . . . . .	18
<b>CAPÍTULO II</b> . . . . .	<b>TÓPICOS IMPORTANTES EN LA INGENIERÍA DE CONTROL</b>
II.1.- CONCEPTOS DE CONTROL . . . . .	19
II.1.1.- DEFINICIONES. . . . .	19
II.1.2.- COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CONTROL. . . . .	21
II.1.2.a) PROCESO . . . . .	21
II.1.2.b) MEDIOS DE MEDICIÓN . . . . .	22
II.1.2.c) ELEMENTO PRIMARIO . . . . .	22
II.1.2.d) ELEMENTO SECUNDARIO . . . . .	22
II.1.2.e) MEDIOS DE CONTROL . . . . .	22
II.1.2.f) ELEMENTO FINAL DE CONTROL . . . . .	23
II.1.2.g) UNIDAD DE POTENCIA . . . . .	23
II.1.2.h) PERTURBACIÓN . . . . .	23
II.2.- TIPOS DE CONTROLADORES. . . . .	23
II.2.1.- CONTROLADOR PROPORCIONAL . . . . .	23
II.2.2.- CONTROLADOR INTEGRAL. . . . .	25
II.2.3.- CONTROLADOR DERIVATIVO (control de velocidad). . . . .	28
II.2.4.- CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL. . . . .	29
II.2.5.- CONTROLADOR PROPORCIONAL-DERIVATIVO (PD). . . . .	32
II.2.6.- CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO (PID). . . . .	33
II.3.- CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL . . . . .	34
II.3.1.- SISTEMA DE CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES. . . . .	34
II.3.2.- TIPOS DE CONTROL. . . . .	36
II.3.2.a).- CONTROL ANALÓGICO. . . . .	36
II.3.2.b).- CONTROL DIGITAL. . . . .	37
II.3.2.c).- CONTROL HÍBRIDO. . . . .	40

II.4.- SISTEMAS DE CONTROL. . . . .	40
II.4.a).- SISTEMA DE CONTROL CONVENCIONAL DE LAZO DEDICADO . . . . .	41
II.4.b).- SISTEMA CENTRALIZADO DE CONTROL DIGITAL DIRECTO (CDD). . . . .	41
II.4.c).- SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO (SICODI). . . . .	42
II.4.c.1.- VENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDO. . . . .	45

**CAPÍTULO III CONTROL ANALÓGICO DE QUEMADORES POSTERIORES**

III.1.- CARACTERÍSTICAS. . . . .	48
III.1.1) TIPOS DE DIAGRAMAS . . . . .	48
III.1.1.a) Diagrama de control (funcional) . . . . .	48
III.1.1.b) Diagramas esquemáticos . . . . .	48
III.2.- DIAGRAMA DE CONTROL. . . . .	48
III.2.1.- DESCRIPCIÓN. . . . .	48
III.2.1.a) MÓDULO 1 . . . . .	49
III.2.1.b) MÓDULO 2 . . . . .	49
III.2.1.c) MÓDULO 3 . . . . .	49
III.3.- DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS (Electrónicos). . . . .	49
III.3.1.- DESCRIPCIÓN. . . . .	49
III.3.2.- ANÁLISIS DE LOS BLOQUES ELECTRÓNICOS. . . . .	50
III.3.2.1.- DESCRIPCIÓN. . . . .	50
III.3.2.1.a) MÓDULO PI (RA). . . . .	50
III.3.2.1.b) PUNTO DIFERENCIA. . . . .	52
III.3.2.1.c) LIMITADORES A 0v. y -10v. . . . .	54
III.3.2.1.d) SELECTOR DE SEÑAL ALTA. . . . .	55
III.3.2.1.e) MONITOR DE SEÑAL BAJA (Comparador analógico). . . . .	57
III.3.2.1.f) GENERADOR DE FUNCION (Función de caracterización). . . . .	61
III.3.2.1.g) AMPLIFICADOR DE SEGUIMIENTO (TA). . . . .	63
III.3.2.2.- SIMULACION . . . . .	55
III.3.2.2.a.- MÓDULO PI (RA). . . . .	66
III.3.2.2.a.1) SIMULACIÓN ANALÓGICA . . . . .	66
III.3.2.2.a.2) SIMULACIÓN DIGITAL . . . . .	66
III.3.2.2.a.3) COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y OBSERVACIONES. . . . .	68
III.3.2.2.b.- LIMITADORES. . . . .	70
III.3.2.2.b.1) SIMULACIÓN ANALÓGICA . . . . .	70
III.3.2.2.b.2) SIMULACIÓN DIGITAL . . . . .	70
III.3.2.2.b.3) COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y OBSERVACIONES . . . . .	70
III.3.2.2.c.- SELECTOR DE SEÑAL ALTA . . . . .	72
III.3.2.2.c.1) SIMULACIÓN ANALÓGICA . . . . .	72
III.3.2.2.c.2) SIMULACIÓN DIGITAL . . . . .	72
III.3.2.2.c.3) COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y OBSERVACIONES . . . . .	73
III.3.2.2.d.- COMPARADOR ANALÓGICO. . . . .	73
III.3.2.2.d.1) SIMULACIÓN ANALÓGICA . . . . .	73
III.3.2.2.d.2) SIMULACIÓN DIGITAL . . . . .	75
III.3.2.2.d.3) COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y OBSERVACIONES . . . . .	75
III.3.2.2.e.- GENERADOR DE FUNCIÓN . . . . .	75
III.3.2.2.e.1) SIMULACIÓN ANALÓGICA . . . . .	75
III.3.2.2.e.2) SIMULACIÓN DIGITAL . . . . .	76
III.4.- DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL. . . . .	80
III.4.1.- MÓDULO 1. . . . .	80
III.4.1.1.- IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA DEL MÓDULO 1. . . . .	83
III.4.2.1) SITUACIONES EN LA GENERACIÓN DEL PUNTO DE AJUSTE DINÁMICO . . . . .	87

III.4.2.1.a)	ESTADO ESTABLE . . . . .	87
III.4.2.1.b)	TEMPERATURA BAJA DEL VAPOR SOBRECALENTADO ( < 700 °F ) . . . . .	87
III.4.2.1.c)	TEMPERATURA ALTA DEL VAPOR SOBRECALENTADO ( > 952 °F ) . . . . .	88
III.4.2.1.d)	PRESIÓN ALTA DEL VAPOR SOBRECALENTADO ( > 1252 PSIA ) . . . . .	88
III.4.2.2.-	IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA DEL MÓDULO 2. . . . .	88
III.4.3.-	MÓDULO 3. . . . .	89
III.4.3.1.-	CONDICIONES DE GENERACIÓN DE LA SEÑAL DE DEMANDA DE COMBUSTIBLE. . . . .	89
III.4.3.1.a)	OPERACIÓN EN MODO COORDINADO. . . . .	89
III.4.3.1.b)	OPERACIÓN EN MODO AUTOMÁTICO. . . . .	92
III.4.3.1.c)	CONDICIONES EXTREMAS DE LA TEMPERATURA DEL VAPOR SOBRECALENTADO. . . . .	93
III.5.-	SISTEMA DE PROTECCIONES. . . . .	94
III.5.1.-	LÓGICA DE RODADO A MÍNIMO. . . . .	94
III.5.2.-	TRANSFERENCIA A COMBUSTIÓN MÍNIMA. . . . .	96

**CAPÍTULO IV** **MODELO DINÁMICO DEL PROCESO**

IV.1.-	DESCRIPCIÓN. . . . .	100
IV.1.1.-	MODELO MATEMÁTICO DE LA VÁLVULA. . . . .	100
IV.1.2.-	MODELO MATEMÁTICO DEL PROCESO. . . . .	101
IV.1.2.1.-	CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DINÁMICO PARA LA VALIDACIÓN DEL CONTROL DIGITAL DE QUEMADORES POSTERIORES. . . . .	101
IV.1.3.-	PRINCIPALES FÓRMULAS DEL MODELO DEL PROCESO. . . . .	104

**CAPÍTULO V** **CONTROL DIGITAL DE QUEMADORES POSTERIORES**

V.1.-	INTRODUCCION. . . . .	110
V.2.-	DESCRIPCION DE LA ESTRUCTURA GENERAL. . . . .	111
V.3.-	DESCRIPCION DE FUNCIONES. . . . .	112
V.3.1.-	FUNCION CTRL_QP.C . . . . .	112
V.3.1.1.-	CONTROL MAESTRO (Mod1). . . . .	114
V.3.1.1.a)	rate ( ) . . . . .	115
V.3.1.1.b)	ta ( ) . . . . .	115
V.3.1.1.c)	sa ( ) . . . . .	115
V.3.1.1.d)	fcgas ( ) . . . . .	116
V.3.1.1.e)	fcdie ( ) . . . . .	116
V.3.1.2.-	GENERADOR DEL PUNTO DE AJUSTE DINAMICO (Mod2). . . . .	117
V.3.1.2.a)	CONTROLADOR DE TEMPERATURA MINIMA DE VAPOR SOBRECALENTADO (CTmVS) . . . . .	117
V.3.1.2.b)	CONTROLADOR DE TEMPERATURA MAXIMA DE VAPOR SOBRECALENTADO (CTMVS) . . . . .	119
V.3.1.2.c)	CONTROLADOR DE PRESION MAXIMA DE VAPOR SOBRECALENTADO (CPHVS) . . . . .	119
V.3.1.3.-	GENERADOR DE LA DEMANDA DE COMBUSTIBLE (Mod3) . . . . .	121
V.3.1.3.a)	dem_min ( ) . . . . .	121
V.3.1.3.b)	flpflp ( ) . . . . .	122
V.3.1.3.c)	retardo ( ) . . . . .	122
V.3.1.3.d)	selector ( ) . . . . .	124
V.3.1.3.e)	dem_com ( ) . . . . .	125
V.3.2.-	FUNCION MODPRO.C . . . . .	126
V.3.3.-	FUNCION PERM.C . . . . .	128

## CAPÍTULO VI

PRUEBAS Y RESULTADOS DEL CONTROL DIGITAL DE  
QUEMADORES POSTERIORES

VI.1.- INTRODUCCIÓN. . . . .	129
VI.2.- ALGORITMO DE PRUEBAS. . . . .	130
VI.3.- TIPOS DE PRUEBAS. . . . .	131
VI.3.1.- MÓDULO 1. . . . .	132
VI.3.1.a) PRUEBA FUNCIONAL . . . . .	132
VI.3.1.b) PRUEBA DE REGULACIÓN EN LAZO ABIERTO . . . . .	133
VI.3.1.c) PRUEBA CON MODELO MATEMÁTICO DE VÁLVULA . . . . .	133
VI.3.1.d) PRUEBA DE INTEGRACIÓN CON MODELO DINÁMICO DEL PROCESO (que en lo sucesivo incluye modelo de válvulas) . . . . .	134
VI.3.2.- MÓDULO 2. . . . .	137
VI.3.2.a) PRUEBA FUNCIONAL: . . . . .	137
VI.3.3) INTEGRACIÓN MÓDULOS 1 y 2 CON MODELO DINÁMICO DEL PROCESO. . . . .	139
VI.3.3.a) PRUEBA DE REGULACIÓN EN LAZO CERRADO . . . . .	139
VI.3.4) MÓDULO 3. . . . .	142
VI.3.4.a) PRUEBA FUNCIONAL . . . . .	142
VI.3.5) INTEGRACIÓN TOTAL:MÓDULOS 1, 2 Y 3 CON MODELO DINÁMICO DEL PROCESO. . . . .	144
VI.3.5.1) PRUEBA EN OPERACIÓN NORMAL (700 °F < TUM < 1000 °F) . . . . .	144
VI.3.5.1.a) PRUEBA CON PERTURBACIÓN EN ESCALÓN. . . . .	144
VI.3.5.1.b) PRUEBA CON PERTURBACIÓN EN RAMPA. . . . .	147
VI.3.5.2) PRUEBA EN OPERACIÓN CRÍTICA POR ALTA TEMPERATURA (TUM >= 1000 °F). . . . .	149
VI.3.5.3) PRUEBA EN OPERACIÓN CRÍTICA POR BAJA TEMPERATURA DE VAPOR SOBREALENTADO (TUM <= 700 °F) . . . . .	152
GRÁFICAS . . . . .	156
CONCLUSIONES . . . . .	177
APÉNDICE A: AMPLIFICADOR OPERACIONAL . . . . .	181
APÉNDICE B: RESPUESTA CARACTERÍSTICA DE LOS SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN . . . . .	187
APÉNDICE C: CONVERSIÓN DE UNIDADES . . . . .	189
ANEXO 1: DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES Y CONSTANTES DEL MODELO DEL PROCESO	190
ANEXO 2: VARIABLES ANALÓGICAS, DIGITALES Y CONSTANTES DEL SISTEMA . . . . .	192
ANEXO 3: CONDICIONES INICIALES . . . . .	198
ANEXO 4: UTILERIA . . . . .	201
BIBLIOGRAFÍA GENERAL . . . . .	202

## INTRODUCCIÓN

*Para lograr que un proceso industrial funcione de manera óptima, es necesario determinar y manejar en forma adecuada, todas y cada una de las variables que intervienen en dicho proceso.*

*Hace algunos años, esto se conseguía implantando sistemas de control analógico, los cuales funcionaban de manera aceptable, pero tenían un índice de confiabilidad relativamente bajo por requerirse mantenimiento periódico (reemplazo de componentes: Transistores, diodos, etc), ajustes y sintonización, dejando ocasionalmente fuera de servicio al equipo. En la actualidad, la tendencia es la automatización de procesos por medio de sistemas digitales, los cuales, entre otras ventajas, pueden manipular una mayor cantidad de variables y no tienen los inconvenientes mencionados para los sistemas analógicos.*

*El gran desarrollo en las técnicas de construcción de circuitos integrados de muy alta escala, ha permitido una gran evolución en lo que a sistemas computacionales (hardware) se refiere. Las "nuevas generaciones" de microprocesadores (286, 386, 486), así como sus circuitos de soporte, permiten un control "rápido" y eficaz de los procesos. Esto, aunado al gran progreso de la programación, en general y de los algoritmos de control en particular, ha dado como resultado un sorprendente avance al control de procesos industriales. De esta manera, el control de procesos asistido por computadora y adicionado con controladores digitales, es la mejor manera para la automatización de un proceso.*

*El sistema de control distribuido (SICODI) instalado, inicialmente, en la central termoeléctrica de ciclo combinado de Gomez Palacio, Dgo., por Westinghouse electric corporation (WECO), era predominantemente analógico. El Departamento de INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL del INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS (IIE) está desarrollando un proyecto de modernización, en dicha central, consistente en reemplazar, paulatinamente, el control analógico por un SICODI totalmente digital. El objetivo es hacerlo en todos y cada uno de los diferentes sistemas y subsistemas de la planta, para asegurar una operación con mayor disponibilidad y eficiencia.*

*La idea general para la realización de esta tesis es la de establecer un control digital aplicado a uno de los equipos principales de la planta de ciclo combinado, que se denomina: QUEMADORES POSTERIORES ( QP ). El punto de partida fué el control analógico de combustión de los mismos, ya mencionado.*

*En el capítulo I, se realiza una descripción funcional de la central termoeléctrica de ciclo combinado abarcando, en forma general, los equipos más importantes. También, se realiza una descripción detallada de los quemadores posteriores, en cuanto a sus características físicas y de operación.*

*El capítulo II proporciona los conceptos de control más relevantes, así como los principales elementos de un sistema de control. Además, se incursiona en las diferentes técnicas de control, concluyendo con la enumeración de las ventajas que poseen los sistemas de control distribuido (SICODI) en relación con los métodos de control convencional de lazo dedicado y digital directo (CDD).*

*En el capítulo III, se realiza el análisis de los diagramas funcional y esquemáticos, que corresponden al control de combustión analógico de los quemadores posteriores, identificando todos y cada uno de los bloques electrónicos que los constituyen, así como los símbolos de control que representan a dichos bloques. Estos módulos se analizan electrónicamente y algunos son simulados mediante un paquete de software llamado MICROCAP II, donde se observa su comportamiento ante perturbaciones. También, se implementan los modelos matemáticos que definen su funcionamiento, con lo que se establece un algoritmo para cada uno de ellos. Dichos algoritmos, son codificados y simulados en lenguaje de programación C. Los resultados de ambas simulaciones se comparan, resultando las conclusiones para cada bloque.*

*La finalidad de todo lo anterior, fué poder determinar el funcionamiento del sistema de control en conjunto, mediante lo cual, se implementó el algoritmo de control general del sistema de quemadores posteriores.*

*En el capítulo IV, se realiza el estudio del modelo matemático dinámico del proceso, el cual es fundamental para probar al algoritmo de control desde el punto de vista regulatorio. Se proporcionan las fórmulas principales de éste y se explica el porque de la elección de la temperatura de los gases de escape de la turbina de gas ( $T_{gst}$ ), como variable de perturbación.*

*En el capítulo V, tomando como base los resultados del apartado III y lo deducido en el anterior, se establece el algoritmo de control en Lenguaje C. También, se proporcionan las descripciones de los archivos y funciones que integran el control digital de los quemadores*

*posteriores, haciéndose énfasis en aspectos operativos que no fueron profundizados en el capítulo III.*

*Para el capítulo VI, se establece la estructura de pruebas mediante la cual se valida el sistema de control digital. Además, se proporciona la estrategia de pruebas y los resultados obtenidos, los cuales están basados fundamentalmente en gráficas. Así, el algoritmo de control es sometido a pruebas exhaustivas, simulándose diferentes condiciones de operación, hasta que los resultados de las simulaciones realizadas son satisfactorios.*

# CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE CICLO COMBINADO

## I.1.- CONCEPTO.

*La filosofía esencial de operación de una central termoeléctrica de ciclo combinado es la de utilizar los gases de escape (desecho) de la turbina de gas, para producir vapor de agua mediante el cual se alimenta a una turbina de vapor. De este modo, se incrementa considerablemente la eficiencia del sistema, pues se aprovechan las ventajas que poseen los dos tipos de turbinas, lográndose obtener una eficiencia mayor en comparación con cualquier planta de tipo convencional (la cual opera sólo con turbinas de gas o de vapor). Teóricamente, el aumento en la eficiencia de la planta es de un 40% en relación a la obtenida de una central convencional (47%), lo que representa una eficiencia total de 65% aproximadamente.*

*La central de ciclo combinado esta compuesta por dos generadores de turbina de gas, dos recuperadores de calor con sus respectivos sistemas de quemadores posteriores cada uno y una turbina de vapor. En condiciones de 60 °F y nivel del mar, la salida total de la planta es de 260 MW, de los cuales 80 MW son generados por cada una de las turbinas de gas y 100 MW por la turbina de vapor. Es por ello que el ciclo combinado alcanza tan elevada eficiencia.*

## **1.2.- EQUIPOS PRINCIPALES.**

*Una central termoelectrónica de ciclo combinado consta de los siguientes equipos principales (ver fig. 1.1):*

### **1.2.1.- TURBINA DE GAS.**

*Existen dos turbinas de gas en la planta, cada una de las cuales esta acoplada a un generador eléctrico. La energía cinética de los gases que inciden en los álabes de la turbina, es convertida en energía eléctrica mediante este acoplamiento. En términos generales podemos decir que las funciones principales de esta turbina son:*

- a) Producir energía mecánica para mover al generador eléctrico a una velocidad angular determinada (60 r.p.s en condiciones normales de operación).*
- b) Suministrar gases de escape al recuperador de calor para la generación del vapor.*

### **1.2.2.- TURBINA DE VAPOR.**

*Funciona con el mismo principio que la turbina de gas, con la diferencia de que, en este caso, el agente que incide en los álabes es el vapor de agua producido en el recuperador de calor.*

### **1.2.3.- GENERADOR ELÉCTRICO.**

*El generador eléctrico está acoplado a la turbina y tiene como tarea el convertir la energía mecánica en energía eléctrica. Es trifásico y tiene una capacidad nominal de 94 444*

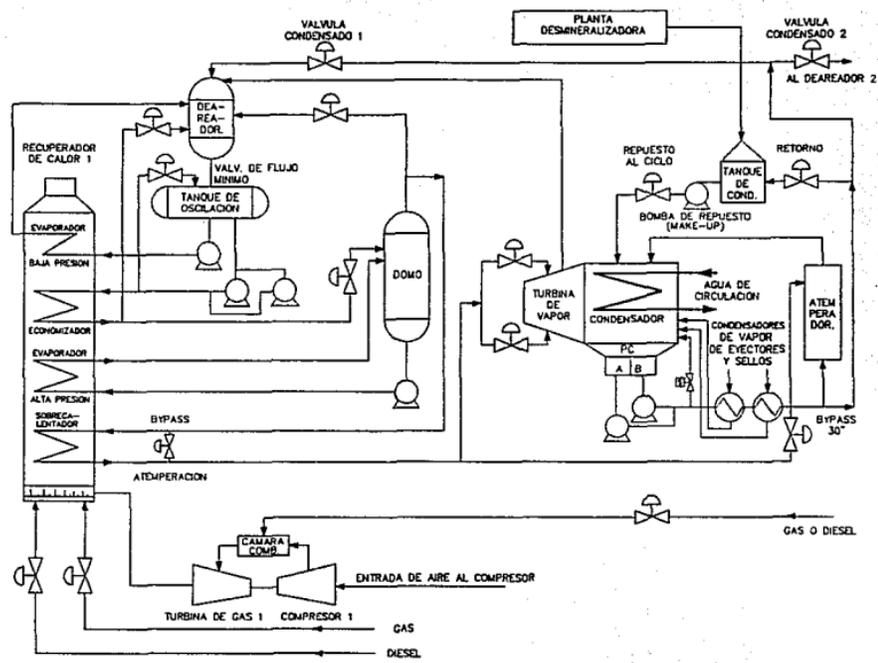


Fig. 1.1. Diagrama general de la central termoelectrica de ciclo combinado. Nótese la distribución de las cámaras.

*KVA con un voltaje de 13 800 volts. Su frecuencia de operación es 60 HZ y su velocidad angular de 3600 R.P.M. El factor de potencia es de 0.9.*

#### ***1.2.4.- RECUPERADOR DE CALOR.***

*La planta posee dos recuperadores de calor interconectados, entre sí, con la turbina de vapor por un lado, y con su respectiva turbina de gas por el otro.*

*La generación del vapor (que alimenta a la turbina) se realiza prácticamente en este equipo, por ello se dice que el recuperador de calor es el eslabón entre el ciclo de gas y el ciclo de vapor.*

*Está constituido por arreglos de tubos en forma de serpentines, por donde se hace circular el fluido de trabajo (que es líquido saturado en la etapa inicial). El flujo de gas en el interior del recuperador de calor es vertical ascendente y los arreglos de tubos están colocados en forma horizontal. De esta manera, el gas en su trayectoria, pasa por los elementos en el siguiente orden: Sobrecalentador, evaporador de alta presión, economizador, evaporador de baja presión; para ser enviado, finalmente, a la atmósfera a través de la chimenea del recuperador.*

*El fluido en el sobrecalentador y economizador se hace circular a contraflujo (en relación a la trayectoria del gas) para aprovechar todas las ventajas que brinda la diferencia de temperaturas (promedio). Mientras que en los evaporadores, el fluido se hace circular en paralelo con la trayectoria del gas.*

*A continuación se describen los arreglos mencionados. Todos tienen forma de serpentín, como ya se mencionó, a excepción del evaporador de baja presión que es un arreglo*

*de tubos en forma horizontal. Cabe hacer la aclaración, que los valores proporcionados no son definitivos, pues pueden variar de acuerdo a las condiciones propias del proceso y a la ubicación geográfica de la central:*

**1.2.4.a) EVAPORADOR DE BAJA PRESIÓN.** *Este equipo recibe líquido saturado con una temperatura de 250 °F, proveniente del tanque de baja presión, por medio de una bomba de circulación de baja presión. Genera una mezcla agua-vapor obtenida mediante el calentamiento de dicho líquido, que es enviada posteriormente al deareador.*

**1.2.4.b) ECONOMIZADOR.** *Recibe líquido saturado del tanque de almacenamiento de baja presión, produciéndole un incremento de temperatura de 250 °F a 570 °F. Posteriormente envía dicho líquido al domo, donde es mezclado con agua recirculada, para después ser liberado por la parte inferior.*

**1.2.4.c) EVAPORADOR DE ALTA PRESIÓN.** *El evaporador de alta presión recibe el fluido desde el domo vía una bomba de alta presión, generando una mezcla agua-vapor que es enviada posteriormente al domo. El proceso de evaporación es isotérmico, con una temperatura aproximada de 577 °F.*

**1.2.4.d) SOBRECALENTADOR.** *El vapor de salida de la parte superior del domo, es enviado al sobrecalentador donde se le incrementa aún más la energía, produciéndose vapor*

sobrecalentado con las condiciones de presión y temperatura requeridas.

Debido a su posición en el hogar del recuperador, el sobrecalentador posee las condición de temperatura más elevada (1011 °F). La temperatura del vapor a la salida del sobrecalentador es del orden de los 952 °F, con una presión de 1277 PSIA. El funcionamiento de este equipo está fundamentado en el ciclo rankine sobrecalentado.

**1.2.5.- QUEMADORES POSTERIORES.** Los quemadores posteriores están localizados en el ducto que comunica a la turbina de gas con el recuperador de calor. Existen dos conjuntos de quemadores posteriores, uno para cada recuperador de calor.

Los quemadores posteriores pueden funcionar con dos tipos de combustibles; cuya denominación y características básicas aparecen a continuación:

**1) DIESEL ESPECIAL:**

- Poder calorífico superior: 10803 KCal/Kg.
- Densidad : 0.822 Kg/m<sup>3</sup> a 24 °C.

**2) GAS NATURAL:**

- Poder calorífico superior: 9 504 KCal/m<sup>3</sup>.
- Densidad específica: 0.635 Kg/m<sup>3</sup>.

Una descripción más detallada de los quemadores posteriores se realiza después.

**I.2.6.- DEAREADOR.** Recibe el líquido enviado por el condensador, incrementando su temperatura hasta 250 °F para enviarlo, posteriormente, al tanque de almacenamiento de baja presión. Utiliza el vapor extraído de la turbina de vapor y el agua con alta presión proveniente del economizador para calentar el líquido condensado.

**I.2.7.- DOMO.** El domo realiza la separación de la mezcla agua-vapor que recibe del evaporador de alta presión. El vapor saturado se obtiene en la parte superior del domo y fluye hacia el sobrecalentador.

**I.2.8.- CONDENSADOR.** Recibe los residuos de vapor que provienen de la descarga de la turbina de vapor, convirtiéndolos en agua mediante su expansión hasta presiones menores a la atmosférica.

Se trata de un condensador de superficie, formado por un arreglo de tubos por donde circula agua de enfriamiento; la corriente de vapor pasa alrededor de ellos (sistema acuotubular). De esta manera, el agua de enfriamiento absorbe, recoge y arrastra consigo el calor desprendido por el vapor condensado. El líquido condensado obtenido es enviado al deareador.

**I.2.9.- TANQUE DE CONDENSADO.** Su función principal es almacenar líquido saturado que proviene de los intercambiadores de calor. El fluido a la salida de éstos puede dividirse en dos trayectorias; una que es enviada a los deareadores (estado de operación normal) y otra que

es transportada al tanque de condensados, mediante una válvula que abre cuando el flujo hacia los deareadores es muy alto. El líquido almacenado en el tanque se bombea al pozo caliente.

**I.2.10.- ATEMPERADOR.** Se utiliza principalmente en la etapa de arranque de la turbina de vapor. Inicialmente, la válvula bypass de 30" permanece abierta (ver figura I.1), mientras que las válvulas de la turbina de vapor están cerradas. Cuando el vapor sobrecalentado adquiere ciertas condiciones (presión > 300 PSIA), la válvula del atemperador cierra, sacándolo de operación, y las de la turbina abren.

La idea principal es que los atemperadores pasen el vapor sobrecalentado a saturado, cuando la turbina de vapor no esté en funcionamiento, con la finalidad de poder introducirlo, posteriormente, en el condensador; lo que no podría realizarse si el vapor estuviera sobrecalentado.

**I.2.11.- PLANTA DESMINERALIZADORA.** La planta desmineralizadora tiene como función principal eliminar la dureza del agua que es utilizada para la producción de vapor y para el circuito cerrado de enfriamiento. Utiliza los procesos de filtración y desmineralización para tal fin.

El flujo de vapor hacia la turbina se controla por medio de una válvula principal y dos de control, aunque también se tienen de corte para casos de emergencia.

*El vapor de escape de la turbina de vapor es utilizado para precalentar el agua de circulación; parte de éste es retroalimentado hacia el deareador y otra parte es condensada y recirculada al sistema de recuperación de calor, cerrándose de esta forma el ciclo.*

*Además de estas secciones existen una gran cantidad de bombas, filtros, compuertas, condensadores, válvulas, etc.; las cuales tienen una función determinada, pero cuya descripción está al margen de los propósitos de esta tesis.*

### **1.3.- QUEMADORES POSTERIORES.**

#### **1.3.1.- IMPORTANCIA DE LOS QUEMADORES POSTERIORES.**

*Los quemadores posteriores incrementan la temperatura de los gases de escape de la turbina de gas, alterando con esto las características del vapor y regulando, en determinado momento, el funcionamiento de la turbina de vapor. Esto, en términos generales, significa mayor eficiencia de la planta al incrementarse la capacidad de generación eléctrica.*

*La cantidad de energía del vapor sobrecalentado puede incrementarse considerablemente con la utilización de los quemadores posteriores o puede, por otra parte, decrementarse haciendo uso de la válvula bypass de atemperación localizada entre la entrada y la salida del sobrecalentador.*

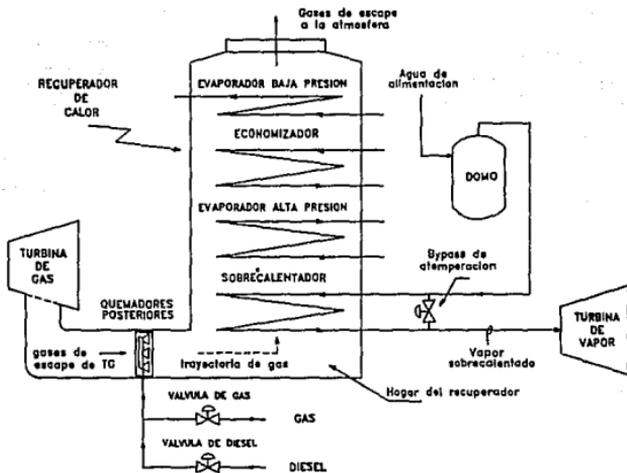
Debido a lo anterior, existe la necesidad de implementar en la central termoeléctrica un CONTROL DIGITAL DE LA COMBUSTIÓN DE LOS QUEMADORES POSTERIORES, que permita la operación óptima de estos. Así, podrá brindarse un apoyo más efectivo en cuanto a la generación de energía eléctrica, principalmente durante los picos en la curva de demanda de carga.

### 1.3.2.- CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES.

La figura 1.2 nos muestra la localización de los quemadores posteriores en la planta, precisamente en la zona de recuperación de calor. Como puede verse, se encuentran alojados en el ducto que comunica a la turbina de gas con el recuperador de calor, de tal forma que los gases de escape de dicha turbina pasan por entre los quemadores en su recorrido hacia el recuperador, absorbiendo con ello calor adicional.

Los quemadores están formados por elementos verticales con 14 toberas cada uno para diesel y gas. Un quemador piloto está montado horizontalmente a lo largo de la base de los elementos del quemador principal (ver fig.1.3). El piloto es energizado sólo con el encendido del quemador principal y puede proporcionar hasta 2 000 000 Btu/hr (504 000Kcal/hr.). La figura 1.3 muestra el aspecto físico de los quemadores posteriores. Las toberas para gas y diesel se encuentran localizadas a lo largo del cuerpo de los quemadores.

Los quemadores posteriores poseen una capacidad máxima de 250 000 000 Btu/hr. (63 000 000 Kcal/hr.), produciéndose una elevación mínima de calor de 41 666 000 Btu/hr para



**Fig. 1.2. Localización de los quemadores posteriores en la zona de recuperación de calor.**

el sistema de diesel y de 250 000 000 Btu/hr para el de gas; lo cual indica una ventaja del segundo sobre el primero.

Las especificaciones para los quemadores posteriores son las siguientes:

- Flujo de gas de la turbina = 2 550 000 Lb/hr. (1159 Ton/hr.) a 980 °F.
- Presión en el ducto del quemador = 18" C.A (457mm.C.A).
- Oxígeno en el gas = 15.92% en peso.
- Elevación de temperatura : De 988 °F a 1200 °F.

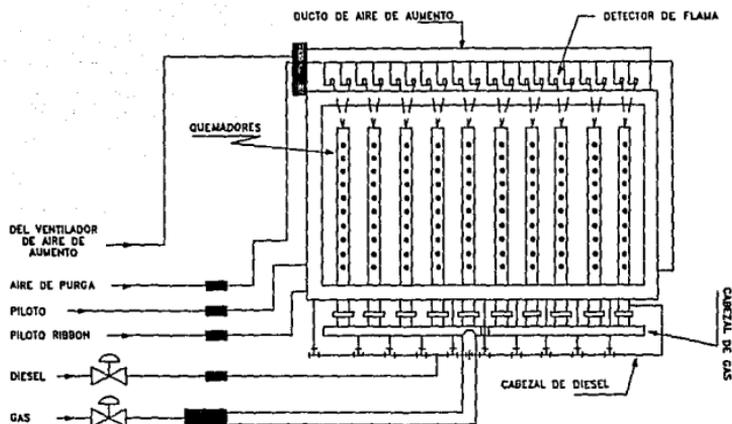


Fig. 1.3.- Aspecto físico de los quemadores posteriores. Apréciense los elementos auxiliares y la posición de los quemadores.

### 1.3.3.- SISTEMA DE VENTILADORES.

Además de los elementos auxiliares ya mencionados, los quemadores también poseen un sistema de ventiladores cuya finalidad es mantener la relación adecuada de aire-combustible, mediante la cual se consigue una combustión óptima. Una descripción resumida de éstos se encuentra a continuación:

**1.3.3.a) VENTILADOR DE AIRE DE AUMENTO:** Sirve para enfriar al quemador y proveer la primera combustión de aire.

**1.3.3.b) VENTILADOR DE AIRE DE PURGA:** Suministra aire para proteger a los detectores

de flama.

**1.3.3.c) VENTILADOR DE AIRE DE ATOMIZACIÓN:** *Provee aire sólo cuando se utiliza diesel como combustible.*

*Los ventiladores de aire de aumento y purga son arrancados y detenidos por un sistema lógico automático que los activa por medio de un relevador maestro, durante la secuencia de arranque.*

*Los detectores de flama, mencionados anteriormente, utilizan luz infrarroja para sensar el estado de la flama y están conectados a un sistema de protecciones capaz de interrumpir el flujo de combustible, en caso de que la flama se extinga.*

#### **1.3.4.- OPERACIÓN.**

*Es muy importante aclarar que los quemadores posteriores sólo pueden funcionar con un combustible de los dos ya mencionados (gas o diesel), por lo que el operador debe elegir alguno antes del arranque.*

*Las condiciones necesarias que deben existir para iniciar la operación de los quemadores posteriores, son las siguientes:*

- a) La caldera está en modo de rodado.*
- b) La caldera está en estado húmedo.*
- c) La turbina de gas está en operación.*

*Si se cumplen estas condiciones, los quemadores pueden ser arrancados automáticamente (por el sistema de control automático) o en forma manual por el operador.*

*En términos generales, el control de los quemadores posteriores se logra modificando la posición de la válvula de gas o diesel, según sea el caso. Para tal fin, se tiene funcionando un control que considera la demanda de vapor de la turbina como variable principal.*

***"El control de combustión de los quemadores posteriores, aunado a la válvula bypass de atemperación, controlan la temperatura del vapor llevándola a un punto de ajuste óptimo."<sup>1</sup>***

*La temperatura del vapor a la salida del sobrecalentador es controlada mediante un punto de ajuste variable. Cuando la válvula de bypass de atemperación de dicho sobrecalentador abre, el punto de ajuste de los quemadores posteriores cambia a su posición original. Esto previene que los dos sistemas de control (control de los quemadores posteriores y de la válvula bypass de atemperación) operen simultáneamente, produciendo inestabilidades en el proceso.*

***1.3.4.1.- TRANSFERENCIA DE COMBUSTIBLE:*** *Si se requiere hacer un cambio de combustible en plena operación, se realiza un procedimiento llamado transferencia de combustible. Existe un sistema de seguridad de la flama que se encarga de controlar las válvulas de suministro, durante esta etapa.*

---

<sup>1</sup> WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, POWER DIVISION SYSTEM Customer's familiarization program. (Philadelphia, Pennsylvania).  
VI. p 2-3-15.

## TÓPICOS IMPORTANTES EN LA **INGENIERÍA DE CONTROL**

### **II.1.- CONCEPTOS DE CONTROL**

#### **II.1.1.- DEFINICIONES.**

\* **VARIABLE CONTROLADA:** Es la condición que se mide y que será sometida al proceso de control.

\* **MEDIO CONTROLADO:** Es el proceso en el cual una variable va a ser controlada. La variable controlada es una condición o característica del medio controlado.

\* **VARIABLE MANIPULADA:** Corresponde a la cantidad o condición que es variada por el elemento final de control para afectar el valor de la variable controlada.

\* **AGENTE DE CONTROL:** Se denomina así al proceso, energía o material del cual la variable manipulada es una característica.

\* **SEÑAL ACTUADORA:** Corresponde a la diferencia entre la señal de referencia y una señal relacionada con la variable controlada, en un determinado tiempo.

\* **DESVIACIÓN:** Es la diferencia entre el valor de la variable controlada y el valor del punto de ajuste, en un tiempo determinado.

\* **DESVIACIÓN ESTABLE:** Diferencia permanente entre el punto de control y el valor de la variable controlada correspondiente al punto de ajuste (Véase control

proporcional).

- \* **ACCIÓN DE CORRECCIÓN:** Variación de la variable manipulada originada por el sistema de control.
- \* **CICLAJE:** Variación periódica de la variable controlada.
- \* **PUNTO DE AJUSTE (set point):** Es el valor de referencia al cual será llevado el valor de la variable controlada mediante el sistema de control. Puede decirse también que es el valor deseado de la variable controlada.
- \* **PUNTO DE CONTROL:** Valor de la variable controlada al cual opera el control automático para mantenerlo, bajo cualquier condición de ajuste fijado.
- \* **ESTADO ESTABLE:** Es una condición de cualquier variable que es mantenida a un valor constante o que sólo se le permite una variación lenta y uniforme con el tiempo.
- \* **ESTADO TRANSITORIO:** Es un cambio en la variable de manera no uniforme. Generalmente implica una condición anormal en el sistema de forma temporal con corta duración.
- \* **SINTONIZACIÓN:** Este término es muy importante ya que determina la buena regulación por parte del sistema de control. El concepto de sintonización se refiere a la elección de los parámetros del controlador que proporcionen la mejor de las respuestas de éste, ante la presencia de la señal de error. Esto es, al sintonizar se pretende elegir los valores de constante proporcional, constante de tiempo integral y constante derivativa que consigan la señal correctora más apropiada para tratar a la

señal de error.

*Existen tres métodos de sintonización para sistemas de entrada simple y salida simple:*

- 1) *Método sistemático de ensayos.*
- 2) *Método de la sensibilidad última.*
- 3) *Método de la curva de reacción.*

\* **PERMISIVO:** *Señal que se crea como consecuencia de la evaluación de una serie de condiciones y cuya función es activar una acción determinada (sistema de protecciones). También se denomina como una condición que debe cumplirse para que pueda realizarse una acción determinada.*

## **II.1.2.- COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CONTROL.**

**II.1.2.a) PROCESO:** *Es un conjunto de operaciones encaminadas a la obtención de un resultado deseado. Las operaciones pueden ser de tipo mecánicas, eléctricas, reacciones químicas, o alguna combinación de ellas.*

*Todo proceso contiene inherentemente ciertas características fundamentales de retardo y demora, las cuales dificultan la acción de control de dicho proceso. Estos efectos de retardo y demora son denominados retrasos de tiempo del proceso y son ocasionados por las siguientes:*

### **II.1.2.a.1.- PROPIEDADES.**

\* **Capacidad:** *Medida de la cantidad máxima de energía que puede ser almacenada entre los límites de una parte determinada del equipo.*

- \* **Capacitancia:** Es el cambio en la cantidad contenida por unidad de cambio de la variable de referencia.
- \* **Resistencia:** Es la oposición al flujo de energía.
- \* **Tiempo muerto:** Cualquier demora definida entre dos acciones relacionadas.
- \* **Autoregulación:** Es una reacción sostenida, inherente al proceso, que ayuda al establecimiento del equilibrio.

**II.1.2.b) MEDIOS DE MEDICIÓN:** Pueden ser cualquier dispositivo de medición y tienen como finalidad el determinar y transmitir el valor de la variable controlada.

**II.1.2.c) ELEMENTO PRIMARIO:** Corresponde a la porción de los medios de medición que sensan la energía del medio controlado para producir un efecto, en respuesta al cambio en el valor de la variable controlada. Como ejemplos de estos tenemos a la placa de orificio, boquilla de flujo, tubo Venturi y termopares.

**II.1.2.d) ELEMENTO SECUNDARIO:** Recibe la salida del elemento primario y la convierte en una señal apropiada para el sistema de control. Puede ser un transductor y puede ser utilizado para transmitir la magnitud de la variable controlada o sólo para indicarla. También puede calcular el valor de la variable calculada; extrayendo la raíz cuadrada de la presión diferencial para conseguir la medición del flujo, por ejemplo. Un manómetro y un puente de Wheatstone son dispositivos de este tipo.

**II.1.2.e) MEDIOS DE CONTROL:** Mediante estos dispositivos puede realizarse una acción correctiva.

**II.1.2.f) ELEMENTO FINAL DE CONTROL:** Es cualquier actuador de válvula o unidad de potencia que modifica directamente el valor de la variable manipulada.

**II.1.2.g) UNIDAD DE POTENCIA:** Es la parte de los medios de control que proporciona potencia para accionar el elemento final de control.

**II.1.2.h) PERTURBACIÓN:** Es una señal no deseada de característica aleatoria que produce cambios en las condiciones del proceso.

## **II.2.- TIPOS DE CONTROLADORES.**

### **II.2.1.- CONTROLADOR PROPORCIONAL.**

El controlador proporcional responde inmediatamente ante la presencia de la señal de error, multiplicándola por una constante de proporcionalidad ( $K_p$ ), como se muestra en la siguiente relación:

$$U_o(t) = K_p * U_i(t) \dots \dots \dots (II.1)$$

De ésta, obtenemos la función de transferencia:

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = K_p \dots \dots \dots (II.2)$$

Donde:  $U_o(t)$ : Señal de salida.

$U_i(t)$ : Señal de error.

$K_p$  : Ganancia proporcional.

En el control proporcional, la variable de salida no es afectada por el tiempo y

no tiene defasamiento en relación a la señal de entrada. Presenta una desviación de error cero, que viene siendo el valor de la salida cuando no hay error en la entrada. Manifiesta también, una desviación permanente (offset) que no es capaz de eliminar por sí solo.

La salida del controlador proporcional puede ser mayor, igual o menor que la de la variable de entrada, dependiendo del valor de la constante; si la constante proporcional  $K_p$  es mayor que uno, se presenta el primer caso, si es igual a uno, entonces se cumple el segundo, y si es menor que uno, ocurre el último caso.

Generalmente, se hace alusión al término banda proporcional en lugar de considerar la ganancia proporcional. Por definición, la banda proporcional es el cambio en la entrada de un controlador, necesario para producir la máxima señal de salida. La relación que existe entre ésta y la ganancia proporcional está dada por la siguiente ecuación:

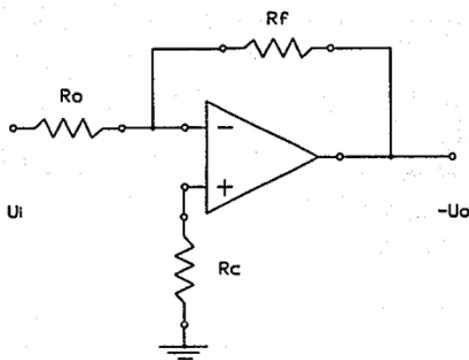
$$B. P = \frac{100\%}{G. P} \dots \dots \dots (11.3)$$

Donde B.P es la banda proporcional y G.P es la ganancia proporcional del controlador. La ganancia sólo puede obtenerse si tanto la variable de entrada como la de salida poseen las mismas unidades.

La configuración electrónica de un controlador proporcional, puede observarse en la figura II.1. En ella se aprecia la posición de las resistencias de retroalimentación

( $R_f$ ) y de entrada ( $R_o$ ), que determinan el valor de la constante proporcional ( $K_p$ ) de acuerdo a la siguiente expresión:

$$K_p = \frac{R_f}{R_o} \dots \dots \dots (14)$$



**Fig. II.1.- Configuración electrónica del controlador proporcional.**

### II.2.2.- CONTROLADOR INTEGRAL.

La acción integral corrige por completo la desviación permanente que se presenta en la proporcional; su salida varía de acuerdo a la constante de tiempo de acción integral ( $T_i$ ) hasta nulificar por completo la señal de error. Sin embargo, tiene el inconveniente de ser lenta, puesto que, cualquier cambio de signo en el error no es considerado hasta haber cancelado el error previo, en cuyo momento, se lleva a cabo

la inversión en la acción correctiva.

El valor de la salida  $U_o(t)$  varía de la siguiente manera:

$$\frac{d}{dt} U_o(t) = K_i * U_i(t) \dots \dots \dots (II.5)$$

O también:

$$U_o(t) = K_i \int_0^t U_i(t) dt + U_o(0) \dots \dots \dots (II.6)$$

Donde:

$K_i = 1/T_i$  : Coeficiente de acción integral.

$T_i$ : Constante de tiempo de acción integral.

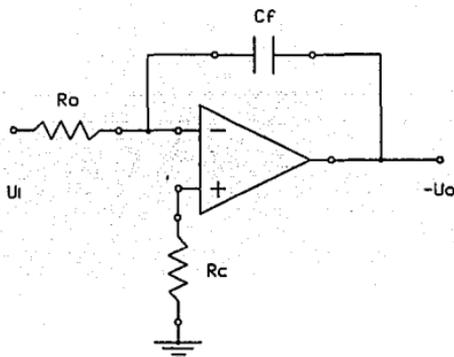
$U_o(0)$ : Valor acumulado.

$U_i(t)$ : Señal de error.

De la ecuación II.6, apreciamos que cuando la variable de entrada es cero no se modifica la variable de salida, debido a que se anula la integral y el valor de salida es igual al valor acumulado  $U_o(0)$ . Si la variable de entrada es pequeña, la variable de salida se modifica lentamente; pero si es grande, su variación es súbita. La magnitud de la constante de tiempo de acción integral ( $T_i$ ) determina la rapidez de respuesta de la acción integral:

"Cuanto mayor es la constante de tiempo de acción integral, tanto menor es el

*incremento de la variable de salida por unidad de tiempo para una variable de entrada determinada<sup>2</sup>.*



**Fig. II.2. - Configuración del controlador integral. Apréciase la posición del condensador de integración.**

*Este tipo de acción se implementa electrónicamente con el controlador de la figura II.2. Cabe hacer mención, que la implementación de esta acción, únicamente puede lograrse con la configuración inversor.*

*La constante de tiempo de acción integral ( $T_i$ ) se obtiene de los parámetros del circuito, mediante la siguiente relación:*

<sup>2</sup> FRÖHR (Y) ORTTENBURGEN, *Introducción al control electrónico* (Barcelona, España: Marcombo S.A., 1986), p.68.

$$T_i = R_o * C_f \dots \dots \dots (11.7)$$

*El capacitor en la rama de retroalimentación (Cf) recibe el nombre de condensador de integración y es el que determina, a fin de cuentas, el valor de la constante de tiempo de acción integral, ya que el valor de la resistencia de entrada Ro está determinado por las condiciones exigidas para la comparación de las corrientes a la entrada del controlador.*

### **II.2.3.- CONTROLADOR DERIVATIVO (control de velocidad).**

*El valor de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de variación de la señal de error actuante.*

Esto es:

$$U_o(t) = Td \frac{d}{dt} U_i(t) \dots \dots \dots (11.8)$$

*El tiempo derivativo Td es el intervalo de tiempo (en minutos) en el que la acción de velocidad se adelanta al efecto de acción proporcional.*

*La acción de control tiene la desventaja de amplificar las señales de ruido y puede producir efecto de saturación en el accionador. Además, no se utiliza solo porque este tipo de controlador es efectivo únicamente en periodos transitorios, pues para señales de error constantes se tiene una derivada cero; lo que implica que no exista señal actuadora.*

La acción derivativa origina un efecto de avance de fase como resultado de la derivación de la variable de entrada.

La configuración de un controlador derivativo es la mostrada en la figura 11.3.

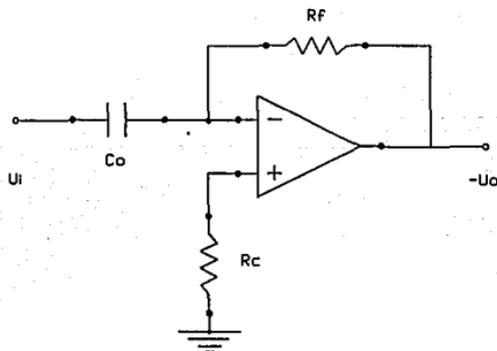


Fig. 11.3.- Configuración del controlador derivativo.

#### II.2.4.- CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL.

El controlador proporcional-integral (PI) es el más utilizado en el ámbito de la generación de energía eléctrica.

Aprovecha la combinación de las propiedades de los controladores proporcional e integral para corregir la señal de error. Del primero, adquiere la velocidad de respuesta con la que actúa inmediatamente cuando aparece el error; del segundo, obtiene la característica de eliminar la desviación permanente, logrando con ello,

anular por completo la señal de error, en un tiempo determinado. Dicho tiempo, dependerá de la naturaleza de la señal de error (magnitud principalmente) y de la constante de integración ( $T_i$ ) establecida.

Genéricamente, la acción proporcional-integral se define mediante la ec. II.9 :

$$U_o(t) = K_p U_i(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t U_i(t) dt + U_o(0) \dots \dots \dots (II.9)$$

Donde:

$K_p$ : Ganancia proporcional.

$T_i$ : Constante de tiempo de acción integral.

$U_o(0)$ : Valor alcanzado por la salida antes de que se presente la señal de error.

La constante  $T_i$ , mencionada con anterioridad, regula la acción de control integral. Su inverso es la **frecuencia de reposición**, definida como el número de veces por minuto que se duplica la parte proporcional y cuyas unidades son repeticiones por minuto.

El circuito implementado de este tipo de acción, es el mostrado en la figura II.4. Puede apreciarse que la rama de retroalimentación está compuesta por un arreglo en serie de una resistencia y un capacitor. El valor de estos elementos determina el **tiempo de acción integral ( $T_n$ )**, definido mediante la siguiente ecuación:

$$T_n = R_f C_f = \frac{R_f}{R_o} R_o C_f = K_p T_i \dots \dots \dots (II.10)$$

La ganancia proporcional ( $K_p$ ) del arreglo es determinada, prácticamente, por la resistencia  $R_f$ , ya que el valor de la resistencia de entrada  $R_o$  se fija inicialmente. El valor del tiempo de acción integral ( $T_n$ ) puede variarse mediante la capacitancia de  $C_f$  (ver fig. II.4).

Finalmente, se dice que el controlador PI tiene un efecto de avance de fase debido a la componente de acción integral, la cual proporciona una salida mayor que la parte proporcional sola, cuando existe señal de error. Cuando la señal de error es cero, la salida del controlador corresponde sólo a la de la parte integral.

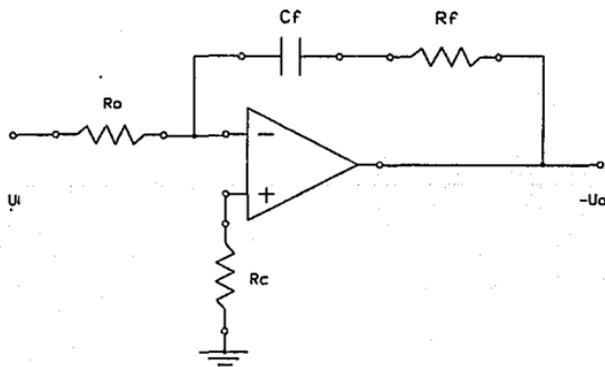


Fig. II.4. Configuración electrónica de un controlador proporcional-integral.

**II.2.5.- CONTROLADOR PROPORCIONAL-DERIVATIVO (PD).**

*Este tipo de control se utiliza en muy raras ocasiones debido a que no elimina el problema del error permanente. Sin embargo, cuando es utilizado para un ajuste proporcional se amortigua, considerablemente, la oscilación del sistema al aplicar un aumento del tiempo derivativo ( $t_d$ ).*

*Está definido por la siguiente ecuación:*

$$U_o(t) = K_p U_i(t) + K_p T_v \frac{d}{dt} U_i(t) \dots \dots \dots (II.11)$$

**Con:**

**$K_p$ :** *Ganancia proporcional.*

**$T_v$ :** *Tiempo de acción derivativo (seg).*

*La configuración de este tipo de controlador es la mostrada en la figura II.5. En ella se aprecia la disposición de una malla en T en la retroalimentación, formada por dos resistencias y un capacitor.*

*Este arreglo, con sus elementos, determina las expresiones para la ganancia proporcional ( $K_p$ ) y el tiempo de acción derivada ( $T_v$ ), que se obtiene mediante la expresión mostrada en la ecuación II.12.*

$$T_v = \frac{R_{f1} * R_{f2}}{R_{f1} + R_{f2}} C_q \dots \dots \dots (II.12)$$

*La constante de tiempo de acción derivada ( $T_d$ ) - equivalente a la  $T_i$  del*

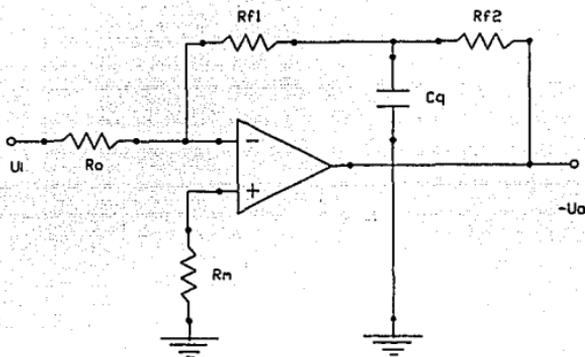


Fig. II.3.- Configuración de un controlador PD.

controlador PI - está relacionada con los parámetros arriba mencionados, de la siguiente manera:

$$T_d = K_p T_v = \frac{R_{f1} * R_{f2}}{R_o} C_q \dots \dots \dots (II.13)$$

### II.2.6.- CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO (PID).

Una vez comprendido el funcionamiento por separado de los tres tipos de controladores básicos (proporcional, integral y derivativo), es posible entender que un controlador PID posee en suma las propiedades de cada tipo de acción. Tenemos entonces que:

a) La parte proporcional brinda rapidez, corrigiendo la posición del elemento final de

control en una cantidad proporcional a la desviación. Crea un error permanente.

b) La acción integral es lenta a comparación de la proporcional, pero corrige, por completo, el error permanente ocasionado por ésta. Corrige la señal de error con un coeficiente que es proporcional a la desviación.

c) El control derivativo mejora aún más el arreglo, pues reduce la oscilación del sistema y alinea más rápidamente a la variable controlada.

La ecuación genérica en función del tiempo para este controlador, se presenta en la ecuación II.14.

$$-U_o(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t U_o(t) dt + K_p \left[ 1 + \frac{T_v}{T_n} \right] U_o(t) + T_d \frac{d[U_o(t)]}{dt} + U_o(0) \quad \text{II.14}$$

Podemos distinguir en esta cuatro sumandos, de los cuales el primero corresponde a la componente integral, el segundo es la parte proporcional, el tercero es la componente derivativa y el último término corresponde al valor acumulado.

La figura II.6 muestra el arreglo para un controlador PID. En ella puede apreciarse la malla de retroalimentación formada por un arreglo de resistencias y capacitores.

## II.3.- CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL.

### II.3.1.- SISTEMA DE CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES.

Un sistema de control es un conjunto de elementos humanos, mecánicos, eléctricos, neumáticos, electrónicos, etc.; interrelacionados entre sí, que tienen como

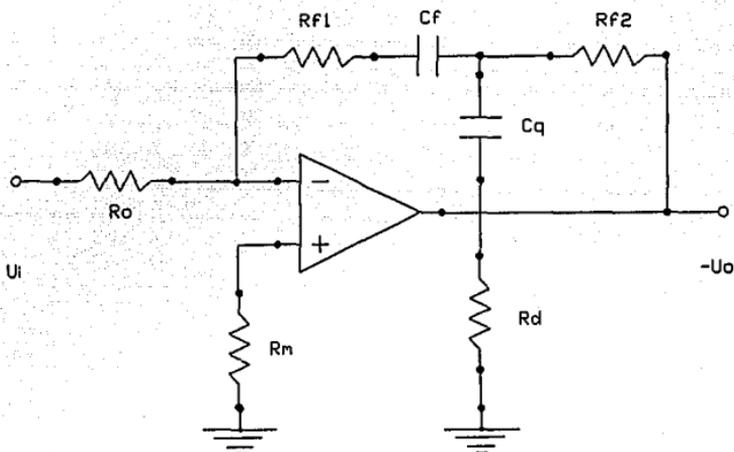


Fig. 11.6.- Configuración del controlador PID. Nótese la disposición de los elementos en la malla de retroalimentación.

objetivo final mantener una serie de variables físicas, relacionadas con un proceso determinado, lo más próximas posible a los valores previamente establecidos (puntos de ajuste), aun con la presencia de perturbaciones en las entradas del proceso o dentro del mismo.

En una central termoeléctrica el producto final es la energía eléctrica y para lograr una regulación apropiada de ésta, es imprescindible la implementación de un complejo sistema de control que considere todas las variables que intervienen en el

proceso y las manipule para regular las condiciones de presión y temperatura (entre otras) requeridas.

*La tendencia actual de los sistemas de control de procesos industriales es la automatización. Las razones más importantes a considerar para la instalación de un sistema de control automático son la disponibilidad del equipo, el incremento en la generación y la seguridad. En muchos procesos industriales -incluyendo la generación de energía eléctrica- se presentan condiciones extremas de variables como la presión y/o temperatura. La necesidad de evitar, en lo posible, el error humano ocasionado por la fatiga u otras causas, es un factor más que justifica la instalación de sistemas de este tipo.*

### **II.3.2.- TIPOS DE CONTROL.**

*Desde el punto de vista del procesamiento de señales y del equipo empleado para la implementación del control, existen tres tipos a saber:*

- a) **CONTROL ANALÓGICO.**
- b) **CONTROL DIGITAL.**
- c) **CONTROL HÍBRIDO.**

#### **II.3.2.a).- CONTROL ANALÓGICO.**

*El control analógico es aquel en el cual las variables de proceso son tomadas de la planta y transformadas en señales eléctricas continuas que están en función del tiempo. Dicha transformación se consigue mediante transductores. La característica*

esencial de este tipo de variables es el poder variar gradualmente en un intervalo continuo de valores.

Posteriormente, en el equipo de control, las señales son manipuladas por medio de sistemas electrónicos diseñados a base de amplificadores operacionales y componentes discretos diversos (como son transistores, diodos, etc.).

### **II.3.2.b).- CONTROL DIGITAL.**

El control digital tiene su fundamento en el uso de los dos únicos posibles estados lógicos: "1" y "0". Esto asegura, entre otras cosas, que no exista confusión cuando se lee un valor.

La adquisición de las señales del proceso se realiza con la misma técnica que en el control analógico; esto es, la señal física es sensada y transformada a energía eléctrica, para después ser transmitida hasta los sistemas de control propios.

Debido a que en un sistema de control digital las señales son expresadas mediante códigos numéricos, es necesario convertir la señal analógica (que proviene de los transductores) a una digital, para lo cual se utiliza un convertidor analógico-digital (CAD).

El convertidor analógico-digital (CAD) está integrado básicamente por un muestreador-retenedor y un cuantificador. El primero, como su nombre lo indica, está compuesto por dos partes; una que realiza el muestreo de la señal a una constante de tiempo determinada y otra que realiza la retención de la cantidad muestreada. La

cuantificación consiste en asignar un número determinado de bits para cada nivel de voltaje de la señal de campo. Este tema es muy interesante y amplio, pero una descripción detallada de él, está fuera de los propósitos de esta obra.

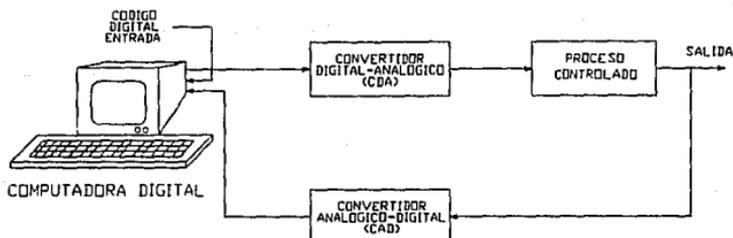
La señal es procesada, posteriormente, por un hardware diseñado a base de circuitos integrados como son microprocesadores, memorias, contadores, amplificadores (Buffers), etc; implementados en una arquitectura denominada de Von Neumann. Dicha arquitectura está caracterizada por tener un procesador central (controlador del programa), una cantidad determinada de memoria, una unidad aritmética y dispositivos de entrada y salida.

Por otro lado, para poder realizar la acción de control sobre algún actuador es preciso que una variable digital sea convertida en una señal analógica mediante el uso de un convertidor digital-analógico (CDA).

Una variable de proceso se representa en forma digital mediante las siguientes características:

- a) Un número: Indica el valor absoluto de la variable.
- b) Una unidad física: Está determinada por el tipo de transmisor de medida empleado.
- c) Signo positivo o negativo: Determina el sentido de la modificación, en caso de que se tratase de una señal de error.

Un sistema típico de control digital es el representado en la figura II.7, en el se muestra a groso modo su estructura fundamental.



**Fig. 11.7.-** Diagrama representativo de un sistema de control digital. Obsérvese la interacción entre los bloques y la computadora digital.

*Algunas de las ventajas de los sistemas de control digitales en comparación con los analógicos son:*

- a) *Sensibilidad mejorada.*
- b) *Mayor seguridad.*
- c) *Mayor inmunidad ante ruido.*
- d) *Equipo más compacto y ligero.*
- e) *Mayor flexibilidad en su programación: Son más versátiles que los analógicos, pues el programa que los caracteriza puede ser modificado para realizar cambios de diseño o acciones adaptables sin ninguna variación en cuanto al hardware.*
- f) *No requiere calibración o ajustes periódicos.*

**II.3.2.c).- CONTROL HÍBRIDO.**

*Además de las dos formas básicas de control, explicadas arriba, existe una tercera que es más versátil ya que es la combinación de éstas. Se trata del llamado control híbrido, que básicamente contiene elementos de control digital como una computadora (digital) y controladores implementados por medio de tarjetas analógicas. Estas últimas, están fundamentadas en el uso del amplificador operacional, acompañado, claro está, de una determinada cantidad de dispositivos discretos.*

*Con el advenimiento de los circuitos de muy alta escala, la tendencia en el control es la digitalización, pues ofrece una gran cantidad de ventajas a comparación de los sistemas analógicos.*

**II.4.- SISTEMAS DE CONTROL.**

*En la actualidad existen varios tipos de técnicas de control, cada una de las cuales puede encontrar aplicación en la automatización de determinada planta. Las técnicas de control han experimentado tal evolución, que en la actualidad es posible controlar (por completo) cualquier proceso. Bajo este hecho, tenemos que la técnica a implementar para el control de un proceso depende de las características del mismo; así, si el proceso es pequeño la mejor opción es un sistema de control digital directo, debido a que las variables manejadas son pocas.*

*Por otra parte, si se trata de controlar un sistema con cientos o tal vez miles de variables, un sistema de control distribuido es más conveniente, debido a las*

características que se describirán posteriormente.

Las técnicas de control más importantes por su utilización en procesos industriales, son las siguientes:

- a) Sistema de control convencional de lazo dedicado.
- b) Sistema centralizado de control digital directo (CCD).
- c) Sistema de control distribuido (SICODI).

#### **II.4.a).- SISTEMA DE CONTROL CONVENCIONAL DE LAZO DEDICADO.**

Este tipo de sistema de control tuvo su auge en la década de los 60's, cuando la tecnología para la construcción de los circuitos integrados no existía, por ende, se trata de un control puramente analógico.

La forma de operación de este tipo de control, se caracteriza por que existen varios conjuntos de instrumentos, cada uno de los cuales se dedica exclusivamente a controlar sólo una variable del proceso (ver fig. II.8).

#### **II.4.b).- SISTEMA CENTRALIZADO DE CONTROL DIGITAL DIRECTO (CDD).**

Esta modalidad de control se utilizó mucho en los procesos durante los 70's, cuando hubo un repunte en la optimización de los procesos de construcción de circuitos integrados de baja y mediana escala de integración.

En el control digital directo, la regulación de todas las variables del proceso a controlar está a cargo de un sólo procesador (ver fig. II.8). Esto significa que una sola computadora se encarga de realizar tanto el control supervisorio como el regulatorio

(ver págs. 46 y 47).

*El más grave de los inconvenientes para la utilización de este tipo de control, es la misma seguridad del sistema. Si funciona defectuosamente la computadora del control centralizado, el proceso se paraliza por completo o tiene que funcionar con el respaldo manual hasta que la falla sea corregida (lo que generalmente implica inversión de mucho tiempo).*

*Como se dijo con anterioridad, la técnica de control a implementar depende de las características propias del proceso, principalmente. De esta manera, si los lazos de control del proceso a controlar son pocos (menores a 15 ó 20) y no son complejos, puede adoptarse un sistema de control centralizado, pues las variables a controlar son pocas. Cuando se requiera controlar un número relativamente grande de variables, es más conveniente la instalación de un sistema de control distribuido (SICODI), porque además de las ventajas que ofrece (ver págs. 45 y 46), representa una reducción en los costos de equipo e instalación, muy a considerar en las industrias actuales.*

#### **II.4.c).- SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO (SICODI).**

*En este tipo de control, las funciones que normalmente eran asignadas a la computadora son implementadas en controladores digitales independientes. Las computadoras no realizan control digital directo (CDD), pues su papel principal es el control supervisorio; relegando de esta manera, el control regulatorio avanzado a microcontroladores distribuidos que son encomendados para cada propósito (ver figura*

## II.8).

Tales microcontroladores, realizan todas las conversiones analógico-digital (A/D) y digital-analógico (D/A) necesarias para la computadora. Además, envían parámetros a la computadora central para reportar mediciones, puntos de ajuste, salidas (actuadores) y el estado general del lazo de control (loop). También, los microcontroladores distribuidos pueden realizar cálculos, disminuyendo con ello la carga en la memoria de la computadora. Esto y la reducción de tráfico de interrupciones, solucionaron en gran medida el problema de capacidad de memoria y de la cantidad de buffers utilizados, muy frecuente en el control digital directo.

En virtud de la "inteligencia" local de la computadora y de la capacidad para manejar datos de los lazos (loops) de comunicación, los sistemas de control distribuido poseen un alto grado de seguridad en su información. Además, en la actualidad, la transmisión de las señales de proceso se realiza en forma digitalizada y se utilizan técnicas de comunicación por fibra óptica. Esto contribuye en gran medida a aumentar la confiabilidad del sistema, puesto que las señales de ruido que se presentan en el proceso, durante la transmisión de las mediciones, son rechazadas por completo, debido a la gran inmunidad contra transitorios del medio ambiente que presenta la fibra.

En un sistema de control distribuido, las unidades reciben las señales procedentes de los transmisores con una intensidad entre 4 y 20 mA., en lazo de corriente a dos hilos.

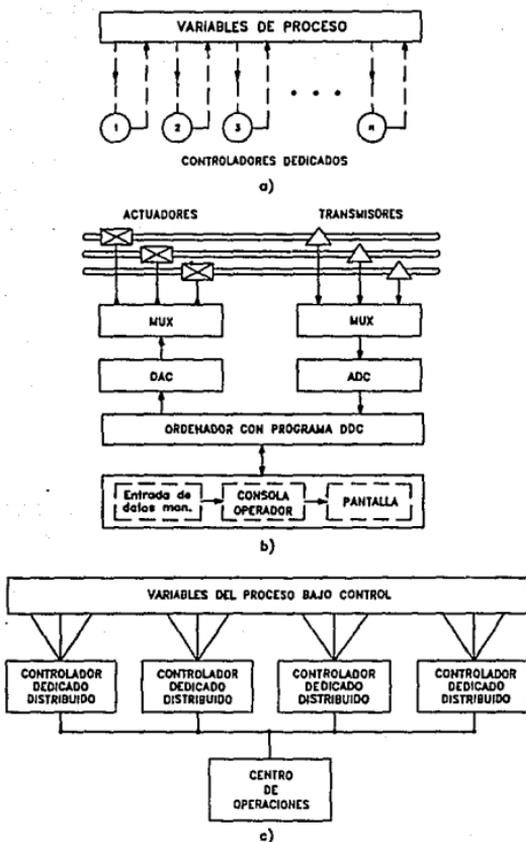


Fig. 11.8.- Tipos de sistemas de control, a) Conventional; b) Directo; c) Distribuido.

Otra aportación más del sistema de control distribuido, es la utilización de una consola del operador (interface). Desde ésta, el operador puede intervenir directamente sobre el proceso, actuando sobre las funciones típicas del controlador como son: Puntos de ajuste, transferencias automático-manual, señales de salida a válvula, etc.

También, es posible arrancar y parar bombas, motores y realizar secuencias; visualizar estados de alarma y solicitar informes relacionados con los lazos de control y del proceso en general.

#### **II.4.c.1.- VENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDO.**

Las ventajas relevantes que poseen los sistemas de control distribuido son las siguientes:

- a) **JERARQUIZACIÓN:** Estructurar jerarquizada en sistemas descentralizados, pudiendo aplicarse en distintos niveles.
- b) **TAREAS:** Realiza tareas de mando, regulación, supervisión, observación, operación, documentación y diagnóstico en un mismo sistema.
- c) **VERSATILIDAD:** Se tiene la gran posibilidad de realizar cambios aún con la planta en operación, sin cambios en el hardware, simplemente con una sencilla reprogramación. Además se evita cableado excesivo.
- d) **AUTOCOMPROBACIÓN:** Posee rutinas de autocomprobación del sistema, disminuyendo con ello los costos de mantenimiento preventivo y correctivo.
- e) **SEGURIDAD:** Operación segura. El índice de fallas es sumamente bajo, debido a

la auto comprobación descrita en el inciso anterior.

**f) COMPATIBILIDAD:** Posee gran facilidad de acoplamiento con otros sistemas que pudieran ser jerárquicamente superiores o inferiores.

**g) FLEXIBILIDAD:** Tiene una gran variedad en cuanto a tamaños, distancia de transmisión y funciones.

En los sistemas de cogeneración de energía (planta de ciclo combinado, por ejemplo), un sistema de control distribuido realiza el control sobre:

- 1) Turbinas de gas.
- 2) Turbina de vapor.
- 3) Recuperadores de calor.
- 4) Quemadores posteriores.
- 5) Compresores.
- 6) Bombas de circulación.
- 7) Intercambiadores de calor.

También, realiza el control de los sistemas de protección, el control de la distribución de la energía, arranque, autorizaciones de maniobras y paradas de emergencia. Genera informes del estado del proceso y cálculo de balance de energía, etc.

Otra clasificación del control se basa en el tipo de tarea que éste realiza. El término de control regulatorio se refiere a la acción de corregir o llevar a sus puntos

*de consigna a las variables ante cualquier circunstancia.*

*El control supervisorio, por su parte, se encarga de "cuidar" el buen funcionamiento de los controladores que realizan control regulatorio, integrando con ello un sistema maestro-esclavos, donde verifica el funcionamiento del sistema en general y establece comunicación con cada parte para ordenar acciones y recibir informes.*

*Además del hardware mencionado anteriormente, es necesario un software que lo controle y en el cual esten implícitas las acciones de control a realizar por el sistema. Los algoritmos de control estan contemplados dentro de este software.*

# **CONTROL ANALÓGICO DE QUEMADORES POSTERIORES.**

## **III.1.- CARACTERÍSTICAS.**

*El control analógico de combustión de los quemadores posteriores (QP) realizado por la compañía Westinghouse Electric Corporation (WECO), está documentado mediante los siguientes:*

### **III.1.1) TIPOS DE DIAGRAMAS.**

*III.1.1.a) Diagrama de control [funcional] (I): En este tipo de diagramas se manifiesta la estrategia de control que se lleva a cabo utilizando simbología SAMA-ISA y criterios de control específicos; esto es, existe en él una estructura tal que permite identificar la función de cada elemento (símbolo). Además, proporciona el desarrollo y la secuencia del proceso.*

*El diagrama funcional muestra las entradas de campo analógicas y digitales, así como también las salidas. Además pueden obtenerse de él las constantes del proceso.*

*III.1.1.b) Diagramas esquemáticos (5): En los diagramas esquemáticos se localizan los circuitos electrónicos del sistema de control. Esto permite hacer un análisis funcional de ellos, pudiéndolos separar en bloques para facilitar la tarea.*

## **III.2.- DIAGRAMA DE CONTROL.**

### **III.2.1.- DESCRIPCIÓN.**

*Debido a la complejidad del sistema de control, se hizo necesaria la división del*

diagrama funcional en tres módulos. Con esto se facilitó el análisis del sistema de control. La denominación de dichos módulos se proporciona a continuación:

**III.2.1.a) MÓDULO 1:** Es donde se calculan las demandas de posición de los elementos finales de control (actuadores), según el tipo de combustible utilizado. Se le denomina módulo generador de la demanda de posición (Véase fig. III.21, pág. 81).

**III.2.1.b) MÓDULO 2:** Esta sección proporciona a la anterior la señal llamada punto de ajuste dinámico de la temperatura de gas (Véase fig. III.23, pág. 86).

**III.2.1.c) MÓDULO 3:** Está compuesto por una lógica de protección contra alta temperatura de vapor sobrecalentado y una sección que genera la señal llamada demanda de combustible Véase fig. III.26, pág. 92).

### **III.3.- DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS (Electrónicos).**

#### **III.3.1.- DESCRIPCIÓN.**

Básicamente contienen las conexiones existentes entre los controladores y circuitos auxiliares.

En una inspección rápida, puede observarse que los controladores utilizados son proporcional-integral diseñados a base de un amplificador operacional (OPAMP) con configuración de inversor; lo que ocasiona que la señal de error a su entrada sea tratada con una acción PI e invertida en polaridad.

Debido a la elevada ganancia de voltaje del OPAMP se hace necesario el uso de limitadores de tensión para evitar la saturación del elemento final de control. De esta manera, tenemos que los voltajes que maneja el sistema están comprendidos en un rango de 0 v. a

-10v. (ver limitadores).

### III.3.2.- ANÁLISIS DE LOS BLOQUES ELECTRÓNICOS.

La importancia de realizar un análisis de los bloques electrónicos que integran el control analógico, radica en poder establecer el modelo matemático para cada uno de ellos; mediante los cuales se implementan los correspondientes algoritmos. Además, dicho análisis permitirá establecer, de una manera concisa, la estrategia de control realizada.

En términos generales, todo el control de este subsistema, así como gran parte de los demás, está integrado por los siguientes bloques electrónicos:

- a) MÓDULO PI (RA).
- b) PUNTO DIFERENCIA (SUMADOR).
- c) LIMITADORES A 0v. y -10v.
- d) SELECTOR DE SEÑAL ALTA ( > ).
- e) MONITOR DE SEÑAL BAJA ( /L ).
- f) GENERADOR DE FUNCIÓN.
- g) AMPLIFICADOR DE SEGUIMIENTO (TA).

#### III.3.2.1.- DESCRIPCIÓN.

##### III.3.2.1.a) MÓDULO PI (RA).

Las características de los diferentes tipos de controladores ya fueron analizadas en el capítulo II. En base a ellas podemos realizar el estudio de este módulo en particular.

La versatilidad de este módulo nos permite implementar varias configuraciones, gracias a que sus componentes pueden ser intercambiados (ver figura III.1) :

a) **CONTROLADOR PI:** Si se unen los pines 2 y 8, se obtiene un controlador proporcional-integral. En este caso, al unir 3 con 4 aumenta la capacitancia, pues se forma un arreglo en paralelo de los capacitores ( $C1+C2$ ), aumentando con ello el tiempo de acción integral. También puede variarse la ganancia proporcional debido a que  $R1$  es "plug-in" y puede intercambiarse .

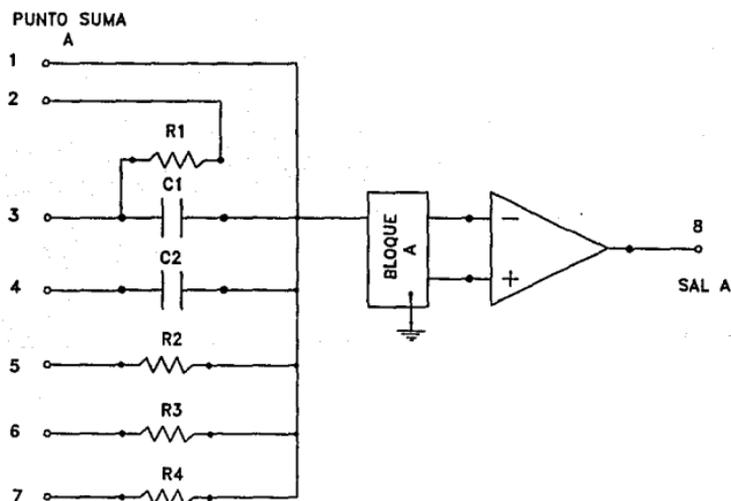


Fig. III.1.- Módulo PI (RA). Nótese la versatilidad de este bloque. Los valores de resistencias y capacitores dependen de la aplicación en particular.

b) **DIFERENCIADOR:** Si unimos 1 y 2 y además se conecta 3 a 8 se configura un circuito diferenciador que incluye un alisador (filtro) para protección contra altas frecuencias.

c) **SUMADOR:** Si se conecta 5 a 8 por ejemplo, y se inyectan señales en 6 y 7, se consigue un sumador.

d) **CONTROLADOR INTEGRAL:** Al conectar sólomente 4 a 8 y aplicar señal en 5, 6 ó 7 se configura un controlador integral.

*El circuito, debido a su arreglo, puede realizar la suma algebraica de las entradas junto con una acción que dependerá de la configuración elegida entre las mencionadas arriba.*

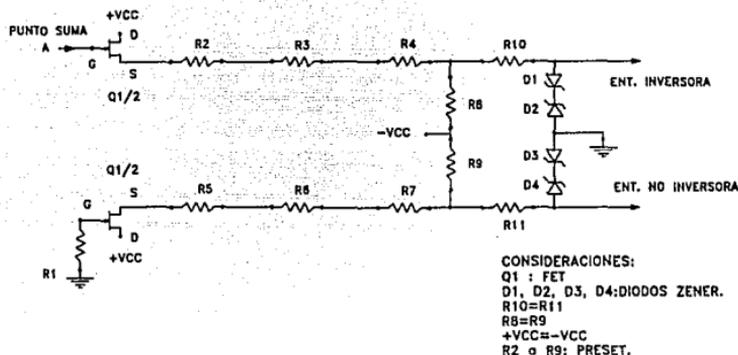
*Para el caso del control de los quemadores posteriores, el módulo se implementa como en el caso (a), para conseguir el circuito del controlador maestro y los controladores de temperatura y presión del módulo 2.*

*El bloque A (ver figura III.2) es un circuito que sirve para eliminar el offset de entrada del amplificador operacional. Como se recordará, una de las maneras de lograr lo anterior es asegurando que tanto la entrada inversora como la no inversora tengan el mismo potencial. Esto se consigue con la utilización de un arreglo simétrico de resistencias de precisión entre dichas entradas. La característica de alta impedancia de entrada del FET (field-effect transistor), permite aislar este arreglo del voltaje presente en la compuerta del mismo.*

*Los diodos D1 a D4 son del tipo zener y están en un arreglo espalda con espalda, con lo que se asegura un voltaje regulado en las entradas, a pesar de las variaciones bruscas que pudiesen presentarse en las entradas del controlador.*

### **III.3.1.1.) PUNTO DIFERENCIA.**

*El punto diferencia es un caso particular de la configuración de sumador. Es llamado*



**Fig. III.2.- Circuito de ajuste en las entradas del amplificador operacional para el controlador P.I.**

así, debido a que para fines de control realiza una diferencia entre el valor de una variable de referencia (setpoint) y el valor de la variable controlada. Su ecuación es la misma que la del sumador:

$$-V_o = \left[ \frac{V_{o1}}{R_1} + \frac{V_{o2}}{R_2} + \frac{V_{o3}}{R_3} + \frac{V_{o4}}{R_4} + \frac{V_{o5}}{R_5} + \frac{V_{o6}}{R_6} \right] * R_f \dots \dots \dots (III.1)$$

Para nuestro caso en particular:

$$-V_o = \left[ \frac{V_{o1}}{100k} + \frac{V_{o2}}{20k} + \frac{V_{o3}}{20k} + \frac{V_{o4}}{20k} + \frac{V_{o5}}{20k} + \frac{V_{o6}}{20k} \right] * 20k \dots \dots \dots (III.2)$$

Con:

$V_{o1}, V_{o2}, V_{o3}, V_{o4}, V_{o5}, V_{o6}$  : Voltajes de entrada.

$V_o$  : Voltaje total de salida.

Puede apreciarse, mediante una inspección rápida de la fórmula, que el voltaje total de salida es función de los valores de las resistencias y de los voltajes de entrada que varían según las condiciones del proceso.

La implementación se realiza en base a una configuración de inversor que produce un cambio de polaridad en el voltaje de salida.

La figura III.3 muestra el circuito característico de este módulo. Este es un circuito muy común y representa uno de los principales usos del amplificador operacional.

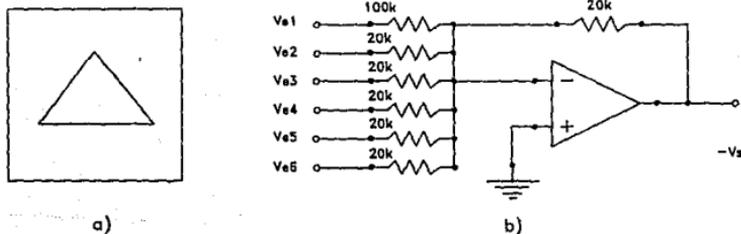


Fig. III.3.- Elemento punto diferencia (sumador). a) Símbolo de control; b) circuito.

### III.3.2.1.6) LIMITADORES A 0v. y -10v..

Los limitadores cumplen una función primordial en la buena regulación del sistema. Debido a que el actuador tiene un determinado rango de acción (apertura), la señal que recibe debe tener una polaridad adecuada al rango mencionado y no debe sobrepasar los valores máximo y mínimo establecidos por dicho rango. Los limitadores mantendrán el valor de la demanda de posición en un intervalo comprendido entre 0 y -10 volts con lo que se asegura,

sobre todo, la integridad de los actuadores. También, mediante éstos es posible prevenir las inestabilidades producidas por una ganancia alta del sistema (mayor que 1), que se genera si la señal de salida es muy grande (recordar concepto de ganancia).

En base a lo anterior, se tienen dos limitadores, uno que supervisa el nivel máximo de señal (-10v.) y el otro que revisa el límite bajo (0v.); cuyos circuitos aparecen en la figura III.4. El funcionamiento electrónico de éstos se describe a continuación:

**a) LIMITADOR A -10v.:**

a.1) Cuando el voltaje en su entrada  $V_c$  sea menor que la referencia (-10v.), la diferencia detectada por el circuito diferencial es positiva. Esto ocasiona que exista un voltaje de salida en el limitador, debido a que tal diferencia es integrada e invertida (en polaridad), produciendo con ello una polarización directa del diodo.

a.2) Si la diferencia es negativa, entonces el voltaje en la salida del amplificador diferencial es de polaridad positiva; por lo que el diodo se encuentra en corte y "bloquea" el voltaje.

**b) LIMITADOR A 0v. :**

b.1) Cuando el voltaje en la entrada  $V_c$  es mayor o igual que el voltaje de referencia (0v.), el diodo a la salida es polarizado en directa, por lo que se "satura". Por tal motivo, existe un voltaje a la salida del limitador.

b.2) Si el voltaje en la entrada  $V_c$  es menor que la referencia (0v.), el diodo pasa a la región de corte y es entonces cuando no aparece voltaje alguno en el cátodo del diodo.

**III.3.2.1.4) SELECTOR DE SEÑAL ALTA.**

La descripción de este bloque se realiza a continuación. Obsérvese la figura III.5 para

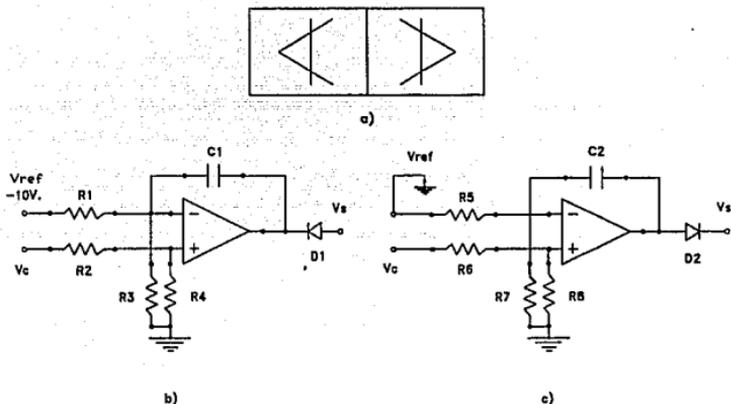


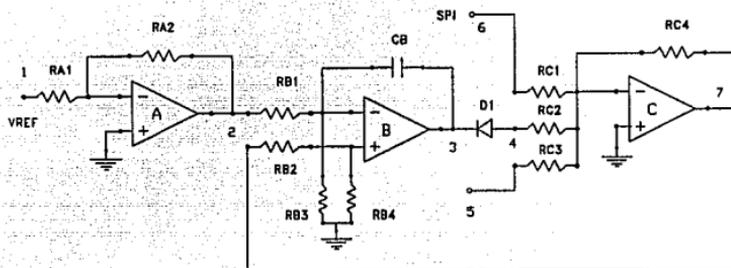
Fig. III.4. Limitadores: a) Símbolo de control, b) Limitador a -10v, c) Limitador a 0v.

acompañar la explicación.

Si el valor de la salida del controlador PI (SPI) es mayor (en valor absoluto) que el voltaje en el punto 2, aparece ese mismo valor en 7 con signo positivo (considérese que  $-10v < SPI < 0v$ ), debido a la configuración de inversor del amplificador C. El voltaje en el punto 4 es cero, puesto que 3 posee un voltaje (+) que bloquea al diodo.

El voltaje (+) en 3 es ocasionado por la polaridad positiva del punto 7; así como por su valor mayor a comparación del nodo 2 ( Ver limitadores ).

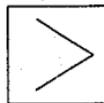
Tenemos entonces, que para todo valor de SPI menor que -1.5v., el voltaje del punto



(a)

RA1=RA2=RC1=RC2=RC3=RC4  
RB1=RB2=RB3=RB4

(b)



(c)

**Fig. III.5.- Circuito selector de señal alta. a) Diagrama; b) Especificaciones; c) Símbolo de control.**

7 es igual en magnitud pero de signo positivo.

Otras dos conclusiones importantes que surgen del análisis del circuito son:

- a) Cuando  $SPI = -1.5v.$ , el voltaje en 7 permanece en  $+1.5v.$
- b) Si  $-1.5v. < SPI < 0v.$ , el valor del punto 7 es de  $+1.5v.$

**III.3.2.1.c) MONITOR DE SEÑAL BAJA** (Comparador analógico).

Dentro del marco de la ingeniería de control, algunas sociedades importantes como ISA conocen a este módulo con el nombre de función monitor de señal y definen su comportamiento de la siguiente manera:

**"La salida tiene estados lógicos que dependen de los valores de entrada analógicos. Cuando la entrada excede o es menor que un valor límite determinado, la salida cambia de estado."**

*Las características más importantes de este módulo son las siguientes (Observar figura III.6):*

a) Existe un "1" lógico en las dos salidas cuando la señal de entrada está dentro del rango ( $V_{ref} \pm E_{net}$ ).

Donde:

$V_{ref}$ : Voltaje de referencia.

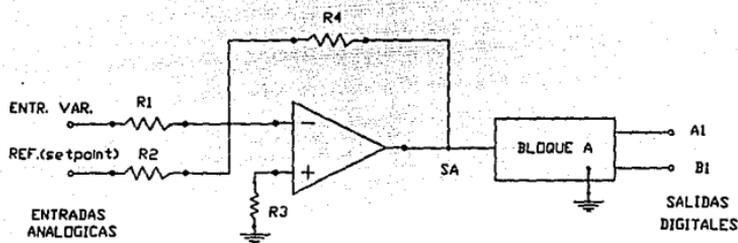
$E_{net}$ : Voltaje suministrado por la resistencia de retroalimentación ( $R_4$ ).

b) La salida A1 adquiere un "0" lógico cuando la señal de entrada es igual o más negativa que ( $V_{ref} - E_{net}$ ).

c) La salida B1 adquiere un "0" lógico cuando la señal de entrada es igual o más positiva que  $V_{ref} + E_{net}$ .

*El circuito implementado de este módulo es el que aparece en la figura III.6. El bloque A es un circuito que tiene como función detectar una diferencia de potencial analógica en su entrada y producir dos salidas digitales cuyo valor (1 ó 0) dependerá de la magnitud y polaridad del voltaje ya mencionado. Su funcionamiento se describe a continuación:*

*La ganancia del amplificador se establece de tal manera que proporcione suficiente voltaje para disparar los transistores, cuando la diferencia entre la señal de entrada y el punto de ajuste exceda  $E_{net}$ . (Ver figura III.7). Los diodos D1 y D2 son de germanio, por lo que*

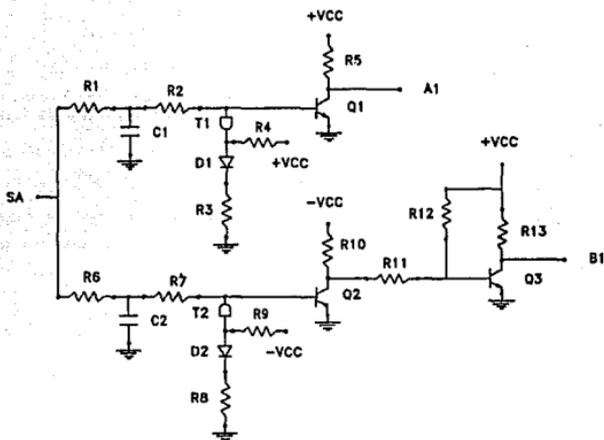


**Fig. III.6.- Monitor de señal baja. Obsérvese las dos entradas analógicas y las dos salidas digitales.**

polarizan con 0.35v. a los ánodos de los diodos tunel T1 y T2.

Inmediatamente después de la conmutación del diodo tunel, su resistencia directa cambia de  $65 \Omega$  a  $650 \Omega$ . Desde el momento en que el diodo tunel se pone en paralelo con la unión base-emisor del transistor (teniendo una baja resistencia en directa) hasta que la conmutación ocurre en 1.0 mA., el transistor se bloquea. Cuando la salida del amplificador A1 excede 1mA., el diodo tunel conmuta a un estado de baja conductancia estable por lo que no demanda mucha corriente de base.

Aproximadamente +3.7 vdc son requeridos en la salida del amplificador A1 para conmutar al diodo tunel T1; con -3.7 vdc se hace lo propio para T2. Cuando T1 ó T2 conmutan a baja conductancia, el transistor Q1 ó Q2 envían su salida a cero volts, respectivamente.



**Fig. III.7. Bloque A. Apreciarse la posición de sus componentes. SA: Salida del amplificador operacional; A1, B1: Salidas del comparador analógico.**

La resistencia R4 debe ser elegida de tal manera que se consigan los 3.7 vdc a la salida del amplificador A1, cuando la entrada neta alcance el límite impuesto para una aplicación en particular. Tal resistencia puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$R4 = \frac{ER_{ent}}{E_{net}} \dots \dots \dots (III.3)$$

Donde:

E: voltaje requerido para conmutar al diodo tunel (3.7 vdc en este caso).

*Ren:* Resistencia de entrada (10 K $\Omega$  en este caso).

*E<sub>net</sub>:* Voltaje de entrada neto al cual el diodo debe conmutar de acuerdo con cada aplicación.

Con una entrada negativa neta  $Q_1$  se satura. Si la entrada neta es positiva  $Q_2$  se satura.

### **III.3.2.1.9) GENERADOR DE FUNCIÓN** (Función de caracterización).

Este módulo tiene como objetivo el producir una función caracterizada a partir de la señal de entrada  $V_i$ . Consta de un conjunto de amplificadores operacionales configurados como sumadores de dos entradas. Existe una misma referencia para los amplificadores A, B y C suministrada a través de una de sus entradas (ver figura III.8); la otra entrada de los tres es unida formando un nodo por el que se suministra la señal  $V_i$ . Los voltajes de salida en A, B y C son sumados en el amplificador E, obteniéndose de esta manera, una señal que será agregada al voltaje  $V_i$  mediante el arreglo E, del cual se obtiene el voltaje de salida total o voltaje de caracterización.

Los diodos  $D_1$ ,  $D_2$  y  $D_3$  aseguran que las entradas al sumador D sean negativas, debido a la posición que guardan en el arreglo. También, determinan la forma de la curva de caracterización en base a su voltaje de umbral.

La posición que guardan las resistencias variables ( $R_{VA}$ ,  $R_{fA}$ ,  $R_{VB}$ ,  $R_{fB}$ ,  $R_{VC}$ ,  $R_{fC}$ ,  $R_{fD}$ ,  $R_{fE}$ ), determina la ganancia para cada amplificador y por lo tanto, para el módulo en conjunto; pudiendo variar con ellas las características de la curva.

A continuación se presentan las fórmulas obtenidas del análisis electrónico del generador de función o circuito de caracterización (cotejar variables con circuito):

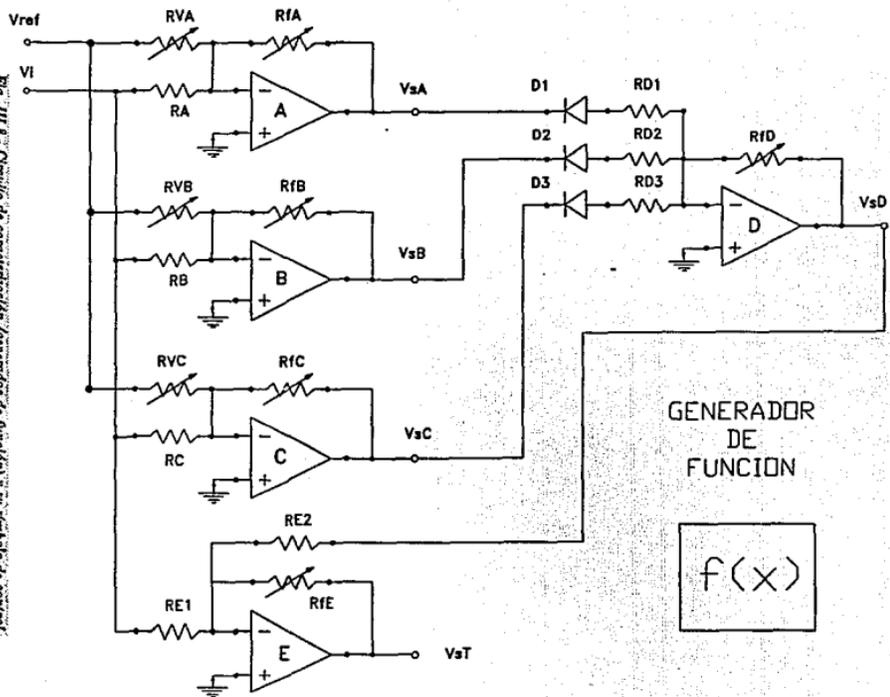


Fig. III.8. Circuito de controlización (generador de función) y su modo de control.

$$V_{sA} = -\left(\frac{V_i}{A_1} + A_2\right) \cdot A_3 ; \quad A_1 = R_A ; \quad A_2 = \frac{V_{ref}}{R_{VA}} ; \quad A_3 = R_{EA} \quad (III.4)$$

$$V_{sB} = -\left(\frac{V_i}{B_1} + B_2\right) \cdot B_3 ; \quad B_1 = R_B ; \quad B_2 = \frac{V_{ref}}{R_{VB}} ; \quad B_3 = R_{EB} \quad (III.5)$$

$$V_{sC} = -\left(\frac{V_i}{C_1} + C_2\right) \cdot C_3 ; \quad C_1 = R_C ; \quad C_2 = \frac{V_{ref}}{R_{VC}} ; \quad C_3 = R_{EC} \quad (III.6)$$

$$V_{sD} = -(V_{sA} + V_{sB} + V_{sC}) \cdot D_1 ; \quad D_1 = \frac{R_{fD}}{R_D} ; \quad R_{D1} = R_{D2} = R_{D3} = R_D \quad (III.7)$$

$$V_{sT} = -\left(\frac{V_i}{E_1} + \frac{V_{sD}}{E_2}\right) \cdot E_3 ; \quad E_1 = R_{E1} ; \quad E_2 = R_{E2} ; \quad E_3 = R_{ET} \quad (III.8)$$

CON:

$V_i$ : Voltaje de entrada.

$V_{ref}$ : Voltaje de referencia.

$V_{sT}$ : Voltaje de salida total.

### III.3.2.1.9) AMPLIFICADOR DE SEGUIMIENTO (TA).

Al activarse la bobina B1 (figura III.9 b) el contactor del relevador pasa a la posición NA (normalmente abierto). Debido a esto, el amplificador se comporta como integrador.

Cuando la bobina B1 es desenergizada, el contactor regresa al estado NC (normalmente cerrado) y es entonces cuando la corriente existente en el capacitor es descargada en la resistencia R7.

Si la entrada lógica es cero, la bobina del relevador es desenergizada. Para que el relevador sea energizado es necesario que exista un "1" en la entrada del circuito activador del relevador (ver Figura III.9 b).

El bloque offset es un circuito de compensación ya analizado en el módulo PI.

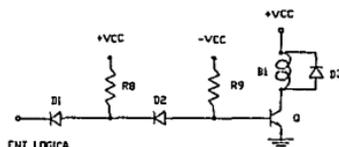
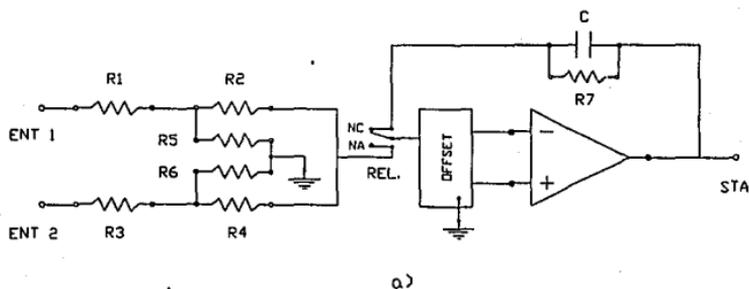


Fig. III.9.- Amplificador de seguimiento. a) circuito principal; b) Circuito activador del relevador.

### **III.3.2.2.- SIMULACION.**

*Una vez realizado el análisis de operación de cada uno de los bloques electrónicos que integran el sistema de control, se procederá a implementar las simulaciones analógica y digital con la finalidad de corroborar el funcionamiento de cada uno.*

*La simulación analógica se lleva a cabo en un paquete llamado MICROCAP II (versión 2.4), el cual, entre otras pruebas, realiza el análisis de transitorios. Esta prueba es muy importante debido a que en ella, podemos excitar a los diferentes módulos con señales pulso, escalón y rampa, para contemplar la respuesta en el nodo que se requiera. De esta manera, se aprecia el comportamiento por separado de cada uno.*

*La simulación digital, por su parte, está compuesta de un código para cada bloque en donde se representa su funcionamiento mediante modelos matemáticos. La codificación se realizó en lenguaje C y la ejecución de las corridas en el ambiente de pruebas Turbo C con un sistema operativo MSDOS (ver anexo 4).*

*El procedimiento para el desarrollo de los algoritmos que simulan los bloques de control, se resume en el diagrama III.10. Este comprende los aspectos globales tratados en la sección anterior, así como el establecimiento de los diferentes algoritmos.*

*La estructura de pruebas para los algoritmos está formada básicamente por las secciones que se aprecian en la figura III.11.*

*Cabe hacer la aclaración de que algunos bloques no fueron simulados en forma analógica debido a que poseen elementos que no maneja el paquete microcap II (un caso concreto es el diodo tunel que integra al monitor de señal ). Por otra parte, algunos otros no*

se probaron digitalmente puesto que el código es tan sencillo que no vale la pena realizar la simulación. De hecho, se pretendió analizar los bloques de mayor trascendencia.

### III.3.2.2.a.- MÓDULO PI (RA).

#### III.3.2.2.a.1) SIMULACIÓN

**ANALÓGICA:** En este caso se hizo la simulación de este módulo con la configuración de controlador PI, introduciendo una señal pulso (excitación) en su entrada. Las figuras m.1 muestran el circuito y la respuesta del controlador ante este estímulo.

#### III.3.2.2.a.2) SIMULACIÓN DIGITAL:

El diagrama de flujo del controlador PI es el de la figura III.12. Se utilizó un

algoritmo genérico denominado PRESET, que se obtiene a partir de la definición de integración y con la utilización de herramientas matemáticas como el método trapezoidal o el de Euler. Viene siendo, propiamente dicho, una integración numérica. Los parámetros  $T_I$  y  $K_p$  se eligieron de acuerdo a los utilizados en las pruebas analógicas.

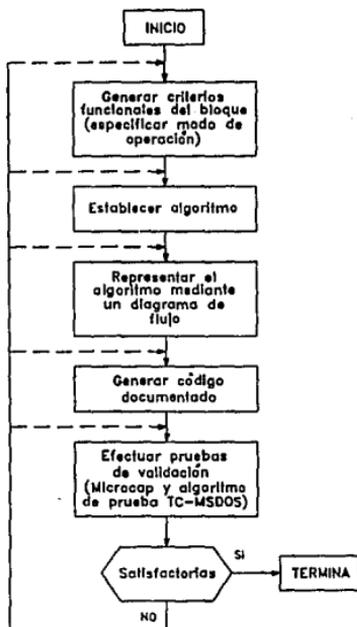
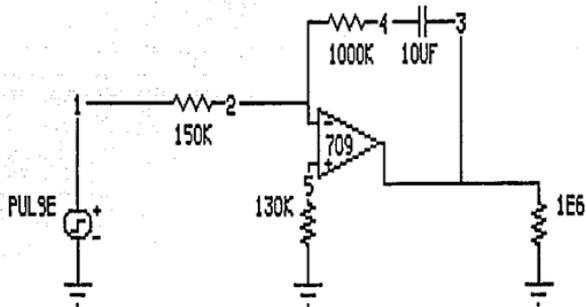
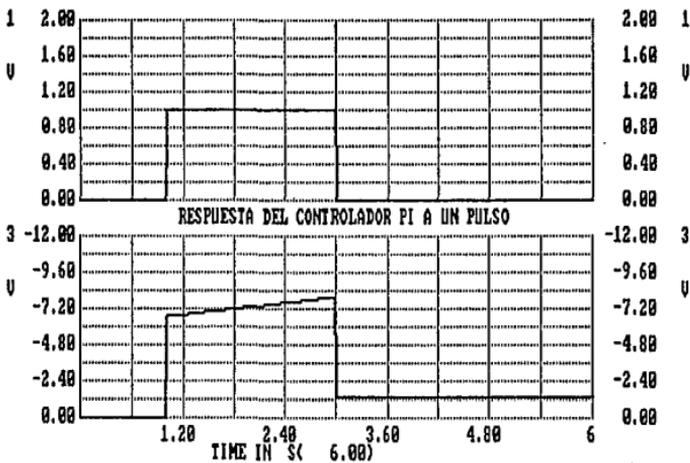


Fig. III.10. Diagrama de flujo para el desarrollo de algoritmos que simulan a los bloques electrónicos.



CONTROLADOR PI



Figuras m.1

Los resultados obtenidos de la corrida se presentan en la figura III.13.

### III.3.2.2.a.3) COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y OBSERVACIONES.

Tanto en la simulación analógica como en la digital, puede apreciarse claramente la tendencia de la salida del controlador proporcional-integral. Como se esperaba, la rampa resultante tiene características de pendiente y amplitud determinadas por las constantes de integración y proporcionalidad.

En la simulación analógica, los valores de capacidades y resistencias fueron tomados inicialmente de los

diagramas esquemáticos de Westinghouse (WECO), para después realizarse pruebas cambiando valores. Esto fué con la finalidad de determinar el comportamiento del circuito ante los cambios en sus parámetros. Las conclusiones al respecto son las siguientes:

- Si  $C_f$  y/o  $R_f$  aumentan, la acción integral disminuye.
- Si por el contrario,  $C_f$  y/o  $R_f$  disminuyen, el coeficiente de acción integral ( $K_i$ ) aumenta y por ende la acción integral (Para información más detallada ver cap. II).

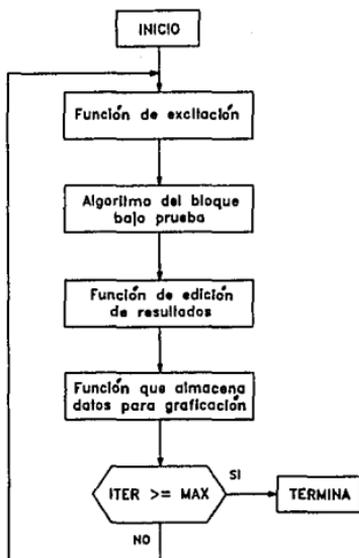


Fig. III.11.- Diagrama de flujo de la función principal de prueba de los algoritmos.

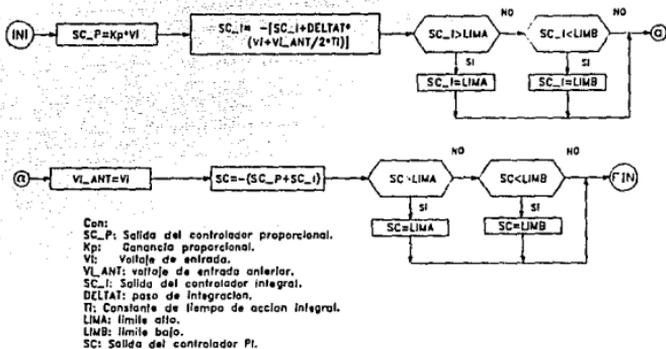


Fig. III.12. Diagrama de flujo del controlador PI. Observe la limitación realizada inmediatamente a la salida del controlador.

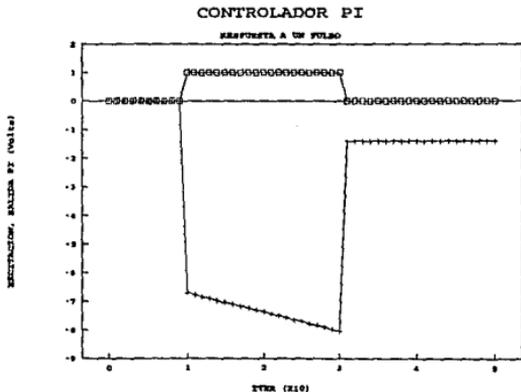


Fig. III.13. Controlador PI. Arriba: Señal de excitación; Abajo: Respuesta.

En cuanto a la constante proporcional, se observa claramente su efecto rápido sobre la señal de error.

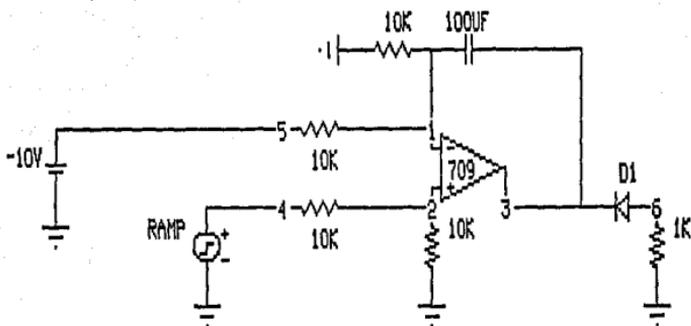
**III.3.2.2.a.- LIMITADORES.** Para esta parte se describe únicamente la prueba del limitador a  $-10v.$ , considerando que el limitador a  $0v.$  tiene el mismo funcionamiento.

**III.3.2.2.b.1) SIMULACIÓN ANALÓGICA:** El paquete microcap II proporcionó las figuras m.2. En ellas puede observarse el circuito típico y el comportamiento de la salida del limitador, en la inferior. Mientras la señal de excitación es menor que el límite ( $-10v.$ ) la salida del limitador es cero. Cuando se rebasa el límite (2.3 segundos, aproximadamente) la salida del circuito adquiere un valor (ver descripción de limitadores, pags. 54-55).

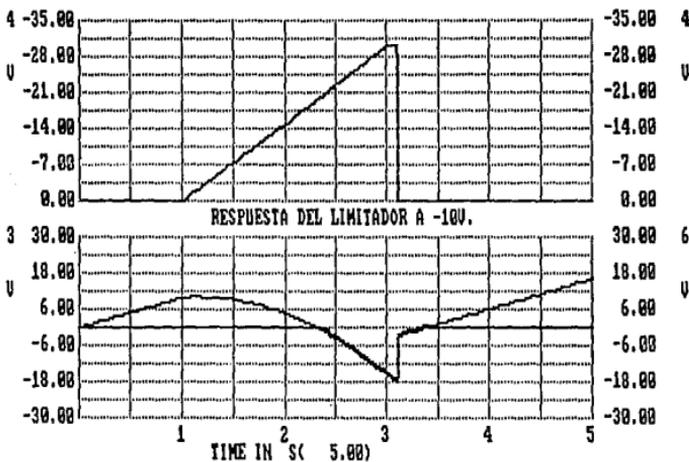
**III.3.2.2.b.2) SIMULACIÓN DIGITAL:** La figura III.14 muestra el diagrama de flujo de la función  $\lim 10v$  ( ) que se utilizó para la validación funcional de este bloque. Por otra parte, la figura III.15 muestra el comportamiento del limitador a  $-10v.$

La respuesta del circuito (línea gruesa con quiebre) permanece en cero volts hasta que el voltaje de entrada (línea gruesa con pendiente negativa) rebasa el valor límite establecido ( $-10v.$ ), aproximadamente en la iteración 20; en cuyo momento, la respuesta empieza a incrementarse en rampa con pendiente negativa. La línea delgada con pendiente positiva corresponde a la diferencia existente entre el voltaje de referencia (valor máximo establecido) y la señal de entrada. Se aprecia que dicha diferencia se hace positiva exactamente en el momento en que aparece señal en la salida del circuito, lo que indica que en términos absolutos, la entrada es mayor que dicha referencia.

**III.3.2.2.b.3) COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y OBSERVACIONES :** El modelo



CIRCUITO LIMITADOR A -10V.



Figuras n. 2.

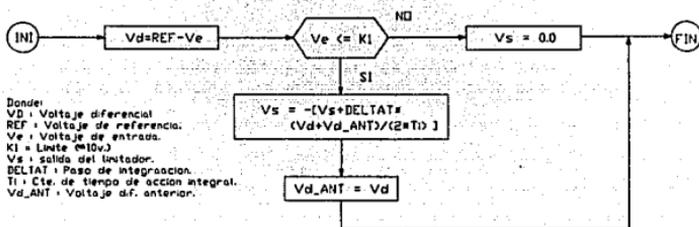


Fig. III.14. Diagrama de flujo de un 10v. Considérase las variables de tipo genérico.

matemático obtenido para los dos limitadores se estableció en base a un análisis electrónico del circuito electrónico. A pesar de no ser una representación real se observa, que los resultados obtenidos en la simulación digital son bastante aproximados a los que arrojó la prueba en microcap II.

### III.3.2.2.c.- SELECTOR DE SEÑAL ALTA.

III.3.2.2.c.1) SIMULACIÓN ANALÓGICA: El circuito de prueba, la señal de excitación y la respuesta correspondiente de la prueba de este bloque se observan en las figuras m.3. En la gráfica se puede apreciar que la salida del selector es igual a  $+1.5v$ . mientras la señal de entrada es mayor a la referencia ( $-1.5v$ ). En el momento en que la entrada (parte superior de la gráfica) es menor que dicha referencia, la salida del circuito sigue a la entrada.

III.3.2.2.c.2) SIMULACIÓN DIGITAL: No se realizó la simulación digital puesto que se considera demasiado obvia la respuesta del bloque y su codificación requiere de 2 ó 3 líneas con expresiones muy simples (básicamente de una instrucción if).

## LIMITADOR A -10V.

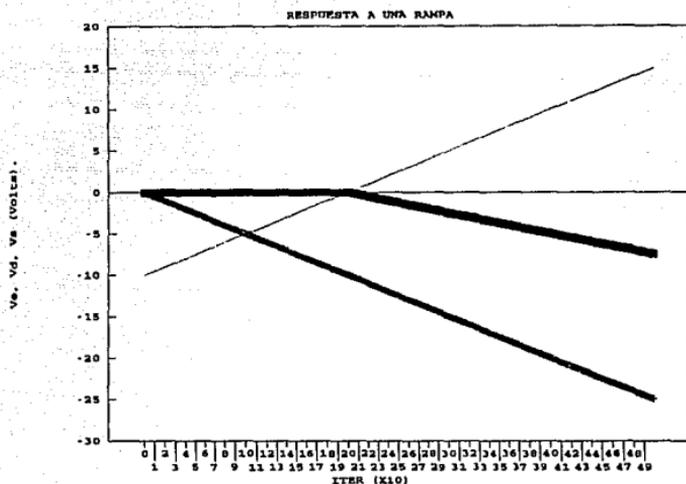
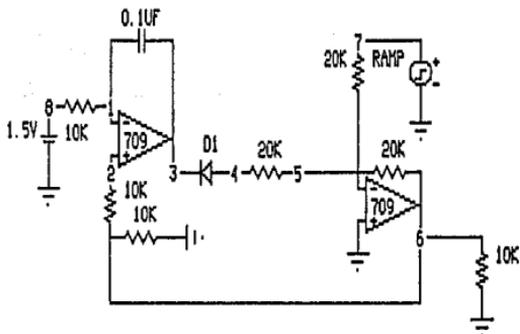


Fig. III.15.- Señales en los principales puntos del limitador a -10v.

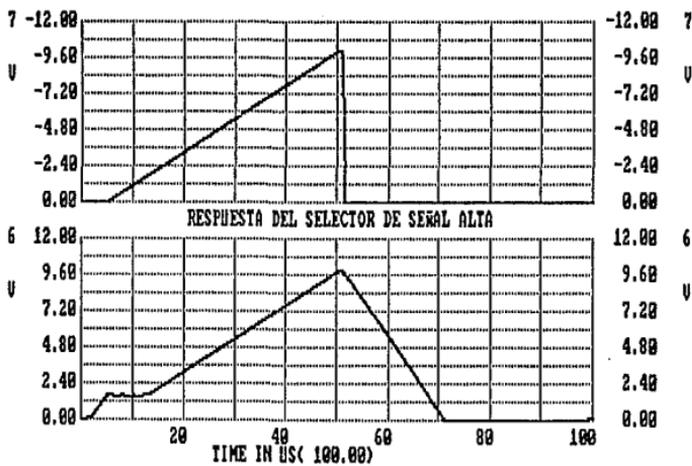
**III.3.2.2.c.3) COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y OBSERVACIONES:** La prueba en microcap II nos muestra el comportamiento de este módulo. En conclusión y basándonos en las figuras m.3: El voltaje de salida del circuito está forzado a tener como mínimo un valor de +1.5v.

**III.3.2.2.d.- COMPARADOR ANALÓGICO** (Monitor de señal).

**III.3.2.2.d.1) SIMULACIÓN ANALÓGICA:** Para este bloque no fué posible realizar esta simulación debido a la incapacidad del microcap para trabajar con diodos tunel, los cuales



CIRCUITO PASA ALTAS



Figuras m.3

tienen un papel importante en el funcionamiento del circuito (ver descripción del monitor de señal, pags. 57-61).

**III.3.2.2.d.2) SIMULACIÓN DIGITAL:** Ante la imposibilidad de realizar una simulación analógica, se desarrolló un análisis electrónico muy detallado por medio del cual se logró establecer un código para la prueba digital. El diagrama de flujo del código mencionado se presenta en la figura III.16 y el comportamiento de la salida del bloque se muestra en la figura III.17.

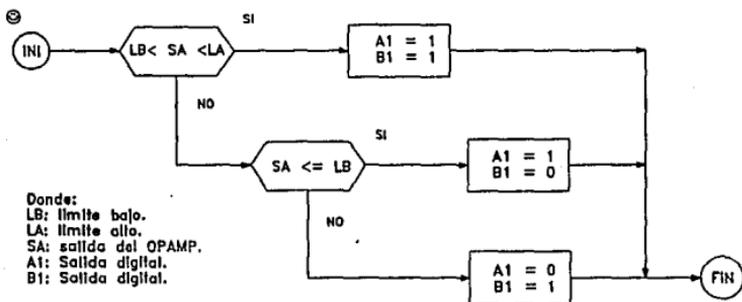


Fig. III.16.- Diagrama de flujo del monitor de señal (comparador analógico).

**III.3.2.2.d.3) COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y OBSERVACIONES:** La figura III.17 manifiesta el comportamiento del monitor de señal. Se aprecia en ella la conmutación de la salida cuando la entrada adquiere un valor localizado en un intervalo determinado.

### **III.3.2.2.e.- GENERADOR DE FUNCIÓN** (Función de caracterización).

**III.3.2.2.e.1) SIMULACIÓN ANALÓGICA:** Debido a que el generador de función está

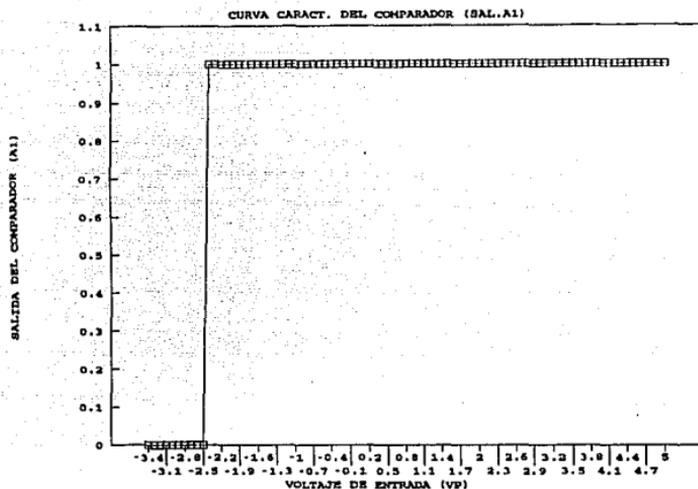


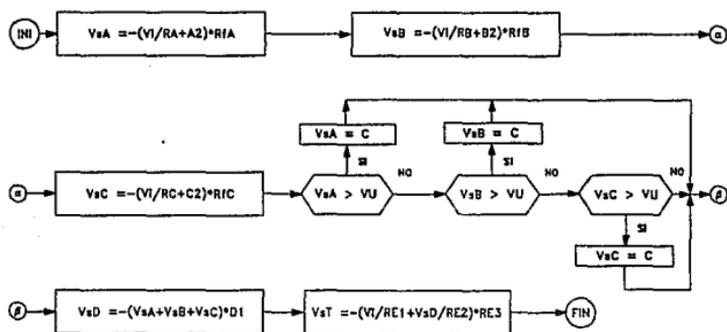
Fig. III.17. Comportamiento de la salida digital 'A1' del monitor de señal.

implementado a base de sumadores, la simulación analógica no se realizó.

**III.3.2.2.e.2) SIMULACIÓN DIGITAL:** Un análisis del circuito dió origen al código de este módulo. Los parámetros fueron tomados directamente de los circuitos en los diagramas esquemáticos, con la finalidad de obtener las mismas curvas de caracterización. Se realizaron dos funciones una para la válvula de gas y otra para la de diesel. El diagrama de flujo general del circuito de caracterización se muestra en la figura III.18, mientras que las gráficas obtenidas se presentan en las figuras III.19 y III.20. Se aprecian las curvas caracterizadas con

diferentes valores para el gas y diesel, así como los puntos de cambio de pendiente, determinados por el voltaje de umbral de los diodos.

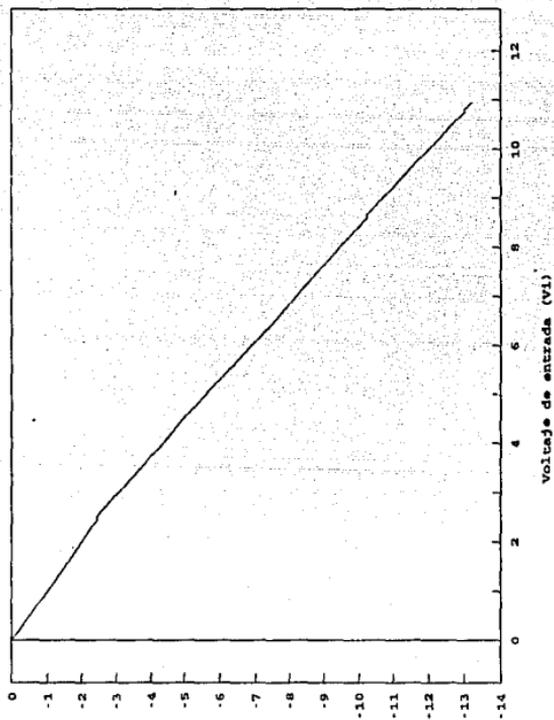
Cabe hacer mención que los resultados obtenidos de la corrida de este código, se cotejaron con los adquiridos en la prueba de un código numérico ya puesto a prueba en otras aplicaciones, obteniéndose resultados satisfactorios. Las gráficas mostradas son iguales a las obtenidas mediante el código mencionado, lo que implica que el modelo matemático es confiable.



Donde:  
 V<sub>U</sub>: Voltaje de umbral de los diodos.  
 C<sub>2</sub>: Constante (0).  
 \* NOTA: Para las demás variables y parámetros consultar el diagrama del circuito.

**Fig. III.18.- Diagrama de flujo de la función de caracterización. Considérese la nota expuesta al pie del dibujo.**

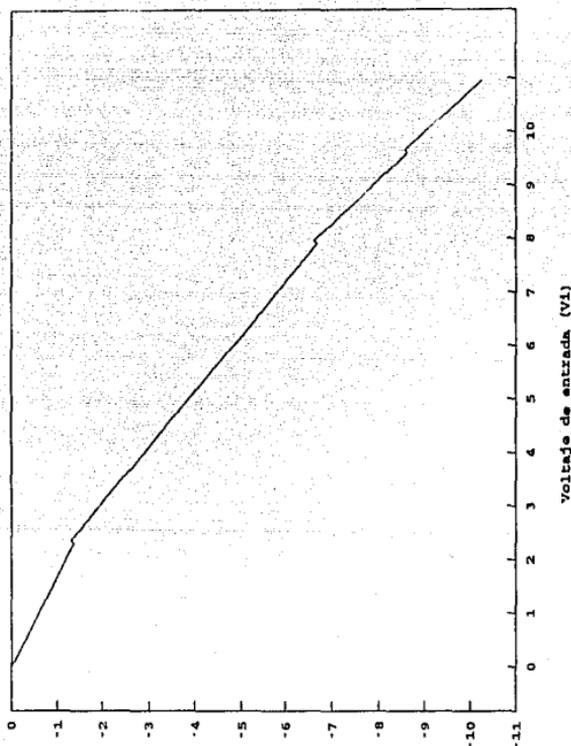
## CURVA DE CARACT. VALVULA DE GAS



Voltaje de caracterización (Vc)

Fig. III.19.- Curva de caracterización para gas. Nótese la pendiente.

CURVA DE CARACT. - VALV. DIESEL



Voltaje de caracterización (Vc)

Fig. III.20.- Curva de caracterización para diesel.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

### **III.4.- DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL.**

*Después de realizar el análisis de los bloques electrónicos, la posibilidad de comprender la estrategia de control (Fig. III.21) se incrementa considerablemente. Así, con ayuda de algunos de los circuitos electrónicos desglosados de los diagramas funcionales concluimos el estudio del control analógico de quemadores posteriores, determinando el funcionamiento global del sistema mediante la descripción por separado de cada módulo:*

#### **III.4.1.- MÓDULO 1.**

*En condiciones normales de operación el control se realiza en automático, generándose una demanda de posición (señal actuadora) ya sea para la válvula de gas o de diesel, según sea el combustible elegido.*

*En el diagrama de control (Figura III.21) se aprecia la estrategia de control llevada a cabo. El proceso genera las variables que ocupa el sistema de control para llevar a buen fin la regulación.*

*Las señales de campo: Temperatura de gases después de los quemadores posteriores (A101), que prácticamente es la temperatura de los gases en el hogar del recuperador, el punto de ajuste dinámico por temperatura (A102), y la derivada de la temperatura de vapor sobrecalentado (A103); son enviadas a la entrada del bloque punto diferencia (1.2) para ser operadas algebraicamente con las salidas de los limitadores (A111, A114) y la salida del amplificador de seguimiento (A119), las cuales son retroalimentadas desde el mismo módulo.*

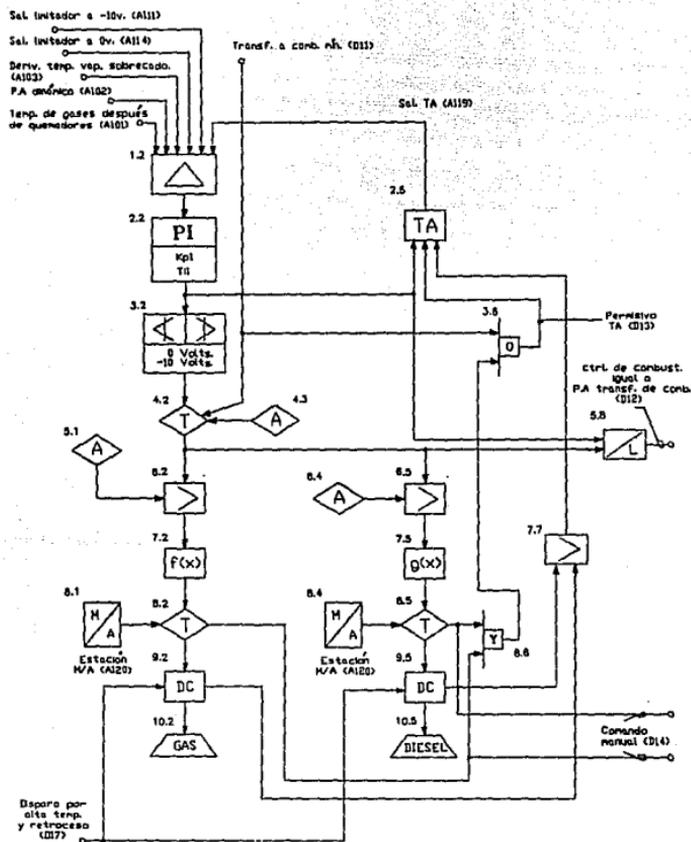


Fig. III.21 Diagrama de control del módulo generador de la demanda de posición.

La salida de este bloque (que para fines de control es la señal de error) es suministrada al controlador proporcional-integral (2.2), donde se trata con este tipo de acción para producir una señal correctora.

El bloque 3.2 corresponde a los limitadores que ya fueron explicados previamente. En términos eléctricos la señal es limitada entre  $-10$  v. y  $0$  v.; para realizar dicha acción se establece un lazo cerrado formado por el punto diferencia (operacional C), controlador PI (operacional E) y los propios limitadores (operacionales A y B), además de un inversor de voltaje que se aprecia en la figura III.25. Cabe aclarar que así como la limitación, existen otras funciones que no se aprecian a detalle en el diagrama de control. Sin embargo, al analizar los circuitos es posible confirmar la estrategia efectuada.

A la salida del bloque 4.2 (transferencia de función) la señal de control puede ser utilizada para gobernar la válvula de gas o de diesel, dependiendo de la selección de combustible ya mencionada.

Podemos observar en la fig III.21, que tanto la sección de gas como de diesel están implementadas con la misma táctica. De esta manera, es posible realizar la descripción de su funcionamiento en forma simultánea:

Los bloques 5.1 y 6.2 por un lado ó 6.4 y 6.5 por el otro, tienen la finalidad de asegurar un valor mínimo de posición para evitar que sus respectivos actuadores cierren por completo, lo que ocasionaría que los quemadores posteriores salieran de operación.

7.2 y 7.5 son bloques que realizan la caracterización de la señal actuadora, proporcionando una salida que tiene una relación no lineal con su entrada (ver descripción

del generador de función págs. 61-63). La caracterización de la válvula de gas difiere de la de diésel debido a las características propias y distintas de sus respectivos combustibles.

Los bloques 8.1 y 8.4 son estaciones manual-automático que operan sólo en condiciones de transferencia de modo. Esto es, cuando se realiza una transferencia de modo de operación de manual a automático o viceversa.

9.2 y 9.5 son tarjetas conductoras. En términos generales, tienen como función conducir al actuador hasta la posición (apertura) determinada por la señal de demanda de posición.

Los actuadores aparecen en el diagrama con los indicadores 10.2 y 10.5. Estos adquieren una posición que es gobernada por la señal de control. Así, la variación del flujo de combustible en los quemadores posteriores está en relación al cambio de la señal de control, lo que conlleva necesariamente a una variación en las condiciones del proceso (ver descripción del modelo dinámico del proceso, capítulo IV).

Las compuertas 3.6 y 8.6, el amplificador de seguimiento (2.5), el monitor de señal baja (5.8) y el circuito pasa altas (7.7), forman parte del sistema de transferencia a combustión mínima que se trata posteriormente.

### **III.4.1.1.- IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA DEL MÓDULO 1.**

El circuito de la figura III.22 muestra el diagrama electrónico general del generador de la demanda de posición. Los operacionales A, B, C, D y E forman el controlador principal del sistema. Los amplificadores G, H, I por un lado y K, L, M por el otro, constituyen los selectores de señal alta para la caracterización de la válvula de gas y de diésel,

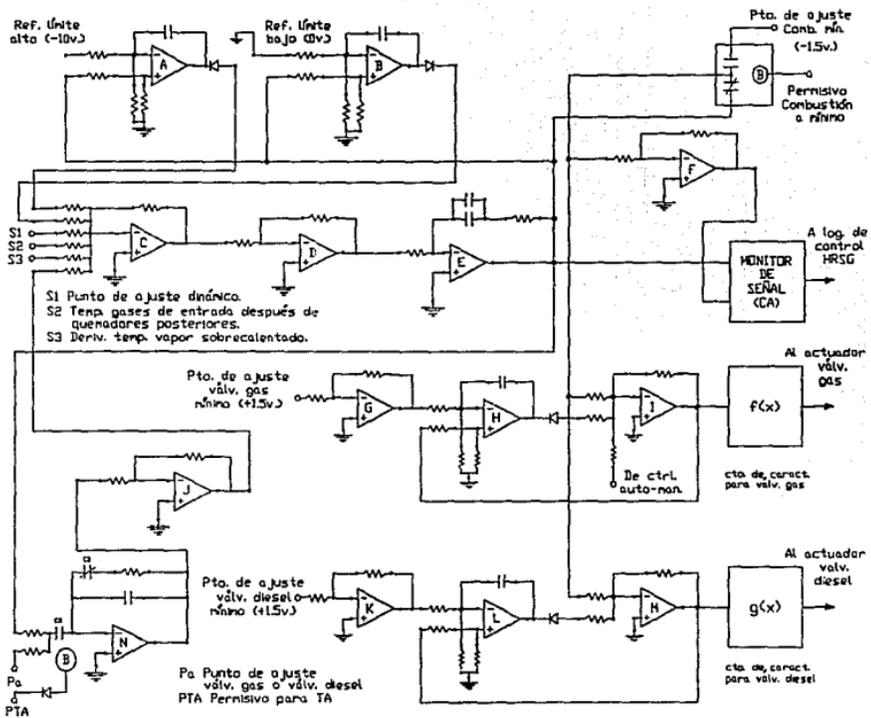


Fig. 11.22. Diagrama eléctrico general simplificado del módulo 1.

respectivamente. El OPAMP N es el montaje del amplificador de seguimiento (TA). J y F son simples inversores que se utilizan para cambiar polaridad (poseen ganancia unitaria en este caso).

Una vez realizada la identificación de los circuitos en el diagrama general y teniendo en mente los resultados obtenidos del análisis de los bloques realizado en el capítulo precedente, nos damos cuenta de los detalles de la estrategia.

### III.4.2.- MÓDULO 2.

El módulo 2 está constituido por los bloques mostrados en la figura III.23. En ella se aprecia que la estrategia está encaminada a obtener el punto de ajuste (PA) dinámico por temperatura, que utiliza el módulo 1 para la realización del control regulatorio.

Existen tres controladores: Controlador de temperatura mínima de vapor sobrecalentado (CTmVS), controlador de temperatura máxima de vapor sobrecalentado (CTMVS) y el controlador de presión máxima de vapor sobrecalentado (CPMVS). Cada uno de los cuales está integrado por un punto diferencia, el controlador PI propiamente dicho, y sus limitadores (Ver figura).

El CTmVS tiene un punto de ajuste de 700 °F, lo que indica que para temperaturas menores a ésta del vapor sobrecalentado, la salida de tal controlador debe gobernar el punto de ajuste dinámico, produciendo una señal con tendencia creciente para lograr abrir la válvula y con ello incrementar la temperatura.

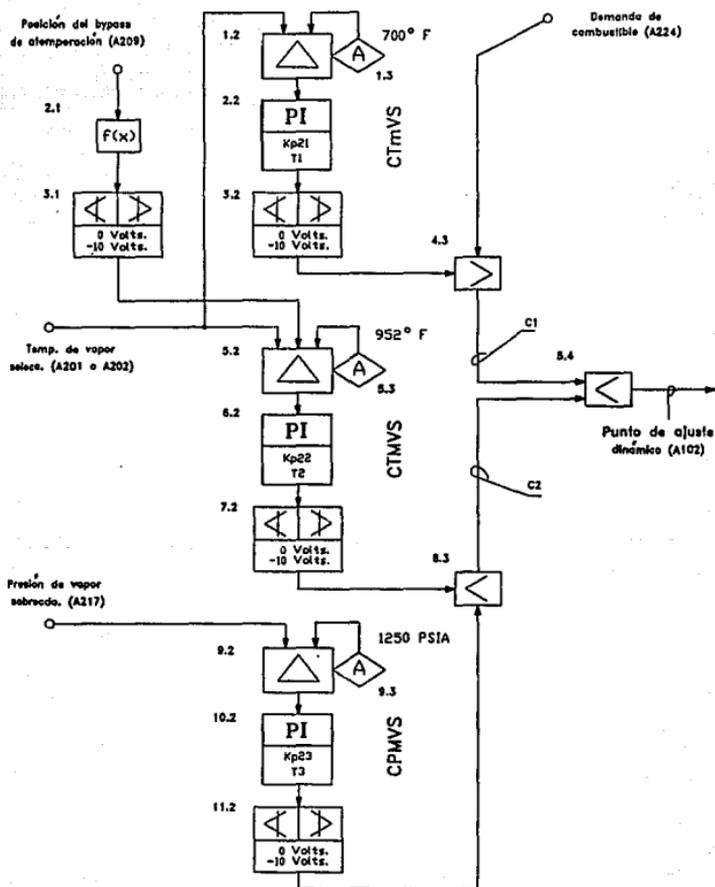


Fig. III.23.- Diagrama de control del generador del P.A. dinámico.

*El CTMVS por su parte, posee un punto de ajuste de 952 °F debido a lo cual actúa en caso de que la temperatura de este elemento sobrepase el valor de esta referencia; en cuyo caso el punto de ajuste dinámico es igual a la salida de este controlador. La señal es decreciente para conseguir cerrar la válvula y disminuir, paulatinamente, la temperatura del vapor.*

*Cuando la presión del vapor sobrecalentado es mayor que el punto de ajuste del CPMVS fijado en 1250 PSIA, el punto de ajuste dinámico toma el valor de la salida de dicho controlador, la cual debe tener una tendencia decreciente para mandar cerrar la válvula de combustible, ocasionando la disminución en la combustión y con ello la disminución de la presión.*

*La determinación en lo que se refiere a que señal gobierna el punto de ajuste dinámico, está condicionada a los valores de la presión y temperatura del vapor (como acabamos de contemplar), así como a la relación de valor entre ellas y con la señal de la demanda de combustible originada en el módulo 3. El selector de señal alta (4.3) y los de baja (5.4 y 8.3) tienen como función "conmutar" el valor que puede adquirir el punto de ajuste dinámico dependiendo de las siguientes:*

### **III.4.2.1) SITUACIONES EN LA GENERACIÓN DEL PUNTO DE AJUSTE DINÁMICO**

*(Ver diagrama para localizar las señales C1 y C2):*

**III.4.2.1.a) ESTADO ESTABLE:** *Si la demanda de combustible es mayor que la salida del CTmVS y además menor que la señal C2, entonces el punto de ajuste dinámico será igual a la demanda de combustible.*

**III.4.2.1.b) TEMPERATURA BAJA DEL VAPOR SOBRECALENTADO (< 700 °F):** *Si la salida del CTmVS es mayor que la señal de demanda de combustible y además, menor que*

la señal C2, entonces el punto de ajuste dinámico será gobernado por tal salida.

**III.4.2.1.c) TEMPERATURA ALTA DEL VAPOR SOBRECALENTADO ( $> 952\text{ }^{\circ}\text{F}$ ):** Si la salida del CTMVS es menor que la salida del CPMVS y además, es menor que la señal CI, entonces el valor del punto de ajuste dinámico es conducido por la salida mencionada.

**III.4.2.1.d) PRESIÓN ALTA DEL VAPOR SOBRECALENTADO ( $> 1252\text{ PSIA}$ ):** Si la salida del CPMVS es menor que la del CTMVS y también es menor que el valor de CI, entonces ésta será el punto de ajuste dinámico.

Por otra parte, se realiza una caracterización de la posición del bypass (2.1) para después introducirla al controlador de temperatura máxima de vapor sobrecalentado (CTMVS), previa limitación (3.1). La consideración de la posición de la válvula bypass de atemperación es importante ya que el control de los quemadores posteriores aunado al de esta válvula regulan las características de presión y temperatura del vapor sobrecalentado (capítulo I).

#### **III.4.2.2.- IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA DEL MÓDULO 2.**

La implementación electrónica general del módulo generador del punto de ajuste dinámico se muestra en la figura III.24. El arreglo está formado por la configuración característica del elemento pasa altas estudiado en el capítulo III. Así bien, podemos distinguir a los operacionales 1 y 2 formando el circuito pasa altas (4.3) del diagrama de control; el OPAMP 3 y el 6 integran el circuito pasa bajas 8.3 del mismo; y los amplificadores 4 y 5 constituyen el otro pasa bajas (5.4) del diagrama. Los bloques que aparecen en el diagrama corresponden a los controladores que eléctricamente están implementados con el mismo circuito.

Dicho circuito se presenta en la figura III.25 con la finalidad de hacer más

comprendible la explicación. Se aprecia en él, la disposición de sus elementos en lazo cerrado, realizándose la limitación por medio de la retroalimentación de la señal actuadora (salida del controlador PI). La línea punteada en el dibujo indica el nodo en donde es aplicada la señal a controlar, que puede ser la temperatura o la presión del vapor sobrecalentado.

### **III.4.3.- MÓDULO 3.**

El módulo 3 tiene como objetivo proporcionar la señal de demanda de combustible al sistema. El diagrama de la figura III.26 muestra la estructura de este módulo. Los bloques presentados en línea punteada residen en otro equipo; el control coordinado y el panel de control se localizan en una VAX-WS, mientras que los permisos son generados por el sistema de protecciones del recuperador de calor como se indica en la figura.

Existen tres formas básicas para la generación de la demanda de combustible, las cuales dependen del estado de operación del sistema de control distribuido, y que se resumen en las siguientes (véase figura):

#### **III.4.3.1.- CONDICIONES DE GENERACIÓN DE LA SEÑAL DE DEMANDA DE COMBUSTIBLE.**

##### **III.4.3.1.a) OPERACIÓN EN MODO COORDINADO.**

Cuando el sistema está funcionando normalmente, la demanda de combustible por temperatura es generada desde el coordinado del sistema, el cual representa el nivel más alto en la jerarquía del control distribuido implementado en la central. De esta manera, el punto de ajuste dinámico es gobernado directamente por esta señal, teniendo un valor adecuado que le permite pasar a través de los selectores de señal, ya mencionados.

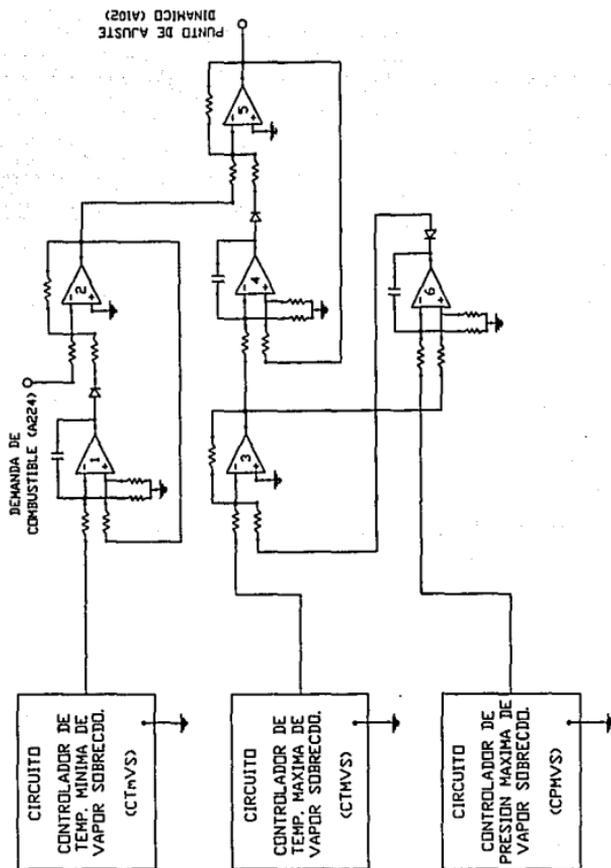
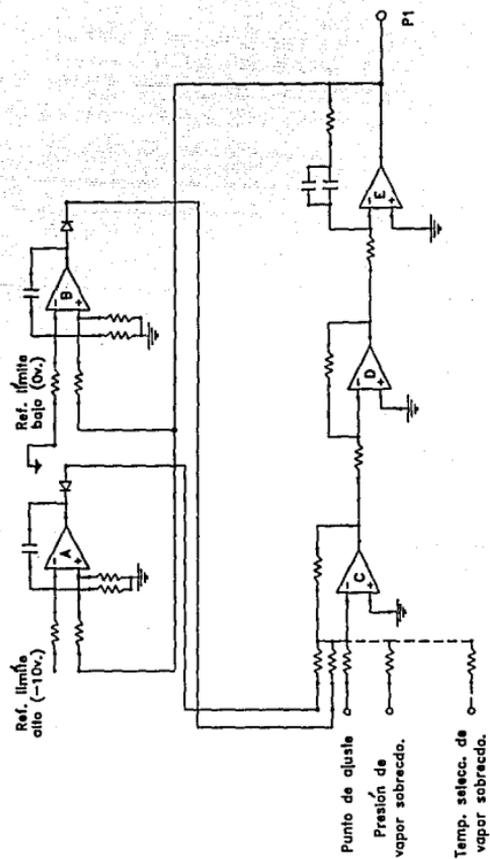


Fig. III.24.- Diagrama eléctrico general del módulo 2.



**Fig. 111.23.-** Circuito electrónico de los bloques del diagrama general del módulo 2. Nótese el lazo cerrado que se forma para realizar la limitación.

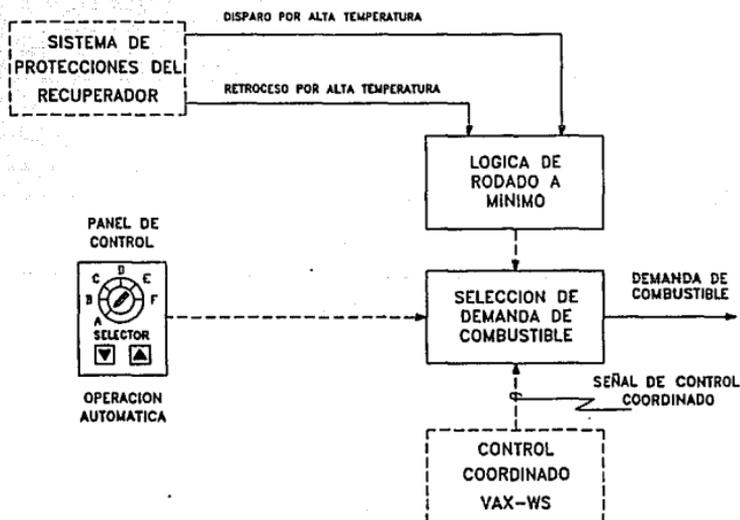


Fig. III.26. Diagrama a bloques general del módulo 3i

### III.4.3.1.b) OPERACIÓN EN MODO AUTOMÁTICO.

La demanda de combustible por temperatura puede ser generada desde el panel de control. A través de ésta, un operador es capaz de bajar o subir la señal en rampa hasta un valor deseado y con una rapidez determinada ( $^{\circ}$  F/MIN). Dicha rapidez se elige previamente mediante un selector giratorio localizado en la misma estación (Fig. III.26).

### **III.4.3.1.c) CONDICIONES EXTREMAS DE LA TEMPERATURA DEL VAPOR SOBRECALENTADO.**

*Cuando se presenta una contingencia por alta temperatura de vapor sobrecalentado, el sistema de protecciones evalúa y genera, si es necesario, las señales de retroceso y disparo. En tal situación, la señal demanda de combustible es generada por una lógica denominada rodado a mínimo, la cual es analizada en el apartado III.5.*

*Aprovechando las descripciones anteriores y haciendo alusión a los modos de operación del sistema en específico, queda por definir el modo de operación manual, el cual representa el nivel más bajo en la jerarquía del sistema de control distribuido de la central. En éste, el operador está habilitado para gobernar directamente al actuador desde una estación manual-automático [M/A] (indicadores 8.1, 8.4 del diagrama de control del módulo 1, Fig. III.21, pág. 81), ya definida en este capítulo.*

*La diferencia entre el panel de control y la estación M/A, radica en que la primera corresponde a la operación en estado automático; esto es, mediante ella puede manipularse la posición del actuador de una forma diferida (regulada) y no directa como se realiza con la estación M/A en el modo manual. Así bien, el selector junto con los botones del panel de control del módulo 3, actúa sobre el punto de ajuste dinámico del controlador maestro, mientras que, la estación de manual opera sólo cuando el sistema se encuentre en este modo y de forma directa sobre el actuador.*

### III.5.- SISTEMA DE PROTECCIONES.

Existe un sistema de detección de temperatura que tiene como objetivo evaluar condiciones para la activación de protecciones contra alta temperatura de vapor sobrecalentado. Así, cuando dicha temperatura tiende a sobrepasar un límite 1 determinado, se activa el permisivo de retroceso por alta temperatura de vapor sobrecalentado. Si el incremento continúa hasta elevarse por encima de un valor límite 2, entonces se activa el permisivo disparo de quemadores por alta temperatura de vapor sobrecalentado, sacándolos de operación.

Al aparecer el permisivo de retroceso, se presenta la señal de rodado a mínimo por medio de la lógica del mismo nombre.

#### III.5.1.- LÓGICA DE RODADO A MÍNIMO.

Esta lógica tiene como finalidad generar la señal de rodado a mínimo cuando el sistema de protecciones produzca las señales de retroceso o disparo. Su estructura general se aprecia en la figura III.27. En forma resumida, opera de la siguiente manera:

Cuando no existe ninguno de los permisivos (L1, L2) aparece un "0" a la salida de la compuerta OR (L3), ocasionando que la salida de la compuerta AND, que corresponde a la señal "RODADO A MINIMO" (L6), sea "0". De esta manera, quedan determinados los valores de entrada para el flip-flop:  $S=0$ ,  $R=1$ ; con lo que su salida Q (L7) es "0". Diez



ocasionando el cierre inmediato de la válvula de combustible.

### III.5.2.- TRANSFERENCIA A COMBUSTIÓN MÍNIMA.

Cuando aparece la señal de transferencia del control maestro de combustible a mínimo (D11) se activa el amplificador de seguimiento (TA) realizando la función especificada con anterioridad. Es entonces cuando se realiza la transferencia, pasando el punto de ajuste de la transferencia de combustible (+1.5 v.) y bloqueándose la señal actuadora del controlador maestro. De esta manera, la diferencia que existe entre las entradas del monitor de señal baja es grande, ocasionando la conmutación de sus salidas.

Dicha conmutación produce la activación de "señal de control de combustible es igual al punto de ajuste de la transferencia de combustible", que es introducida a un sistema lógico cuya salida genera el permiso "control maestro de transferencia de combustible a mínimo".

Con la acción del amplificador de seguimiento (TA), la salida del controlador disminuye gradualmente (como ya se mencionó) hasta llegar a un valor que produce una diferencia de voltajes localizada dentro del rango de desactivación del monitor de señal; en cuyo momento desaparece su señal de salida.

Existe una lógica para la generación del permiso que activa al amplificador de seguimiento. La figura III.28 ilustra claramente dicha lógica y muestra sus entradas, las cuales representan condiciones de modo de operación (manual - automático), tipo de combustible (gas - diesel). También se localiza la señal de transferencia de control maestro de

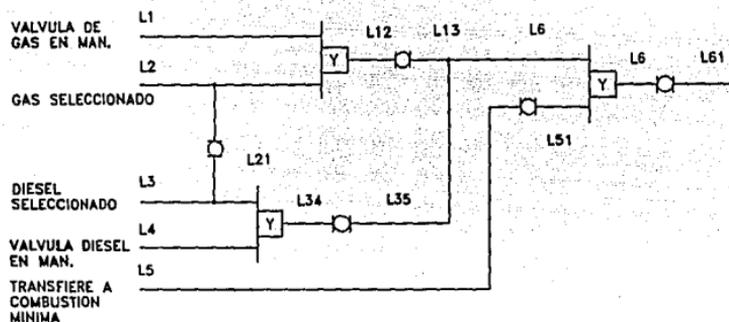


Fig. III.28.- Circuito que genera el permiso para la activación del amplificador de seguimiento (TA).

combustible a mínimo que es generada por el sistema de protecciones del recuperador de calor.

Un aspecto importante en esta lógica es la utilización de la redundancia con la finalidad de asegurar un estado lógico determinado, por si se presentara el caso de falla de alguna compuerta. Lo anterior se observa en el dibujo, precisamente en dos nodos: El que corresponde a la señal L21 y el de L13.

Las posibles combinaciones de tales entradas, se presentan en las tablas III.1.a y III.1.b. En ellas se aprecia la condición de la bobina como resultado de la activación o desactivación del permiso y la correspondiente acción del amplificador de seguimiento.

Se observa, entre otras cosas, que en cuanto aparece la señal de transferencia, el amplificador integra.

	L1	L2	L12	L13	L21	L3	L4	L34	L35	L5	L51	L6	L61	BOBINA	TA
OP. CON GAS/EN AUTO/SIN TRANSF.	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	DESENERGIZADA	DESCARGA
OP. CON GAS/EN AUTO/CON TRANSF.	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	ENERGIZADA	INTEGRADA
OP. CON GAS/ EN MAN/SIN TRANSF.	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	ENERGIZADA	INTEGRADA
OP. CON GAS/EN MAN/CON TRANSF.	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	ENERGIZADA	INTEGRADA

Tabla III.1.a.- Posibles combinaciones en la lógica de transferencia a combustión mínima. Nótese el estado de la bobina y la acción del amplificador de seguimiento (TA). Operación con gas.

	L1	L2	L12	L13	L21	L3	L4	L34	L35	L5	L51	L6	L61	BOBINA	TA
OP. DIE SEL/EN AUTO/SIN TRANSF.	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	DESENER GIZADA	DESCAR GA
OP. DIE SEL/EN AUTO/CON TRANSF.	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	ENERGI- ZADA	INTE- GRA
OP. DIE SEL/ EN MAN/SIN TRANSF.	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	DESENER GIZADA	DESCAR GA
OP. DIE SEL/EN MAN/CON TRANSF.	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	ENERGI- ZADA	INTE- GRA

Tabla III.1.a.- Posibles combinaciones en la lógica de transferencia a combustión mínima. Nótese el estado de la bobina y la acción del amplificador de seguimiento (TA). Operación con diesel.

## **MODELO DINÁMICO DEL PROCESO**

### **IV.1.- DESCRIPCIÓN.**

*El modelo dinámico del proceso está constituido por dos modelos matemáticos a saber:*

- 1) MODELO MATEMÁTICO DE LA VÁLVULA.**
- 2) MODELO MATEMÁTICO DEL PROCESO.**

#### **IV.1.1.- MODELO MATEMÁTICO DE LA VÁLVULA.**

*Este modelo simula el comportamiento del actuador ante la variación de la señal de control recibida del generador de la demanda de posición (módulo 1).*

*El modelo utiliza como base la integración numérica que, a su vez, tiene como fundamento el método iterativo de Runge Kutta. Existe una expresión para el cálculo de la variación de la posición de la válvula ( $D\_XVGAS$ ) en términos de la señal de control ( $SC\_VGAS$ ), de la posición de la válvula ( $X\_VGAS$ ) y de la constante de tiempo de la misma ( $T\_VGAS$ ); que está dada por la ecuación IV.1.*

*Mediante la fórmula de Runge Kutta se obtiene el valor de la posición actual de la válvula.*

UNAM

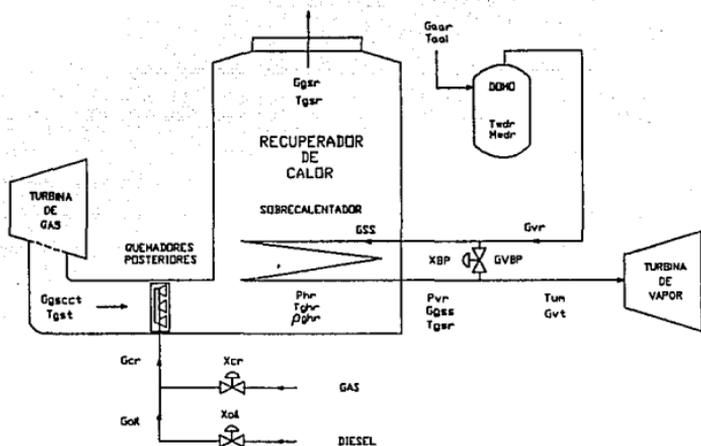
$$D\_XVGAS = \frac{(SC\_VGAS - X\_VGAS)}{T\_VGAS} \dots \dots \dots (iv.1)$$

#### **IV.1.2.- MODELO MATEMÁTICO DEL PROCESO.**

*El modelo matemático del proceso es un modelo no lineal que simula a la sección de recuperación de calor. Permite obtener las presiones y temperaturas del vapor sobrecalentado, así como de los gases en el hogar del recuperador de calor, entre otras. La figura IV.1 brinda el panorama de la zona mencionada con la localización de las variables de mayor relevancia en el control de los quemadores posteriores. El listado con el significado de las variables puede consultarse en el anexo 1.*

##### **IV.1.2.1.-CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DINÁMICO PARA LA VALIDACIÓN DEL CONTROL DIGITAL DE QUEMADORES POSTERIORES.**

- 1.- **Codificación:** Lenguaje C.
- 2.- **Ambiente:** PC-AT, Turbo C, Sistema operativo DOS.
- 3.- **Unidades:** Sistema Internacional de Unidades.
- 4.- **Tipos de variables:**
  - Algebraicas.
  - De estado.
  - Parámetros.
- 5.- **Zonas del proceso de ciclo combinado que emula:**
  - a) **Turbina de gas:** Gases de escape (Flujo, temperatura).
  - b) **Domo de alta presión:** Agua de alimentación (Flujo, temperatura); Interior del domo (Masa



**Fig. 14.11.- Diagrama simplificado de la zona de recuperación de calor. Obsérvese la localización de las variables del modelo dinámico del proceso.**

de agua, temperatura); vapor al recuperador (Flujo).

c) Recuperador de calor: Gases en el hogar (Presión, temperatura, densidad); sobrecalentador (Flujo de entrada, flujo de salida, temperatura de vapor sobrecalentado).

d) Turbina de vapor: Vapor sobrecalentado (Temperatura, flujo presión).

e) Válvulas de regulación: Combustible a QP (Gas); Combustible a QP (Diesel); atemperación.

f) Funciones de acoplamiento con el control:

- De entradas al modelo.
- De salidas al modelo.

**g) Ecuaciones :**

El modelo consiste de : 11 ecuaciones algebraicas.

6 ecuaciones de estado.

30 parámetros.

1 función auxiliar (integración).

**h) Condiciones operativas de ejecución del modelo: ESTADO ESTABLE.**

- |   |              |
|---|--------------|
| - Temperatura de gases de salida de TG:             | 749.123 °K   |
| - Flujo de gases de salida TG:                      | 79.8 Kg/seg. |
| - Posición válvula de combustible gas:              | 80 %         |
| - Temperatura de gases en el hogar del recuperador: | 949.47 °K.   |
| - Presión de gases en el hogar del recuperador:     | 413.343 KPa. |
| - Temperatura de vapor sobrecalentado:              | 800.032 °K.  |
| - Flujo de vapor sobrecalentado:                    | 35 Kg/seg.   |
| - Presión de vapor sobrecalentado:                  | 6205 KPa.    |
| - Posición válvula de atemperación:                 | 15 %         |

Como puede apreciarse, las condiciones de estado estable del modelo, son muy

elevadas, lo que indica que el sistema está trabajando en un estado con demanda de carga alta. De hecho, una apertura de la válvula de combustible de los quemadores posteriores de 80%, es la primera muestra de lo anterior, puesto que una apertura tal presupone un incremento considerable en la temperatura de los gases de escape ( $T_{gst}$ ).

La posición actual de la válvula mencionada antes, es utilizada por el modelo del proceso para obtener el flujo de gases a quemadores posteriores determinado por la ecuación IV.6. Como se aprecia, dicho flujo está en términos de la temperatura de los gases en el hogar del recuperador ( $T_{ghr}$ ), de la posición de la válvula ( $X_{cr}$ ); como ya se indicó, de la presión en el hogar del recuperador ( $P_{hr}$ ) y de la presión en el quemador posterior ( $P_{iq}$ ), básicamente.

El mecanismo principal de funcionamiento del sistema en conjunto, consiste en que la variación de la apertura de la válvula en el modelo, repercute sobre el flujo de combustible en los quemadores posteriores con lo que se suceden una gran variedad de cambios en las condiciones del proceso, alterándose las presiones y temperaturas ya mencionadas.

#### **IV.1.3.-PRINCIPALES FÓRMULAS DEL MODELO DEL PROCESO.**

Las fórmulas de mayor importancia se proporcionan a continuación; las pequeñas descripciones que se brindan en relación a ellas, están encaminadas a hacer énfasis sobre la relación que existe entre las mismas, lo que es muy importante para comprender el efecto que

ocasiona la presencia de una perturbación en el proceso. El significado de las literales utilizadas en las fórmulas puede consultarse en el anexo 1 de esta obra.

**\* Presión del vapor en el recuperador.**

$$P_{vr} = \rho_u * T_{um} * R_{v2} \dots \dots \dots (IV.3)$$

En esta expresión se observa que la presión del vapor en el recuperador es directamente proporcional a la temperatura del vapor sobrecalentado ( $T_{um}$ ) y a la densidad del mismo.

**\* Flujo de gases que salen del recuperador de calor.**

$$G_{gsr} = C_{vhr} * \sqrt{\frac{P_{hr}^2 - P_j^2}{T_{gsr}}} \dots \dots \dots (IV.4)$$

La cantidad de flujo de gases está en función de la temperatura de los gases a la salida del recuperador ( $T_{gsr}$ ).

**\* Temperatura de los gases que salen del recuperador.**

$$U_{dr} = K_{dr} * (G_{gsr})^{0.8} \dots \dots \dots (IV.5)$$

$$T_{gsr} = \frac{G_{gsr} * C_{pg} * T_{ghr} - U_{dr} * \left( \frac{T_{ghr}}{2.0} - T_{vdr} \right)}{\frac{U_{dr}}{2.0} + G_{gsr} * C_{pg}} \dots \dots \dots (IV.5)$$

La temperatura de los gases a la salida del recuperador ( $T_{gsr}$ ) está en términos de la temperatura de los gases en el hogar ( $T_{ghr}$ ) principalmente, esto implica que si la temperatura de los gases de escape de la turbina de gas ( $T_{gst}$ ) varía, la temperatura de gas en el hogar del

recuperador (Ecuación IV.16) también, con el consecuente incremento en la temperatura de los gases de salida del recuperador.

\* Flujo de gas a quemadores posteriores.

$$G_{cx} = X_{cx} * C_{vx} * \sqrt{\frac{P_{ig}^2 - P_{hr}^2}{T_{ghr}}} \dots \dots \dots (IV.6)$$

\* Flujo de vapor producido en el recuperador.

$$G_{vr} = \frac{G_{aar} * C_{pv} * (T_{aal} - T_0) + G_{ggr} * K_{vr} * (T_{ghr} - T_{wdr})}{H_{vr}} \dots \dots (IV.7)$$

El flujo de vapor que se obtiene del recuperador es directamente proporcional a la temperatura de los gases en el hogar ( $T_{ghr}$ ).

\* Presión de los gases en el hogar del recuperador.

$$P_{hr} = R_g * \rho_{ghr} * T_{ghr} \dots \dots \dots (IV.8)$$

La presión es directamente proporcional a la temperatura.

\* Flujo de vapor a través del BYPASS del sobrecalentador.

$$G_{vbp} = \frac{X_{bpb} * C_{vbp} * G_{vr}}{K_{bbs} + X_{bpb} * C_{vbp}} \dots \dots \dots (IV.9)$$

Las variables para la determinación del flujo a través del bypass de atemperación son el flujo de vapor producido en el recuperador y la apertura de la válvula de bypass ( $X_{bpb}$ ).

\* Flujo de vapor a través del sobrecalentador.

$$G_{ss} = G_{vr} - G_{vBP} \dots \dots \dots (IV.10)$$

\* Temperatura del vapor que sale del sobrecalentador.

$$T_u = \frac{T_{ghr} * U_u + C_{pv} * G_{ss} * T_{wdr}}{C_{pv} * G_{ss} + U_u} \dots \dots \dots (IV.11)$$

\* Temperatura del vapor sobrecalentado.

$$T_{um} = \frac{G_{ss} * (H_{vr} + C_{pv} * (T_u - T_{wdr})) + G_{vBP} * H_{vr} - G_{vr} * H_{vr}}{G_{vr} + C_{pv}} + T_{wdr} \dots \dots \dots (IV.12)$$

Una de las variables de mayor importancia para el control del proceso es la temperatura de vapor sobrecalentado, cuya expresión es la mostrada en la ecuación IV.12. En ella, se observa la presencia del flujo de vapor a través del sobrecalentador ( $G_{ss}$ ), de la temperatura del vapor que sale del sobrecalentador ( $T_u$ ), del flujo en el bypass de atemperación ( $G_{vBP}$ ) y del flujo de vapor producido en el recuperador de calor ( $G_{vr}$ ), como variables principales. De la expresión para el cálculo de  $T_u$  (ec. IV.11) notamos la relación que existe con la variable  $T_{ghr}$ , lo que implica que las variaciones en esta última traen como consecuencia variaciones en la temperatura de vapor sobrecalentado ( $T_{um}$ ).

\* Flujo de agua de alimentación.

$$\frac{dM_{vdr}}{dt} = G_{aar} - G_{vr} \dots \dots \dots (IV.13)$$

$$\frac{dG_{aar}}{dt} = \frac{M_{vdr0} - M_{vdr}}{T_{aa}} \dots \dots \dots (IV.14)$$

\* Densidad de los gases en el hogar del recuperador.

$$\frac{d\rho_{ghr}}{dt} = \frac{G_{gsccct} + G_{cr} - G_{gsr}}{V_{hr}} \dots \dots \dots (IV.15)$$

\* Temperatura de los gases en el hogar del recuperador.

$$\begin{aligned} \frac{dT_{ghr}}{dt} = & \left[ G_{gsccct} * (T_{gst} - T_0) + \frac{G_{cr} * J}{C_{pv}} - G_{gsr} * (T_{ghr} - T_0) - \right. \\ & \left. - (T_{ghr} - T_0) * (G_{cr} + G_{gsccct} - G_{gsr}) \right] / (V_{hr} * \rho_{ghr}) \dots \dots (IV.16) \end{aligned}$$

Después de determinar las relaciones básicas que existen entre las principales fórmulas del modelo dinámico del proceso y ante la perspectiva de elegir una variable que actúe como señal de excitación en las pruebas, podemos afirmar que la temperatura de los gases de escape ( $T_{gst}$ ) es la mejor opción. Haciendo un seguimiento de las variables que afectan el estado de la temperatura de vapor sobrecalentado ( $T_{um}$ ), se encuentra que dicha variable está en función de  $T_u$  (como ya se dijo), que a su vez está en función de la temperatura de los gases en el

*hogar ( $T_{ghr}$ ), la cual por su parte, se calcula por medio del valor de la temperatura de los gases de escape ( $T_{gst}$ ), entre otros.*

*Lo anterior indica que podemos alterar el valor de la variable controlada ( $T_{um}$ ), con la variación de  $T_{gst}$ ; ésto constituye una piedra angular en la realización de las pruebas del control digital de quemadores posteriores.*

*El modelo dinámico, descrito en esta sección, se ha utilizado con anterioridad para probar otros sistemas de control de la central termoeléctrica de ciclo combinado de Gómez Palacio, Durango.*

# CONTROL DIGITAL DE QUEMADORES

## POSTERIORES

### V.1.- INTRODUCCIÓN.

*Los conocimientos adquiridos del sistema de control y del proceso, permiten comprender ampliamente el mecanismo de acción de éstos y la interacción entre ellos. De esta manera, es factible el diseño del sistema de control digital de los quemadores posteriores, mediante el aprovechamiento de los códigos establecidos para los bloques electrónicos y de los resultados obtenidos en su simulación (capítulo III).*

*Cabe hacer mención que el algoritmo de control (sistema de control digital de los quemadores posteriores) es simulado en voltajes, debido a que los modelos matemáticos que lo integran surgieron, en su mayoría, como producto del análisis electrónico de los diagramas esquemáticos y mencionados. Las presiones y temperaturas del modelo dinámico del proceso expresadas en el sistema internacional de unidades (SIU), fueron convertidas a unidades del sistema inglés, para poder ser ocupadas por el sistema de control. Por tal motivo, se utilizaron líneas de código para realizar las conversiones y poder, con ello, acoplar el sistema adecuadamente ( ver apéndice C ).*

*Este capítulo tiene como objetivo describir cada una de las funciones de que comprende*

el control digital. La explicación va de lo general a lo particular, abarcando aspectos de operación y estructura, principalmente.

## V.2.- DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA GENERAL.

A groso modo, el código está integrado por las siguientes funciones:

\* *ctrl\_qp ( )*: Esta función genera la señal de demanda de posición para la válvula de gas o diesel.

\* *modpro ( )*: Simula un proceso dinámico en el cual interactúan temperaturas y presiones de la zona del recuperador de calor. Posee expresiones que calculan la temperatura y presión del vapor sobrecalentado, la temperatura de los gases en el hogar del recuperador, etc. Algunas de estas variables son retroalimentadas al control.

También contiene el modelo matemático para cada válvula. Esta último, recibe la señal de demanda de apertura del controlador para adquirir una posición determinada.

\* *perturb ( )*: Produce una señal que es utilizada en las pruebas como perturbación o excitación. Puede ser una rampa con duración determinada o un escalón, que simulan a la temperatura de los gases de escape de la turbina de gas (Tgst).

\* *perm ( )*: Supervisa la temperatura del vapor sobrecalentado (Tum). Cuando dicha temperatura alcanza ciertos valores límites establecidos (TMAX1 o TMAX2), la función activa la señal de retroceso o disparo, dependiendo del caso.

\* *Base de datos*: La base de datos está costituida por archivos de variables analógicas, digitales (lógicas) y constantes. Las variables analógicas declaradas como externas se encuentran en el archivo *anal123.e*, mientras que las digitales (declaradas también como externas) se

localizan en *digvar.e*. El archivo de constantes es *con1\_qp.e*; en él se incluyen los parámetros de los controladores y de otros componentes.

Se tiene un archivo de condiciones iniciales (*conini.c*) en donde se inicializan las variables del proceso y del control (Una lista detallada de todas las variables y parámetros, con su respectivo identificador, se localiza en el anexo 2).

A continuación se realiza la descripción a fondo de cada función, haciéndose énfasis en algunos aspectos:

### **V.3.- DESCRIPCIÓN DE FUNCIONES.**

#### **V.3.1.- FUNCIÓN CTRL\_QP.C**

Esta función representa la parte esencial de este trabajo de tesis. En ella se encuentra el algoritmo de control para los quemadores posteriores. La figura V.1 muestra, de manera simplificada, las entradas y salidas de la función. La temperatura de los gases después de los quemadores posteriores (A101), la derivada de la temperatura de vapor sobrecalentado seleccionada (A103), la temperatura del vapor sobrecalentado misma (A201), la señal caracterizada de la apertura de la válvula de bypass de atemperación (A209) y la presión en el hogar del recuperador (A217), son obtenidas del modelo del proceso ya sea directamente o por medio de algún tratamiento. Por otra parte, las salidas de los limitadores (A111 y A114) y del amplificador de seguimiento (A119) corresponden a señales producidas en la misma función que tienen la característica de estar retroalimentadas.

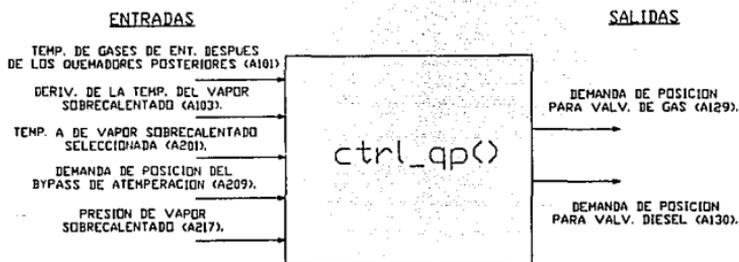


Fig. V.1.- Diagrama de entradas/salidas de `ctrl_qp()`.

La función tiene únicamente dos salidas y ambas son enviadas al modelo del proceso. Tales señales corresponden a la demanda de apertura para la válvula de gas (A129) y para la de diesel (A130). Cabe hacer la aclaración de que sólo una válvula puede estar operando, como se explica en el capítulo I de esta obra. En el código de control se puede elegir el tipo de combustible a utilizar mediante la designación de valor a la variable VALV\_GAS. De esta manera, si se le asigna el valor de "1" el sistema funciona con gas como combustible; si por el contrario, se le da el valor de "0" el combustible a utilizar es diesel.

La función `ctrl_qp()` está compuesta por tres módulos a saber, representados esquemáticamente en la figura V.2. En esta, se puede observar el orden de ejecución de dichos módulos. La descripción que se realiza a continuación, no está en orden de ejecución; está en el orden en que se analizaron los módulos.

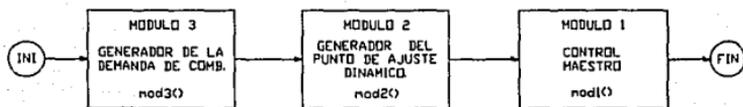


Fig. V.2.- Secuencia de ejecución de los módulos de la función de control.

### V.3.1.1.- CONTROL MAESTRO (Mod1).

Recibe el punto de ajuste dinámico y la temperatura de los gases en el hogar del recuperador, generando la demanda de posición para la válvula de gas o diesel (véase figura V.3).

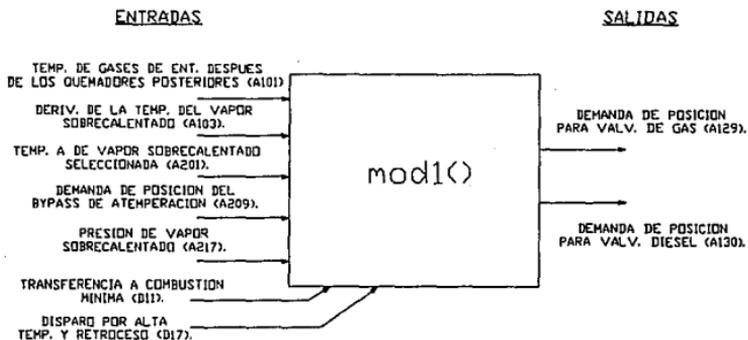


Fig. V.3.- Diagrama de entradas/salidas analógicas y digitales del controlador maestro (mod1).

La señal de error es generada por suma algebraica de las entradas. Las señales temperatura de gases después de los quemadores posteriores (A101) y el punto de ajuste dinámico (A102) siempre están presentes. La salida del limitador a -10v. (A111), la del limitador a 0v. (A114) y la salida del amplificador de seguimiento (A119), sólo aparecen en situaciones especiales; cuando la salida del controlador rebasa los límites establecidos, surge alguna de las dos primeras y al activarse el amplificador de seguimiento (TA), debido al surgimiento de la señal de transferencia a combustión mínima (D11), aparece la última. La derivada de la temperatura de vapor sobrecalentado (A103) por otro lado, se produce como resultado de las variaciones de la temperatura de vapor sobrecalentado seleccionada (A201 ó A202) y en proporción a su razón de cambio; constituyendo una compensación para el sistema de control.

Las funciones que integran este módulo son:

**V.3.1.1.a) rate ( ):** Proporciona la señal A103 como resultado de la derivación numérica de la temperatura del vapor sobrecalentado.

**V.3.1.1.b) ta ( ):** Es activada cuando se presenta la señal de transferencia a combustión mínima (D11). Produce la señal A119.

**V.3.1.1.c) sa ( ):** Recibe la salida del controlador maestro PI (A109), produciendo la señal A120. A120 es igual a la salida del controlador siempre y cuando sea mayor que una

referencia (1.5v.), de lo contrario su valor se fija en dicha referencia. La finalidad de esto es asegurar que la señal de demanda de posición para cualesquiera de las válvulas sea como mínimo 15% evitando con ello que los quemadores posteriores salgan de operación en forma total, como ya se explicó en el capítulo III.

**V.3.1.1.d) fegas ( ):** Realiza la caracterización de la señal de demanda de posición cuando el sistema trabaja con gas como combustible. Debido a que esta función está parametrizada (ver cap. III - circuito de caracterización), es posible variar la caracterización a placer, simplemente con la modificación de los valores de sus parámetros (los parámetros representan valores de voltajes y resistencias).

La función fegas ( ) se adaptó a la forma genérica y se incluyó en un archivo de funciones auxiliares. De esta forma, cuando el código de control la utiliza realiza un "llamado a función".

**V.3.1.1.e) sedie ( ):** Esta función posee las mismas características que la función fegas( ), con la diferencia de que realiza la caracterización para la válvula de diesel. Obviamente, como se estableció en el capítulo III, los parámetros de ambas funciones son distintos.

### V.3.1.2.- GENERADOR DEL PUNTO DE AJUSTE DINAMICO (Mod2).

Genera el punto de ajuste dinámico para el controlador maestro. Recibe la presión de los gases en el hogar, la temperatura del vapor sobrecalentado, la posición de la válvula bypass de atemperación y la demanda de combustible generada por el módulo 3.

El diagrama de entradas/salidas para este módulo es el mostrado en la fig. V.4.

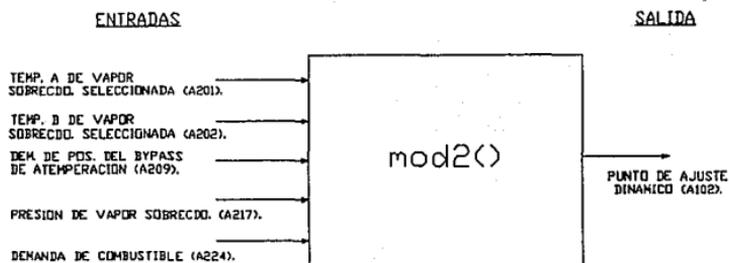


Fig. V.4.- Diagrama de entradas/salidas analógicas del módulo generador del punto de ajuste dinámico (mod2).

Está constituido por tres controladores, dos selectores de señal baja y uno de alta; como se ilustra en la figura V.5, donde aparece el diagrama a bloques de este módulo:

**V.3.1.2.a) CONTROLADOR DE TEMPERATURA MINIMA DE VAPOR SOBREALENTADO (CTmVS):** Tiene como finalidad mantener la temperatura de vapor sobrecalentado (TUM) por encima de un valor determinado (700 °F). La señal de error es la resultante de la temperatura de vapor sobrecalentado seleccionada (A201 ó a202) y el punto de ajuste. Produce la salida A206.

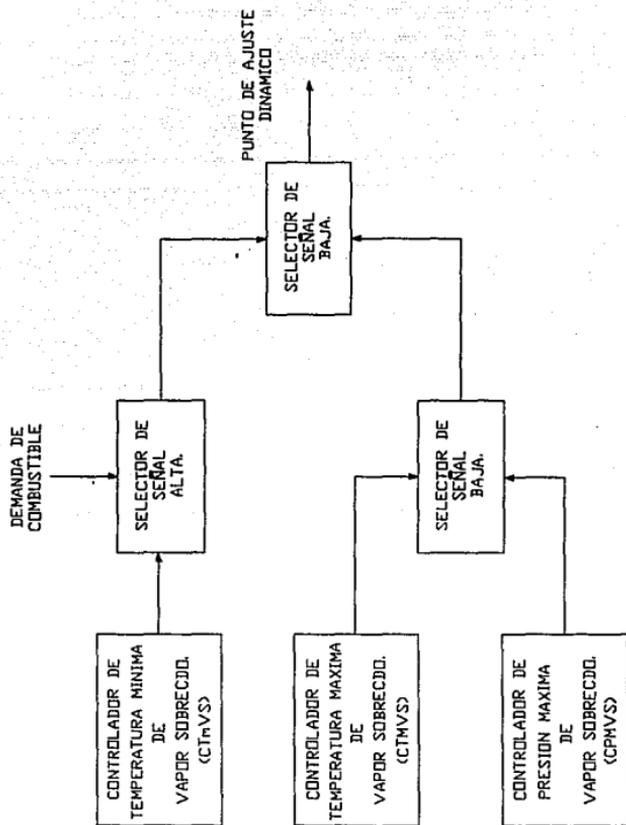


Fig. V.5.- Diagrama a bloques del módulo generador del punto de ajuste dinámico. Nótese la posición de los selectores de señal baja y alta.

**V.3.1.2.b) CONTROLADOR DE TEMPERATURA MAXIMA DE VAPOR**

**SOBRECALENTADO (CTMVS):** Su objetivo es disminuir la apertura de la válvula cuando la temperatura del vapor sobrecalentado ( $T_{um}$ ) se eleve por encima del límite (952 °F). La señal de error resulta de la suma algebraica de:

- b.1) La temperatura de vapor sobrecalentado seleccionada (A201).
- b.2) La señal caracterizada de la posición del bypass de atemperación (A210).
- b.3) El punto de ajuste. Produce la señal A214.

**V.3.1.2.c) CONTROLADOR DE PRESION MAXIMA DE VAPOR SOBRECALENTADO**

**(CPMVS):** Disminuye la temperatura cuando la presión sobrepasa un límite establecido (1250 PSIA). Tiene como entrada a la presión del vapor sobrecalentado (A217), que es comparado con el punto de ajuste para producir la señal de error. Genera la salida A221.

Las salidas de los tres controladores están relacionadas mediante funciones pasa altas y pasa bajas, de tal manera que cada controlador logre su objetivo cuando sea requerido. Esto significa que, dependiendo de ciertas condiciones, el punto de ajuste dinámico (A102) puede tomar el valor de alguna de las salidas de los controladores o de la señal de demanda de combustible por temperatura (A224) generada en el módulo 3, como ya se explicó en el capítulo III. Dichas condiciones se establecen, para la codificación, de la siguiente manera (véase diagrama de control, cap. III, pág. 86):

- a) Si la señal de demanda de combustible (A224) es mayor que la salida del controlador de

temperatura mínima (A206) y además, es menor que la señal A226 , entonces el punto de ajuste dinámico por temperatura (A102) es igual a la demanda de combustible (A224). La señal A226 es la señal que resulta de comparar la salida del controlador de temperatura máxima (A214) y la salida del controlador de presión máxima (A221).

b) Si la señal de salida del controlador de temperatura mínima (A206) es mayor que la demanda de combustible (A224) y también, es menor que A226 , entonces el punto de ajuste dinámico es igual a esta salida.

c) Si la salida del controlador de temperatura máxima (A214) es menor que la señal de salida del controlador de presión máxima (A221) y además menor que la señal A225 , entonces la salida de la función  $\text{mod2}()$  es igual a la del controlador de temperatura máxima. La señal A225 resulta de comparar la salida del controlador de temperatura mínima (A206) y la señal de demanda de combustible (A224).

d) Si la salida del controlador de presión máxima (A221) es menor que la salida del controlador de temperatura máxima (A214) y además menor que la señal A225 , entonces la salida de la función  $\text{mod2}()$  es igual a la del controlador de presión.

El módulo 2 realiza sólo una llamada a función, la cual sirve para caracterizar la apertura de la válvula de bypass de atemperación.

**V.3.1.3.- GENERADOR DE LA DEMANDA DE COMBUSTIBLE (Mod3):** Genera la señal de demanda de combustible (A224). En cuanto se presenta la señal de rodado a mínimo, el módulo 3 gobierna al punto de ajuste dinámico (A102) para disminuir rápidamente su valor (en rampa). También es posible que el punto de ajuste dinámico sea modificado desde un tablero, mediante botones de subir o bajar demanda de combustible.

La figura V.6 muestra las entradas y la única salida de este módulo.

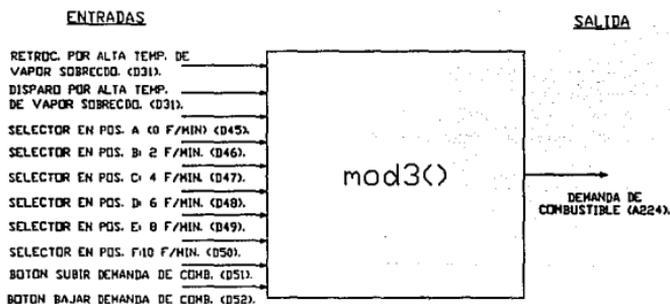


Fig. V.6.- Diagrama de entradas salidas del módulo generador de la demanda de combustible.

La figura V.7, por su parte, muestra el diagrama funcional simplificado del generador de la demanda de combustible.

Las funciones que componen al módulo generador de la demanda de combustible, son las siguientes:

**V.3.1.3.a) dem\_min( ):** Produce la señal de rodado a mínimo (D36). Determinando la

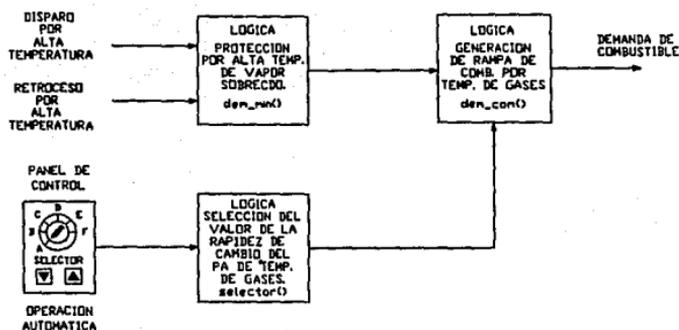
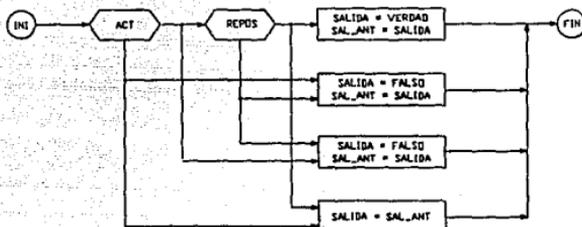


Fig. V.7. Diagrama general simplificado del módulo.

pendiente de la rampa y su duración. Realiza llamadas a las funciones *flip-flop* y *retardo*, cuya activación depende de la presencia de la señal de retroceso (D31) o disparo (D32).

**V.3.1.3.b) *flipflop()***: Simula el comportamiento de un *flip-flop* tipo RS. Cuyo funcionamiento se resume en el diagrama de la figura V.8.

**V.3.1.3.c) *retardo()***: Produce la señal de retardo (D41) después de un determinado tiempo de retardo (10 seg.). Su activación depende de la aparición de la señal de salida del *flip-flop* (D40). Cuando esta última es "1" empieza a avanzar un contador interno, cuyo valor es multiplicado por una constante definida como *CONCURRENCIA* y dividido entre mil. Si el resultado de la operación anterior es igual al tiempo de retardo (en segundos) elegido previamente, se activa la señal D41, interrumpiéndose de inmediato la señal de rodado a mínimo.



EQUIVALENCIAS:  
 ACT = D36.  
 REPOS = D39.  
 SALIDA = D40.  
 SAL\_ANT = D40.  
 VERDAD = 1  
 FALSO = 0

Fig. V.8.- Diagrama de flujo de la función flip-flop 0.

La determinación de la constante **CONCURRENCIA** se realiza mediante el cálculo aproximado del número de iteraciones que se ejecutan por segundo. La **conurrencia** es el tiempo en milisegundos que tarda la computadora en realizar una iteración y obviamente varía, para cada computadora, dependiendo del tipo de procesador con el que se disponga.

El método para calcular la **conurrencia** aproximada es muy sencillo, pues requiere simplemente de manejar el concepto y de utilizar la regla de tres simple. Digamos que  $I$  es el número de iteraciones realizadas por la máquina durante un tiempo en segundos  $T$ , si queremos determinar el número de ejecuciones  $X$  (lease iteraciones) realizadas en un segundo, establecemos la relación:

$$\frac{I}{T} = \frac{X}{1} \dots \dots \dots (v.1)$$

Para calcular la concurrencia [Y] se utiliza la siguiente razón:

$$\frac{T}{I} = \frac{Y}{1} \dots \dots \dots (v.2)$$

El concepto de concurrencia es muy importante, ya que de este parámetro depende la duración de la señal de demanda al mínimo.

La concurrencia (Y), como ya se mencionó, es el tiempo (expresado en milisegundos) que tarda el procesador en realizar una iteración; de esta manera, si conocemos (Y) podemos determinar el número de ejecuciones por minuto (E) que se realizan, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$E = (1000 / Y) * 60 \dots \dots \dots (v.3)$$

con Y en milisegundos.

**V.3.1.3.d) selector ( ):** Determina el valor del parámetro A301 dependiendo de la razón de variación de la temperatura seleccionada en la función seldig ( ). Mediante dicho parámetro se determina la pendiente de la rampa de la demanda de combustible (A224). Actúa únicamente cuando el operador necesita modificar el punto de ajuste dinámico, ya sea en forma ascendente o descendente. La relación entre la posición seleccionada en el tablero (selector giratorio) y la razón de variación de la temperatura se muestra en la tabla V.1, presentada a continuación.

POSICION	VALOR EN EL TABLERO ( % )	VALOR INTERNO (°F/MIN )
A	0	0
B	20	2
C	40	4
D	60	6
E	80	8
F	100	10

Tabla V.1.- Relación entre posición del selector giratorio del panel de control y la razón de variación de la señal demanda de combustible.

V.3.1.3.e) *dem\_com*( ): Produce la salida del módulo 3 mediante una discriminación de variables digitales, determinando a su vez, si el valor de la rampa sube o baja con una determinada rapidez. Posee condiciones de redundancia para asegurar sólo el ascenso o el descenso, pero no ambos a la vez (Obsérvese fig. V.9).

Esta función, utiliza el valor de E como parámetro para calcular la demanda de combustible, mediante las siguientes expresiones:

$$DC = DC + (2N/E) \dots \dots \dots (V.4)$$

$$DC = DC - (2N/E) \dots \dots \dots (V.5)$$

Donde:

DC: Demanda de combustible.

N: Valor de la razón de cambio de temperatura seleccionada por la función selector( ) o

determinada por  $dem\_min()$ .

E: Número de ejecuciones por minuto.

$(2N/E) \rightarrow [^\circ F/min.]$

La primera ecuación sube la demanda de combustible, mientras que la segunda la decremента.

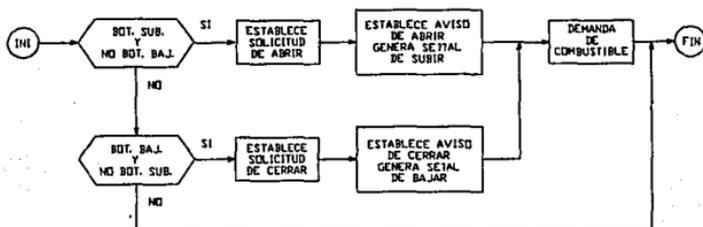


Fig. V.9. Diagrama a bloques de la función  $dem\_com()$ .

### V.3.2.- FUNCION MODPRO.C.

La función  $modpro.c$  constituye el elemento principal de prueba para el control digital de los quemadores posteriores. Las características del proceso ya fueron establecidas en el capítulo IV y su codificación incluye las expresiones algebraicas estudiadas en dicho capítulo así como otras, que para efecto de descripción, se omitieron.

El archivo `modpro()` está constituido por varias secciones de código interrelacionadas entre sí y colocadas en un orden de ejecución adecuado. Estas secciones son el acoplamiento de las señales del control con el proceso, el modelo matemático dinámico del proceso (que incluye modelo matemático de las válvulas) y el acoplamiento del modelo del proceso con el controlador. El acoplamiento del control con el proceso se realiza mediante una asignación de la demanda de posición para cualesquiera de las válvulas (AI29 ó AI30) a las señales `SC_VGAS` o `SC_VDIE`, según sea el combustible elegido para operación. En cambio el acoplamiento del modelo dinámico del proceso con el control está compuesto por expresiones que realizan conversión de unidades para temperaturas y presiones (ver apéndice c).

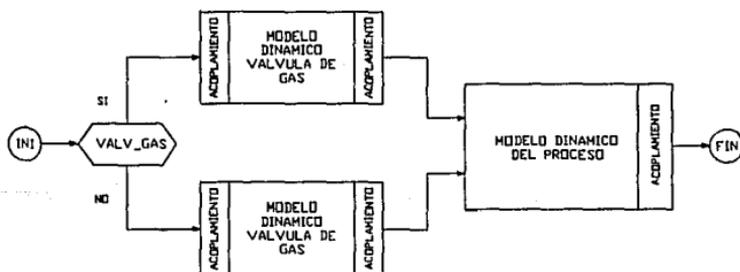


Fig. V.10. Diagrama a bloques de la función que simula al modelo dinámico del proceso (`modpro()`). Agrégase el orden de ejecución y las secciones de acoplamiento.

La figura V.10 muestra la composición básica de este archivo. Primeramente, el código "pregunta" si existe la variable `VALV_GAS`, en cuyo caso, se ejecuta el modelo dinámico que simula a la válvula de gas, realizándose aquí el primero de los acoplamientos ya mencionados. La posición de la válvula (`X_VGAS`), es enviada al modelo del proceso previa asignación a la

variable  $X_{cr}$ . Ya en el modelo del proceso, esta apertura es utilizada para calcular el flujo de gas de los quemadores posteriores, que influye después en el cómputo de todas las variables.

Una vez realizados los cálculos en el modelo dinámico del proceso, las variables de proceso útiles para el control son acopladas a éste, mediante la conversión de unidades ya especificada.

### **V.3.3.- FUNCION PERM.C.**

Para poder detectar el momento preciso en que la temperatura de vapor sobrecalentado rebasa la temperatura límite de activación para la señal de retroceso y/o disparo, es necesario ejecutar esta función en cada iteración. Si dicha temperatura es mayor que el parámetro  $T_{MAX1}$  se activa la señal de retroceso por alta temperatura de vapor sobrecalentado (D31); si se sigue incrementando y logra rebasar  $T_{MAX2}$  se suscita inmediatamente la señal de disparo de quemadores (D32).

# **PRUEBAS Y RESULTADOS DEL CONTROL DIGITAL DE QUEMADORES POSTERIORES**

## **VI.1.- INTRODUCCIÓN.**

*Todas las pruebas realizadas al control digital de quemadores posteriores, fueron creadas con el propósito específico de validarlo. La inclusión de un modelo matemático dinámico del proceso en las pruebas, fué de vital importancia puesto que permitió la evaluación del sistema de control desde el punto de vista operativo y regulatorio. La sintonización se realizó mediante el método sistemático de ensayos.*

*La metodología seguida para la realización de las pruebas fué de lo particular a lo general. Se realizó la prueba de cada módulo por separado y de manera secuencial, para después integrarlos, en forma paulatina, cuando los resultados de su prueba individual fueron satisfactorios. De este modo, el sistema de control se fué depurando poco a poco hasta lograr obtener una estructura definitiva y con alto grado de confiabilidad.*

*La descripción de las pruebas que a continuación se realiza, está ordenada de acuerdo a la secuencia con que éstas fueron realizadas. Los resultados se apoyan básicamente en las gráficas obtenidas y en observaciones realizadas durante la ejecución de cada prueba. Cabe hacer la aclaración, que muchos aspectos son "transparentes" y que a su vez, es imposible*

reportar todos los resultados.

## VI.2.- ALGORITMO DE PRUEBAS.

La figura V.1 nos muestra el diagrama a bloques del algoritmo de pruebas para el control digital de quemadores posteriores. Representa al archivo CTRL\_DIG.C que funge como función principal en la estructura de pruebas. Básicamente está integrado por cuatro

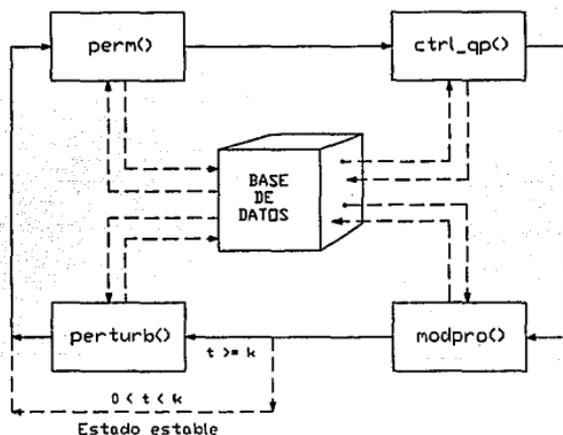


Fig. VI.1.- Algoritmo de pruebas para el control digital de los quemadores posteriores.  
orden de ejecución de las funciones.

Nótese el

archivos de código y una base de datos constituida, a su vez, por varios archivos. El orden de ejecución es el mostrado pero puede variar; la función `modpro()` puede ejecutarse antes que la función `ctrl_qp()`, por ejemplo. La línea punteada que pasa por debajo de la función

*perturb( ) indica el momento ( $t > k$ ;  $k =$  iteraciones) en que comienza a ejecutarse dicho bloque durante una prueba con excitación.*

*Existe también, la posibilidad de realizar pruebas en estado estable (sin excitación) o de intercambiar la función de excitación por otras de diferentes formas y/o magnitudes (rampas y escalones).*

### **VI.3.- TIPOS DE PRUEBAS.**

#### **VI.3.1.- MÓDULO 1:**

*VI.3.1.a) Prueba funcional.*

*VI.3.1.b) Prueba de regulación en lazo abierto.*

*VI.3.1.c) Prueba con modelo matemático de válvula.*

*VI.3.1.d) Prueba de integración con modelo dinámico del proceso (que incluye modelo de válvulas).*

#### **VI.3.2.- MÓDULO 2:**

*VI.3.2.a) Prueba funcional.*

#### **VI.3.3.- INTEGRACIÓN MÓDULOS 1 Y 2 CON MODELO DINÁMICO DE PROCESO:**

*VI.3.3.a) Prueba de regulación en lazo cerrado.*

#### **VI.3.4.- MÓDULO 3:**

*VI.3.4.a) Prueba funcional.*

**VI.3.5.- INTEGRACIÓN TOTAL: MÓDULOS 1, 2 Y 3 CON MODELO DINÁMICO****DEL PROCESO:**

**VI.3.5.1) Prueba en operación normal ( $700\text{ }^{\circ}\text{F} < TUM < 1000\text{ }^{\circ}\text{F}$ ).**

**VI.3.5.1.a.- Prueba con perturbación en escalón.**

**VI.3.5.1.b.- Prueba con perturbación en rampa.**

**VI.3.5.2) Prueba en operación crítica por alta temperatura ( $TUM > 1000\text{ }^{\circ}\text{F}$ ).**

**VI.3.5.3) Prueba en operación crítica por baja temperatura del vapor sobrecalentado ( $TUM < 700\text{ }^{\circ}\text{F}$ ).**

**\*DESARROLLO.****VI.3.1.- MÓDULO 1.****VI.3.1.a) PRUEBA FUNCIONAL:**

**OBJETIVO:** Verificar el buen funcionamiento del código implementado para el módulo 1.

**CONDICIONES:** Se realizó una primera sintonización para el controlador maestro, tomando en cuenta las constantes determinadas de los circuitos electrónicos de los diagramas de WECO ( Westinghouse Electric Corporation ).

**DESARROLLO:** Una vez que se tuvo el código para el módulo generador de la demanda de posición, se probó dando valores a las variables y constantes. Se revisó la operación del código, línea por línea, para detectar posibles problemas en la ejecución de las funciones y operaciones aritméticas.

**RESULTADOS:** Se obtuvo la primera versión del generador de la demanda de posición (módulo 1), trabajando satisfactoriamente.

#### **VI.3.1.b) PRUEBA DE REGULACIÓN EN LAZO ABIERTO:**

**OBJETIVO:** Observar el comportamiento del controlador maestro ante una variación brusca de la temperatura de los gases en el hogar del recuperador (escalón).

**CONDICIONES:** La señal de error a la entrada del controlador es cero inicialmente, dado que las entradas al sumador se nulifican entre sí.

**DESARROLLO:** En esta prueba se introdujo una señal de tipo escalón a partir de un determinado número de iteraciones (cuatro), observándose la curva de respuesta de la salida.

**RESULTADOS:** Debido a que se trata de una prueba en lazo abierto, se aprecia que la salida del controlador es una señal rampa que se incrementa hasta alcanzar la saturación. La gráfica obtenida se omite debido a que la respuesta corresponde básicamente a la del controlador proporcional-integral (PI), que ya fué analizada ampliamente en el capítulo III.

#### **VI.3.1.c) PRUEBA CON MODELO MATEMÁTICO DE VÁLVULA:**

**OBJETIVO:** Realizar una primera prueba del generador de la demanda de posición en lazo cerrado, utilizando el modelo matemático dinámico de una válvula.

**CONDICIONES:** La demanda de posición del control (A129) es igual a la posición de la válvula en el modelo (X\_VGAS). La señal del punto de ajuste dinámico se simula por medio de una rampa.

**DESARROLLO:** El modelo matemático que simula el comportamiento de una válvula se acopló al control maestro. Ante la gran necesidad de probar el sistema de control digital en lazo cerrado, este modelo matemático constituyó una alternativa inicial. En esta prueba, la señal retroalimentada a la entrada del control es una caracterización de la apertura de la válvula obtenida del modelo mencionado. Se pretende que ésta, represente la temperatura de los gases de entrada al recuperador de calor después de los quemadores posteriores (A101), con base en que la función de caracterización (véase cap. III) nos permite obtener a su salida una señal no lineal, ajustable (hasta cierto punto) a los valores que se deseen.

**RESULTADOS:** Mediante las consideraciones anteriores y variando en rampa el punto de ajuste dinámico hasta un valor determinado, además de considerar que la derivada de la temperatura del vapor sobrecalentado (A103) es cero, se aprecia la acción de regulación del control digital de los quemadores posteriores. La salida del controlador sigue a la rampa de entrada.

#### **VI.3.1.d) PRUEBA DE INTEGRACIÓN CON MODELO DINÁMICO DEL PROCESO (que en lo sucesivo incluye modelo de válvulas):**

**OBJETIVO:** Validar el comportamiento (en lazo cerrado) del controlador maestro utilizando

el modelo dinámico del proceso. Realizar el acoplamiento adecuado entre estos bloques.

**CONDICIONES:** Se realizó un control adaptivo para lograr la integración del modelo del proceso con el controlador. De esta manera, los valores de las variables del controlador tuvieron que adaptarse a los del proceso. Como los cálculos en estado estable del proceso se realizaron con una apertura de 0.8, la posición de la válvula en los dos bloques (controlador y modelo del proceso) se fijó inicialmente en esa posición. Con esto, el valor acumulado en la parte integral del controlador tuvo que ser de +6.5333 v., para que después de pasar por la caracterización resultaran los +8.0 v. requeridos.

**DESARROLLO:** Activar una perturbación en forma de escalón de la temperatura de los gases de escape de la turbina de gas ( $T_{gts}$ ), en un determinado número de iteraciones. La señal de excitación se establece con los siguientes parámetros:

- Inicio: 4ª iteración.
- Duración:  $\infty$
- Temperatura inicial: 749.123 °K.
- Temperatura mínima alcanzada: 735 °K.

La retroalimentación se consiguió mediante una simplificación del módulo 2. Como el módulo 1 necesita un punto de ajuste dinámico para regular correctamente, se hizo necesario implementar el código simplificado para un controlador que tomara en cuenta la presión del vapor sobrecalentado y que de acuerdo a la variación de ésta, produjera el punto de ajuste

requerido. La presión fué elegida como señal generadora del punto de ajuste, debido a que esta señal varía en un rango menor que la temperatura de vapor sobrecalentado. Estas observaciones y otras se fundamentan en la realización de una prueba de estado estable realizada al modelo del proceso.

**RESULTADOS:** Los resultados obtenidos en esta prueba fueron de vital importancia para la realización de las pruebas siguientes. Aun con la limitación de que el módulo 2 se simplificó, se puede contemplar perfectamente el comportamiento del controlador maestro y del acoplamiento en general.

Como se aprecia en la gráfica 1 (Ver sección gráficas pág. 156 y sigs.), el controlador maestro responde inmediatamente a la perturbación con una oscilación amortiguada. El valor final alcanzado (estado estable) por la salida del controlador es de  $-7.3$  v. Los tiempos de crecimiento y retardo de la señal son prácticamente cero. El máximo sobreimpulso alcanzado tiene su pico en  $-8.1$  v., aproximadamente y el tiempo de pico de la señal es de 10 iteraciones. El tiempo de establecimiento observado se presenta alrededor de las 550 iteraciones, lo cual implica que si el algoritmo de control se ejecutara una vez por segundo, la salida del controlador alcanzaría el estado estable, nuevamente, en 550 segundos (poco más de 9 min.).

El comportamiento de la válvula, mostrado en la gráfica 2, manifiesta una oscilación grande de la apertura con un tiempo de establecimiento de aproximadamente 600 iteraciones. Un valor final alcanzado de 0.855 (85.5%) de apertura, indica que el sistema de control ordena abrir la válvula con el fin de compensar la disminución de temperatura en el hogar

del recuperador de calor (recordemos que el valor de estado estable es 0.8). El sobreimpulso máximo es del orden de 0.055 (5.5%), presentándose cerca de las 30 iteraciones.

La respuesta de la temperatura de vapor sobrecalentado ( $T_{um}$ ) se aprecia plenamente en la gráfica 3. Tiene un sobreimpulso máximo de casi 7 °K en un tiempo de pico de 80 iteraciones aproximadamente. El tiempo de establecimiento está cercano a las 680 iteraciones.

Estos resultados muestran que el sistema de control digital regula adecuadamente la apertura de la válvula para corregir la desviación de temperaturas producida por efecto de la perturbación.

El tiempo de establecimiento y la oscilación son grandes, lo que indica la necesidad de realizar una sintonización mejor. Sin embargo, el propósito de esta prueba es comprobar la buena regulación del control y con los resultados obtenidos, es suficiente. La sintonización irá mejorándose conforme las pruebas avancen.

## **VI.3.2.- MÓDULO 2.**

### **VI.3.2.a) PRUEBA FUNCIONAL:**

**OBJETIVO:** Realizar una validación operativa del código del generador del punto de ajuste dinámico, verificando que esta variable tome el valor de alguna de las variables siguientes: demanda de combustible (A224), salida del controlador de temperatura mínima de vapor sobrecalentado (A206), salida del controlador de temperatura máxima (A214) o salida del controlador de presión máxima (A221), según se presenten las condiciones de prueba.

**CONDICIONES:** De la misma manera que para el módulo 1, se introdujeron valores tentativos de los parámetros y las variables. A partir del análisis del módulo se establecieron las condiciones de prueba correspondientes a las diferentes "trayectorias".

**DESARROLLO:** Se realizó una corrida del código aplicando una rampa que simule la demanda de combustible.

En este caso, se hizo necesario establecer apropiadamente los parámetros de los tres controladores (Constantes de integración y proporcional, puntos de ajuste), así como también encontrar la relación existente entre sus salidas y la señal de demanda al mínimo, para conseguir que el módulo operara satisfactoriamente. En base a lo anterior, se estableció un rango para la salida de cada controlador, dentro de los cuales deben funcionar. Dicho rango se fué modificando a medida que el sistema se fué depurando.

**RESULTADOS:** Después de realizar varias modificaciones, se consiguió establecer los valores apropiados para las constantes y los puntos de ajuste de los tres controladores. En esta prueba se observa claramente el comportamiento de cada uno de los controladores; verificándose, también, el cambio del valor del punto de ajuste dinámico por efecto de la acción de los selectores de señal alta y baja. A medida que la señal de demanda de combustible varía, activa en determinado momento una y sólo una de las salidas de los controladores o la señal de demanda de combustible generada en el módulo 3. En ese preciso instante, la salida seleccionada pasa a ser el punto de ajuste dinámico. Las condiciones precisas para el

accionamiento de cada selector o de la demanda de combustible se establecieron en los capítulos III y V de este trabajo, en base a ellas podemos darnos una idea más amplia de lo mencionado arriba.

### **VI.3.3) INTEGRACIÓN MÓDULOS 1 y 2 CON MODELO DINÁMICO DEL PROCESO.**

#### **VI.3.3.a) PRUEBA DE REGULACIÓN EN LAZO CERRADO:**

**OBJETIVO:** Acoplar el producto obtenido en la prueba con modelo de válvula y modelo dinámico del proceso (lazo cerrado) con el código del módulo 2, validado ampliamente en la prueba anterior. Repetir el procedimiento de prueba, teniendo en mente que los resultados deben ser muy similares.

**CONDICIONES:** Las condiciones iniciales establecidas en la prueba del módulo 1 con el modelo dinámico del proceso (punto VI.3.1.d) son aplicables para ésta también.

Con la finalidad de demostrar que el sistema de control actúa cerrando o abriendo la válvula (dependiendo de la característica ascendente o descendente de la perturbación), en esta prueba a diferencia de la otra, la perturbación incrementa la temperatura de los gases de escape de la turbina de gas (Tgst), en vez de disminuirla en relación a su valor de estado estable (749.123 °K ).

*Los parámetros de la señal de excitación son:*

- Inicio: 4ª iteración.
- Duración:  $\infty$
- Temperatura inicial: 749.123 °K.
- Temperatura máxima alcanzada: 780 °K.

*Por otra parte, se tuvo la necesidad de inicializar los valores de la parte integral de los tres controladores del módulo 2, considerando por supuesto, los valores de estado estable que el modelo les envía a sus entradas. De esta manera, tenemos que la salida integral del controlador de temperatura mínima de vapor sobrecalentado (A205) se fijó en +9.803538 v., la del controlador de temperatura máxima de vapor sobrecalentado (A213) en +9.8035 v. y la del controlador de presión máxima de vapor sobrecalentado (A220) en +8.7227 v.*

*Además, la presión del vapor sobrecalentado (A217) inicial resultó ser de 899.872 PSIA (-5.9991479 v.), la temperatura del vapor sobrecalentado seleccionada (A201) fué igual a 800 °K (+9.803538 v.) y la temperatura de los gases de entrada al recuperador después de los quemadores posteriores (A101) fué de 950 °K (-8.3292 v.).*

**DESARROLLO:** *Fué necesario suprimir el controlador simplificado del módulo 2, ya comentado, e introducir el código ya probado del mismo, en una estructura donde aparece acoplado con el módulo 1 y los modelos ya mencionados. Se hizo necesario además, realizar una nueva valoración de los parámetros de los controladores del módulo 2, con la finalidad*

de lograr que el control funcionara correctamente. Para la realización de esta prueba se utilizó una excitación de tipo escalón de la variable  $T_{gst}$ , como ya se mencionó. Mediante ésta, se incrementó el valor de tal temperatura y con ello, el de la temperatura del vapor sobrecalentado ( $T_{um}$ ) lo que ocasionó una variación en las condiciones del proceso (véase descripción del proceso en cap.IV).

**RESULTADOS:** Los resultados obtenidos en esta prueba fueron muy parecidos a los establecidos en la prueba del punto (VI.3.1d). Como era de esperarse, en esta prueba se consiguió una sintonización mejor, que en términos generales, se aprecia en la gráficas 4, 5 y 6.

La gráfica 4 muestra el comportamiento de la válvula de gas. Puede apreciarse una respuesta amortiguada con un tiempo de establecimiento de 400 iteraciones, aproximadamente. El sobreimpulso máximo sucede cerca de las 120 iteraciones y tiene una magnitud de 0.06 Pu (6.0%) de apertura.

La curva de respuesta de la temperatura del vapor sobrecalentado (ver gráfica 5), muestra una oscilación de baja magnitud con un tiempo de establecimiento de 650 iteraciones, aproximadamente. Un sobreimpulso máximo de aproximadamente 6 °K, en un tiempo de pico de 50 iteraciones.

La salida del controlador maestro (gráfica 6) pasa de un voltaje de -6.853 v. a -5.85 v., o sea, se presenta un decremento de aproximadamente 1 volt. Esta cantidad equivale al 10% de su rango de operación (0 a -10 v.), y es la cantidad necesaria para lograr cerrar la

válvula hasta una posición de .675 Pu (67.5%), lo que representa una disminución de apertura del 12.5% . Con estas condiciones, se consiguió regresar la temperatura de vapor sobrecalentado a su valor inicial de 800 °K.

El análisis de las características de estas gráficas nos indica, que el acoplamiento realizado satisface los requerimientos de operación y regulación esperados, esto es, las curvas obtenidas manifiestan una respuesta suave con estabilidad aceptable.

### **VI.3.4) MÓDULO 3.**

#### **VI.3.4.a) PRUEBA FUNCIONAL:**

**OBJETIVO:** Validar, desde el punto de vista operativo, la funcionalidad del módulo generador de la demanda de combustible.

**CONDICIONES:** Se eligió una señal de demanda de combustible con un valor inicial igual al del punto de ajuste dinámico (A102) requerido por el controlador maestro para mantener el estado estable. Dicho valor es de +8.7227 v.

**DESARROLLO:** El módulo generador de la demanda de combustible está implementado, como se describió en el capítulo III, a base de una lógica digital redundante, que produce una salida en forma de rampa. Las tres funciones básicas que componen este módulo [dem\_min( ), selector( ) y dem\_com( )] fueron codificadas y probadas por separado y una vez que trabajaron satisfactoriamente, se integraron. Las pruebas exhaustivas realizadas aseguran que la lógica

binaria funciona adecuadamente. Una vez contemplada la estrategia de control de esta parte, se procedió a la implementación del código considerando su operación y simplificando algunas lógicas. El procedimiento de codificación y evaluación del módulo 3 es el siguiente:

1.- Función de demanda al mínimo: `dem_min( )`.

1.1.- Prueba de la función `retardo( )`. Ajuste del parámetro de CONCURRENCIA.

1.2.- Prueba de la función `flpslp( )`.

1.3.- Prueba de la función `dem_min( )`:

1.3.1.1.- Verificar que la salida sea cero cuando las entradas sean cero.

1.3.1.2.- Generar la señal de retroceso (D31) durante más de 10 segundos y verificar que la señal de rodado a mínimo (D36) se desactive por efecto de la función `retardo()`.

1.3.2.- Repetir los dos puntos anteriores, pero con la activación de la señal de disparo de quemadores (D32) en vez de la de retroceso (D31).

2.- Función que establece la rapidez de cambio seleccionada de la señal demanda de combustible: `selector( )`.

2.1.- Prueba con cada una de las posibles combinaciones, solamente con una entrada digital activada a la vez. Verificar la salida.

3.- Función que genera la rampa de demanda de combustible: `dem_com( )`.

3.1.- Codificación y prueba funcional de la función `dem_com( )`.

3.2.- Simulación con botón de subir demanda de combustible (D51) activado.

3.3.- Simulación con botón de bajar demanda de combustible (D52) activado.

**RESULTADOS:** Las pruebas de operación de cada una de las funciones fueron satisfactorias.

La implementación y pruebas de selector( ) resultó bastante sencilla, no así lo correspondiente a las otras dos funciones. En la función `dem_min( )`, lo más relevante es el cálculo de la CONCURRENCIA, debido a su importancia para el sistema de protecciones por alta temperatura de vapor sobrecalentado. El cálculo de la CONCURRENCIA es aproximado, así que la duración de la señal rodado a mínimo no es de 10 segundos exactamente. Sin embargo, la acción de decrementar el valor de la demanda de combustible se cumple perfectamente.

### **VI.3.5 INTEGRACIÓN TOTAL: MÓDULOS 1, 2 Y 3 CON MODELO DINÁMICO DEL PROCESO.**

#### **VI.3.5.1) PRUEBA EN OPERACIÓN NORMAL ( $700\text{ }^{\circ}\text{F} < TUM < 1000\text{ }^{\circ}\text{F}$ ).**

**OBJETIVO:** Observar el comportamiento del sistema de control digital integrado ante perturbaciones pequeñas.

##### **VI.3.5.1.a) PRUEBA CON PERTURBACIÓN EN ESCALÓN.**

**CONDICIONES:** El control digital de los quemadores posteriores ya está integrado y funcionando perfectamente en estado estable. La temperatura de vapor sobrecalentado ( $T_{um}$ ) tiene un valor inicial de  $800\text{ }^{\circ}\text{K}$  y se incrementa bruscamente, por efecto de la perturbación en escalón de la temperatura de gases de escape ( $T_{gst}$ ), hasta llegar a un valor de  $810\text{ }^{\circ}\text{K}$ .

Los parámetros de la señal escalón son:

- Inicio: 5ª iteración.
- Duración:  $\infty$
- Temperatura inicial : 749.123 °K.
- Temperatura máxima alcanzada: 805 °K.

Aparentemente el incremento en la temperatura del vapor sobrecalentado ( $T_{um}$ ) no es considerable, pero debemos tener en cuenta que, para las condiciones tan elevadas del proceso (Como se describe en el capítulo IV), un aumento de 55.88 °K en la temperatura de vapor sobrecalentado es muy significativo, pues el valor alcanzado está muy próximo al límite de activación del permiso retroceso por alta temperatura de vapor sobrecalentado (D31), fijado en 1000 °F (810.93 °K).

En estas condiciones el valor del PUNTO DE AJUSTE DINAMICO (A102) es igual a la DEMANDA DE COMBUSTIBLE (A224). Donde el valor de ésta última puede ser generado desde el botón de SUBIR/BAJAR, seleccionándose previamente la rapidez de cambio máximo de la temperatura.

**DESARROLLO:** Excitar al sistema con la función escalón de la temperatura de gases de escape, para incrementar con ello, la temperatura de vapor sobrecalentado ( $T_{um}$ ) hasta un valor que no sobrepase  $T_{MAX1}$  ( $T_{MAX1} = 1000 \text{ °F} = 810.93 \text{ °K}$ ) .

Observar el comportamiento de la posición de la válvula de gas, de la salida del

controlador maestro (demanda de posición) y de la temperatura del vapor sobrecalentado, principalmente.

**RESULTADOS:** La gráfica 7 muestra el comportamiento de la válvula de gas ante una variación en escalón (ascendente) de la temperatura de gases de escape de la turbina de gas ( $T_{gst}$ ). Como era de esperarse la válvula cierra, alcanzando la estabilidad en un tiempo de establecimiento de 340 iteraciones aproximadamente y reduciendo la apertura hasta 0.575 Pu (57.5%). Esto representa un cierre del 22.5% , en relación a la apertura inicial de 0.8 Pu (80%).

El máximo sobreimpulso calculado es de 0.037, presentándose en un tiempo de pico de 130 iteraciones aproximadamente. Un máximo sobreimpulso tan bajo es un indicativo de que la perturbación es de magnitud pequeña.

El tiempo de crecimiento de la respuesta es de 90 iteraciones y su tiempo de retardo está cercano a las 55.

Como puede apreciarse en la gráfica 8, la salida del controlador maestro alcanza un valor final de -5.1 v., alrededor de las 340 iteraciones. Esto significa que si el sistema de control se ejecutara una vez por segundo, el controlador alcanzaría la estabilidad en un poco más de 5 minutos. El cambio neto en la salida del controlador es de + 1.75 v., lo que representa un 17.5% de la salida total máxima permitida. El sobreimpulso máximo ocurre también a las 130 iteraciones y tiene una magnitud de 0.3 v.

La respuesta de la variable controlada ( $T_{um}$ ), mostrada en la gráfica 9, manifiesta una

oscilación que tiende a disminuir lentamente. Un sobreimpulso máximo de casi 11 °K en 60 iteraciones aproximadamente, demuestra la rápida respuesta del controlador.

Estas observaciones, nos llevan a la conclusión de que el sistema de control digital de los quemadores posteriores, es capaz de regular adecuadamente ante la presencia de perturbaciones bruscas de baja magnitud.

#### **VI.3.5.1.b) PRUEBA CON PERTURBACIÓN EN RAMPA.**

**OBJETIVO:** Observar el comportamiento del sistema de control cuando se presenta una perturbación de tipo rampa en la temperatura de los gases a la salida de la turbina ( $T_{gst}$ ).

**Nota:** Estrictamente hablando, lo que se ha denominado "excitación rampa" es una excitación diente de sierra.

**CONDICIONES:** La temperatura de vapor sobrecalentado no debe rebasar el límite de activación de la variable retroceso ( $T_{MAX1}$ ), ni tampoco el límite de activación de disparo ( $T_{MAX2}$ ). El sistema está en automático y se presupone que el valor del punto de ajuste dinámico existente en el inicio de la prueba, corresponde al último valor de demanda de combustible seleccionado por el operador desde la estación de botones o determinado por el coordinado del sistema de control, como ya se mencionó con anterioridad.

La posición inicial de la válvula de gas es 0.8 Pu (80%) de apertura con una temperatura de vapor sobrecalentado de 800 °K. La presión del vapor sobrecalentado ( $P_{vr}$ ) es de 890 PSIA (6204.4009 KPa), mientras que la presión en el hogar del recuperador ( $P_{hr}$ ) es de 60 PSIA (413.4241 kPa), con una temperatura de gases ( $T_{ghr}$ ) correspondiente de 949.47

°K. La apertura de la válvula de bypass de atemperación es de 0.15 Pu (15%), que al ser caracterizada equivale a +9.52 v.. Esto ocasiona que la salida del controlador maestro adquiera un valor de -6.8533 v., inicialmente.

*La señal de perturbación tiene las siguientes características:*

- Inicio: 5ª iteración.
- Duración: 30 iteraciones.
- Valor inicial de temperatura: 749.123 °K.
- Máxima temperatura alcanzada: 806 °K.

**DESARROLLO:** *Excitar al sistema de control con una señal rampa de características determinadas.*

*Observar el comportamiento de las principales variables del control y del proceso.*

**RESULTADOS:** *Las gráficas obtenidas muestran el comportamiento adecuado del sistema de control. Una vez más y como es de esperarse, las gráficas de la respuesta del controlador maestro (gráfica 10) y de la apertura de la válvula de gas (gráfica 11) tienen la misma forma. Esto indica que si la salida del controlador (en voltaje) se hace menos negativa la válvula cierra y que si se hace más negativa, la válvula abre. El controlador regresa la posición de la válvula a la apertura inicial en un tiempo de establecimiento aproximado de 400 iteraciones. El máximo sobreimpulso alcanzado por la válvula es de 0.045 Pu (4.5%) en un tiempo de pico cercano a las 75 iteraciones.*

Por otra parte, la curva de respuesta de la temperatura de vapor sobrecalentado (gráfica 12) regresa a su valor original (800 °K) en un tiempo de establecimiento de 380 iteraciones, presentando una tendencia oscilante de aproximadamente medio grado Kelvin arriba y abajo de la referencia, que podemos considerar como estado estable.

Analizando estos resultados se concluye que el sistema de control responde de manera adecuada ante transitorios de baja duración y regular magnitud.

#### **VI.3.5.2) PRUEBA EN OPERACIÓN CRÍTICA POR ALTA TEMPERATURA ( TUM > = 1000 °F).**

**OBJETIVO:** Evaluar el desempeño del controlador de temperatura máxima de vapor sobrecalentado (CTMVS). Probar el sistema de protecciones implementado en el módulo 3 mediante la activación del permisivo retroceso por alta temperatura de vapor sobrecalentado (D31); en base al incremento de la temperatura de los gases de escape de la turbina de gas (Tgst). Analizar el comportamiento del control en general.

**CONDICIONES:** En este caso se debe cumplir que el PUNTO DE AJUSTE DINAMICO (A102) sea igual a la SALIDA DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA MAXIMA (A214).

Las condiciones iniciales de la prueba corresponden exactamente a las enunciadas en la prueba anterior. Pero, para ésta, se utiliza una rampa de la temperatura de los gases de escape de la turbina de gas con mayor duración y magnitud, cuyas características específicas se mencionan a continuación:

- Inicio: 5ª iteración.
- Duración: 160 iteraciones.
- Valor inicial de temperatura: 749.123 °K.
- Temperatura máxima alcanzada: 813.7 °K.

**DESARROLLO:** Se incrementa la temperatura de los gases de escape de la turbina de gas (Tgst), produciéndose así, un incremento de la temperatura de vapor sobrecalentado (Tum), debiéndose elevar ésta hasta alcanzar un valor tal que se declare el RETROCESO por alta temperatura del vapor sobrecalentado.

Al existir la señal de retroceso por alta temperatura de vapor sobrecalentado (D31), se genera la señal que declara "demanda de combustible al mínimo" (D36) por lo que la variable analógica de "demanda de combustible" (A224), que corresponde al punto de ajuste dinámico, se rampea automáticamente disminuyendo su valor con rapidez de [N °F/min]. Esto sucede mientras exista la señal de retroceso y con una duración máxima que se encuentra establecida por la función retraso( ) (10 seg).

Se debe observar:

- (a) La respuesta del controlador maestro.
- (b) La demanda de posición a la válvula de combustible (gas).
- (c) El seguimiento del punto de ajuste dinámico con un valor igual al de la demanda de combustible.
- (d) El comportamiento de la temperatura de vapor sobrecalentado.

**RESULTADOS:** La gráfica 13 muestra el comportamiento de la salida del controlador maestro. En ella puede observarse una acción fuerte del controlador ante el incremento elevado de la temperatura, con una saturación que aparece cerca de la iteración 100 y que tiene una duración aproximada de 50 iteraciones.

Aproximadamente por la iteración 60, se sucita un incremento en la pendiente de la salida del controlador que corresponde a la acción de la función  $dem\_min()$ . A partir de este momento, la pendiente de la *demanda de combustible* toma el valor máximo con una rapidez de cambio de  $10\text{ }^{\circ}\text{F}/\text{min.}$ ; con lo que se sucita una disminución drástica del punto de ajuste dinámico. La señal de *rodado a mínimo* generada, desaparece 10 segundos después, cuando la temperatura del vapor sobrecalentado ( $T_{um}$ ) está por debajo del límite de activación de *retroceso*.

En la gráfica, el cambio de pendiente mencionado es apenas perceptible (debido a la escala), pero, a fin de cuentas, es el que origina la saturación.

La respuesta se estabiliza en 540 iteraciones, para después oscilar dentro de un rango restringido.

La válvula también manifiesta una saturación que inicia cerca de la iteración 95 (véase gráfica 14) y que tiene una duración aproximada de 75 ejecuciones. En este periodo, la apertura se mantiene en 0.15 Pu (15%), que representa la mínima apertura permitida por el sistema. La respuesta se estabiliza alrededor de las 540 iteraciones.

La curva de respuesta de la temperatura de vapor sobrecalentado ( $T_{um}$ ), presentada en la gráfica 15, obtiene su máximo sobreimpulso cerca de las 90 iteraciones, después de lo

*cuál disminuye su valor rápidamente para oscilar en torno al valor de estado estable (800 °K).*

*En la gráfica 16 se puede observar perfectamente la acción de la salida del controlador de temperatura máxima de vapor sobrecalentado (CTMVS). Al presentarse un exceso de temperatura en el vapor sobrecalentado, dicha salida empieza a decrementarse, hasta que en la iteración 60 adquiere un valor menor al del punto de ajuste, con lo que este último pasa a tomar el valor de esa salida, esto es, la salida del controlador de temperatura máxima gobierna al punto de ajuste dinámico. La disminución continua hasta las 110 iteraciones aproximadamente, donde la salida del controlador comienza su ascenso que termina en la saturación.*

*Desde la iteración 120 hasta cerca de la 190, el punto de ajuste es constante. A partir de ese instante aparece una "protuberancia" que manifiesta la acción del controlador de temperatura mínima de vapor sobrecalentado (CTmVS). De la iteración 367 en adelante, se aprecia la intervención definitiva del controlador de temperatura mínima, para incrementar el valor del punto de ajuste dinámico hasta su valor inicial.*

#### **VI.3.5.3) PRUEBA EN OPERACIÓN CRÍTICA POR BAJA TEMPERATURA DE VAPOR SOBRECALENTADO ( $TUM \leq 700 \text{ } ^\circ\text{F}$ ).**

**OBJETIVO:** *Evaluar el desempeño del controlador de temperatura mínima de vapor sobrecalentado (CTmVS). Observar su comportamiento ante disminuciones bruscas de temperatura en el vapor sobrecalentado.*

**CONDICIONES:** En este caso se debe cumplir que el PUNTO DE AJUSTE DINAMICO (AI02) sea igual a la SALIDA DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA MINIMA DE VAPOR SOBRECALENTADO (AI06).

Cabe hacer la aclaración, de que debido a las condiciones tan elevadas de las variables del proceso en estado estable (Capítulo IV), es sumamente difícil lograr que la temperatura de vapor sobrecalentado sea menor a los 700 °F. Sin embargo, tiene que apreciarse claramente la acción del controlador de temperatura mínima de vapor sobrecalentado (CTmVS).

Los parámetros de la señal de excitación son:

- Inicio: 5ª iteración.
- Duración: 160 iteraciones.
- Temperatura inicial: 749.123 °K.
- Temperatura mínima alcanzada: 640 °K.

**DESARROLLO:** Se disminuye la temperatura de vapor sobrecalentado ( $T_{um}$ ) vía el decremento de la temperatura de los gases de escape, por medio de una rampa descendente con pendiente alta, hasta aproximar su valor al del punto de ajuste del controlador de temperatura mínima (700 °F).

Se debe observar:

- (a) La respuesta del controlador maestro.

- (b) La demanda de posición a la válvula de combustible (gas).
- (c) El seguimiento del punto de ajuste dinámico con un valor igual al de la demanda de combustible.
- (d) El comportamiento de la temperatura de vapor sobrecalentado.

**RESULTADOS:** Los resultados obtenidos en esta prueba son muy representativos ya que muestran la acción del controlador de temperatura mínima de vapor sobrecalentado (CTmVS). Como puede apreciarse en la gráfica 17, la apertura de la válvula de gas sufre una fuerte oscilación ocasionada por la disminución rápida de la temperatura de los gases de escape de la turbina de gas (Tgst). La válvula empieza a abrir en forma exponencial a partir de que se presenta la perturbación - iteración 5 -, para saturarse en la iteración 100 aproximadamente. Esta saturación se mantiene hasta las 180 ejecuciones, que es el instante en que la apertura empieza a decrementarse. Posteriormente existe una oscilación amplia en torno a la posición original (0.8 Pu), hasta alcanzar el estado estable nuevamente, alrededor de las 760 iteraciones.

Como puede apreciarse en la gráfica 18, el punto de ajuste dinámico (línea gruesa) comienza a decrementarse en la iteración 250 aproximadamente, hasta la ejecución 300 en donde su valor pasa a ser el de la salida del controlador de temperatura mínima (línea delgada) que se está incrementando. Es precisamente aquí donde interviene el selector de señal alta, permitiéndole el paso a la salida de este controlador. Después de la iteración 300, el punto de ajuste dinámico se incrementa, hasta alcanzar prácticamente su valor inicial (cerca

de la iteración 630).

*El comportamiento de la temperatura de vapor sobrecalentado (gráfica 19) muestra una disminución en las primeras 160 iteraciones, después de lo cual oscila hasta retornar a su temperatura de origen en un periodo aproximado de 800 iteraciones.*

*La salida del controlador maestro (ver gráfica 20) también presenta saturación debido a la perturbación tan drástica que se introdujo. Se aprecia igualmente, el regreso a su valor inicial después de 730 ejecuciones.*

*Estos resultados indican la tendencia del sistema para regular correctamente ante perturbaciones que decrecienten bruscamente la temperatura de vapor sobrecalentado. La acción principal en este caso (como ya se apreció), está a cargo del controlador de temperatura mínima de vapor sobrecalentado (CTmVS), el cual incrementa el valor de su salida en forma progresiva, mientras exista una disminución considerable en la temperatura del vapor sobrecalentado.*

*El tiempo de establecimiento tan grande indica la naturaleza transitoria de la señal de excitación.*

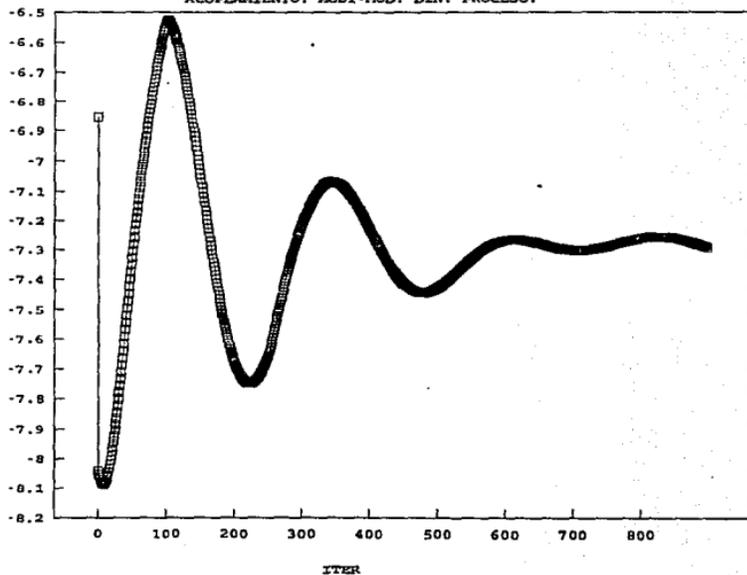
# **GRÁFICAS**

EXCITACION

SAL. CONTROLADOR MAESTRO-PI (Volts).

## CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.

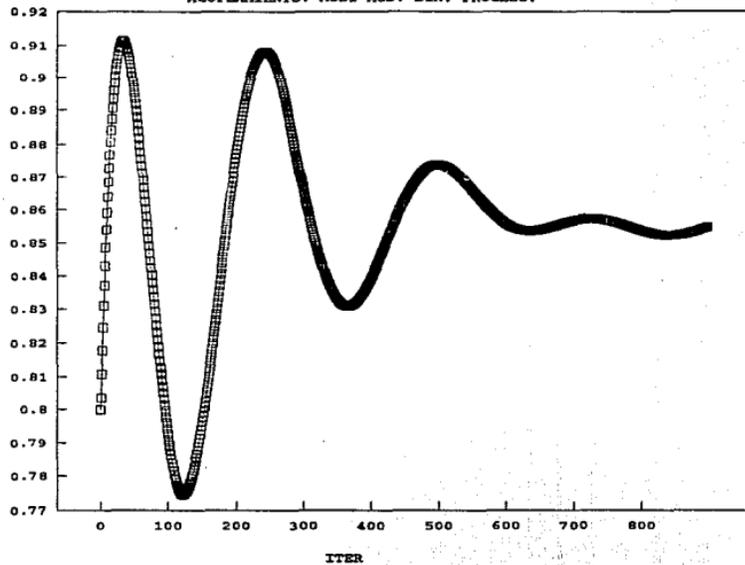
ACOPLAMIENTO: MOD1-MOD. DIN. PROCESO.



APERTURA VALVULA DE GAS (Pu) .

### CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.

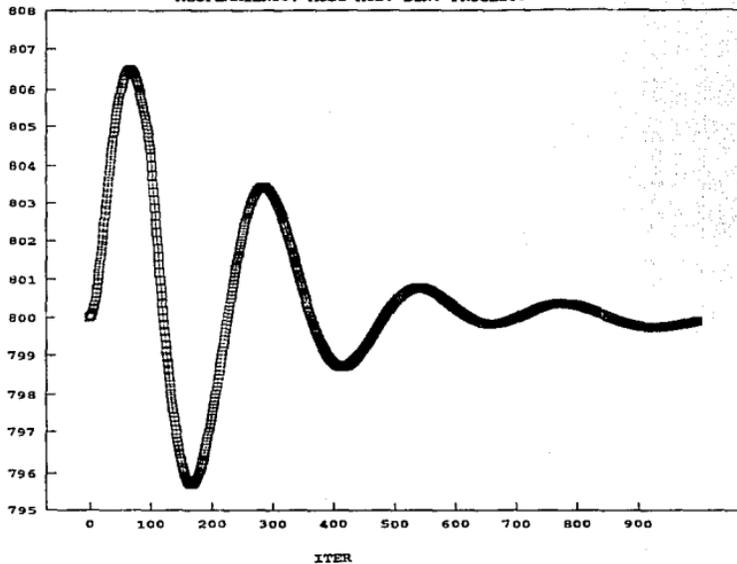
ACOPLAMIENTO: MOD1-MOD. DIN. PROCESO.



TEMP. DE VAPOR SOBRECALENTADO-TUM (°C) .  
*Gráfica 3*

### CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.

ACOPLAMIENTO: MOD1-MOD. DIN. PROCESO.

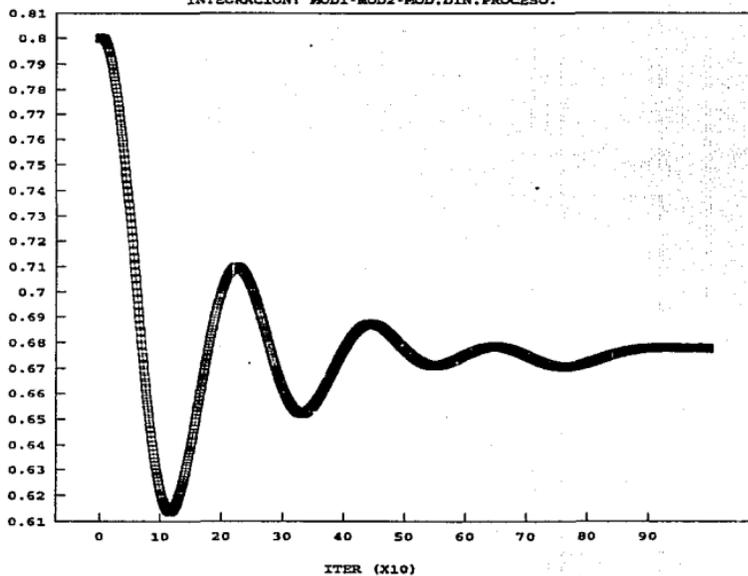


APERTURA VALVULA DE GAS (FV) .

CONTROL DIGITAL

## CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.

INTEGRACION: MOD1-MOD2-MOD.DIN.PROCESO.

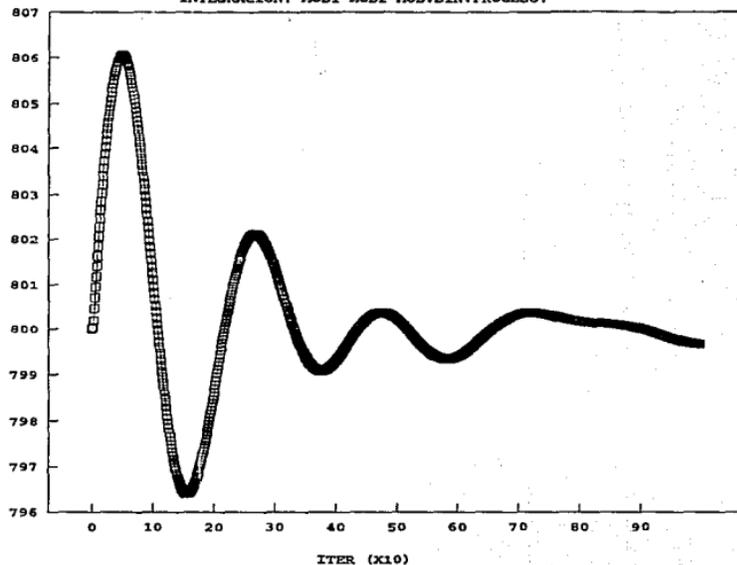


TEMP. DE VAPOR SOBRECALENTADO-TVM (CEK) .

TEMP. DE VAPOR SOBRECALENTADO-TVM (CEK) .

## CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.

INTEGRACION: MOD1-MOD2-MOD.DIN.PROCESO.



SAL. CONTROLADOR MAESTRO-FI (Volts) .  
50 Volts

### CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.

INTEGRACION: MOD1-MOD2-MOD.DIN.PROCESO.

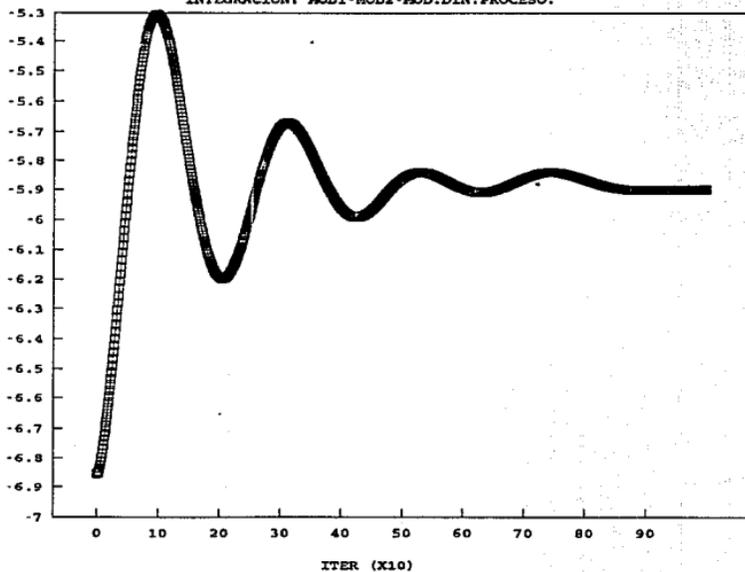
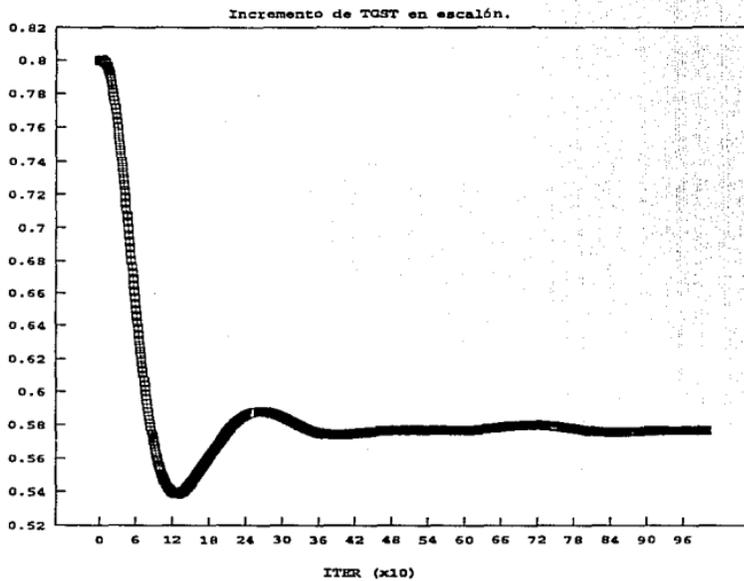


Fig. 10

APERTURA - VALVULA DE GAS (PU) .

## CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.



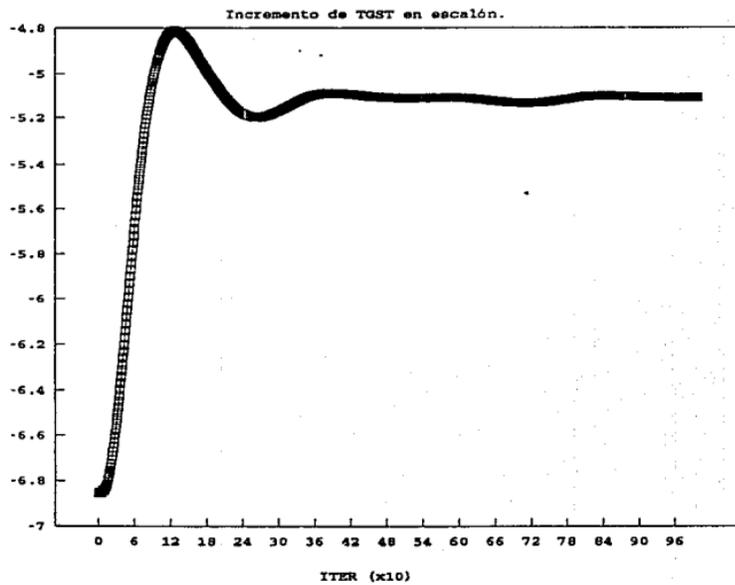
PRUEBAS Y RESULTADOS DEL CONTROL DIGITAL DE QUEMADORES POSTERIORES

10000

SEAL. CONTROLADOR MAESTRO-PZ (Volts).

*Gráfico 8*

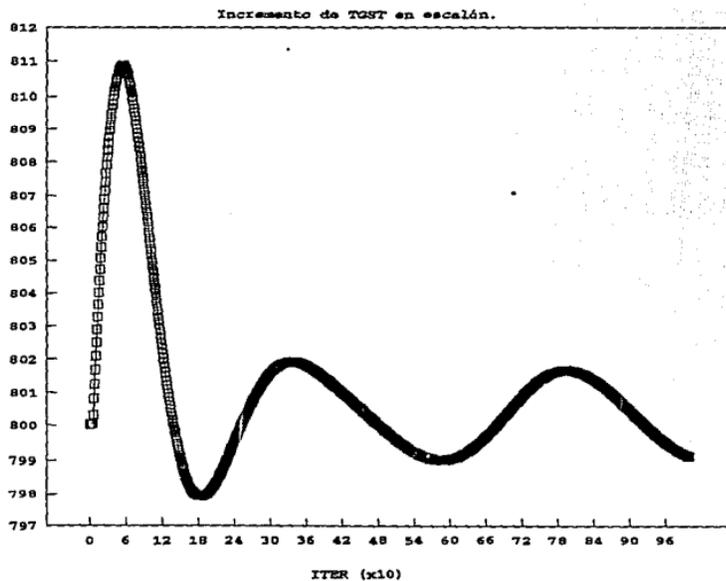
## CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.



TEMP. DE VAPOR SOBRECALENTADO-TUM (CK) .

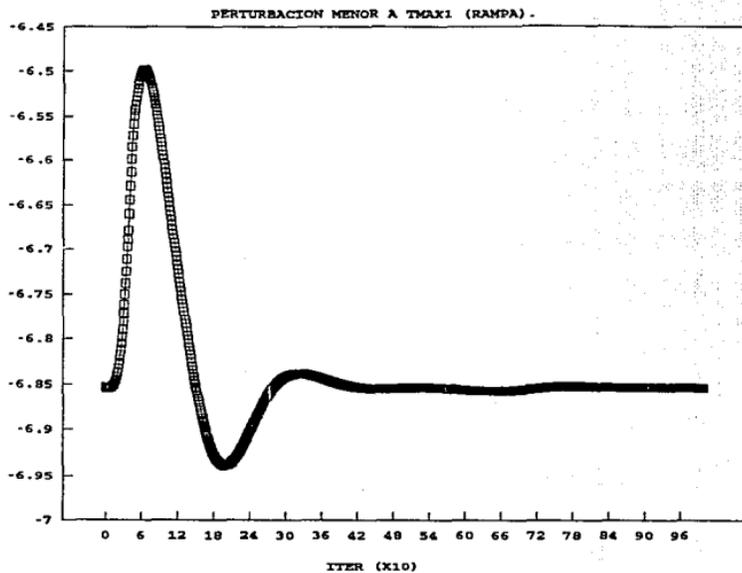
Controlado

## CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.



01.0000  
SAL. CONTROLADOR MAESTRO-P2 (VOLTS).

### CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.



Gráfica III

APERTURA - VALVULA DE GAS (Pu) .

## CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES .

PERTURBACION MENOR A  $T_{MAX}$  (RAMPA) .

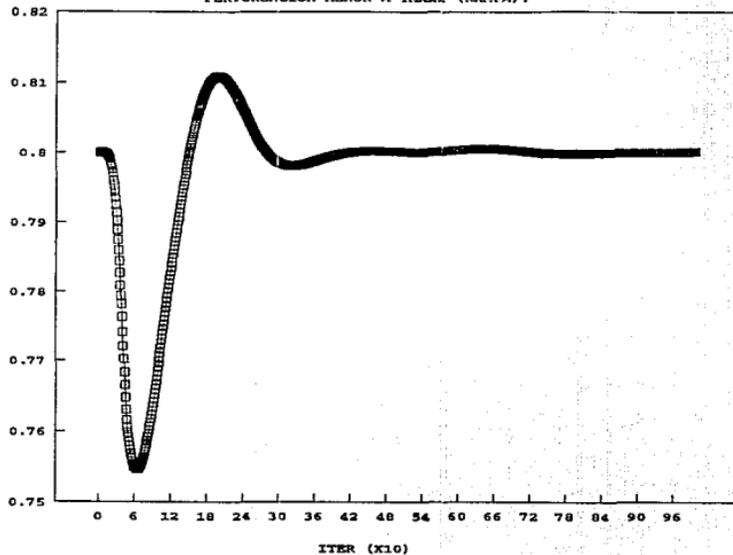


Fig. 11

TEMP. DE VAPOR SOBRECALENTADO-TUN (CIC) .

## CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.

PERTURBACION MENOR A TRAZA (RAMPA) .

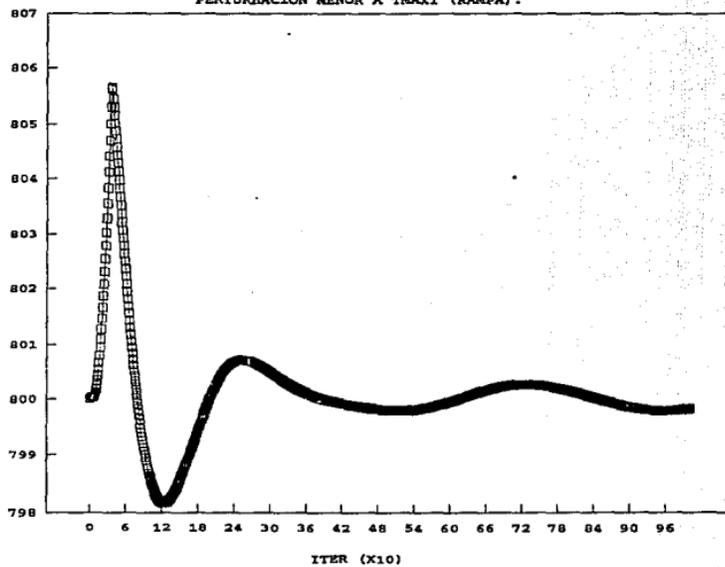
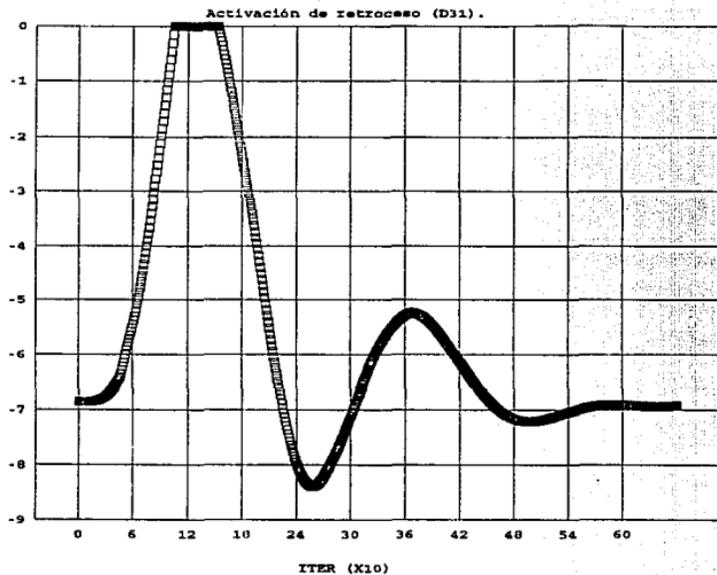


Fig. 22

SAL. CONTROLADOR MAESTRO-PI (Volts).

### CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES



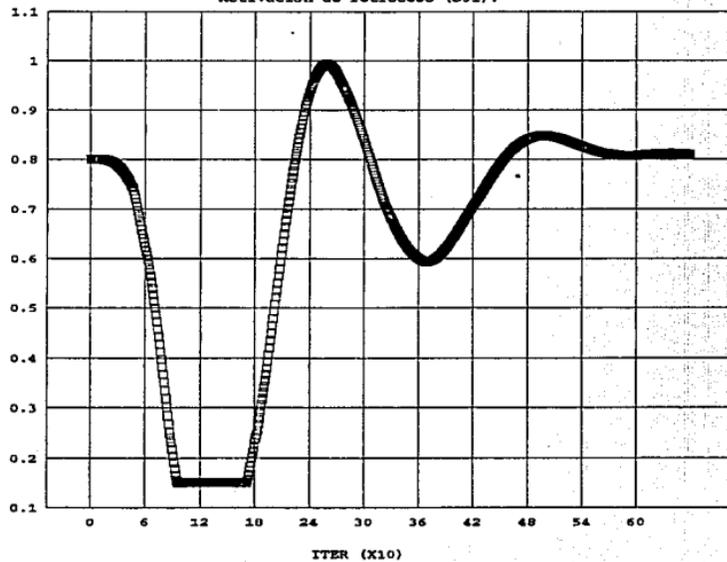
PRUEBAS Y RESULTADOS DEL CONTROL DIGITAL DE QUEMADORES POSTERIORES

*Gráfica 14.*

APERTURA VALVULA DE GAS (PV).

## CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES

Activación de retroceso (D31).

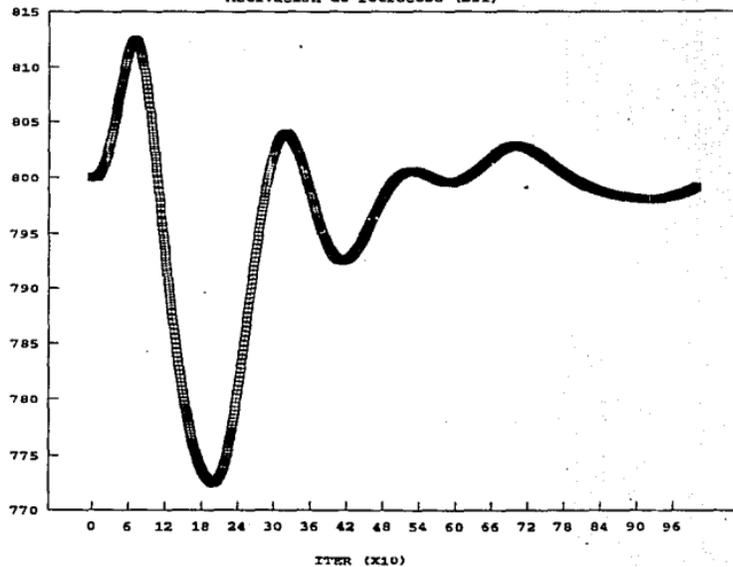


CH/15

TEMP. DE VAPORES SOBRECALENTADO-TUM (CCK)

## CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES

Activación de retroceso (D31)

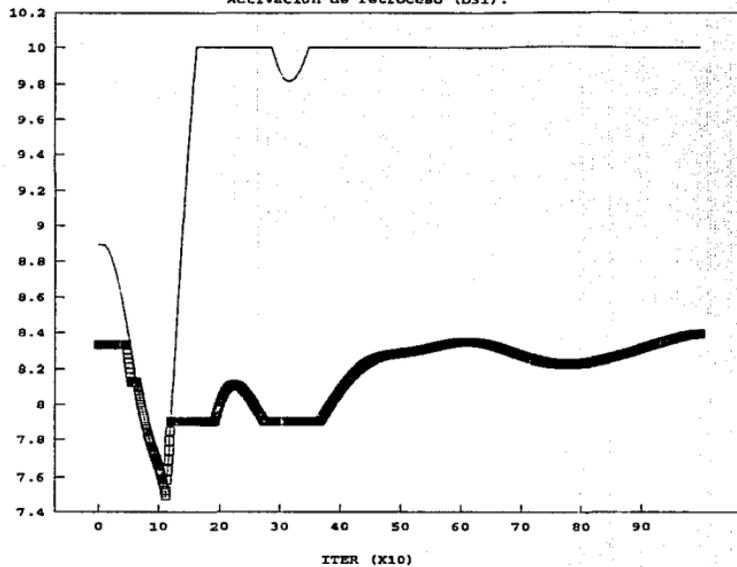


SIEMENS

PTO. DE AJUSTE DIN.. SAL. CTRAVS (A214).

## CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES

Activación de retroceso (D31).



173

APERTURA VALVULA DE GAS (Fu) .

## CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.

EFFECTO DEL CONTROLADOR DE TEMP. MINIMA.

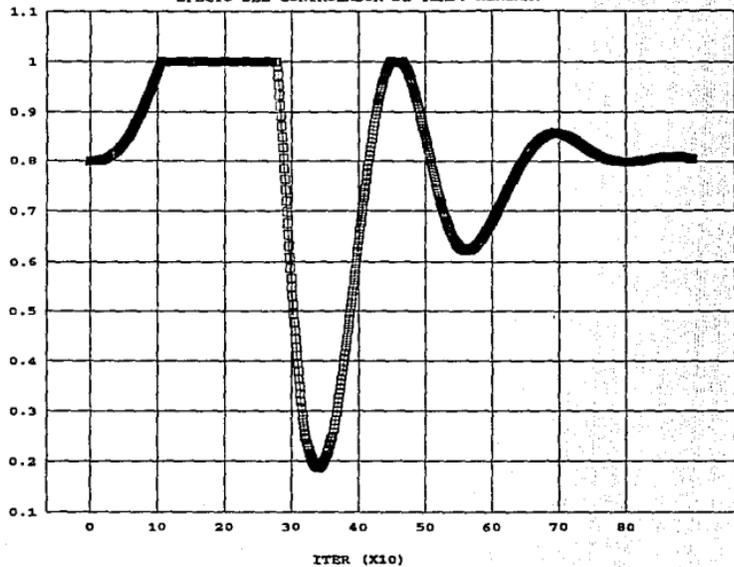
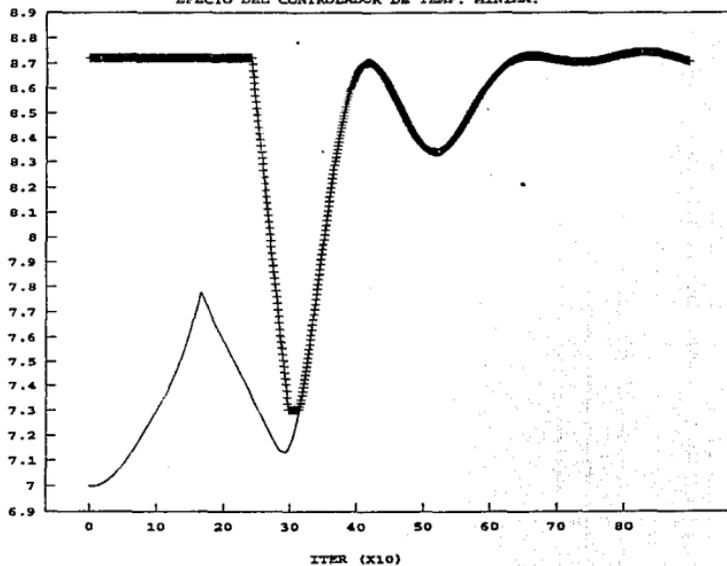


Fig. 10

PTO. DE AJUSTE DINÁMICO, SAL. CTRNS (V)

## CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.

EFECTO DEL CONTROLADOR DE TEMP. MINIMA.

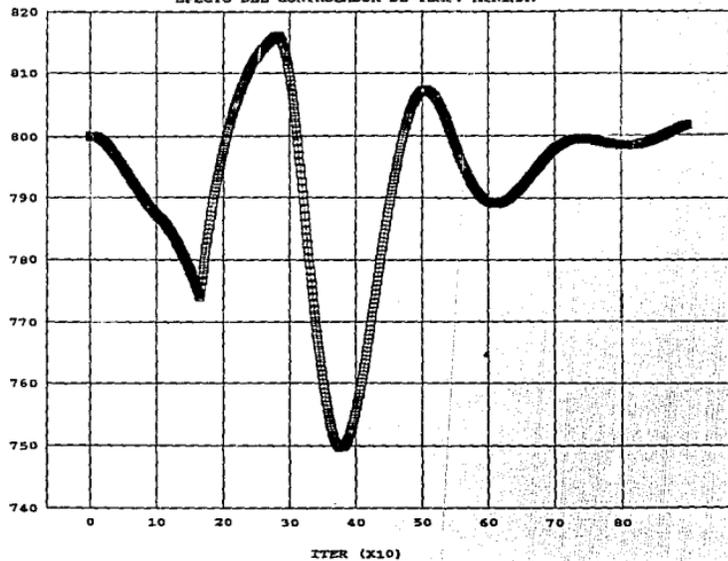


Gráfica 19

TEMP. DE VAPOR SOBRECALENTADO-TUM (°K)

## CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.

EFEECTO DEL CONTROLADOR DE TEMP. MINIMA.



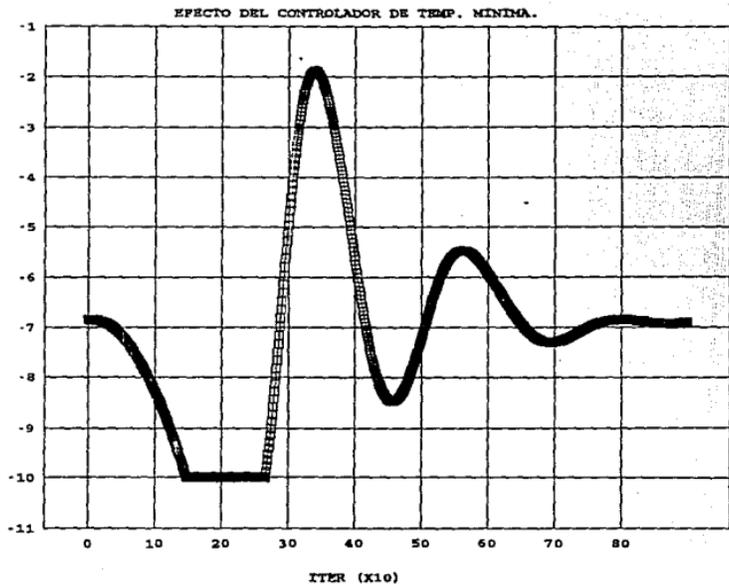
UNALM

PRUEBAS Y RESULTADOS DEL CONTROL DIGITAL DE QUEMADORES POSTERIORES

Gráfica 20:

SAL. CONTROLADOR MARETRO-PI (Volts)

### CONTROL DIGITAL-QUEMADORES POSTERIORES.



## CONCLUSIONES

*El control digital de los quemadores posteriores forma parte del sistema de control distribuido de la central termoeléctrica de ciclo combinado. Tiene como finalidad mantener (en combinación con el control de la válvula de bypass de atemperación) las condiciones de presión y temperatura de vapor sobrecalentado (Tum) preestablecidas. De esta manera, la estrategia de control está encaminada a gobernar la válvula de combustible que alimenta a los quemadores posteriores.*

*Podemos definir esta tesis como interdisciplinaria, puesto que en ella se conjugan aspectos de áreas como ingeniería eléctrica, ingeniería de control, termodinámica y computación; todas ellas vinculadas mediante el importante proceso de la simulación. El poder realizar infinidad de pruebas en un sistema simulado (que represente en forma muy aproximada al proceso real) es de vital importancia para la validación del control, ya que mediante éstas, es posible optimar el sistema diseñado, evitándose además, el riesgo de exponer a daños al equipo de la planta.*

*El análisis de los diagramas electrónicos de Westinghouse electric corporation (WECCO), sirvió para obtener modelos matemáticos modularizados. Dichos modelos fueron implementados y probados para, posteriormente, ser estructurados y sintetizar su comportamiento. Con lo anterior como base, se estableció una estructura de pruebas bien definida, consistente de varias etapas, la cual se desarrolló de manera paulatina hasta*

conformar la versión final del control digital de los quemadores posteriores, que representa el objetivo esencial de este trabajo.

El modelo matemático dinámico del proceso resultó de gran importancia para la realización de las pruebas de regulación del algoritmo de control. De su análisis se concluyó que una variación en la temperatura de los gases de escape de la turbina de gas ( $T_{gst}$ ), ocasiona una variación en la variable controlada ( $T_{um}$ ), previa alteración de otros parámetros; por tal motivo, se eligió a la primera como variable a perturbar.

Por otra parte, tenemos que el algoritmo de control diseñado ha sido validado ampliamente, en base a las pruebas exhaustivas que se le aplicaron y a la respuesta apropiada que mostró. El tipo de pruebas utilizado para su validación, sometió al sistema de control de quemadores posteriores a condiciones extremas diversas.

Las gráficas obtenidas de las pruebas antes mencionadas, permiten, en términos generales, observar la correcta regulación del sistema ante perturbaciones bruscas en las condiciones del proceso ( $T_{gst}$ ). Esto es, si la variable controlada ( $T_{um}$ ) aumenta, el algoritmo de control manda cerrar la válvula de combustible; si por el contrario, disminuye dicha variable, el controlador ordena la apertura de la válvula. También, dichas gráficas, muestran el funcionamiento del sistema de protecciones implementado.

Para llevar a cabo la sintonización del sistema de control, estando éste acoplado con el modelo dinámico del proceso, se aplicó la técnica conocida con el nombre de "método sistemático de ensayos", habiéndose obtenido resultados satisfactorios, como se puede observar en las gráficas que muestran los resultados de las pruebas. se utilizó este método debido a su

accesibilidad y sencillez y porque existen varios controladores en el sistema, lo que implicaría una mayor complejidad si se hubiese elegido algún otro método.

Se manifestó una mejoría en la sintonización del controlador conforme avanzaron las pruebas, ya que la señal de respuesta (en las últimas pruebas) presenta una oscilación menor y un tiempo de establecimiento relativamente corto, a pesar de las características bruscas de las perturbaciones; lo cual significa que se tiene una respuesta "suave".

El hecho de haber utilizado métodos de integración numérica es una limitante en las pruebas, para que la respuesta sea aun más "suave". Esto es debido a que tales métodos son aproximaciones y ocasionan un pequeño error en cada iteración el cual es acumulativo. Sin embargo, podemos considerar que la respuesta es correcta, ya que se aprecia claramente la tendencia de la señal y su oscilación está dentro de la tolerancia admisible.

La aportación más importante de esta obra es, entre otras, el algoritmo de control de los quemadores posteriores. Una de las aplicaciones prácticas y de mayor trascendencia de éste, es su integración a un sistema total de control digital que será implementado y sometido a diversas pruebas en el departamento de **INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL** del **INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS (IIE)**. La idea es integrar los sistemas de control de varias secciones, para conformar un sistema global.

Las aportaciones de este trabajo de tesis permitirán, además, analizar y sintetizar, en forma rápida y segura, la implementación de algoritmos de control digital directo correspondientes al control analógico de otros equipos de la planta, lo cual reditúa en la elaboración de algoritmos de alto grado de confiabilidad.

*En el aspecto didáctico, este trabajo proporciona una panorámica de la relación tan estrecha que existe entre el control de procesos industriales, la electrónica y la computación, en la actualidad. Además, contempla la importancia que tiene la simulación en el diseño de sistemas de control y su relación con la modelación matemática.*

## APÉNDICES

# AMPLIFICADOR OPERACIONAL (OPAMP)

## ANÁLISIS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL COMO CUADRIPOLO ACTIVO.

El amplificador operacional puede analizarse como elemento de cuatro terminales (cuadripolo) considerando sus dos entradas, su salida y la referencia (tierra). La característica de activo se le brinda, debido a que posee una fuente de voltaje (-U) a su salida.

Apoyándonos en la figura A.1, podemos realizar el análisis indicado, considerando que el amplificador operacional es ideal.

Analizando las mallas de entrada obtenemos las siguientes expresiones:

$$V_o = V_{e1} - V_{e2} \quad (A.1)$$

$$I_o = I_{e1} - I_{e2} \quad (A.2)$$

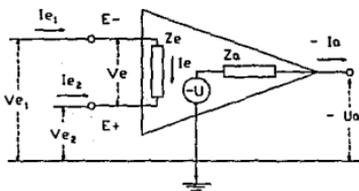


Fig. A.1. Esquema del OPAMP como cuadripolo activo

\* SALIDA:

$$-V_o = -V_u - I_o Z_o \quad (A.3)$$

Con  $Z_o$ : Impedancia compleja de salida.

\* ENTRADA:

$$V_o = I_o Z_o \dots \dots \dots (A.4)$$

Con  $Z_e$ : Impedancia compleja de entrada.

\* **GANANCIA:**

$$- V = V_o V_u \dots \dots \dots (A.5)$$

Con  $V_u$ : Ganancia de voltaje.

En expresión logarítmica tenemos:

$$V_{u/db} = 20 \log_{10} \left( - \frac{V}{V_o} \right) \dots \dots \dots (A.6)$$

Si definimos las características de ganancia mediante la corriente de entrada  $I_e$ , se considera:

$$- V = I_e Z_o \dots \dots \dots (A.7)$$

Donde  $Z_o$  es la magnitud compleja denominada impedancia de transferencia, que representa una medida del grado de desacoplo existente entre la entrada y la salida del amplificador.

\* **VOLTAJE DE ENTRADA EN MODO COMÚN:** Si las dos entradas ( $E+$  y  $E-$ ) poseen el mismo signo, la expresión que determina el voltaje de entrada en modo común es:

$$V_g = \frac{1}{2} (V_{e1} + V_{e2}) \dots \dots \dots (A.8)$$

\* **GANANCIA EN MODO COMÚN:** Representa la relación que existe entre la ganancia de voltaje y el voltaje de entrada en modo común:

\* **RAZÓN DE RECHAZO EN MODO COMÚN:** Expresa la relación existente entre la

$$G_g = - \frac{V_o}{V_g} \dots \dots \dots (A.9)$$

ganancia de voltaje y la ganancia en modo común:

$$K_g = \frac{V_o}{V_g} \dots \dots \dots (A.10)$$

### CARACTERÍSTICAS DEL OPAMP IDEAL

- a) Ganancia de voltaje infinita ( $A_v \rightarrow \infty$ ).
- b) Impedancia de transconductancia infinita ( $Z_i \rightarrow \infty$ ).
- c) Impedancia de entrada infinita ( $Z_i \rightarrow \infty$ ).
- d) La impedancia de salida tiende a cero ( $Z_o \rightarrow 0$ ).
- e) El voltaje de entrada en modo común ( $V_g$ ) no influye sobre la tensión de salida.
- f) No existe defasamiento de la señal de entrada.

### CARACTERÍSTICAS INTERNAS DE UN OPAMP REAL

Un amplificador operacional real está estructurado por tres etapas principales:

- a) Etapa diferencial simétrica de entrada. Mediante esta etapa es posible conseguir una impedancia de entrada sumamente elevada ( $Z_i \rightarrow \infty$ ).
- b) Amplificador intermedio de tensión. Por medio de esta etapa la ganancia de voltaje es muy grande ( $A_v \rightarrow \infty$ ).

c) *Etapa de salida en contrafase con baja impedancia. La característica de baja impedancia de salida es posible en base a esta etapa ( $Z_o \rightarrow 0$ ).*

*Gracias a esta última etapa, la tensión de salida  $U_a$  se mantiene casi constante, a pesar de que la resistencia de carga tenga un valor elevado. Por otra parte, la resistencia de carga mínima debe ser mayor a un valor determinado, pues de lo contrario, el voltaje a la salida del amplificador disminuye. El valor de la corriente de carga característica ( $I_{\text{CARACT}}$ ) y la tensión máxima posible en el amplificador ( $U_{\text{Vmax}}$ ), determinan la resistencia mínima aceptable ( $R_{\text{Lmin}}$ ) de éste, como se aprecia en la siguiente expresión (Ley de ohm):*

$$R_{\text{Lmin}} = \frac{U_{\text{Vmax}}}{I_{\text{CARACT}}} \dots \dots \dots \quad (\text{A.11})$$

### **RESPUESTA DINÁMICA DE UN AMPLIFICADOR REAL**

*Los transistores, con los que se construye un amplificador operacional, actúan como capacidades que, en combinación con las resistencias del circuito, provocan una acción retardadora. Si se aumenta la frecuencia de la señal con la que se está alimentando al amplificador operacional, el defasamiento de la señal de salida con respecto a tal entrada aumenta.*

*Los amplificadores reales pueden considerarse como elementos retardadores de primer orden, que presentan una constante de tiempo de retardo comprendida entre 1 y 30 mseg. y una ganancia entre 80 y 100 dB. La retroalimentación reduce mucho la ganancia y aumenta*

en forma proporcional la frecuencia de corte; disminuyendo así, la constante de tiempo de retardo.

El amplificador operacional (OPAMP en lo sucesivo) no tiene tendencia a oscilar dentro de un rango de frecuencias determinado, aun estando retroalimentado, por tanto es posible representar sus parámetros en términos reales:

**\* RESISTENCIA DE ENTRADA:**

$$R_e = \frac{\Delta V_e}{\Delta I_e} \dots \dots \dots (A.12)$$

**\* RESISTENCIA DE SALIDA:**

$$R_s = \frac{\Delta V_s}{\Delta I_s} \dots \dots \dots (A.13)$$

**\* GANANCIA PROPORCIONAL:**

$$V_u = \frac{\Delta V_s}{\Delta V_e} \dots \dots \dots (A.14)$$

**\* RESISTENCIA DE TRANSFERENCIA:**

$$R_d = - \frac{\Delta V_s}{\Delta V_e} \dots \dots \dots (A.15)$$

De esta ecuación obtenemos:

$$V_u R_e = R_d \dots \dots \dots (A.16)$$

**\* RESPUESTA ESTÁTICA DEL OPAMP REAL:**

Las variaciones de la tensión de alimentación y sobre todo, las variaciones de temperatura,

influyen sobre los parámetros de los amplificadores. Mediante un circuito totalmente simétrico a la entrada, pueden eliminarse los errores ocasionados por factores anteriores. Las características a considerar en la respuesta estática son:

- a) Razón de rechazo en modo común.
- b) Tensión offset de entrada.
- c) Corriente offset de entrada.

La inevitable asimetría del circuito de entrada del amplificador ocasiona que éste, presente a su salida una tensión distinta de cero, aun cuando se consigan las siguientes condiciones:

- 1) E+ y E- estén cortocircuitadas y conectadas a tierra.
- 2) E- esté abierta y E+ conectada a referencia.

\* **TENSIÓN OFFSET DE ENTRADA:** Se entiende como aquel voltaje que se requiere a la entrada para que a la salida se presente un voltaje cero. Puede ser positiva o negativa.

Aplicando una tensión adicional  $U_{eo}$  puede compensarse la tensión offset.

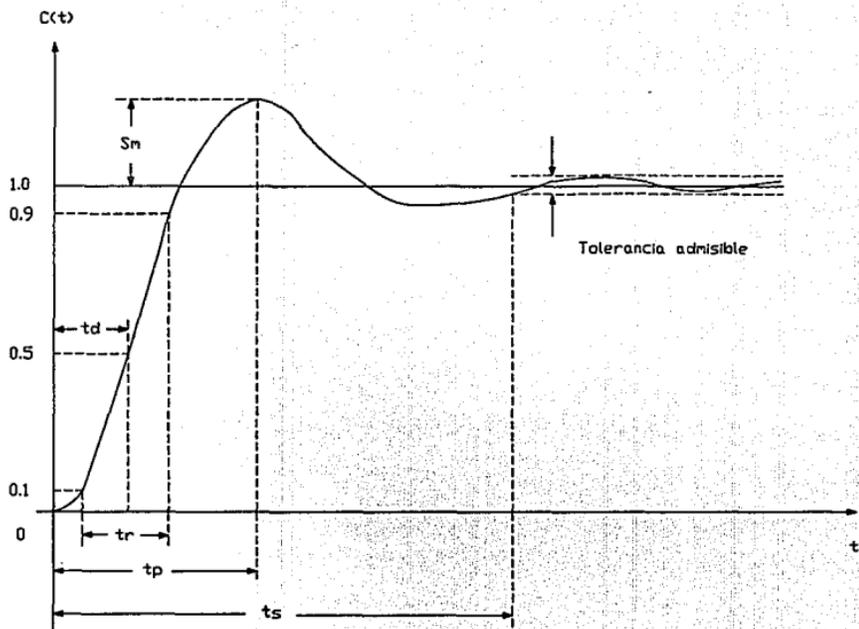
**RESPUESTA CARACTERÍSTICA DE LOS SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN.**

*En un sistema de control real, se presentan oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar el estado estable, debido a que tiene elementos con almacenamiento de energía. Es por eso que no posee una respuesta instantánea cuando es sometido a perturbaciones.*

*Es común especificar las características de respuesta de un sistema de control, en términos de la respuesta transitoria a una entrada escalón unitario, en virtud de su fácil generación y de ser una perturbación drástica. Dicha respuesta, posee los siguientes parámetros (véase figura b.1):*

- 1.- SOBREPULSO MÁXIMO ( $S_m$ ). Corresponde al valor pico máximo de la curva de respuesta medido a partir de la unidad.*
- 2.- TIEMPO DE RETARDO ( $t_d$ ). Es el tiempo que tarda la respuesta en alcanzar, por primera vez, la mitad del valor final.*
- 3.- TIEMPO DE CRECIMIENTO ( $t_r$ ). Es el tiempo requerido para que la respuesta crezca del 10 al 90 %, del 5 al 95 % ó del 0 al 100 % de su valor final.*
- 4.- TIEMPO DE PICO ( $t_p$ ). Es el tiempo necesario para que la respuesta alcance el primer pico del sobreimpulso.*
- 5.- TIEMPO DE ESTABLECIMIENTO ( $t_s$ ). Tiempo requerido por la curva de respuesta para alcanzar y mantenerse dentro de un determinado rango alrededor del valor final (5% ó 2%, por lo general), ubicándose dentro de la zona de tolerancia admisible.*

Fig. 6.1. Respuesta transitoria de un sistema de segundo orden.



CONVERSIÓN DE UNIDADES

APÉNDICE C

VOLTAJE (-V)	TEMPERATURA (°F)	PRESION (PSIA)	PU
10.0	1500	1500	1.0
9.5	1425	1425	0.95
9.0	1350	1350	0.90
8.5	1275	1275	0.85
8.0	1200	1200	0.80
7.5	1125	1125	0.75
7.0	1050	1050	0.70
6.5	975	975	0.65
6.0	900	900	0.60
5.5	825	825	0.55
5.0	750	750	0.50
4.5	675	675	0.45
4.0	600	600	0.40
3.5	525	525	0.35
3.0	450	450	0.30
2.5	375	375	0.25
2.0	300	300	0.20
1.5	225	225	0.15
1.0	150	150	0.10
0.5	75	75	0.05
0.0	0.0	0.0	0.0

Fig. C1.3. Tablas de conversión: Unidades de Ingeniería a voltaje y viceversa.

\* RELACIONES DE CONVERSIÓN (Sistema internacional de unidades -> Sistema inglés):

TEMPERATURA:  $^{\circ}F = 1.8 \text{ }^{\circ}K - 459.67$

PRESIÓN:  $PSIA = Kpa / 6.894757$

## **ANEXOS**

**DESCRIPCION DE LAS VARIABLES Y CONSTANTES DEL MODELO DEL PROCESO**

IDENTIFICADOR	DESCRIPCION
DELTA_T	Constante de tiempo del modelo dinámico del proceso.
Cvr	Cv de la válvula de combustible a quemadores posteriores.
Cv011	Cv diesel .
Cvhr	Cv de los gases de salida del recuperador.
Vhr	Volumen del hogar del recuperador.
Vvr	Volumen del vapor en el recuperador.
Kvr	Constante de proporcionalidad .
Cpg	Cp gas .
Cpv	Cp vapor .
Cpw	Cp agua .
Uu	Coficiente de transferencia de calor en sobrocalentador.
J	Poder calorífico del gas natural.
Rg	Constante universal de los gases.
Rv2	Constante del vapor 2 .
Xdr	Constante.
X6	Constante.
K7	Constante.
K10	Constante.
K11	Constante.
Kess	Constante de proporcionalidad.
CVBP	Cv de la válvula de Bypass.
Mwdr0	Masa del agua del domo del rec. 0.
Taa	Temp. de agua de alimentación.
Piq	Presión a la entrada de quemadores posteriores.
Pj	Presión atmosférica.
Taal	Temperatura de agua de alimentación de entrada.
TO	Temperatura de referencia.
XBP	Apertura Bypass.
Ggscc	Flujo másico de gases a la salida de la cámara de combustión de la turbina.
Tgst	Temperatura de gases a la salida de la turbina de gas (Gases de escape).
Mwdr	Masa de agua en domo del recuperador.

Gvt	Flujo másico del vapor.
Pvr	Presión del vapor en recuperador.
ROU	Densidad de vapor sobrecalentado.
D_ROU	Derivada ROU.
D_ROuA	Valor anterior D_ROU.
Tghr	Temperatura de gas en hogar del recuperador.
ROghr	Densidad de gases en hogar del recuperador.
Hvr	Entalpía del vapor en recuperador.
Twdr	Temperatura de agua en domo del recuperador.
DELTA_P	Variable auxiliar.
Phr	Presión en el hogar del recuperador.
Tgsr	Temperatura de gases a la salida del recuperador.
Ggsr	Flujo másico gases a la salida del recuperador.
Gaar	Flujo másico del agua de alimentación en recuperador.
POT	Variable auxiliar.
Udr	Coficiente total de transferencia de calor en el domo .
Gcr	Flujo másico de combustible en recuperador.
Gvr	Flujo másico de vapor en recuperador.
Goil	Flujo másico de diesel.
GVBP	Flujo másico de vapor en Bypass.
Gss	Flujo másico de gases de salida del sobrecalentador.
Tu	Temperatura de sobrecalentado.
Tum	Temperatura de vapor sobrecalentado.
D_GVT3	Derivada del flujo de vapor sobrecalentado.
D_GVT3	IDEM...(valor anterior).
D_Mwdr	Derivada de la masa de agua en el domo.
D_MwdrA	IDEM...(valor anterior).
D_Gaar	Derivada del flujo de agua de alimentación.
D_GaarA	IDEM...(valor anterior).
D_ROghr	Derivada de la densidad del gas en el hogar del recuperador.
D_ROghrA	IDEM...(valor anterior).
D_Tghr	Derivada de la temperatura de los gases en el hogar del recuperador.
D_TghrA	IDEM...(valor anterior).

**VARIABLES ANALÓGICAS DEL SISTEMA DE CONTROL DIGITAL DE LOS  
QUEMADORES POSTERIORES**

IDENTIFICADOR	DESCRIPCION	TIPO
A101	TEMPERATURA DE GASES DE ENTRADA (Después de los quemadores posteriores)	E
A102	P.A DINÁMICO POR TEMPERATURA DE GASES	I
A103	DERIVADA DE LA TEMP. DE VAPOR SOBRECALENTADO	E
A103A	VARIABLE AUXILIAR	I
A104	SALIDA PUNTO DIFERENCIA (SUMADOR)	I
A105	SALIDA DEL INVERSOR DE POLARIDAD	I
A106	SALIDA CONTROLADOR PROPORCIONAL (SC_F)	I
A107	SALIDA CONTROLADOR INTEGRAL (SC_I)	I
A108	VALOR ANTERIOR DE A104	I
A109	SALIDA CONTROLADOR PI (SCPI)	I
A110	DIF. ENTRADA LIM -10V	I
A111	SALIDA LIMITADOR A -10V	I
A112	VALOR ANTERIOR DE A110	I
A113	DIF. ENTRADA LIM 0V	I
A114	SALIDA LIMITADOR A 0V	I
A115	VALOR ANTERIOR DE A110	I
A116	DIF. ENTRADA TA	I
A117	SALIDA TA	I
A118	VALOR ANTERIOR A115	I
A119	SALIDA TA INVERTIDA	I
A120	SALIDA DEL CIRCUITO PASA ALTAS	I
A121	IDEM...DIESEL	I
A125	SALIDA CARACTERIZADA DE VÁLVULA DE GAS	I
A126	IDEM... DIESEL	I
A127	DEMANDA DE POSICIÓN VÁLVULA GAS EN %	S
A128	DEMANDA DE POSICIÓN. VÁLVULA DIESEL EN %	S
A129	DEMANDA DE POSICIÓN VÁLVULA GAS EN PU	S

A130	DEMANDA DE POSICIÓN VÁLVULA DIESEL EN PU	S
A201	TEMP. A SELECCIONADA DE VAP. SOBREALENTADO	E
A202	TEMP. B SELECCIONADA DE VAP. SOBREALENTADO	E
A203	SALIDA PUNTO DIF. 1 (SUMADOR)	I
A204	SALIDA CONTROLADOR PROPORCIONAL 1 (SC_P)	I
A205	SALIDA CONTROLADOR INTEGRAL 1 (SC_I)	I
A206	SALIDA CONTROLADOR PI-1 (SCPI)	I
A207	SALIDA ANTERIOR DE A203.	I
A209	DEMANDA DE POSICIÓN DEL BYPASS DE ATEMPERACIÓN	E
A210	SALIDA CARACTERIZADA Y LIMITADA DE A209	I
A211	SALIDA PUNTO DIF. 2 (SUMADOR)	I
A212	SALIDA CONTROLADOR PROPORCIONAL 2 (SC_P)	I
A213	SALIDA CONTROLADOR INTEGRAL 2 (SC_I)	I
A214	SALIDA CONTROLADOR PI-2 (SCPI)	I
A215	SALIDA ANTERIOR DE A211	I
A217	PRESIÓN DE VAPOR SOBREALENTADO	E
A218	PUNTO DIF. 3 (SUMADOR)	I
A219	SALIDA CONTROLADOR PROPORCIONAL 3 (SC_P)	I
A220	SALIDA CONTROLADOR INTEGRAL 3 (SC_I)	I
A221	SALIDA CONTROLADOR PI-3 (SCPI)	I
A222	SALIDA ANTERIOR DE A218	I
A224	DEMANDA DE COMBUSTIBLE	I
A225	SALIDA FUNCIÓN PASA ALTA (A224 ó A205)	I
A226	SAL FUNCION PASA BAJA (A221 ó A214)	I
A301 (N)	PENDIENTE DE LA DEMANDA DE COMBUSTIBLE	I
&CONTADOR	CONTADOR DE LA SEÑAL RETARDO	I

### VARIABLES DIGITALES DEL SISTEMA DE CONTROL DIGITAL DE LOS QUEMADORES POSTERIORES

IDENTIFICADOR	DESCRIPCIÓN	TIPO
D11	TRANSFERENCIA A COMBUSTIÓN MÍNIMA	E
D12	SEÑAL DE CTRL. DE COMB. IGUAL A P.A TRANSF. DE COMB.	S
D13	RASTREO	S
D14	COMANDO MANUAL	S
D15	VÁLVULA DIESEL EN MANUAL	S
D16	VÁLVULA GAS EN MANUAL	S
D17	DISPARO POR ALTA TEMPERATURA Y RETROCESO	E
D31	RETROCESO POR ALTA TEMPERATURA DE VAPOR SOBRECALENTADO	E
D32	DISPARO DE QUEMADORES POSTERIORES	E
D33	VAR. AUX. PARA LA ASIGNACIÓN INICIAL DE A102 (A224=A102)	I
D34	VAR. AUX. PARA LA ASIGNACIÓN INICIAL DE A102 (A224=A102) ANTES AUXD32.	I
D36	RODADO A MÍNIMO	I
D39	SALIDA DE COMPUERTA OR	I
D40	SALIDA FLIP-FLOP	I
D41	SEÑAL DE RETARDO	I
D45	SELECTOR EN POSICIÓN A (0 F/MIN)	E
D46	SELECTOR EN POSICIÓN B (2 F/MIN)	E
D47	SELECTOR EN POSICIÓN C (4 F/MIN)	E
D48	SELECTOR EN POSICIÓN D (6 F/MIN)	E
D49	SELECTOR EN POSICIÓN E (8 F/MIN)	E
D50	SELECTOR EN POSICIÓN F (10 F/MIN)	E
D51	BOTON SUBIR DEMANDA DE COMBUSTIBLE	E
D51A	VAR. AUX PARA LA ASIGNACIÓN INICIAL DE A102 (A224=A102) ANTES AUXD51.	I
D52A	VAR.AUX PARA LA ASIGNACIÓN INICIAL DE A102 (A224=A102) ANTES AUXD52.	I

D52	BOTÓN BAJAR DEMANDA DE COMBUSTIBLE	E
D53	SOLIC. SUBIR DEMANDA DE COMBUSTIBLE	E
D54	SOLIC. BAJAR DEMANDA DE COMBUSTIBLE	E
D55	AVISO SUBIR DEMANDA DE COMBUSTIBLE	E
D56	AVISO BAJAR DEMANDA DE COMBUSTIBLE	E
D60	ORDEN DE CERRAR POR DEMANDA AL MÍNIMO	I
D61	ACTIVA BOTONES	I

### CONSTANTES DEL SISTEMA DE CONTROL DIGITAL DE LOS QUEMADORES POSTERIORES

#### \*CONTROLADOR MAESTRO\*

IDENTIFICADOR	DESCRIPCIÓN	VALOR
Kp1	CONSTANTE PROPORCIONAL ( $K_p = R_f/R_o$ )	1.0
T11	CONSTANTE DE TIEMPO DE ACCIÓN INTEGRAL	1.0
DELTAT1	PASO DE INTEGRACIÓN	0.1
K	CONSTANTE	-10.0
	* LIMITADOR -10V. *	
DELTAT2	PASO DE INTEGRACIÓN	1.0
T12	CONSTANTE DE TIEMPO DE ACCIÓN INTEGRAL	0.1
REF1	VOLTAJE DE REFERENCIA	-10.0
	* LIMITADOR 0V. *	
DELTAT3	PASO DE INTEGRACIÓN	1.0
T13	CONSTANTE DE TIEMPO DE ACCIÓN INTEGRAL	0.1
REF2	REFERENCIA DE VOLTAJE	0.0
	* AMPLIFICADOR DE SEGUIMIENTO (TA) *	
OVSP	PUNTO DE AJUSTE VÁLVULA DIESEL	0.5
GVSP	IDEM...GAS	0.6
T14	CONSTANTE DE TIEMPO DE ACCIÓN INTEGRAL	1.0
DELTAT4	PASO DE INTEGRACIÓN	0.1
D156	CONSTANTE	0.0

## • MODELO VÁLVULAS •

DELTA_T1	PASO DE INTEGRACIÓN	0.1
LAG	LÍMITE ALTO GAS	1.0
LBG	LÍMITE BAJO GAS	0.0
LAD	LÍMITE ALTO DIESEL	1.0
LBD	LÍMITE BAJO DIESEL	0.0
• FUNCIÓN DE CARACTERIZACIÓN PARA GAS: $f_{cgas}()$ •		
RAg	VALOR DE RESISTENCIA	20.0
A2g	$A2g = (Vrfg/RVAg)$	-10.0/72.10
RfAg	VALOR DE RESISTENCIA	19.90
RBg	VALOR DE RESISTENCIA	30.0
B2g	$B2g = (Vrfg/RVBg)$	-10.0/26.60
RfBg	VALOR DE RESISTENCIA	18.2
RCg	VALOR DE RESISTENCIA	100.0
C2g	$C2g = (Vrfg/RBCg)$	-10.0/98.40
RfCg	VALOR DE RESISTENCIA	19.5
D1g	$D1g = (R/Dg/RDg)$	11.3/20.0
RE1g	VALOR DE RESISTENCIA	20.0
RE2g	VALOR DE RESISTENCIA	40.0
RE3g	VALOR DE RESISTENCIA	20.0
• FUNCIÓN DE CARACTERIZACIÓN PARA DIESEL: $f_{cdie}()$ •		
RA <sub>d</sub>	VALOR DE RESISTENCIA	20.0
A2 <sub>d</sub>	$A2d = (Vrfd/RVAd)$	-10.0/76.10
RfA <sub>d</sub>	VALOR DE RESISTENCIA	18.30
RVB <sub>d</sub>	VALOR DE RESISTENCIA	30.0
B2 <sub>d</sub>	$B2d = (Vrfd/RVBd)$	-10.0/35.60
RfB <sub>d</sub>	VALOR DE RESISTENCIA	18.1
RC <sub>d</sub>	VALOR DE RESISTENCIA	100.0
C2 <sub>d</sub>	$C2d = (Vrfd/RBCd)$	-10.0/89.80
RfC <sub>d</sub>	VALOR DE RESISTENCIA	19.9
D1 <sub>d</sub>	$D1d = (R/Dd/RDd)$	27.0/20.0
RE1 <sub>d</sub>	VALOR DE RESISTENCIA	20.0
RE2 <sub>d</sub>	VALOR DE RESISTENCIA	40.0
RE3 <sub>d</sub>	$RE3d = R/Ed$	12.0

## \* FUNCIÓN DERIVADA \*

GAN	GANANCIA	10.0
LS	LÍMITE SUPERIOR	0.0
LI	LÍMITE INFERIOR	-10.0
CT	PASO DE DERIVACIÓN	1.0
T	CONSTANTE DE TIEMPO DE DERIVACIÓN	1.0

## \* MODULO 2 \*

Kp21	CONSTANTE PROPORCIONAL (CTMVS)	1.0
KP22	CONSTANTE PROPORCIONAL (CTMVS)	1.0
KP23	CONSTANTE PROPORCIONAL (CPMVS)	1.0
T1	CONSTANTE DE TIEMPO DE ACCIÓN INTEGRAL (CTMVS)	5.0
T2	CONSTANTE DE TIEMPO DE ACCIÓN INTEGRAL (CTMVS)	10.0
T3	CONSTANTE DE TIEMPO DE ACCIÓN INTEGRAL (CPMVS)	33.0
DELTAT	PASO DE INTEGRACIÓN	0.1
PA1	PUNTO DE AJUSTE (CTMVS)	+7.0
PA2	PUNTO DE AJUSTE (CTMVS)	+9.52
PA3	PUNTO DE AJUSTE (CPMVS)	+8.333
TMAX1	LÍMITE DE ACTIVACIÓN DE RETROCESO	811.0 (°K)
TMAX2	LÍMITE DE ACTIVACIÓN DE DISPARO DE QP'S	830.0 (°K)
DELTA	PASO DE INTEGRACIÓN DEL MODELO DEL PROCESO	0.1

CONDICIONES INICIALES (SIU)  
CONSTANTES $DELTA\_T = 0.1$  $ITER = 0.0$  $CONT = 0.0$  $Cvr = 0.033263$  $Cvoil = 1.0$  $Cvhr = 3.6127338$  $Vhr = 300.0$  $Vvr = 300.0$  $Kvr = 5.9089911$  $Cpg = 2.0$  $Cpv = 2.5$  $Cpw = 4.1868$  $Uu = 177.7860222$  $J = 45764.0$  $Rg = 0.3464$  $Rv2 = 0.44206$  $Kdr = 34.93086$  $K6 = 2924.48$  $K7 = -0.02218$  $K10 = 506.454$  $K11 = 0.00709$  $Ksss = 0.4111244$  $CVBP = 0.292459725$  $Mwdr0 = 20000.0$  $Taa = 40.0$

$D_{ROuA} = 0.0$   
 $D_{GVT3A} = 0.0$   
 $D_{MwdrA} = 0.0$   
 $D_{GaarA} = 0.0$   
 $D_{ROghrA} = 0.0$   
 $D_{TghrA} = 0.0$   
 $Piq = 930.690$   
 $Pj = 101.341$   
 $Taai = 400.0$   
 $T0 = 273.0$   
 $XBP = 0.15$   
 $Ggsct = 79.8$   
 $Tgst = 749.123$   
 $Mwdr = 20000.0$   
 $GVT3 = 35.0$   
 $Gvp = 0.0$   
 $Tghr = 949.473$   
 $ROghr = 1.257$   
 $ROu = 17.544$   
 $Tum = 800.0$   
 $Phr = 413.64$   
 $Tgsr = 323.76311$   
 $Gaar = 35.0$   
 $IPVR = 0.8722319$   
 $ITGHR = 0.80$   
 $T_VDIE = 2.0$   
 $T_VGAS = 0.1$

## SISTEMA DE CONTROL

**\* MODULO 1:**

VALV\_GAS = 1.0

A107 = 6.85333

ENT\_ANTE = -9.803538 *inic. parametro de rate()*

ENT\_ANT = -9.803538

DEL = 0.1

PERM = 0.0

REL = 0.0

**\* MODULO 2 :**

A217 = -5.999149

A201 = -9.803538

A205 = 7.0

A213 = 8.9

A220 = 6.67

A209 = 0.15

A101 = -8.32916

A102 = 8.32916

A224 = 8.32916

K20 = 10.0

**UTILERIA****\* HARDWARE:**

- PC AT- 286, EQUIPADA CON COPROCESADOR 287.
- IMPRESORA HP LASERJET III.

**\* SOFTWARE:**

- SISTEMA OPERATIVO: MSDOS.
- MEDIO AMBIENTE DE PRUEBAS: TURBO C.
- PROCESADOR DE TEXTO: WORD PERFECT Versión: 5.1.
- LENGUAJE DE PROGRAMACION PARA ALGORITMOS (simulación digital) :  
LENGUAJE C.
- SIMULACION ANALOGICA: MICROCAP II Versión: 2.4.
- DIBUJOS: AUTOCAD versión: 10.0.
- GRÁFICAS: LOTUS 123 versión: 2.2.

## BIBLIOGRAFIA GENERAL

### \* LIBROS:

- BOYLESTAD, R. [ Y ] NASHESKY, L.. Electrónica: Teoría de circuitos. México: Prentice / Hall Hispanoamericana, S.A., C1989, 2a. edición, 848 p.
- FRANKLIN, G. [ Y ] POWELL, D.. Digital control of dynamic systems. U.S.A: Addison-Wesley publishing company, 1980, 1 era. edición, 335 p.
- FRÖHR, F. [ Y ] ORTTENBURGER, F.. Introducción al control electrónico. Berlín y Munich: Siemens Aktiengesellschaft y Marcombo S.A., C1986, 372 p.
- GRAEME, J [ Y ] TOBEY, G.. Amplificadores operativos: Diseño y aplicación. México: Editorial Diana, 1978, 1 era. edición, 548 p.
- KUO, B.. Digital control systems. U.S.A: HRW: Series in electrical and computer Engineering. C1980, 730 p.
- LINCH, R. [ , ] OSTBERG, D. [ Y ] KULLER, R.. Calculus with computer applications. U.S.A: Xerox college Publishing, C1973, 964 p.
- LUTHE, R. [ , ] OLIVERA, A. [ Y ] SCHUTZ, F.. Métodos numéricos. México: Limusa S.A, C1988, 444p.
- OGATA, K.. Ingeniería de control moderna. España: Prentice/Hall, 1979, 1 era. edición. 902 p.
- TOCCI, R.. Sistemas digitales: Principios y aplicaciones. México: Prentice / Hall Hispanoamericana, S.A, C1987, 2a. edición, 624 p.

### \* MANUALES:

- COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD. Prontuario: Central termoeléctrica ciclo combinado, Gómez Palacio, Dgo., México. México: CFE: Región de generación termoeléctrica centro - norte. 112 p.
- COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD. Curso práctico para turbinero. México: CFE: Central termoeléctrica de ciclo combinado.
- COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD. Curso práctico para patiero. México: CFE: Central termoeléctrica de ciclo combinado.

- COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD. Curso práctico para operador tablerista. México: CFE: Central termoelectrica de ciclo combinado.

- WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. POWER DIVISION SYSTEM. Customer's familiarization program ( Philadelphia, Pensylvania). VI.

**\* ARTICULOS DE REVISTAS ESPECIALIZADAS.**

- ANTONIO ROMERO, " como elegir el sistema de automatización apropiado". En: Ingeniería Química, agosto 1986. p.p 15-19.

- F.P BADER, " Process controller / computer connection". En: Hydrocarbon processing, September 1985. p.p 109-112.

- FRANCISCO MATEOS, " Control distribuido. Una herramienta eficaz en los procesos de cogeneración ", En: Montajes e instalaciones, Abril 1991. p.p 121-125.

- JOHN D. LANE, " Self-tuning control and other regulatory control techniques". En: Proc. ACC, 1987. p.p 17-32.

- MICHAEL J. BROWER, " Control update: 1990". En: A plant Engineering special report.

- ROBERT E. MAY, " The evolution of computer process control". En: Control Engineering, March 1990. p.p 166-119.

- T.C. ELLIOT, "Power plant control systems". En: Electric power international, december 1991, p.p 17-27.

**\* PONENCIAS:**

- MIGUEL ANGEL DELGADILLO V., " El controlador". En: Fundamentos de instrumentación y control: Parte I. México, D.F.: CANACINTRA- ISA SECCION MEXICO CENTRO, 29 al 31 de marzo de 1993. p.p 47-66.