

20
2E



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
" A R A G O N "

FALLA DE ORIGEN

ANALISIS Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL
DIFUSO PARA EL CONTROL DE QUEMADORES POSTERIORES
DE UNA CENTRAL TERMoeLECTRICA
DE CICLO COMBINADO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

PONCIANO JORGE ESCAMILLA AMBROSIO





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.

DEDICATORIAS

- A mis padres Primitivo e Inés, quienes me regalaron el don más grande que puede existir: la vida. A ellos dedico todo cuanto mi ser pueda realizar.
- A mis hermanos (as): Cristina, Arturo, Lourdes, Armando y Rosa.
- A mis amigos Rubén, Alfredo y Eduardo esperando seguir cultivando su amistad.

AGRADECIMIENTOS.

- Agradezco especialmente al M. en I. David González Maxinez por su disposición para asesorar este trabajo.
- A los catedráticos que revisaron esta tesis:
 - Ing. Martín Contreras Soto.
 - Ing. Raúl Barrón Vera.
 - Ing. Silvia Vega Muytoy.
 - Ing. Raymundo Flores Díaz.
- Un agradecimiento especial a mis amigos los ingenieros Rubén Flores M. y Eduardo Fuentes G. por su gran apoyo en la realización de este trabajo.

INDICE

INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I SISTEMAS DE CONTROL CONVENCIONALES.....	3
I.1 DESARROLLO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE PROCESOS.....	3
I.1.1 CONTROL CENTRALIZADO.....	5
I.1.2 CONTROL DISTRIBUIDO.....	7
I.1.3 CONTROLADORES.....	11
I.2 CONCEPTOS BASICOS EN LA INGENIERIA DE CONTROL.....	14
I.2.1 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CONTROL CONVENCIONAL.....	14
I.2.2 CONCEPTOS BASICOS EN LA AUTOMATIZACION DE PROCESOS.....	16
I.2.3 CARACTERISTICAS FUNDAMENTALES DE UN PROCESO.....	18
I.3 FORMAS DE CONTROL CONVENCIONALES.....	19
I.3.1 CONTROL DE DOS POSICIONES (TODO-NADA).....	20
I.3.2 CONTROL FLOTANTE.....	21
I.3.3 CONTROL PROPORCIONAL.....	22
I.3.4 CONTROL INTEGRAL (DE REPOSICION).....	25
I.3.5 CONTROL DERIVATIVO.....	26
I.3.6 CONTROL PROPORCIONAL MAS INTEGRAL (PI).....	27
I.3.7 CONTROL PROPORCIONAL MAS DERIVATIVO (PD).....	29
I.3.8 CONTROL PROPORCIONAL MAS INTEGRAL MAS DERIVATIVO (PID).....	30
BIBLIOGRAFIA.....	33
CAPITULO II ANALISIS Y DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL EMPLEANDO LOGICA DIFUSA.....	34
II.1 LA LOGICA DIFUSA.....	34
II.1.1 FUNCION DE MEMBRESIA Y VARIABLE LINGÜISTICA.....	38
II.1.2 OPERADORES LOGICOS.....	41
II.2 DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DIFUSO.....	42
II.2.1 DIFUSION (FUZZIFICATION).....	44
II.2.2 EVALUACION DE REGLAS (RULE EVALUATION).....	47
II.2.3 RESTRICCION (DEFUZZIFICATION).....	56
BIBLIOGRAFIA.....	61

CAPITULO III	PLANTEAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO PARA EL CONTROL DE QUEMADORES POSTERIORES DE UNA CENTRAL TERMoeLECTRICA DE CICLO COMBINADO.....	63
III.1	CENTRAL TERMoeLECTRICA DE CICLO COMBINADO.....	63
III.1.1	EQUIPOS PRINCIPALES.....	64
III.2	QUEMADORES POSTERIORES.....	69
III.3	CONTROL DIFUSO DE QUEMADORES POSTERIORES.....	73
III.3.1	METODOLOGIA.....	73
III.3.2	IDENTIFICACION DE LAS FUENTES DE CONTROL.....	74
III.3.3	DEFINICION DE FUNCIONES DE MEMBRESIA Y CONJUNTOS DIFUSOS.....	78
III.3.4	ELABORACION DE REGLAS.....	82
III.3.5	SELECCION DEL METODO DE RESTRICCION (DEFUZZIFICATION).....	84
III.3.6	SIMULACION Y VALIDACION DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO.....	85
III.3.6.1	ALGORITMO DE CONTROL.....	87
III.3.6.2	PRUEBAS AL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO.....	93
III.3.6.2.a)	PRUEBA CON UNA PERTURBACION ESCALON.....	94
III.3.6.2.b)	PRUEBA CON UNA PERTURBACION RAMPA 1.....	95
III.3.6.2.c)	PRUEBA CON UNA PERTURBACION RAMPA 2.....	97
III.3.6.2.d)	PRUEBA CON UNA PERTURBACION RAMPA 3.....	98
	BIBLIOGRAFIA.....	101
	GRAFICAS.....	102
IV	CONCLUSIONES.....	109
APENDICE A	MODELO DINAMICO DEL PROCESO.....	111
APENDICE B	RESPUESTA CARACTERISTICA DE LOS SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN.....	120
ANEXO 1	DESCRIPCION DE LAS VARIABLES Y CONSTANTES DEL MODELO DEL PROCESO.....	122
ANEXO 2	UTILERIA.....	125

INTRODUCCION

En los últimos años la lógica difusa rápidamente se ha convertido en una de las más exitosas tecnologías para el desarrollo de sistemas de control. Con su ayuda, se han podido desarrollar e implementar complejos sistemas de control con una asombrosa simplicidad, facilidad de mantenimiento y bajo costo. Sin embargo, la lógica difusa no es la panacea para resolver todos los problemas de control. Los ingenieros encargados del desarrollo de sistemas de control difuso deben elegir esta técnica basándose en las características del proceso a controlar. Es aquí cuando surge la pregunta ¿Cuándo es apropiado el uso de los sistemas de control difuso? Y la respuesta es: cuando una o más de las variables de control son continuas y su relación es altamente no lineal; cuando no existe el modelo matemático del proceso en cuestión, o existe pero es difícil de codificar, o es demasiado complejo para ser evaluado de manera rápida en tiempo de operación real, o involucra el empleo de mucha memoria al momento de implementarlo con una arquitectura de microcontroladores; cuando el ambiente es ruidoso sujeto a muchas interferencias o es importante usar sensores baratos con baja precisión (dado que los sistemas de control difuso funcionan adecuadamente con microcontroladores de 4 y 8 bits); y tal vez, después de todo, cuando existe un experto disponible quien puede especificar por medio de reglas eurísticas el comportamiento del proceso y características de las variables de control.

La idea básica de este trabajo es demostrar la aplicabilidad de los sistemas de control difuso a través de su implementación digital y su validación por medio de la simulación en el control de quemadores posteriores de una central termoelectrica de ciclo combinado (CTCC). Así pues, bajo esta filosofía, el desarrollo de este trabajo es el siguiente: en el capítulo I se expone brevemente la evolución que han tenido los sistemas de control, se realiza una descripción física y funcional de los controladores actuales, se proporcionan los conceptos básicos en la automatización de procesos

proporcionan los conceptos básicos en la automatización de procesos y, por último, se expone brevemente el funcionamiento de las formas de control tradicional más ampliamente utilizadas. Lo anterior con el fin de tener una base comparativa entre las distintas formas de control tradicional y el control difuso.

En el capítulo II se proporcionan los conceptos básicos de la lógica difusa. Se describe detalladamente cada una de las tres etapas que conforman la estructura básica de un sistema de control difuso (SCD): difusión (fuzzification), evaluación de reglas y restricción (defuzzification). Dentro de la etapa de difusión se define en que consiste y como se realiza ésta. En la etapa de evaluación de reglas se describen los criterios empleados para realizar inferencias utilizando lógica difusa y como a partir de las distintas reglas se llega a una conclusión difusa. Finalmente, en la etapa de restricción se describen los distintos métodos a través de los cuales se realiza la transformación de la conclusión difusa a un valor concreto, con el que se efectúa la acción de control.

En el capítulo III se pasa de la teoría a la práctica; para ello, en primera instancia, se describe de manera general el funcionamiento y componentes de una central termoeléctrica de ciclo combinado. En seguida, se realiza una descripción detallada de los quemadores posteriores, en cuanto a sus características físicas y de operación. Posteriormente, se realiza la descripción del proceso en el cual están involucrados los quemadores posteriores y se plantea el problema de control. Una vez definido el problema de control, se presenta una metodología, la cual se sigue, para diseñar y desarrollar el sistema de control difuso para el control de los quemadores posteriores, el cual se implementa en lenguaje C en un ambiente de pruebas Turbo C. Después de una descripción de las funciones que componen el algoritmo de control, se realiza su simulación y se somete a diversas pruebas operativas cuyos resultados se grafican empleando el paquete Lotus 123 versión 2.2 y se comparan contra los resultados obtenidos con el control proporcional más integral (PI), actualmente empleado.

CAPÍTULO

I

SISTEMAS DE CONTROL
CONVENCIONALES

I.1 DESARROLLO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE PROCESOS.

Un sistema de control de procesos se define como un arreglo de unidades integradas entre sí de manera sistemática y racional. Estas unidades se encargan de monitorear de manera continua las variables que representan los objetivos de control y las compara con el valor deseado (punto de ajuste) para determinar, de esta manera, la desviación; para corregirla, el sistema produce una señal de control que mediante un actuador final la reduce a cero o a un valor deseado⁽¹⁾.

El constante avance tecnológico, el desarrollo de la teoría del control, y principalmente las necesidades industriales son los factores que han impulsado el desarrollo del control de procesos hasta llegar, en los últimos tiempos, a su automatización.

En un principio el control se realizaba de forma manual con la constante intervención de un operador humano; éste utilizaba sus sentidos para medir la evolución del proceso y efectuar acciones que redujeran las desviaciones que se presentaban respecto al comportamiento deseado, acciones que generalmente obedecían a su intuición y experiencia. Es evidente que esta manera de controlar, que en algunos casos daba resultados aceptables para lo que se pretendía, dejaba mucho que desear, tomando en cuenta que cualquier desviación en las condiciones de operación de un proceso pueden

grandes pérdidas, tanto por exceso de consumo de materias primas o energía como por variaciones en la calidad del producto obtenido. Por otra parte las exigencias del desarrollo industrial, en donde muchos de los procesos se encuentran encadenados e interactúan entre sí, obligó a acelerar la evolución del control de procesos, viéndolo no sólo como el gobierno de un proceso individual sino como todo un conjunto de ellos que tienen que ser coordinados y vistos de manera global.

Para poder evolucionar, el control de procesos necesitó del desarrollo de sensores y de las técnicas de medida y de tratamiento de señales. En un inicio tales sensores eran mecánicos, posteriormente se consiguió convertir las señales mecánicas en eléctricas de tipo analógico y por último se ha llegado a convertirlas en señales digitales pudiéndose, con ello, tratar numéricamente sus valores.

Respecto al equipo de control, los primeros dispositivos fueron también mecánicos con reguladores neumáticos; con ellos se realizaban las tres acciones típicas del control: proporcional, integral y derivativa, dando lugar al control PID, de uso universal y que aún hoy en día sigue dando buenos resultados en los problemas de control. Con el auge de la electrónica se introdujeron reguladores electrónicos que contaron con una mayor precisión y en los que se podía incluir una serie de operaciones para tratamiento de la señal.

Al aparecer, las computadoras fueron consideradas como sistemas de vigilancia, en donde se adquirían, almacenaban y trataban datos, para producir señales de alarma, para realizar cálculo de variables no medibles y elaborar informes de la evolución del proceso. Cuando se ve que la computadora es capaz de responder correctamente, se le encarga la tarea central de control, prescindiendo y substituyendo, incluso, a los reguladores analógicos.

La información referente a las condiciones de operación del proceso entra en la computadora de manera digital, proveniente de sensores que generan señales discretas, o señales analógicas que son convertidas a digitales. Esta información es comparada con los valores deseados para producir las órdenes de control, calculadas según el algoritmo correspondiente a la ley de control que se desee utilizar, y las envía a los actuadores correspondientes para efectuar la regulación del proceso. Como se observa, la computadora se convierte en el corazón y cerebro del sistema de control al ejecutar la ley de control, que ya no se restringe al clásico PID como sucedía en los reguladores analógicos, sino que ahora se puede llevar a cabo cualquier ley de control que pueda programarse.

Por otro lado, con la aparición y difusión del microprocesador los controladores han dejado a un lado la electrónica analógica para emplear la digital y la informática. El uso de un microprocesador como núcleo de un controlador hace que todas las operaciones, cálculos y algoritmos que antes se realizaban por hardware de forma rígida ahora se lleven a cabo por rutinas, mucho más flexibles, y permite la inclusión de algoritmos de control mucho más complejos y otros tratamientos de señal que anteriormente resultaba imposible de realizar.

Estos avances han hecho posible que en la actualidad se implementen dos tipos de control: control centralizado y control distribuido⁽²⁾.

I.1.1 CONTROL CENTRALIZADO.

En un sistema de control centralizado las señales provenientes de los sensores son conectadas mediante sus correspondientes cables a los acondicionadores de señal y convertidores para ser tratadas por una computadora central. La computadora central se encarga de realizar todas las funciones de control digital directo y control

supervisor; normalmente se instala en una sala central de control que se acondiciona especialmente para esta función. Los algoritmos de control, de los que dispone la computadora, se encargan de elaborar las señales de mando que son enviadas de regreso a los actuadores finales de control, pasando por sus correspondientes adaptadores de señal. En la figura No.I.1 se puede observar una representación esquemática de una instalación de control centralizado con computadora.

Este tipo de arquitectura presenta diversos problemas para un sistema de control. Uno de ellos es la necesidad de contar con un cable propio para cada señal de entrada/salida, lo que significa un alto costo y grandes probabilidades de fallas.

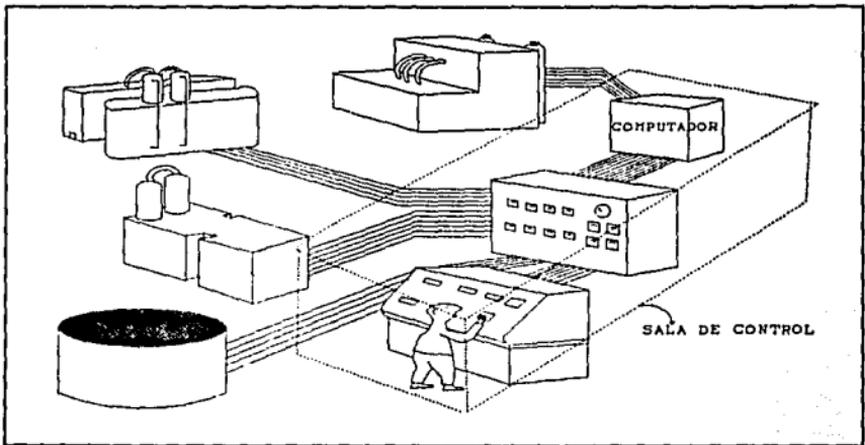


Fig.I.1 Control centralizado con computadora.

También debido a la dependencia de toda la planta de una sola computadora, para evitar desastres en caso de fallas de la instalación, se deben instalar reguladores analógicos de emergencia en paralelo con la computadora, que entren en operación automáticamente

si la falla se produce, con lo que aumenta, nuevamente, el costo del sistema. Por otro lado a medida que aumenta el número de entradas/salidas conectadas, también aumenta el tiempo de procesado, ya que éste se realiza de forma cíclica^[3].

I.1.2 CONTROL DISTRIBUIDO.

Un sistema de control distribuido es aquel cuyos componentes se encuentran distribuidos geográfica y funcionalmente^[4], en el contexto geográfico, esto significa que los dispositivos electrónicos encargados del control se encuentran distribuidos a lo largo de la planta industrial, junto a los distintos procesos que en ella se desarrollan. Allí reciben a través de cables conectados a sensores, la información del comportamiento del proceso, la cual es tratada para generar señales de control que son enviadas a dispositivos de regulación para mantener el control.

En el contexto funcional, el control distribuido se refiere a la distribución de actividades e inteligencia que la distribución geográfica hace posible. Esto ha sido viable gracias al relevante desarrollo que en los últimos tiempos han tenido los microprocesadores, pues consigo trajo la idea de diseñar grandes sistemas de control compuestos por pequeños microcomputadores (controladores). Cada uno de éstos subsistemas se encarga del control local de unos pocos bucles, y todos ellos se enlazan mediante un canal de comunicaciones muy rápido; también se encuentran enlazados con una consola central que se encarga de vigilar el comportamiento de cada uno de los controladores y de todo el sistema, en ella, un operador observa a través de monitores las condiciones del proceso, por medio de un teclado puede enviar comandos a los componentes del sistema y, si es necesario, asume la operación manual del control.

En un sistema de control distribuido, cada uno de sus módulos inteligentes o subsistemas participan en la toma de decisiones, adquiriendo, procesando y distribuyendo información de manera individual. La disposición de inteligencia en el propio módulo permite que se le adjudiquen tareas que pasan a su control y responsabilidad. Además en el caso de que se presente alguna falla en uno de los controladores, ésta afectará sólo a uno, o en el peor de los casos, a varios lazos de control. En la figura No.1.2 puede observarse de manera esquemática un sistema de control distribuido.

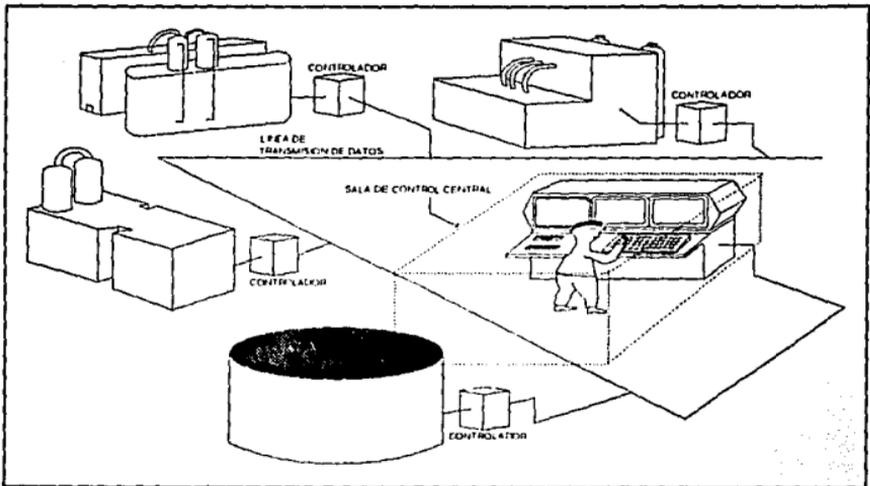


Fig.1.2 Control distribuido.

Un sistema de control distribuido está formado por tres componentes principales^[2]:

1.- Los controladores, basados en microprocesadores, con algoritmos de control digital directo, y de distintas capacidades de control de lazo.

2.- El sistema de comunicación hombre-máquina, basado normalmente en pantallas de color.

3.- El sistema de comunicación interno entre controladores, con la interfase hombre-máquina, con otros módulos o subsistemas y con las unidades de control central.

El sistema de control distribuido, además de tener los tres elementos anteriores, para cumplir su cometido debe reunir las siguientes características:

1) Modularidad. El sistema debe ser capaz de conformarse con sólo la cantidad necesaria de elementos para satisfacer los requerimientos del proceso a controlar, sin un exceso o insuficiencia de recursos. Esta modularidad se debe presentar tanto en los elementos físicos como en los programas y estructuras del sistema, pero ésta es más necesaria en el Hardware, debido a su mayor costo y estructura rígida.

2) Reconfigurabilidad. Esta característica se refiere principalmente al Software del sistema, y es la exigencia de que éste pueda reestructurarse para realizar un mejor control del proceso, pudiendo aprovechar las experiencias y el mejor conocimiento que de tal proceso se van generando y que tienen un carácter progresivo.

3) Extensibilidad. Apoyado en la modularidad, el sistema debe ser capaz de ampliarse (o reducirse) a medida que se incorporen nuevos procesos a la automatización.

4) Compatibilidad. Los equipos de control constantemente van evolucionando, produciéndose equipos nuevos que deben ser compatibles con sus predecesores, comunicables entre sí, y utilizar

programas con las mismas características aunque más potentes. La sustitución de un equipo por otro más moderno, cuando se haga, debe realizarse aprovechando al máximo el trabajo y las instalaciones anteriores.

5) Confiabilidad. Las fallas en los sistemas de control son condiciones anormales de funcionamiento que se manifiestan como errores, un error es la desviación del comportamiento normal de funcionamiento a un comportamiento en el que los valores obtenidos difieren de los valores esperados. Los errores provocan inestabilidad en el sistema debido a la poca seguridad de las condiciones de funcionamiento, lo que trae consigo una baja confiabilidad^[5], entendiéndose ésta como una función del tiempo $R(t)$, y que representa la condición de probabilidad de que el sistema permanezca funcionando el intervalo de tiempo $[0, t]$, dado que comenzó a operar en el tiempo $t=0$. Por otra parte, en grandes instalaciones el costo del sistema de control llega apenas al 5% del valor total de las instalaciones, sin embargo una falla grave del mismo puede producir pérdidas muchas veces superiores a su valor. Es por lo anterior que un sistema de control debe ser capaz de funcionar sin fallas, o que si éstas se producen, sean rápidas de reparar y no afecten el funcionamiento de la instalación, manteniendo con ello su confiabilidad.

6) Facilidad de mantenimiento. La disponibilidad de un sistema se entiende como una función del tiempo $A(t)$, y que representa la probabilidad de que el sistema esté operando el instante de tiempo t , si el límite de ésta función existe cuando t tiende a infinito, éste expresa la fracción de tiempo en la que el sistema es útil^[5]. Actividades como el mantenimiento preventivo y reparaciones reducen el tiempo en el que el sistema se encuentra disponible. Por lo anterior, un sistema de control exige que el mantenimiento que haya

de realizarse sea fácil y rápido de llevar a cabo para que, de esta manera, la disponibilidad del sistema sea máxima.

Es evidente que con un control de tipo distribuido, teniendo controladores dedicados a cada proceso, es más fácil lograr cumplir con las características antes mencionadas, haciéndolas extensibles a cada uno de éstos submódulos de control.

I.1.3 CONTROLADORES.

Una definición general de un controlador es aquella que lo enuncia como una máquina de procesamiento secuencial que ejecuta una serie de instrucciones (programa) para monitorear alguna parte del mundo externo y desarrollar acciones específicas basadas en sus instrucciones y en el monitoreo del medio ambiente⁽⁶⁾. Tal controlador se representa en la figura No.I.3. Como se observa, la interacción con el medio ambiente se lleva a cabo a través de unidades de entrada/salida (I/O), y la ejecución de las instrucciones es realizada por una unidad procesadora.

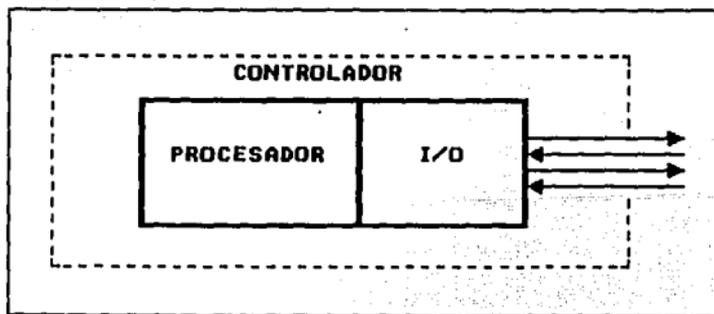


Fig.I.3 Representación general de un controlador.

Desde que apareció el primer controlador durante los 70's, éstos han tenido un constante desarrollo aumentando su sofisticación y posibilidades de aplicación. En un principio las entradas/salidas no pasaban de cuatro, y su nivel de procesamiento era muy pobre; con el avance de los microprocesadores y de los dispositivos electrónicos se ha llegado en la actualidad a tener módulos de entrada/salida de hasta 64 puntos en una sola tarjeta. El nivel y velocidad de procesamiento también han aumentado teniéndose velocidades de procesamiento en el rango de 16-30 MHz. Los controladores también cuentan con canales de comunicación de alta velocidad para comunicarse entre sí y con estaciones de control que vigilan su operación.

En la actualidad la mayoría de los controladores se diseñan de manera modular, configurándose en base a tarjetas electrónicas que se agrupan interconectándose entre sí por medio de buses, y en la proporción que requiera el proceso o unidad a controlar. Existen así tarjetas de unidad central de procesamiento (CPU), de memoria, de entradas y salidas analógicas y digitales de distinto tipo, y de interfases de distintos tipos, incluidas las de los canales de comunicación. En la figura No.I.4 se ilustra la configuración general de un controlador.

Cada controlador realiza una serie de funciones entre las que destacan las siguientes:

- La adquisición de datos: el sistema recoge las señales suministradas por los sensores a través de las unidades de entrada, transformándolas en valores digitales si son analógicas, y las somete a los tratamientos necesarios: filtrado, compensación de temperatura, adecuación de unidades, estimación de gradientes, o las utiliza para calcular el valor de otras variables no medibles. También puede efectuar la compresión de datos para su almacenamiento, o la agrupación de valores y parámetros medidos en el mismo instante para establecer el estado del proceso en ese momento.

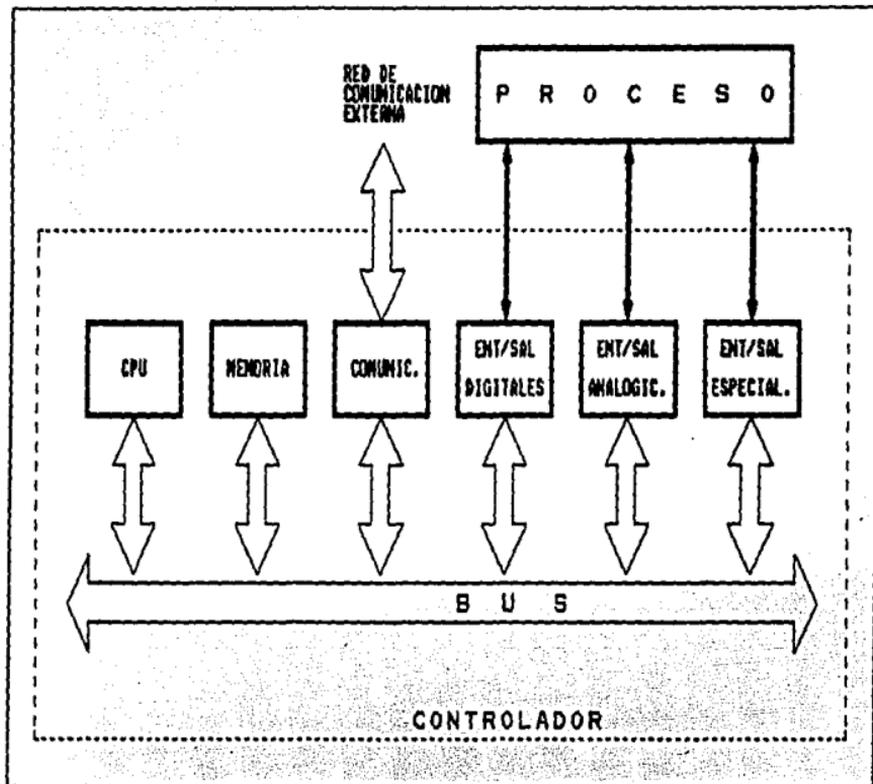


Fig.1.4 Configuración general de un controlador.

- El control de las variables del proceso: de acuerdo con las condiciones de operación y de los algoritmos fijados por los niveles superiores, se encarga de elaborar y obtener las órdenes que han de enviarse a los actuadores a través de las unidades de salida.

- Establecer comunicación con las demás partes del sistema: de acuerdo a las condiciones de operación y a los requerimientos de controladores superiores, se obtiene la información que ha de pasarse tanto a los niveles superiores como a otros dispositivos de control del mismo nivel para la acción coordinada de todos ellos.
- En adición a la actividad de procesamiento, que es la principal actividad de un controlador, existen rutinas de diagnóstico que activan, si es necesario, señales de alarma cuando los valores de las variables del proceso sobrepasan los límites fijados, o cuando se detectan fallas en el propio controlador.

Un punto que merece una especial atención es el referente al sistema de comunicación, ya que éste hace posible que unidades independientes se comuniquen y coordinen realizando un planteamiento global de control. A través de él se hace fluir la información tanto vertical como horizontalmente desde los centros superiores hasta el nivel más bajo de control, haciendo que en él resida el potencial de un sistema de control distribuido.

I.2 CONCEPTOS BASICOS EN LA INGENIERIA DE CONTROL.

I.2.1 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CONTROL CONVENCIONAL.

Los componentes de un sistema de control convencional se muestra en la figura No.I.5.

Los diferentes componentes de un sistema de control, pueden definirse de la siguiente manera:

PROCESO.- En la ingeniería de control, proceso se define como cualquier operación o serie de ellas que producen un resultado final deseado. Estas operaciones pueden ser mecánicas, eléctricas, reacciones químicas o cualquier combinación de ellas.

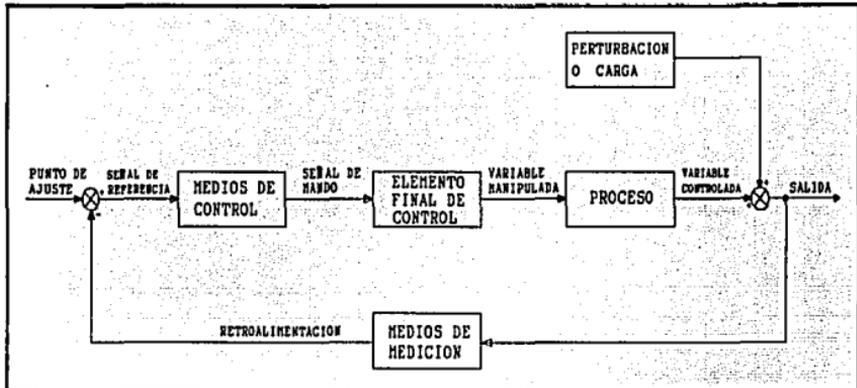


Fig.I.5 Representación general de un sistema de control.

MEDIOS DE MEDICION.- Es el conjunto de dispositivos de medición que tienen como finalidad el determinar y transmitir el valor de la variable controlada.

MEDIOS DE CONTROL.- Son los dispositivos mediante los cuales se puede efectuar una acción correctiva.

ELEMENTO FINAL DE CONTROL.- Es cualquier actuador o unidad de potencia que directamente modifica el valor de la variable manipulada.

PERTURBACIÓN.- Es cualquier señal que provoque cambios en las condiciones de operación del proceso.

I.2.2 CONCEPTOS BASICOS EN LA AUTOMATIZACION DE PROCESOS.

Existen una serie de conceptos dentro de la ingenieria de control que deben definirse y entenderse para poder realizar proyectos de automatización de procesos, estos son:

BUCLE, LAZO O ANILLO DE CONTROL.- Conjunto de elementos en circuito cerrado que hacen posible la realización de las operaciones de medida, comparación, cálculo y corrección.

MEDIO CONTROLADO.- Es el proceso, energía o material en el cual una variable va a ser controlada, y del que dicha variable es una condición o característica.

VARIABLE CONTROLADA.- Es la condición o cantidad que se mide y que será sometida al proceso de control.

VARIABLE MANIPULADA.- Es la condición o cantidad que es variada por el elemento final de control para afectar el valor de la variable controlada.

AGENTE O FLUIDO DE CONTROL.- Es el proceso, energía o material del cual la variable manipulada es una condición o característica.

SEÑAL ACTUADORA.- Así se denomina a la diferencia entre la señal de referencia y una señal relacionada con la variable controlada, en un tiempo determinado.

PUNTO DE AJUSTE (SET POINT).- Es el valor de referencia de la variable controlada y el que se pretende alcanzar mediante el sistema de control.

DESVIACIÓN O ERROR.- Es la diferencia entre el valor de la variable controlada y el valor de la variable controlada correspondiente al punto de ajuste, en un mismo instante de tiempo.

DESVIACIÓN ESTABLE(OFFSET).- Es la diferencia permanente entre el punto de control y el valor de la variable controlada correspondiente al punto de ajuste. Esta es una característica propia del controlador de acción proporcional.

ACCIÓN DE CORRECCIÓN.- Es la variación de la variable manipulada originada por el sistema de control y cuyo fin es disminuir la desviación o error.

CICLAJE.- Es una variación periódica de la variable controlada.

PUNTO DE CONTROL.- Es el valor de la variable controlada al cual opera el control automático para mantenerlo, bajo cualquier condición de ajuste fijado.

ESTADO ESTABLE.- Es la condición de cualquier variable que es mantenida a un valor constante, o a la que sólo se le permite una variación lenta y uniforme con el tiempo.

ESTADO TRANSITORIO.- Es un cambio no uniforme de el valor de la variable controlada, y generalmente implica una condición anormal en el sistema de forma temporal con corta duración.

PERMISIVO.- Es una señal que se crea como consecuencia de la evolución de una serie de condiciones y cuya función es activar una acción determinada (sistema de protecciones). También se define como una condición que debe cumplirse para que pueda realizarse una acción determinada.

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.

I.2.3 CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE UN PROCESO.

Todo proceso posee ciertas características fundamentales de retardo y demora en los cambios de sus variables, y que dificultan la acción de control. Estos efectos de retardo y demora se denominan **retrasos del tiempo del proceso** y son provocados por las siguientes propiedades del proceso:

CAPACIDAD.- Se refiere a la cantidad máxima de energía o material que puede ser almacenado entre los límites de una parte determinada del equipo, medida en unidades de cantidad.

CAPACITANCIA.- Es una medida de las características propias del proceso para mantener o transferir una cantidad de energía o de material con relación a una cantidad unitaria de alguna variable de referencia. En un proceso, una capacitancia grande es favorable para mantener constante la variable controlada a pesar de los cambios de carga que puedan presentarse. Sin embargo, esta misma propiedad hace que sea más difícil cambiar el valor de la variable controlada a uno nuevo, e introduce un retardo importante entre una variación del agente de control y el nuevo valor que toma la variable controlada.

RESISTENCIA.- Es la oposición parcial o total que el proceso presenta al flujo de energía o de material. Se mide en unidades de potencia requeridas para producir una unidad de cambio de flujo.

TIEMPO DE TRANSPORTE O TIEMPO MUERTO.- Es cualquier demora definida entre dos acciones relacionadas, y durante el cual el controlador no ejecuta ninguna acción. Se mide en unidades de tiempo.

AUTORREGULACION.- Es una reacción sostenida, inherente a un proceso, que ayuda o se opone al establecimiento del equilibrio.

Además de tomar en cuenta las propiedades anteriores, cuando se realiza la automatización de un proceso también se debe tomar en cuenta los cambios de carga en el mismo. La carga del proceso es la cantidad total del fluido o agente de control que el proceso requiere en cualquier momento para mantener unas condiciones de trabajo equilibrado. Los cambios de carga, necesarios para mantener el equilibrio del proceso, son generados por cambios en la variable controlada debido a alteraciones en las condiciones de operación. Las siguientes son las causas más comunes de cambios de carga:

- 1) Mayor o menor demanda del fluido de control por el medio controlado.
- 2) Variaciones en la calidad del fluido de control.
- 3) Cambios en las condiciones ambientales.

I.3 FORMAS DE CONTROL CONVENCIONALES.

La forma de control es la manera en que el sistema de control hace correcciones, relativas a una desviación. Visto de manera práctica, se considera que la forma de control de un controlador, es la manera en que éste cambia su salida en relación a una señal de error. Se debe aclarar, que la forma de control que se aplica a un proceso es el resultante de las características de operación de todos los elementos funcionales que componen el sistema de control.

Existen varias formas de control que pueden ser aplicadas individualmente o en distintas combinaciones, ello dependiendo de las características y desventajas propias de cada una, así como del proceso a controlar. Por lo general, mientras más difícil sea controlar un proceso, más complicada será la forma de control que mejor se adapte al control del proceso en cuestión.

Las siguientes, son las formas de control más ampliamente utilizadas:

- a) Control de dos posiciones (todo-nada).
- b) Control flotante.
- c) Control proporcional.
- d) Control integral (de reposición).
- e) Control derivativo.
- f) Control proporcional más integral (PI).
- g) Control proporcional más derivativo (PD).
- h) Control proporcional más integral más derivativo (PID).

En los siguientes apartados se expondrá brevemente el funcionamiento de cada una de las formas de control citadas.

I.3.1 CONTROL DE DOS POSICIONES (TODO-NADA).

En el control de dos posiciones, el elemento final de control es llevado rápidamente desde una de dos posiciones fijas, a la otra; tomando la variable controlada, un único valor. A esta forma de control también se le conoce como dentro-fuera (on-off), ya que en las dos posiciones, el elemento final de control generalmente esta abierto o cerrado respectivamente.

Usualmente, este tipo de control se emplea con una banda diferencial o zona neutra en la que el elemento final de control permanece en su última posición para valores de la variable comprendidos dentro de la banda diferencial. De esta manera, los ajustes

de control se realizan variando el punto de ajuste y la gama diferencial.

Este tipo de control funciona adecuadamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee un tiempo de retardo mínimo. Sin embargo, es evidente que con esta clase de control no pueden alcanzarse condiciones estables de energía de entrada y salida, y la variable controlada oscilará continuamente hacia arriba o hacia abajo del punto de ajuste. En la figura No. I.6 se puede apreciar la curva de respuesta representativa de este tipo de control aplicado a un intercambiador de calor.

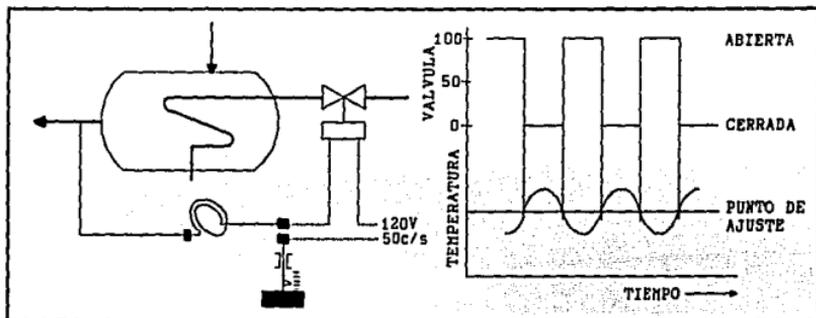


Fig. I.6 Control de dos posiciones.

I.3.2 CONTROL FLOTANTE.

Una variación del control de dos posiciones es el control flotante, en el cual el elemento final de control se mueve más lentamente de una posición a la otra. En este tipo de control, existe una relación predeterminada entre la desviación y la razón del desplazamiento del elemento final de control. También puede existir una zona neutra en la cual el elemento final de control permanece

en su última posición hasta que la variable controlada ha cambiado en una cantidad prescrita.

En el control flotante, al igual que en el control de dos posiciones, la variable controlada tiende a oscilar, pero en este caso las oscilaciones pueden reducirse al mínimo, si se elige adecuadamente la velocidad del elemento final de control para compensar las características del proceso.

Esta forma de control es adecuada cuando los cambios de carga en el proceso son lentos, pero si existen retardos de tiempo importantes o si los cambios de carga son muy rápidos, entonces ya no lo es. En la figura No.I.7 se puede apreciar la forma en que funciona este tipo de control.

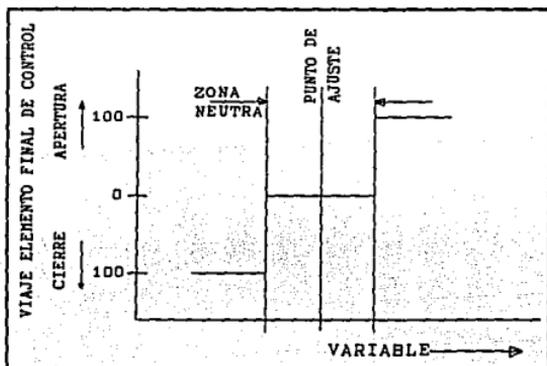


Fig.I.7 Control flotante.

I.3.3 CONTROL PROPORCIONAL.

En esta forma de control existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final

de control, tal como se muestra en la figura No.I.8. En otras palabras, el elemento final de control se mueve la misma cantidad para cada unidad de desviación; esto resulta multiplicando la señal de error por una constante proporcional, como se indica en la siguiente ecuación:

$$U_o(t) = K_p U_i(t)$$

donde: $U_o(t)$ = Señal de salida.

$U_i(t)$ = Señal de error.

K_p = Ganancia proporcional.

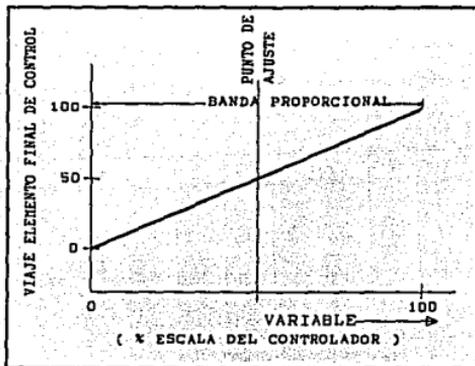


Fig.I.8 Control proporcional.

Un término importante en este tipo de control es la denominada **banda proporcional (BP)**, la cual se define como el porcentaje de variación de la variable controlada necesario para producir una carrera completa del elemento final de control (ver figura No.I.8). Generalmente, la banda proporcional se expresa en tanto por ciento de su campo de medida total. Así, por ejemplo, si un controlador tiene una banda proporcional de 20, significa que el 20% de la

señal de entrada permisible provocará un recorrido completo (sobre su rango) del elemento final de control. La fórmula de la banda proporcional es:

$$BP = \frac{100 \%}{Gc}$$

En la ecuación anterior se introduce el concepto de **ganancia del controlador (Gc)** que es el resultante de dividir el cambio en la salida del controlador entre el cambio a la entrada del mismo.

Este tipo de control responde únicamente a la cantidad de la desviación y no considera su duración, lo que da como resultado que siempre exista un error o desviación permanente (offset). En la figura No.I.9 se grafica la respuesta de un controlador proporcional a un cambio de carga escalonado para el ejemplo del intercambiador de calor.

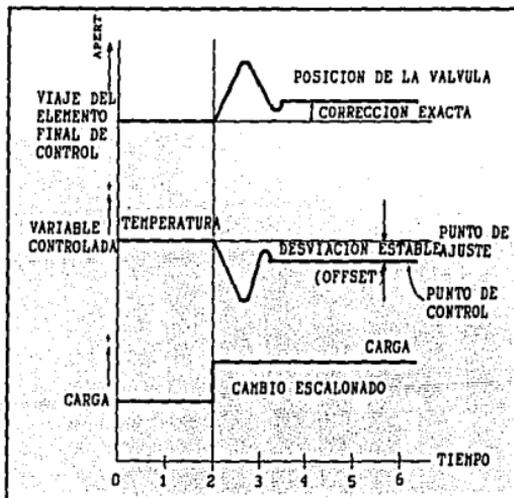


Fig.I.9 Respuesta de un controlador proporcional a un cambio de carga escalonado.

I.3.4 CONTROL INTEGRAL (DE REPOSICION).

La forma de control integral es aquella en donde el elemento final de control se posiciona de acuerdo con una función integral en el tiempo de la variable controlada. En términos matemáticos esto es:

$$U_o(t) = K_i \int_0^t U_i(t) dt + U_o(0)$$

donde: $U_o(t)$ = Salida del controlador.

K_i = $1/T_i$ Coeficiente integral.

T_i = Constante de tiempo de acción integral.

$U_o(0)$ = Valor acumulado.

$U_i(t)$ = Señal de error.

Analizando la ecuación anterior, se deduce que cuando la variable de entrada es cero no se modifica la variable de salida, ya que en este caso se anula la integral y el valor de salida es igual al valor acumulado $U_o(0)$. Si la variable de entrada es pequeña, entonces la variable de salida se modifica lentamente; y si esta es grande, entonces su variación es súbita. La rapidez de respuesta esta determinada por la constante de acción integral (T_i), pues cuanto mayor sea la constante de tiempo, tanto menor será el incremento de la variable de salida por unidad de tiempo para una variable de entrada determinada.

El control integral corrige por completo la desviación permanente que se presenta en el control proporcional, ya que su salida varia de acuerdo a la cantidad y duración de la desviación; es decir, la corrección de la posición del elemento final de control continúa mientras perdure la desviación y por lo tanto se produzca una corrección exacta, para cualquier cambio de carga. Sin embargo, la respuesta de esta forma de control es lenta debido a

que los cambios de signo en la señal de error no son considerados hasta que se cancele el error previo, momento en el cual se lleva a cabo la inversión en la acción de corrección. En la figura No.I.10 se grafica la respuesta de un control integral.

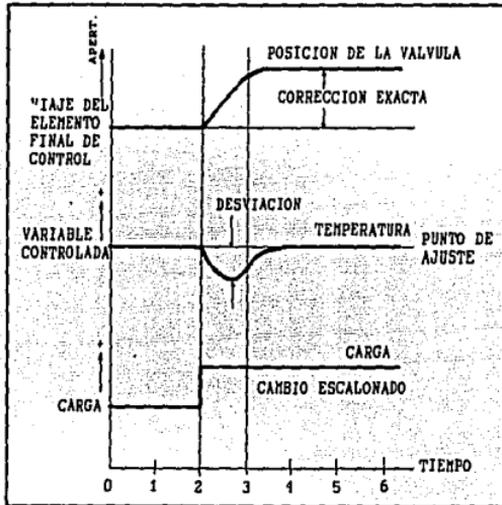


Fig.I.10 Respuesta de un controlador integral a un cambio de carga escalonado.

I.3.5 CONTROL DERIVATIVO.

El control derivativo es aquel en donde la acción correctiva es igual a una constante multiplicada por la derivada del error. Su expresión matemática es la siguiente:

$$U_o(t) = T_d \frac{d}{dt} U_i(t)$$

donde: $U_o(t)$ = Salida del controlador.

T_d = Constante de tiempo derivativo en minutos.

$U_i(t)$ = Señal de error.

Este tipo de control no puede aplicarse solo, ya que un error estable o constante tendría una derivada igual a cero y por lo tanto no habría acción correctiva. El control derivativo es adecuado cuando se desea aplicar una acción correctiva larga, al tiempo que se está formando el error, pues el valor de salida del controlador es proporcional a la velocidad de variación de la señal de error.

I.3.6 CONTROL PROPORCIONAL MAS INTEGRAL (PI).

Como se vió anteriormente, el control proporcional por si sólo responde únicamente a la cantidad de desviación y no toma en cuenta la duración de esta, lo que da origen a una desviación permanente (offset). Para corregir este defecto, se combina el control proporcional con el integral. El primero se encarga de que el sistema de control adquiera la velocidad de respuesta necesaria para actuar de inmediato cuando aparezca el error; con el segundo, el sistema adquiere la característica de eliminar la desviación permanente, ya que la corrección de la posición del elemento final de control continuará mientras perdure el error. Por lo tanto la combinación del control proporcional con el control integral da como resultado la obtención de un control sin error bajo todas las condiciones de carga. En la figura No.I.11 puede apreciarse la respuesta de este tipo de control para un cambio de carga escalonado.

La ecuación característica de esta forma de control es la siguiente:

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

donde: $U_o(t)$ = Salida del controlador.

K_p = Ganancia proporcional.

T_i = Constante de tiempo de acción integral.

$U_o(0)$ = Valor alcanzado por la salida antes de presentarse el error.

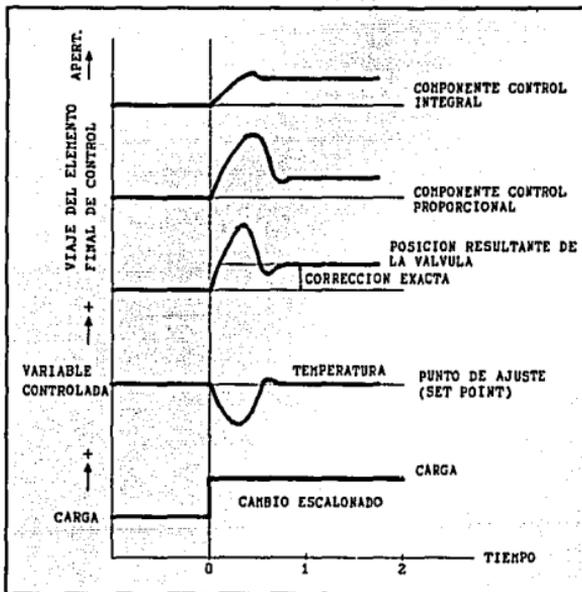


Fig.I.11 Respuesta de un controlador Proporcional más Integral (PI) a un cambio de carga escalonado.

I.3.7 CONTROL PROPORCIONAL MÁS DERIVATIVO (PD).

En esta forma de control existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento final de control. En otras palabras, entre más rápido varíe la variable controlada, más rápido se moverá el elemento final de control intentando corregir la desviación.

Debido a que este tipo de control tiene como característica el oponerse a todas las variaciones, provoca que el sistema de control sea muy estable; sin embargo, no logra eliminar la desviación permanente, característica del control proporcional. En la figura No.I.12 se ilustra la respuesta de esta forma de control a un cambio de carga escalonado.

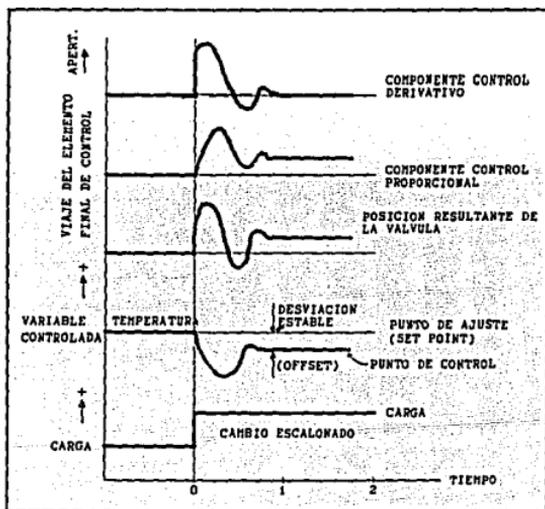


Fig.I.12 Respuesta de un control Proporcional más derivativo a un cambio de carga escalonado.

La expresión matemática de esta forma de control es la siguiente:

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

I.3.8 CONTROL PROPORCIONAL MAS INTEGRAL MAS DERIVATIVO (PID).

La combinación de las formas de control proporcional, integral y derivativo permite diseñar un sistema que aprovecha las ventajas que cada una ofrece:

- a) El control proporcional permite corregir la posición del elemento final de control en una cantidad proporcional a la desviación.
- b) El control integral permite eliminar la desviación estable originada por el control proporcional, ya que corrige la posición del elemento final de control en un coeficiente proporcional a la desviación.
- c) El control derivativo permite reducir la oscilación del sistema de control y alinea, de manera rápida, a la variable controlada.

La ecuación característica de esta forma de control es la siguiente:

$$U_o(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t U_i(t) dt + K_p \left[1 + \frac{T_v}{T_n} \right] U_i(t) + T_d \frac{d[U_i(t)]}{dt} + U_o(0)$$

como se observa, la ecuación se integra por cuatro sumandos, el primero corresponde a la parte integral; el segundo, corresponde a la parte proporcional; el tercero, corresponde a la parte derivativa; y el cuarto, corresponde al valor acumulado.

Al aplicar esta forma de control, la variable controlada tiende a desviarse menos del punto de ajuste (set point) y retorna de manera más rápida a dicho valor. Este tipo de control se emplea principalmente en procesos con grandes retrasos entre la señal de entrada y la respuesta del sistema. En la figura No.I.13 se grafica la respuesta de un controlador PID para un cambio de carga escalonado.

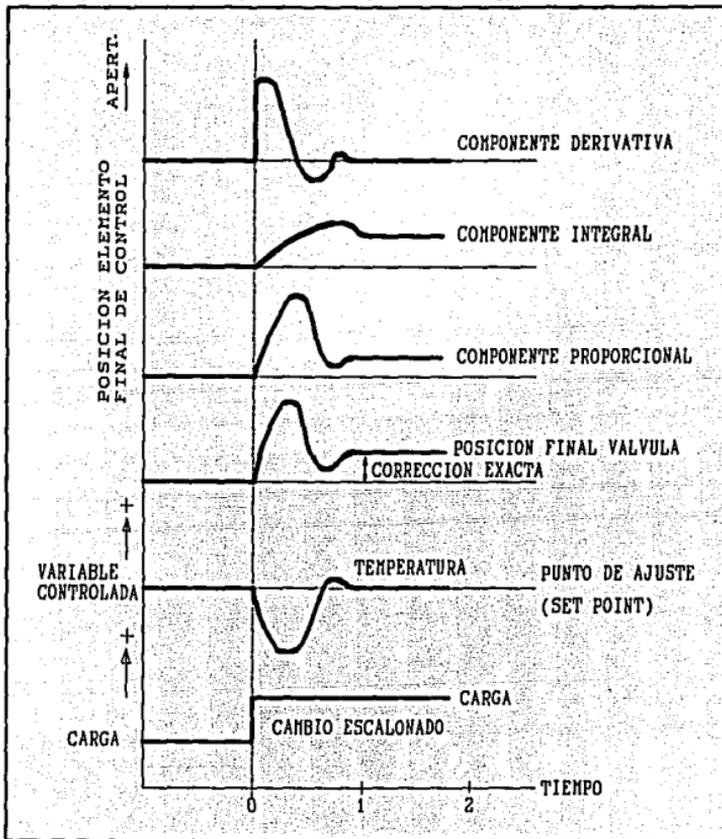


Fig. I.13 Respuesta de un controlador PID a un cambio de carga escalonado.

BIBLIOGRAFIA

1. Padilla, Lares Franciso.
"Diseño y configuración de control de procesos";
DEPTAC, México; 1992.
2. Nó, José.
"Sistemas distribuidos de control (SDC) de procesos";
Automática e instrumentación,
Informes 87-88, pp. 101-130.
3. "Sistemas de control distribuido con actuadores
inteligentes"; Panorama, Automática e instrumentación,
Enero 1990, No.198, pp. 97-100.
4. Moore, J.A.
"Digital control devices";
ISA Press, USA; 1986.
5. Siewiorek, P. Daniel.
"Architecture of fault-tolerant computers";
Computer, August 1984, pp. 9-17.
6. Brower, Michael J.
"Trends in programmable control";
Plant Engineering,
May 25, 1989, pp. S3-S8.
7. Creus, Antonio.
"Instrumentación Industrial";
Alfaomega-Marcombo; 4ª Edición;
México, 1992.

ANÁLISIS Y DISEÑO
DE SISTEMAS DE CONTROL
EMPLEANDO LÓGICA DIFUSA

II.1 LA LÓGICA DIFUSA.

La imprecisión y la incertidumbre son conceptos inherentes a la naturaleza inexacta del mundo real y por ende están íntimamente ligados al pensamiento humano. Debido a ello, nuestra manera de razonar generalmente es en función de aseveraciones vagas, afirmaciones inciertas y juicios de valor⁽¹⁾. Esta inexactitud y vaguedad no es captada en la lógica tradicional (crisp logic) —lógica Aristotélica o lógica bivalente— en donde existen tan sólo dos premisas: completamente verdadero o completamente falso.

En la lógica tradicional los límites de cada conjunto están clara y rigurosamente determinados, así cada elemento está completamente incluido o completamente excluido de un conjunto, y sus condiciones de pertenencia se representan gráficamente mediante una función escalón⁽²⁾. Un ejemplo de lo anterior se muestra en la figura No.II.1, en donde se representa el conjunto "hombres altos".

Observando la figura No.II.1, se puede preguntar si la sentencia "Jorge es un hombre alto" es falsa o verdadera; y se debe seleccionar sólo una u otra alternativa. Por ejemplo, si Jorge mide 1.80m, entonces la sentencia es completamente verdadera; pero si Jorge mide 1.79m, entonces la sentencia es completamente falsa. Sin embargo, ¿Jorge seguirá siendo alto, aún si fuera 5cm o 10cm más

bajo?. En este caso, tan sólo un centímetro hace la diferencia. Claramente se observa que ésta es una situación inusual y poco apegada a la realidad.

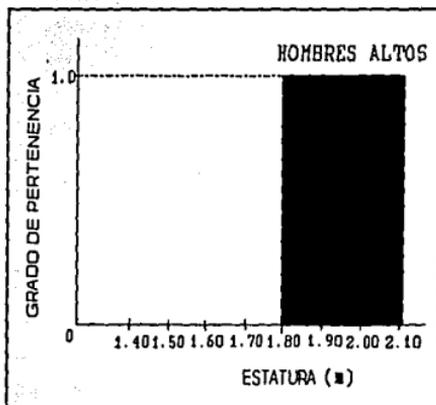


Fig.II.1 Ejemplo de un conjunto tradicional, "hombres altos".

Esta manera de razonar ha creado un sinnúmero de paradojas. Una de las más populares es la vieja paradoja griega del cretence que miente⁽¹⁾. Un cretence afirma: "todos los cretences mienten". ¿Miente entonces el cretence? Si el cretence está diciendo la verdad entonces miente y si miente entonces dice la verdad. Existe una contradicción: la afirmación resulta ser a la vez falsa y verdadera.

Para resolver problemas como los anteriores y apegarse más a la inexactitud del mundo real, así como a la manera de razonar del

hombre, se creó la denominada **lógica difusa**¹ (fuzzy logic) que se basa en la teoría de los conjuntos difusos originalmente propuesta por Lotfi A. Zadeh en 1965^[3], y que tiene como antecedente a la lógica multivalente.

Si la lógica tradicional se define como la ciencia que trata de los principios formales del razonamiento, entonces la **lógica difusa se puede definir como la ciencia que trata de los principios formales del razonamiento aproximado, en donde el razonamiento preciso es un caso extremo y particular**^[4]. En otras palabras, la lógica difusa es una extensión de la lógica clásica capaz de tratar con la imprecisión y la incertidumbre^[5].

Básicamente la lógica difusa extiende la lógica tradicional en dos aspectos: en primer lugar los conjuntos son calificados cualitativamente usando términos lingüísticos, por ejemplo: alto, caliente, moderado, lento, usualmente, casi nunca, casi siempre, etc; y los elementos de estos conjuntos se asignan por grados de pertenencia, es decir, la condición de pertenencia es una curva y no un escalón.

Así pues, en lógica difusa una premisa se califica en grados de verdad (en el rango de 0 a 1), lo que permite que un elemento sea a la vez parcialmente miembro de un conjunto dado y parcialmente no miembro de ese mismo conjunto.

La transición de un conjunto difuso a otro se realiza de manera gradual y no abrupta como sucede en los conjuntos de la lógica tradicional. Por ejemplo, retomando el conjunto "hombres altos", una representación difusa del mismo podría ser la mostrada en la figura No.II.2.

¹ Comúnmente en los textos en español se realiza la traducción de "fuzzy logic" como "lógica borrosa", pero considerando que la lógica en cuestión es una extensión de la lógica tradicional, el término "lógica difusa" resulta ser el más adecuado y el que define con mayor acierto el significado de éste nuevo concepto.

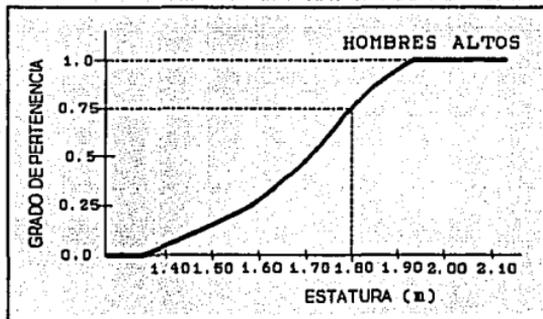


Fig.II.2 Representación de un conjunto difuso, "hombres altos".

Como se observa, en este caso la sentencia "Jorge es alto" puede tener diferentes grados de verdad, dependiendo de la estatura que Jorge tenga; por ejemplo, si él mide 1.80m, entonces la sentencia tiene un grado de verdad de 0.75 y, a la vez, un grado de falsedad de 0.25. En otras palabras, lo anterior significa que en lógica difusa un elemento puede pertenecer, al mismo tiempo, a un conjunto y al complemento de ese conjunto, con la única restricción de que los grados de pertenencia de un objeto a conjuntos complementarios sumen uno.

Utilizando esta lógica también se resuelve la paradoja del cretence mentiroso, ya que la respuesta a si el cretence miente, o no, puede ser medio verdadera y medio falsa; es decir, el cretence es mentiroso en un grado de verdad de 0.5, y es veraz en un grado de verdad de 0.5.

II.1.1 FUNCIÓN DE MEMBRESÍA Y VARIABLE LINGÜÍSTICA.

El concepto central para aplicar la lógica difusa es la denominada **función de membresía** (membership function), que no es más que la curva que determina numéricamente el grado en que un elemento pertenece a un conjunto difuso^[6]. Esta función generalmente se denota con la letra griega " μ " y toma valores entre 0 y 1. Su representación se realiza de la siguiente manera:

$$\mu_A(x) \in [0,1]$$

expresión que indica que el grado de pertenencia del elemento x en el conjunto difuso A se determina a través de la función $\mu_A(x)$, y que este valor está dentro del rango de 0 a 1, inclusive; en donde 0 indica total no pertenencia (o completamente falso) y 1 indica total pertenencia (o completamente verdadero).

En sí, la función de membresía representa una transformación de una visualización estricta del mundo real a una visualización difusa del mismo. Para realizar esta transformación la lógica difusa introduce un nuevo concepto: la variable lingüística.

Una **variable lingüística**, como su nombre lo sugiere, es una variable cuyos valores no son números sino palabras o sentencias expresadas en un lenguaje natural o sintético^[11]. Cada sentencia representa un conjunto difuso, y no un valor numérico específico; por ejemplo, si se desea representar de manera difusa la velocidad de un automóvil en la ciudad, entonces se puede crear una variable lingüística a la que se denomine "velocidad", sus valores podrían ser los conjuntos difusos: "rápido", "despacio", "muy rápido", "muy despacio" y "moderada". En general, los valores de una variable lingüística se pueden generar a partir de un término primario, por ejemplo rápido, su antónimo, despacio, y una colección de modificadores, muy, no muy, algo, moderadamente, etc. El rango de valores para cada conjunto difuso se establece en base a la experiencia,

así para este caso, si se considera un universo de discurso de 0 a 160 Km/hr, el rango para cada conjunto difuso podría ser:

Velocidad	Límite inferior	Límite superior
Muy despacio	0 Km/hr	50 Km/hr
Despacio	20 Km/hr	80 Km/hr
Moderada	50 Km/hr	110 Km/hr
Rápido	80 Km/hr	140 Km/hr
Muy rápido	110 km/hr	160 km/hr

como se observa, un valor de velocidad de, por ejemplo, 65 Km/hr esta considerado dentro de dos conjuntos: moderada y rápido; esto permite que a dicha velocidad se le considere como moderada tendiendo a rápido o rápido tendiendo a moderada, lo cual aparentemente es ambiguo, sin embargo refleja nuestra manera de razonar, la cual no puede representarse en una lógica donde sólo existen dos valores 0 ó 1.

La función de membresía para la variable lingüística "velocidad", podría ser la mostrada en la figura No.II.3. Como se observa, en ella se representan los conjuntos difusos que la conforman. Esta función permite asignar el grado (entre cero y uno) en que cada elemento comprendido dentro del universo de discurso en cuestión (0 a 160 Km/hr) pertenece a cada conjunto difuso. También se observa que cada conjunto se traslapa con su vecino, lo cual hace posible que un elemento dado pertenezca al mismo tiempo a dos conjuntos diferentes, pero en distinto grado.

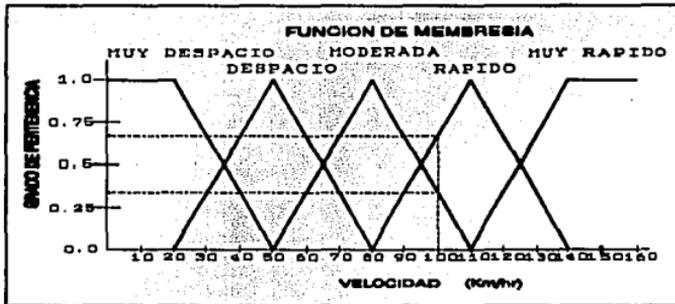


Fig.II.3 Función de membresía para la variable lingüística "velocidad".

Como ejemplo del uso de la función de membresía mostrada en la figura No.II.3, a continuación se determina el grado en que un valor de velocidad de 100 Km/hr pertenece a cada conjunto difuso, esto es:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{MUY DESPACIO}}(100 \text{ Km/ Hr}) &= 0 \\ \mu_{\text{DESPACIO}}(100 \text{ Km/ Hr}) &= 0 \\ \mu_{\text{MODERADA}}(100 \text{ Km/ Hr}) &= 0.3 \\ \mu_{\text{RAPIDO}}(100 \text{ Km/ Hr}) &= 0.7 \\ \mu_{\text{MUY RAPIDO}}(100 \text{ Km/ Hr}) &= 0 \end{aligned}$$

lo anterior indica que 100 Km/hr pertenece a dos conjuntos diferentes: moderada y rápido, pero en distinto grado: 0.3 y 0.7 respectivamente. Interpretando esto, se podría decir que un vehículo que viaja a 100 Km/hr va rápido pero tendiendo a una velocidad moderada.

En la figura No.II.4 se puede apreciar una representación gráfica de la variable velocidad, en la que se aprecia mejor los distintos conjuntos que la conforman, así como el grado en que algunos valores de velocidad pertenecen a cada conjunto difuso.

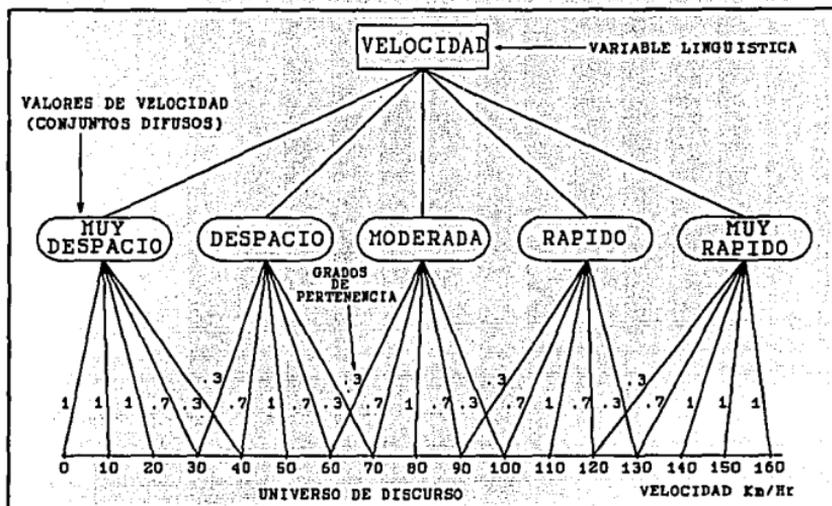


Fig.II.4 Representación gráfica de la variable lingüística velocidad.

II.1.2 OPERADORES LOGICOS.

Al igual que la lógica clásica, la lógica difusa también posee operadores básicos para realizar operaciones entre variables. Estos operadores son los mismos: AND, OR, y NOT; aunque su definición es diferente. De acuerdo con Lotfi A. Zadeh^[3] la definición de estos operadores es la siguiente:

AND. El grado en que un elemento x pertenece a ambos conjuntos A y B es igual al más pequeño de los grados de membresía individuales, esto es:

$$\mu_{A \wedge B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

OR. El grado en que un elemento x pertenece a cualquiera de los conjuntos difusos A o B es igual al más grande de los grados de membresía individuales, esto es:

$$\mu_{A \vee B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

NOTA. El grado en que el elemento x pertenece al complemento del conjunto difuso A es igual a uno menos el grado en que x pertenece al conjunto A , esto es:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

Como se observa, los operadores son equivalentes en ambas lógicas, con la limitación de que en la lógica tradicional μ sólo toma el valor de 0 ó 1.

Las posibilidades de aplicación de estos conceptos son muchas y diversas; en éste estudio se ha elegido, quizá, el área en donde la lógica difusa ha encontrado mayor aplicación y el terreno más idóneo para su explotación: el control automatizado.

II.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DIFUSO.

En los sistemas de control tradicional más utilizados, como los mencionados en la sección I.3, el control se ejerce aplicando una fórmula matemática directa. Sin embargo, en muchos casos las leyes

de control del proceso en cuestión son difíciles de obtener o la relación matemática resultante es demasiado compleja. Por otra parte, puede ser que las condiciones de operación del proceso no sean totalmente conocidas y la experiencia del operador influye mucho en la ejecución del control.

Debido a que la lógica difusa crea sus propias fuentes de control al combinar reglas y conjuntos difusos, ésta permite al diseñador construir sistemas de control aún cuando su entendimiento del comportamiento matemático del sistema en cuestión sea incompleto⁽¹²⁾.

En los casos en que existe una alta no linealidad entre las variables del proceso, en que el modelo matemático del proceso es incompleto, éste no existe, o existe pero es difícil de entender, es cuando la lógica difusa es capaz de describir el proceso y las leyes de control por medio de "reglas de sentido común" que se refieran a cantidades indefinidas (conjuntos difusos). Con reglas de la forma "si..., entonces..." se puede describir la estrategia de control e implementar, con ellas, un algoritmo donde las variables objeto de control se transforman en variables lingüísticas. De esta manera, al tomar decisiones en función de los diferentes estados de un proceso, se manejan términos cualitativos en lugar de términos cuantitativos.

La estructura básica de un sistema de control difuso se integra por tres etapas fundamentales: **difusión (fuzzification), evaluación de reglas (rule evaluation), y restricción (defuzzification)**². En donde las funciones de membresía son los medios a través de los cuales se transforman los valores numéricos concretos de una variable en valores numéricos difusos que pueden ser manipulados,

² La traducción al español de las palabras fuzzification y defuzzification generalmente se realiza como emborronamiento y desemborronamiento, pero de acuerdo al lineamiento dado en la sección II.1, considero más adecuado los términos difusión y restricción para definir estos conceptos.

incluso, por microprocesadores pequeños. En la figura No.II.5 se muestra la estructura básica de un sistema de control difuso.

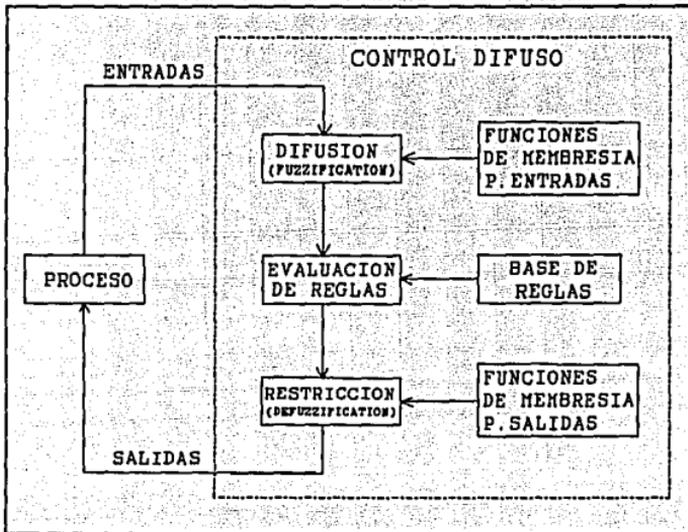


Fig.II.5 Estructura básica de un sistema de control difuso.

A continuación se hace una breve descripción de cada una de las etapas que componen un sistema de control difuso.

II.2.1 DIFUSION (FUZZIFICATION).

El proceso de difusión (fuzzification) consiste en tomar en tiempo real el valor de entrada de la variable en cuestión y combinarlo con la función de membresía de su variable lingüística correspondiente para producir un valor difuso de entrada a la siguiente

etapa del controlador difuso, la evaluación de reglas^[2]. En otras palabras, la difusión es una transformación de un valor numérico preciso dentro de cierto universo de discurso a un valor numérico difuso de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos en que se ha dividido ese mismo universo de discurso. Una manera gráfica de representar esta transformación se ilustra en la figura No.II.6.

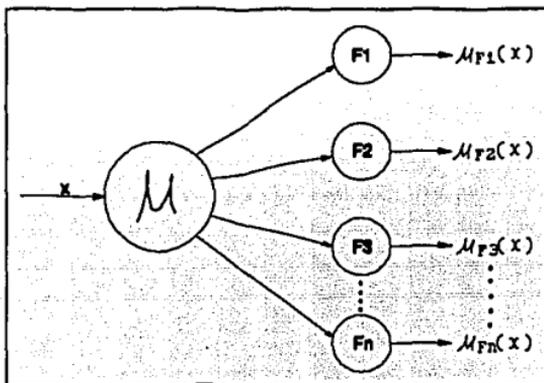


Fig.II.6 Proceso de difusión.

en donde:

μ = Es la función de membresía que relaciona los valores numéricos de la variable de entrada con sus correspondientes valores numéricos difusos.

F_i = Cada uno de los conjuntos difusos de que consta una variable lingüística.

x = Valor numérico de la variable de entrada.

$\mu_{F_i}(x)$ = Valor numérico difuso, que indica el grado en que el valor numérico x pertenece al conjunto difuso i .

$i = 1, 2, 3, \dots, n$.

n = Número de conjuntos difusos de la variable lingüística.

Como se puede apreciar, se ingresa a la etapa de difusión con el valor numérico X de la variable en cuestión, este valor se relaciona a través de la función de membresía con cada uno de los conjuntos difusos que la conforman, para obtener a la salida un valor de pertenencia a cada uno de ellos.

Para ejemplificar este proceso, se puede utilizar la función de membresía ilustrada en la figura No.II.7, en donde se representa la variable lingüística temperatura para un acondicionador de aire doméstico.

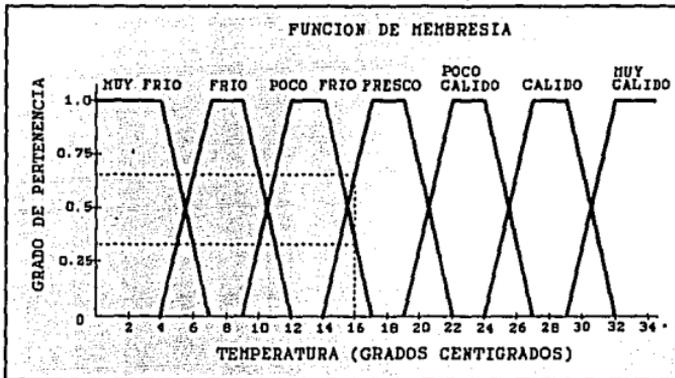


Fig.II.7 Función de membresía para la variable "temperatura".

Como se observa, cada valor de temperatura posee un grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos que componen la función de membresía. Así por ejemplo, para obtener el valor difuso de 16 °C, se ingresa a la función a través del eje X en el punto en donde se encuentra este valor y se traza una recta perpendicular que intercepta a los conjuntos difusos; posteriormente se trazan rectas paralelas al eje X a partir de los puntos de intersección con cada conjunto difuso; los puntos en donde dichas rectas cortan

al eje Y indican el grado en que 16 °C pertenece a cada conjunto difuso. En este caso, la recta perpendicular al eje X sólo cruza dos conjuntos difusos, con lo que se obtienen dos grados de pertenencia a dos conjuntos diferentes, esto es:

$$\mu_{\text{POCO FRIO}}(16 \text{ °C}) = 0.3$$

$$\mu_{\text{FRESCO}}(16 \text{ °C}) = 0.7$$

para los demás conjuntos difusos el grado de pertenencia es cero, puesto que la recta perpendicular al punto 16 °C no los corta en ningún punto. Con la obtención de estos valores concluye la etapa de difusión.

II.2.2 EVALUACION DE REGLAS (RULE EVALUATION).

Desde un punto de vista general, la evaluación de reglas involucra una base de reglas difusa y una máquina de inferencias difusa. La base de reglas elaborada generalmente junto con un experto en el área de conocimiento del problema en cuestión, consiste de una serie de sentencias condicionales expresadas de la forma: **SI (IF) un conjunto de condiciones se satisface, ENTONCES (THEN) un conjunto de acciones se ejecutan**; constituyendo un medio natural a través del cual se pueden implementar las estrategias de control a partir del conocimiento de los expertos y operadores del proceso a controlar. A la parte condicional se le denomina antecedente y a la parte de la acción se le denomina conclusión (o consecuente) de la regla⁽⁹⁾. El antecedente de una regla de control difuso expresa el estado en el que se deben encontrar las variables del proceso para activarla, mientras que su conclusión especifica los cambios que deben llevarse a cabo cuando se activa dicha regla.

Los antecedentes y las conclusiones de cada regla se pueden combinar con las operaciones lógicas AND, OR o NOT. Un ejemplo, para

un sistema de dos entradas y una salida, múltiples-entradas-una-salida (MISO multiple-input-single-output), podría ser la regla condicional "si X es A y Y es B, entonces Z es C"; en donde se debe especificar el universo de discurso numérico para las variables difusas X, Y y Z. Así mismo, para cada universo de discurso de las variables difusas X y Y se debe especificar una librería apropiada de valores (conjuntos difusos): A_1, A_2, \dots, A_n ; B_1, B_2, \dots, B_m ; respectivamente. Similarmente se debe construir una librería de conjuntos difusos para la variable de salida Y: C_1, C_2, \dots, C_k . En cada caso los conjuntos difusos contiguos deben traslaparse de un 25 a 50 por ciento para obtener resultados óptimos, según lo demuestra empíricamente Bart Kosko⁽¹¹⁾.

Una vez definida la librería de conjuntos difusos para cada variable, la construcción de las reglas se realiza escogiendo combinaciones apropiadas de conjuntos difusos de entrada y salida, relaciones que constituyen una estimación difusa que expresa cómo la salida depende funcionalmente de la entrada sin requerir de una descripción matemática. Así, una regla difusa de la forma "si A entonces B" representa un mapeo, o una asociación difusa entre una parte del espacio del universo de la variable de entrada con una parte del espacio del universo de la variable de salida. Al antecedente A de la regla se le denomina asociante de entrada, mientras que a la conclusión B de la regla, se le denomina asociante de salida⁽¹¹⁾. Una manera gráfica de representar esta asociación o mapeo se ilustra en la figura No. II.8. En donde, como se observa, la regla R_i mapea o asocia el conjunto difuso de entrada A_i con el conjunto difuso de salida B_i en los universos de discurso U y V respectivamente.

Expresado en términos de la ingeniería de control, el antecedente se relaciona con el estado actual de la variable de control, mientras que la conclusión se relaciona con el incremento o decremento que debe sufrir la variable manipulada para reducir la desviación o error.

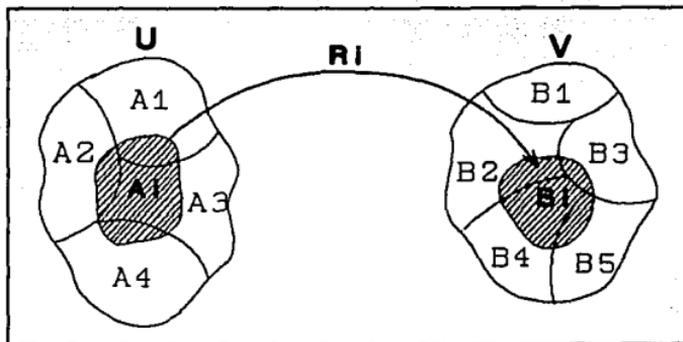


Fig.II.8 Representación de un regla como una asociación difusa.

La máquina de inferencias es un intérprete de la base de reglas, su tarea consiste en calcular una conclusión numérica difusa a partir de los valores difusos de entrada. Para realizar esto, la máquina de inferencias emplea un mecanismo de inferencias difuso que es una lógica de toma de decisiones que emplea reglas de la base de reglas para obtener una conclusión difusa correspondiente a los valores que han ingresado al sistema de control y que han pasado, en primera instancia, por la etapa de difusión.

El mecanismo de inferencias empleado en los controladores difusos es generalmente mucho más sencillo que el empleado en los sistemas expertos convencionales, ya que la conclusión de cada regla no se aplica como antecedente de alguna otra; y por lo cual en los controladores difusos no se emplea el mecanismo de encadenamiento para realizar una inferencia. En un sistema difuso se emplea un mecanismo de inferencias de búsqueda hacia adelante y en un sólo sentido (one-level forward data-driven inference)⁽¹⁰⁾.

Los criterios para realizar inferencias en lógica difusa son dos: el modus ponens generalizado (generalized modus ponens GMP) y el modus tollens generalizado (generalized modus tollens GMT)⁽¹⁰⁾. Estos criterios se muestran a continuación:

premise 1: X es A'
premise 2: si X es A entonces Y es B (GMP)
 consecuencia: Y es B'.

premise 1: Y es B'
premise 2: si X es A entonces Y es B (GMT)
 consecuencia: X es A'.

donde A, A', B y B' son valores (conjuntos) difusos de las variables lingüísticas X y Y; las proposiciones arriba de la línea son las premisas; y las proposiciones abajo de la línea son las conclusiones. En los sistemas de control difuso el proceso de inferencias generalmente se realiza utilizando implicaciones del tipo modus ponens generalizado (GMP). Un ejemplo de la aplicación de este criterio para un sistema de dos entradas y una salida (MISO multiple-input-single-output) es:

entrada: X es A' y Y es B'
 R₁: si X es A₁ y Y es B₁, entonces Z es C₁;
 OR R₂: si X es A₂ y Y es B₂, entonces Z es C₂;

 OR R_n: si X es A_n y Y es B_n, entonces Z es C_n;

Z es C'

donde X , Y , y Z son variables lingüísticas representando dos variables de estado y una variable de control, respectivamente; A_i , B_i , y C_i , son valores (conjuntos difusos) de las variables X , Y , y Z en los universos de discurso U , V , y W , respectivamente; con $i = 1, 2, 3, \dots, n$; y con todas las reglas ligadas con el conector OR constituyendo una base de reglas.

El modo de implementar lógicamente una regla de control difuso de la forma "si X es A_i y Y es B_i , entonces Z es C_i "; es a través de una implicación difusa o relación difusa (fuzzy relation) R_i , y se define como:

$$\begin{aligned} \mu_{R_i} &\triangleq \mu_{(A_i \wedge B_i \rightarrow C_i)}(u, v, w) \\ &= \min [\mu_{A_i}(u), \mu_{B_i}(v)] - \mu_{C_i}(w) \end{aligned}$$

donde:

$A_i \wedge B_i$ es un conjunto difuso $A_i \times B_i$ en $U \times V$;

$R_i \triangleq (A_i \wedge B_i) \rightarrow C_i$ es una implicación difusa o relación

en $U \times V \times W$;

- denota la función de implicación difusa.

En general un sistema de control difuso procesa en paralelo un número de reglas (o implicaciones difusas) n : R_1, R_2, \dots, R_n . Así es que, en el caso de un sistema de dos entradas y una salida MISO, para cada par de entradas A y B que ingresan al sistema sistemáticamente se activa cada regla almacenada en la base de reglas

pero en grados diferentes. De tal forma que la salida del sistema, si la conclusión de cada regla es C_1, C_2, \dots, C_n ; es igual a la suma de los grados parciales de verdad de cada regla, esto es:

$$C' = w_1 C_1 + w_2 C_2 + \dots + w_n C_n$$

donde w_i refleja el grado de credibilidad, validez o influencia de la regla R_i en la conclusión difusa C' . En la figura No.II.9 se ilustra una representación general de este proceso para el caso de un sistema de dos entradas y una salida (MISO).

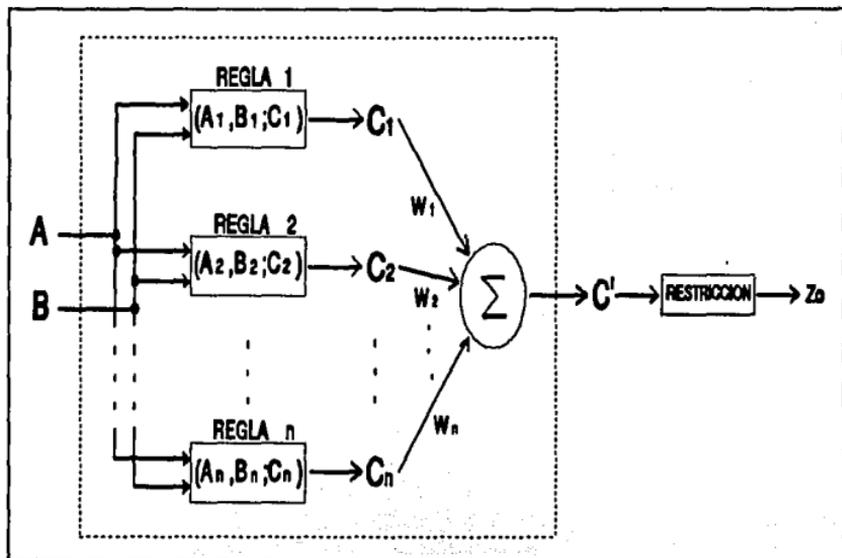


Fig.II.9 Representación general del proceso de evaluación de reglas.

Para obtener el grado de verdad o grado de influencia w de cada regla sobre la conclusión difusa C' el mecanismo de inferencias dispara, a partir de los valores difusos que provienen de la etapa de difusión, aquellas reglas que tengan en su antecedente un valor difuso mayor que cero.

Una vez obtenido el grado de influencia w para cada regla, se pueden utilizar principalmente dos tipos de razonamiento para obtener la conclusión difusa C' : correlación-mínimo (correlation-minimum encoding) y correlación-producto (correlation-product encoding). Para explicar en que consiste cada razonamiento considérese que se tiene una base de reglas con dos reglas de control como las siguientes:

- R_1 : si X es A_1 y Y es B_1 , entonces Z es C_1 ;
 R_2 : si X es A_2 y Y es B_2 , entonces Z es C_2 .

los grados de influencia w_1 y w_2 de dichas reglas en la conclusión C' se expresarían de la siguiente manera:

$$w_1 = \mu_{A_1}(X_0) \wedge \mu_{B_1}(Y_0)$$

$$w_2 = \mu_{A_2}(X_0) \wedge \mu_{B_2}(Y_0)$$

donde $\mu_{A_1}(X_0)$, $\mu_{B_1}(Y_0)$, $\mu_{A_2}(X_0)$ y $\mu_{B_2}(Y_0)$ representan el grado en

que X_0 y Y_0 pertenecen a los conjuntos difusos A_1 , B_1 , A_2 y B_2 respectivamente.

El razonamiento de correlación-mínimo, también llamado Mínimo de Mandani (Mandani's minimum)⁽¹⁰⁾ considera a cada regla como una implicación difusa R_i , en donde la iésima regla conduce a la conclusión:

$$\mu_{C_1'}(W) = w_1 \wedge \mu_{C_1}(W)$$

lo que implica que la función de membresía μ_C de la consecuencia inferida C esta dada por:

$$\begin{aligned} \mu_C(W) &= \mu_{C_1'} \vee \mu_{C_2'} \\ &= [w_1 \wedge \mu_{C_1}(W)] \vee [w_2 \wedge \mu_{C_2}(W)] \end{aligned}$$

Una representación gráfica de este razonamiento se ilustra en la figura No.II.10. Como se observa este resultado sigue siendo difuso, por lo que para obtener un valor concreto (crisp) es necesario realizar un proceso de restricción (defuzzification).

El razonamiento de correlación-producto, también llamado Producto de Larsen (Larsen's product)⁽¹⁰⁾ considera a cada regla como una implicación difusa R_i , en este caso la i ésima regla conduce a la conclusión:

$$\mu_{C_1'}(W) = w_1 \cdot \mu_{C_1}(W)$$

lo que implica que la función de membresía μ_C de la consecuencia inferida C esta dada por:

$$\begin{aligned} \mu_C(W) &= \mu_{C_1'} \vee \mu_{C_2'} \\ &= [w_1 \cdot \mu_{C_1}(W)] \vee [w_2 \cdot \mu_{C_2}(W)] \end{aligned}$$

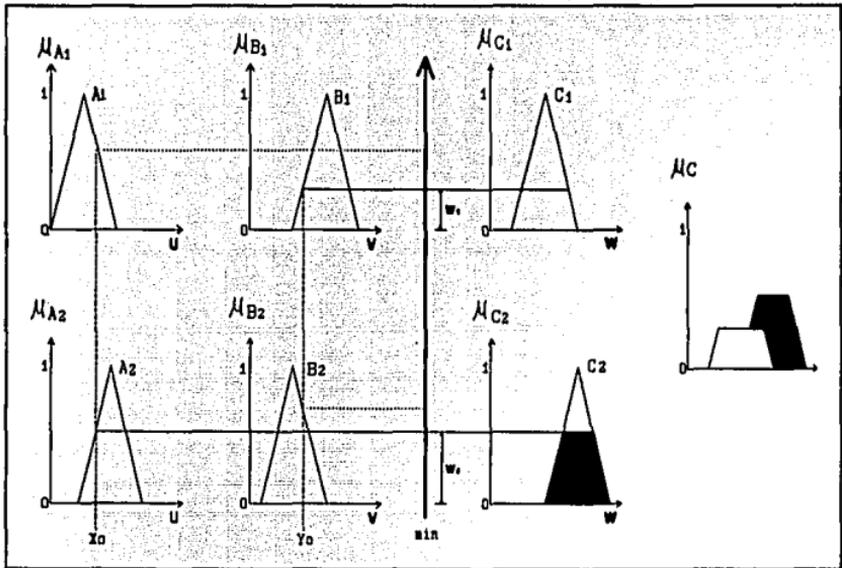


Fig. II.10 Razonamiento correlación-mínimo.

Una representación gráfica de este razonamiento se ilustra en la figura No.II.11. Al igual que en el razonamiento anterior, el resultado sigue siendo difuso, por lo que para obtener un valor concreto (crisp) es necesario realizar un proceso de restricción (defuzzification).

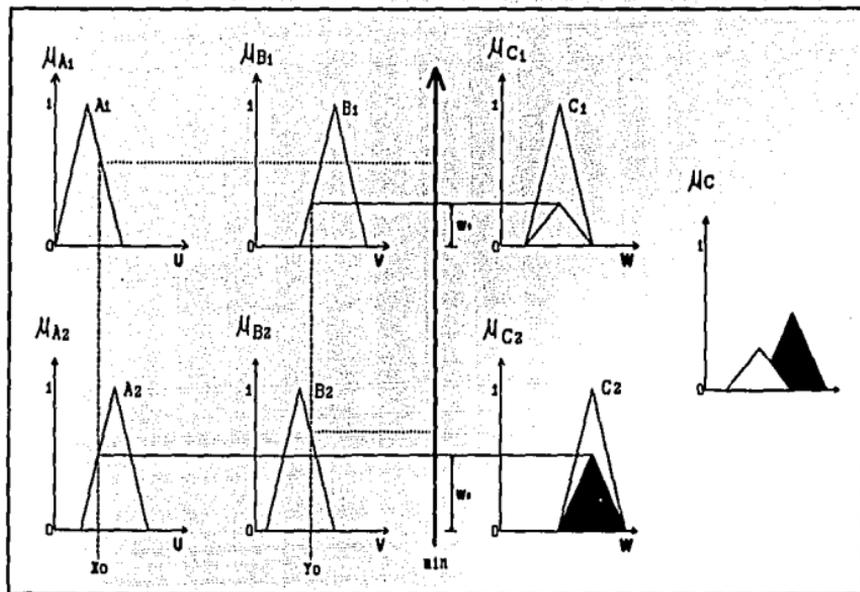


Fig.II.11 Razonamiento correlación-producto.

II.2.3 RESTRICCIÓN (DEFUZZIFICATION).

El proceso de restricción consiste en transformar las salidas del sistema de control difuso de un espacio de acciones de control definidas dentro de un universo de discurso difuso a acciones definidas dentro de un universo de discurso no difuso (crisp)⁽¹⁰⁾. Es decir, es el proceso de combinar la conclusión de todas las reglas disparadas durante el proceso de evaluación de reglas, en una única acción con un valor específico y concreto; valor que es ejecutable y que sale del sistema para efectuar la acción de control.

Actualmente existen tres métodos para realizar el proceso de restricción, estos son: a) criterio del máximo, b) promedio de influencias, y c) centro de gravedad; a continuación se describe brevemente en que consiste cada uno de ellos.

a) Criterio del máximo (Max Criterion Method MAX).

Este criterio selecciona como salida, de entre las reglas disparadas durante el proceso de evaluación de reglas, la conclusión de aquella que tenga el máximo grado de verdad o de influencia sobre la conclusión difusa C' . Por ejemplo, si durante el proceso de evaluación se dispararon 3 reglas R_1 , R_2 y R_3 obteniéndose para cada una los grados de influencia $w_1 = 0.75$, $w_2 = 0.40$, y $w_3 = 0.20$ respectivamente; la conclusión que se selecciona como salida es la dada por la regla R_1 , ya que ésta posee el máximo grado de verdad con respecto a las otras dos.

El criterio del máximo es el más sencillo, pero también es el menos usado, debido a que sólo considera aquella regla que posee el máximo grado de verdad, ignorando la posible contribución de las demás reglas. Por otra parte, en el caso de que dos reglas posean un mismo valor w , y éste sea máximo, se crea un conflicto que debe ser resuelto agregando alguna rutina extra.

b) Promedio de influencias (Mean of Maximum Method MOM).

Esta técnica genera una acción de control que representa el valor promedio de todas las acciones de control locales dadas por aquellas reglas disparadas durante el proceso de evaluación de reglas. Su expresión matemática es la siguiente:

$$z_o = \sum_{j=1}^n \frac{w_j}{n}$$

donde w_i es el grado de influencia asignado a cada regla, y n es el número de reglas tomadas en cuenta.

c) El centro de gravedad (Center of Area Method COA).

El mejor método disponible para realizar el proceso de restricción es el del centro de gravedad, ya que éste considera la contribución y grado de influencia (grado de verdad) de cada regla disparada durante el proceso de evaluación de reglas. Este método consiste de varias etapas, las que se describen a continuación:

1.- Truncar cada uno de los conjuntos difusos de la función de membresía de salida en el punto dado por el grado de influencia de aquellas reglas disparadas durante el proceso de evaluación de reglas y que, por lo tanto, son tomadas en cuenta para realizar el proceso de restricción.

2.- Calcular el área correspondiente a cada uno de los conjuntos truncados en el paso anterior.

3.- Calcular el punto en el eje x correspondiente al centro de gravedad de cada conjunto truncado.

4.- Calcular el centro de gravedad correspondiente al eje x con la fórmula:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

- donde: z_0 = centro de gravedad en el eje x (acción de control concreta);
- A_i = área del conjunto difuso truncado i ;
- x_i = centro de gravedad con respecto al eje x del conjunto difuso truncado i ;
- $i = 1, 2, \dots, n$;
- n = número de conjuntos difusos truncados.

Existe una forma simplificada para obtener el centro de gravedad que se basa en el teorema demostrado por Bart Kosko⁽¹¹⁾ en el sentido de que se puede calcular el centro de gravedad global a partir de los centros de gravedad locales de cada conjunto difuso. Para ello se aplica la siguiente fórmula:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n W_i C_i I_i}{\sum_{i=1}^n W_i I_i}$$

- donde: Z_0 = centro de gravedad global en el eje x (acción de control concreta);
- W_i = grado de influencia de la regla i ;
- C_i = centro de gravedad con respecto al eje x del conjunto difuso i ;
- I_i = Área del conjunto difuso i .
- $i = 1, 2, \dots, n$;
- n = número de reglas disparadas durante el proceso de evaluación de reglas.

En la figura No.II.12 se muestra una interpretación gráfica de las distintas estrategias de restricción para el caso de dos reglas disparadas durante el proceso de evaluación de reglas.

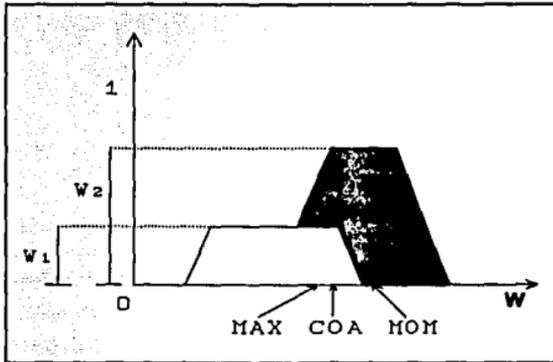


Fig.II.12 Representación gráfica de las estrategias de restricción.

En algunos estudios se ha demostrado que cuando se utiliza la estrategia MOM el desempeño de un sistema de control difuso es semejante a un sistema multinivel de relevadores, mientras que si se utiliza la estrategia COA el comportamiento es similar al obtenido con un control convencional PI. Por otro lado un sistema de control difuso que utiliza el método COA presenta menos errores que aquel en donde se utiliza el método MOM; sin embargo, la estrategia MOM es mejor que la MAX.

BIBLIOGRAFIA

1. Kosko, Bart e Isaka Satoru.
"Lógica borrosa";
Investigación y Ciencia;
Septiembre de 1993; pp. 60-65.
2. Murphy, Pat.
"Fuzzy logyc and its application
in control systems"; ISA, 1991;
Paper No. 91-0474; pp. 1231-1245.
3. Zadeh, Lotfi A.
"Fuzzy sets";
Information and Control;
Vol. 8, 1965; pp. 338-353.
4. Zadeh, Lotfi A.
"Fuzzy Logic"; Computer;
Abril de 1988; pp. 83-93.
5. Viot Greg.
"Fuzzy Logic in C";
Dr. dobb Journal;
Febrero de 1993; pp. 40-49.
6. Watson, R. Stephen, et al.
"Fuzzy Decision Analysis";
IEEE Transactions on systems, man,
and cybernetics, Vol. SCM-9. No. 1;
Enero de 1979. pp. 1-9.

7. Brubaker, I. David.
"Fuzzy-logic basics: intuitive rules replace complex math";
EDN; Junio 18 de 1992; pp. 111-116.
8. Wang, Li-Xin.
"Fuzzy Systems Are Universal Approximators";
IEEE, 1992.
9. Togai, Masaki and Watanabe Horoyuki.
"Expert System On A Chip: An Engine For Approximate Reasoning"; en Fuzzy Expert Systems; Ed. Abraham Kandel, USA, 1992, pp 259-274.
10. Lee, Chuen Chien.
"Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, Part II";
IEEE Trans. on Syst. Man and Cybern.,
Vol. SMC-20, No. 2, 1990. pp. 419-435.
11. Kosco, Bart.
"Neural Networks and Fuzzy Systems";
Prentice Hall, USA 1992.
12. Earl, Cox.
"Fuzzy Fundamentals";
IEEE Spectrum; October 1992.
pp. 58-61.

CAPÍTULO

III

**PLANTEAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO
PARA EL CONTROL DE QUEMADORES POSTERIORES
DE UNA CENTRAL TERMOELECTRICA DE CICLO COMBINADO**

III.1 CENTRAL TERMOELECTRICA DE CICLO COMBINADO.

Una central termoeléctrica de ciclo combinado utiliza los gases de escape (desecho) de una turbina de gas para producir vapor de agua mediante el cual se alimenta a una turbina de vapor. Con esto, se logra incrementar considerablemente la eficiencia del sistema, ya que se aprovechan al máximo las ventajas que ofrece el uso de los dos tipos de turbina. En comparación con la eficiencia que se obtiene en una planta convencional (47%), que opera sólo con turbinas de gas o de vapor (sólo un tipo), el incremento de eficiencia en una planta de ciclo combinado es de un 40%, lo que representa una eficiencia total del 65% aproximadamente⁽¹⁾.

Los componentes de una central termoeléctrica de ciclo combinado son los siguientes: 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 a nivel del mar, la producción total de energía eléctrica por 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.

III.1.1 EQUIPOS PRINCIPALES.

A continuación se dará una breve descripción de los equipos principales de los que consta una central termoeléctrica de ciclo combinado. En la figura No.III.1, se muestra un esquema general de este tipo de central; en él se puede apreciar la distribución de los equipos principales.

a) Turbina de gas. En la planta existen 2 turbinas de gas, cada una acoplada a un generador eléctrico. Mediante éste acoplamiento, la energía cinética de los gases que inciden en los álabes de la turbina es convertida en energía eléctrica. En términos generales, las principales funciones de esta turbina son:

- 1) Producir energía mecánica para mover el generador eléctrico a una velocidad angular de 60 r.p.s. (en condiciones de operación normal).
- 2) Suministrar gases de escape al recuperador de calor para la generación de vapor.

b) Turbina de vapor. Su funcionamiento es similar al de la turbina de gas, con la diferencia de que el agente que incide en los álabes de la turbina es el vapor de agua producido en el recuperador de calor.

c) Generador eléctrico. Esta acoplado a la turbina y su tarea consiste en convertir energía mecánica en energía eléctrica. Es trifásico y tiene una capacidad nominal de 94,444 KVA con un voltaje de 13,800 volts. Opera a una frecuencia de 60 Hz y a una velocidad de 3600 r.p.m. Su factor de potencia es de 0.9.

d) Recuperador de calor. En la planta existen dos recuperadores de calor interconectados entre sí con la turbina de vapor de un lado, y con su respectiva turbina de gas por el otro. Prácticamente

en este equipo se produce el vapor de agua que alimenta a la turbina de vapor, por lo que se dice que el recuperador de calor es el eslabón entre el ciclo de gas y el ciclo de vapor.

En el interior del recuperador de calor se encuentran los siguientes elementos: sobrecalentador, evaporador de alta presión, economizador, y el evaporador de baja presión; cada uno (a excepción del evaporador de baja presión formado sólo por tubos horizontales) está compuesto por arreglos de tubos horizontales en forma de serpentines, por donde se hace circular el fluido de trabajo (líquido saturado en la etapa inicial). El flujo de gas en el interior del recuperador de calor es vertical ascendente, por lo que en su trayectoria pasa por los distintos elementos en el siguiente orden: sobrecalentador, evaporador de alta presión, economizador, evaporador de baja presión, y finalmente salen a la atmósfera a través de la chimenea del recuperador.

En los evaporadores el fluido circula en paralelo con la trayectoria del gas, mientras que en el sobrecalentador y en el economizador, el fluido circula a contraflujo (con relación a la trayectoria del gas), esto con el fin de aprovechar la diferencia de temperaturas (promedio). A continuación se da una breve descripción del funcionamiento de cada uno de los elementos existentes en el interior del recuperador de calor.

d. 1) Evaporador de baja presión. A través de una bomba de baja presión y proveniente del tanque de oscilación, recibe líquido saturado a una temperatura de 250 °F. Con el calentamiento de este líquido, genera una mezcla agua-vapor que, posteriormente, es enviada al deareador.

d. 2) Economizador. Recibe líquido saturado del tanque de oscilación, produciéndole un incremento de temperatura de 250 °F a 570 °F. Posteriormente envía dicho líquido al domo, donde se mezcla con agua recirculada, para después ser liberado por la parte inferior.

d. 3) Evaporador de alta presión. A través de una bomba de alta presión y desde el domo, recibe fluido con el que se genera una mezcla agua-vapor que es enviada nuevamente al domo. El proceso de evaporación es isotérmico, con una temperatura aproximada de 557 °F.

d. 4) Sobrecalentador. El vapor que asciende a la parte superior del domo, es enviado al sobrecalentador en donde se le incrementa aún más la temperatura, produciéndose vapor sobrecalentado con las condiciones de presión y temperatura requeridas.

Debido a la posición del sobrecalentador en el hogar del recuperador, éste posee las condiciones 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.

e) Quemadores posteriores. Se localizan 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 ser alimentados con dos tipos de combustible: diesel especial o gas natural; pero se debe elegir sólo uno para operar.

Posteriormente se hará una descripción más detallada de este equipo.

f) Deaerador. Utilizando el vapor extraído de la turbina de vapor y el agua con alta presión proveniente del economizador, incrementa hasta una temperatura de 250 °F el líquido que recibe del condensador para, posteriormente, enviarlo al tanque de oscilación (de baja presión).

g) **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.

h) **Condensador.** Convierte en agua los residuos de vapor que provienen de la descarga de la turbina de vapor; para ello, expande dichos residuos 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; al pasar la corriente de vapor alrededor de ellos, el agua de enfriamiento absorbe, recoge y arrastra consigo el calor desprendido por el vapor condensado; posteriormente envía al deareador el líquido obtenido.

i) **Tanque de condensado.** La función principal de este elemento es la de almacenar el líquido saturado que proviene de los intercambiadores de calor. El fluido a la salida de éstos (intercambiadores de calor), puede dividirse en dos trayectorias: una que es enviada a los deareadores, y otra que es transportada al tanque de condensados. Para el último caso, se abre una válvula cuando el flujo hacia los deareadores es muy alto. El líquido almacenado en el tanque se bombea al pozo caliente.

j) **Atemperador.** Principalmente se utiliza en la etapa de arranque de la turbina de vapor. En un inicio, la válvula bypass de 30" permanece abierta, mientras que las válvulas de la turbina de vapor están cerradas. Cuando el vapor sobrecalentado adquiere una presión mayor a 300 PSIA, la válvula del atemperador cierra, sacándolo de operación, y las de la turbina abren.

La idea básica es utilizar los atemperadores para pasar el vapor sobrecalentado a saturado, cuando la turbina de vapor no esté funcionando. Lo anterior con la finalidad de poder introducirlo,

posteriormente, al condensador; acción que no podría realizarse si el vapor estuviera sobrecalentado.

k) **Planta desmineralizadora.** Su función principal es la de eliminar la dureza del agua que se utiliza para producir el vapor y para el circuito cerrado de enfriamiento. Utiliza procesos de filtración y desmineralización para tal fin.

Además de los equipos mencionados existen en la planta una gran cantidad de bombas, filtros, compuertas, condensadores, válvulas, etc.; los cuales realizan diversas funciones, pero cuya descripción esta fuera de los objetivos de la presente tesis.

III.2 QUEMADORES POSTERIORES.

Los quemadores posteriores se encuentran alojados en el ducto que comunica a la turbina de gas con el recuperador de calor, de tal manera que los gases que salen de la turbina de gas pasan por entre los quemadores, con lo cual adquieren temperatura adicional en su recorrido hacia el recuperador de calor.

En la figura No.III.2 se puede apreciar la ubicación de los quemadores posteriores en la planta, siendo ésta, la zona de recuperación de calor.

Un aspecto físico de los quemadores posteriores se ilustra en la figura No.III.3; como se observa, éstos están formados por un conjunto de 14 toberas verticales cada una para diesel y gas. Poseen un quemador piloto montado horizontalmente a lo largo de la base de los elementos del quemador principal. El piloto se energiza sólo con el encendido del quemador principal y puede proporcionar hasta 2 000 000 Btu/hr (504 000 Kcal/hr).

Los quemadores posteriores tienen una capacidad máxima de 250 000 000 Btu/hr (63 000 000 kcal/hr), con lo cual se produce una elevación mínima de calor de 41 666 000 Btu/hr para el sistema diesel

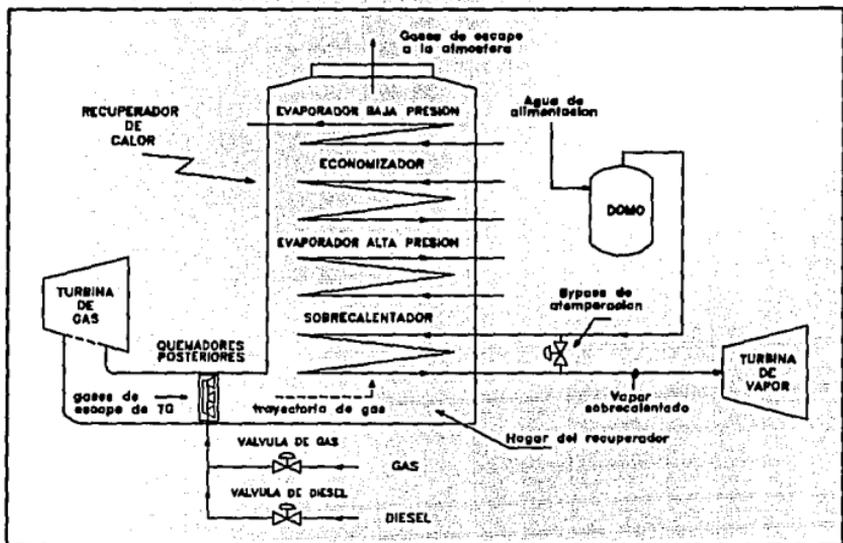


Fig.III.2 Ubicación de los quemadores posteriores en la zona de recuperación de calor.

y de 250 000 000 Btu/hr para el sistema de gas; como se puede apreciar, el segundo tiene ventaja 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. (457 mm.C.A.).
- Oxígeno en el gas = 15.92 % en peso.
- Elevación de temperatura: de 988 °F a 1200 °F.

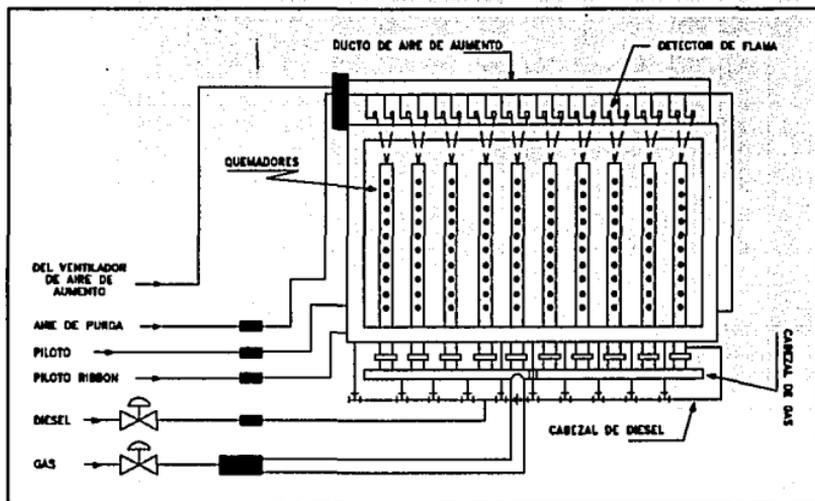


Fig.III.3 Aspecto físico de los quemadores posteriores.

Además de los elementos ya citados, los quemadores poseen un sistema de ventiladores cuya función es mantener la relación adecuada de aire-combustible, mediante la cual se consigue una combustión óptima. El sistema cuenta con tres ventiladores que son:

a) **Ventilador de aire de aumento.**- Su objetivo es enfriar al quemador y proveer la primera combustión de aire.

b) **Ventilador de aire de purga.**- Su objetivo es suministrar aire para proteger a los detectores de flama.

c) **Ventilador de aire de atomización.**- Su función es proveer aire sólo cuando se utiliza diesel como combustible.

Tanto el ventilador de aire de aumento como el de purga son arrancados y detenidos por un sistema automático lógico que los activa, durante la secuencia de arranque, por medio de un relevador maestro.

Los quemadores poseen detectores que utilizan luz infrarroja para sensar el estado de la flama; así mismo, éstos están conectados a un sistema de protecciones que, en caso de que la flama se extinga, es capaz de interrumpir el flujo de combustible.

Cabe hacer la aclaración de qué los quemadores posteriores pueden operar con sólo uno de los combustibles ya citados (gas o diesel), por lo que antes de arrancarlos se debe elegir alguno de los dos.

Las condiciones iniciales necesarias para activar los quemadores posteriores son las siguientes:

- a) Caldera en modo de rodado. Es decir, la turbina de vapor debe estar en operación.
- b) Caldera en estado húmedo. En otras palabras, debe existir agua en la caldera.
- c) Turbina de gas en operación.

Si se cumplen las condiciones anteriores, los quemadores posteriores podrán ser arrancados automáticamente (por el sistema automático de control), o en forma manual por el operador.

En términos generales, el control de los quemadores posteriores se lleva a cabo mediante la modificación de la posición de la válvula de admisión de combustible, ya sea para el caso de gas o el de diesel. "El control de combustión de los quemadores posteriores, aunado al control de la válvula bypass de atemperación, controlan la temperatura del vapor sobrecalentado llevándola a un punto de ajuste óptimo".¹

¹ WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. POWER DIVISION SYSTEM. Customer's familiarization program. Philadelphia, Pennsylvania.

De hecho, el control que actualmente se emplea utiliza un punto de ajuste variable (punto de ajuste dinámico) que considera a la demanda de vapor de la turbina como variable principal para regular la temperatura a la salida del sobrecalentador. Cuando la válvula bypass de atemperación de dicho sobrecalentador abre, el punto de ajuste de los quemadores posteriores cambia a su posición original. Esto con el fin de prevenir que los sistemas de control (control de los quemadores posteriores y de la válvula bypass de atemperación) operen simultáneamente, produciendo inestabilidad en el proceso.

III.3 CONTROL DIFUSO DE QUEMADORES POSTERIORES.

III.3.1 METODOLOGIA.

A pesar de que en la literatura existen diversos ejemplos de sistemas de control difuso⁽²⁾, en ellos no se precisa la manera en como se debe diseñar, formular y desarrollar uno. Sin embargo, es importante y necesario seguir una metodología adecuada para la elaboración de un sistema de control difuso. Reconociendo que no existe un procedimiento formal, en éste trabajo se optó por seguir los siguientes 5 pasos:

1. Identificar las fuentes de control en términos de entradas-salidas del Sistema de Control Difuso (SCD), y en base a éstas, establecer la estructura y características del mismo.

2. Definir la función de membresía (o tabla de verdad) y establecer los conjuntos difusos tanto para las variables que serán entradas, como para las que serán salidas.

3. Definir el comportamiento de las fuentes de control, es decir, elaborar las reglas que mapean las entradas con las salidas.

4. Determinar el método de restricción (defussification) a utilizar de acuerdo a las características del proceso.

5. Simular y validar el SCD.

La primera etapa es de tipo conceptual, mientras que las etapas posteriores forman un ciclo iterativo de modelado y simulación que continúa hasta que el SCD alcanza el comportamiento deseado.

Para validar los resultados del SCD, éstos se pueden comparar contra resultados obtenidos en pruebas y comportamientos conocidos. Si los resultados difieren a los deseados, entonces se procede a realizar cambios ya sea en la definición de los conjuntos difusos o en las relaciones dadas en las reglas.

A continuación, de acuerdo al procedimiento anterior, se muestran los resultados finales de cada etapa; debe aclararse que a ellos se llegó después de validar el sistema mediante la simulación y una vez realizadas todas las modificaciones necesarias para alcanzar un control óptimo de los quemadores posteriores.

III.3.2 IDENTIFICACION DE LAS FUENTES DE CONTROL.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo del control de los quemadores posteriores es lograr una temperatura óptima del vapor sobrecalentado que ingresa a la turbina de vapor². Para lograr este objetivo es necesario, en primer lugar, analizar y entender las relaciones entre las variables presentes en la zona del recuperador de calor, y que intervienen en el proceso para obtener la temperatura de vapor sobrecalentado deseada. En términos de causa-efecto se presentan los siguientes fenómenos: la apertura o cierre

² En el caso del control de la válvula bypass de atemperación, éste no se considera, ya que es un control independiente.

de la válvula de combustible (Xcr) causa un incremento o decremento del flujo de dicho combustible hacia los quemadores (Gcr); lo cual provoca un incremento o decremento en la combustión; lo que, a su vez, trae como consecuencia que los gases que pasan por entre las toberas de los quemadores adquieran o pierdan temperatura en su camino hacia el hogar del recuperador, esto se refleja en la temperatura de los gases existentes en el hogar del recuperador (T_{ghr}); y como éstos son los que pasan, en primer instancia, por entre los serpentines del sobrecalentador, con el incremento o decremento de su temperatura se provoca un incremento o decremento en la temperatura del vapor sobrecalentado (T_{um}). Como se observa, se trata de una serie de relaciones en donde la apertura o cierre de la válvula de combustible es la variable que necesariamente provoca una variación en las condiciones del proceso y, que por tanto, es la variable a manipular para lograr el objetivo que se persigue. En la figura No.III.4 se ilustra la zona del recuperador de calor, y se indican las variables que afectan a T_{um} .

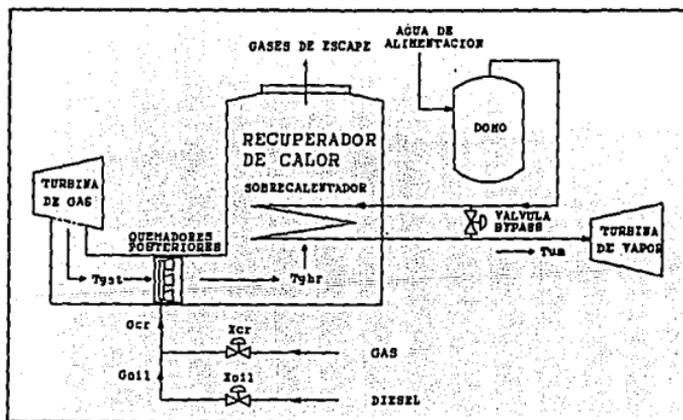


Fig.III.4 Variables que afectan a T_{um} .

Por otro lado, cabe aclarar que si la temperatura de los gases que salen de la turbina de gas (Tgst) varía, esta variación también se reflejará en la temperatura de los gases en el hogar del recuperador, independientemente del incremento que la misma sufra debido al paso de los gases de salida de la turbina por entre los quemadores posteriores. Esta relación será de gran utilidad más adelante para la validación del SCD.

Del análisis anterior se obtuvieron las variables de entrada y salida al SCD; éstas son tres, dos de entrada y una de salida. Las dos primeras indican el estado en el que se encuentra la temperatura del vapor sobrecalentado, éstas son:

Tum error (TUM_E). Es la diferencia entre el valor actual de Tum y el valor de Tum objetivo (set point). Esta variable indica que tan lejos se encuentra Tum de su valor objetivo, ya sea una distancia positiva o negativa.

Tum delta error (TUM_DE). Es la diferencia entre el valor actual de Tum error y el valor de Tum error hace un instante. Esta variable indica la rapidez con la cual Tum está variando: valores positivos indican la rapidez con la cual Tum está aumentando y valores negativos indican la rapidez con la cual Tum está disminuyendo.

La tercer variable surge como consecuencia de las dos anteriores, y es la variable a través de la cual se ejerce el control (variable manipulada):

Apertura de la válvula de combustible (Xcr). Esta variable indica el grado al que debe ajustarse la apertura de la válvula de combustible para alcanzar el valor objetivo de Tum.

Una vez determinadas las variables tanto de entrada como de salida se estableció un sistema de control del tipo MISO (Multiple-Input-Single-Output), con dos variables de entrada y una de salida, con una estructura como la mostrada en la figura No.III.5.

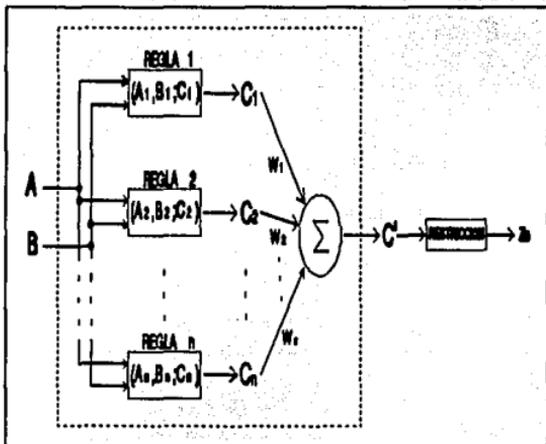


Fig.III.5 Estructura del SCD.

Donde:

A = Tum error.

B = Tum delta error.

C = Apertura de la válvula de combustible (Xcr).

$A_{1,2,3,\dots,n}$ = Conjuntos difusos de A.

$B_{1,2,3,\dots,n}$ = Conjuntos difusos de B.

$C_{1,2,3,\dots,n}$ = Conjuntos difusos de C.

$W_{1,2,3,\dots,n}$ = Grado de influencia de cada regla sobre la conclusión difusa C' .

C' = Conclusión difusa.

Z_0 = Valor concreto que indica la apertura que debe tener la válvula de combustible (comando que se envía al actuador).

III.3.3 DEFINICION DE FUNCIONES DE MEMBRESIA Y CONJUNTOS DIFUSOS.

Para definir la función de membresía y conjuntos difusos de cada variable fué necesario, en primer lugar, identificar el universo de discurso de cada una de ellas, para lo cual se realizó un análisis de los datos obtenidos (existentes) con el control digital (PI) al someter el proceso a 4 perturbaciones de distinto tipo⁽¹⁾: escalón, rampa 1, rampa 2, rampa 3 y rampa 4. El valor objetivo (set point) de T_{um} que se considera es de 800°K, valor que se utilizó para el cálculo de los rangos de TUM_E y TUM_DE . La temperatura de los gases a la salida de la turbina (T_{gst}) es la variable que se afecta para efectuar cada una de las perturbaciones citadas ya que, como se mencionó anteriormente, la variación de ésta incide en la temperatura de los gases en el hogar del recuperador, independientemente del incremento de temperatura que sufren los gases a la salida de la turbina al pasar por entre las toberas de los quemadores posteriores. Para la validación del SCD se utilizaron las mismas perturbaciones, por lo que éstas se explicarán más adelante en la etapa de simulación y validación del SCD. Los datos obtenidos del análisis anterior se muestran en la tabla III.1.

De acuerdo a los datos de la tabla III.1, el rango máximo (universo de discurso) para TUM_E y TUM_DE es el siguiente:

$$U_{Tum\ error} = [-49.0, 15.0]$$

$$U_{Tum\ delta\ error} = [-0.92, 1.5].$$

TABLA III.1 VALORES DE TUM_E Y TUM_DE EN CADA PERTURBACION.

PERTURBACION	TUM_E		TUM_DE	
	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO	VALOR MINIMO	VALOR MAXIMO
ESCALON	-2.3	11.0	-0.5	0.18
RAMPA 1	-1.9	5.8	-0.32	0.2
RAMPA 2	-28.0	13.0	-0.92	1.5
RAMPA 3	-49.0	15.0	-0.82	0.88

Para el caso de Xcr que indica el grado en por ciento de la apertura de la válvula de combustible, éste no puede ser menor al 15%, ya que si así fuera el piloto de los quemadores posteriores se apagaría, con ello los quemadores se saldrían de operación⁽¹⁾; por otro lado la apertura máxima que puede alcanzar la válvula de combustible es del 100%, es decir: $U_{Xcr} = [15.0, 100.0]$.

Una vez identificado el universo de discurso de cada variable, el siguiente paso es dividirlo en subrangos con los que se forman los conjuntos difusos. Existen 4 reglas eurísticas dadas por Earl Cox⁽³⁾ para definir los conjuntos difusos de una variable, éstas son:

1. El número de conjuntos difusos en que se debe dividir el universo de discurso de la variable en cuestión es entre 5 y 9.
2. Cada conjunto difuso debe traslaparse con su vecino entre un 10% a 50%.
3. La suma de los puntos verticales de traslape debe ser menor que 1.
4. La densidad de los conjuntos difusos debe ser más alta alrededor del punto de control óptimo (set point); y debe disminuir a medida que se aleja de este punto.

De acuerdo a las reglas anteriores, se estableció 7 conjuntos difusos para cada variable denominados como sigue:

1. NL = Negativo largo.
2. NM = Negativo medio.
3. NC = Negativo corto.
4. CE = Cero.
5. PC = Positivo corto.
6. PM = Positivo medio.
7. PL = Positivo largo.

Durante el proceso de simulación y validación del SCD, los universos anteriores se fueron reduciendo para el caso de Tum error y Tum delta error y aumentando para el caso de Xcr; sin embargo, se mantuvo el mismo número y denominación de conjuntos difusos. Los rangos resultantes fueron los siguientes:

$$U \text{ Tum error} = [-5.0, 5.0]$$

$$U \text{ Tum delta error} = [-0.3, 0.3]$$

$$U \text{ Xcr} = [2.5, 200].$$

Como se observa, para el caso de Xcr, el rango citado sobrepasa la restricción del 15% de apertura, así como la apertura máxima del 100%; la explicación del porqué de esta situación, se realizará posteriormente durante la etapa de simulación y validación del SCD.

Para el caso del traslape, inicialmente se estableció el 25%, pero durante la etapa de simulación se encontró que los mejores resultados se obtenían con un traslape del 50%, tanto para Tum error como para Tum delta error. En la figura No.III.6 se aprecia la función de membresía para Tum error, y en la figura No.III.7 se aprecia la función de membresía para Tum delta error. Como se puede apreciar, todos los conjuntos difusos tienen una forma gráfica derivada del trapecio; esta forma se eligió debido a que es la más ampliamente utilizada y su definición en términos digitales, como se verá posteriormente, es muy sencilla.

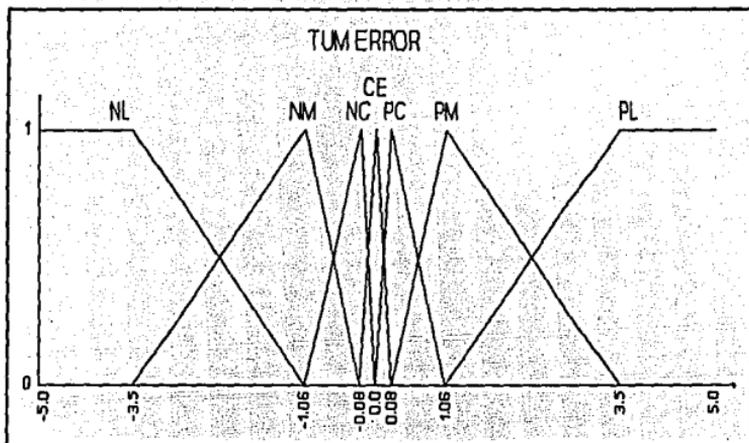


Fig. III.6 Función de membresía para Tum error.

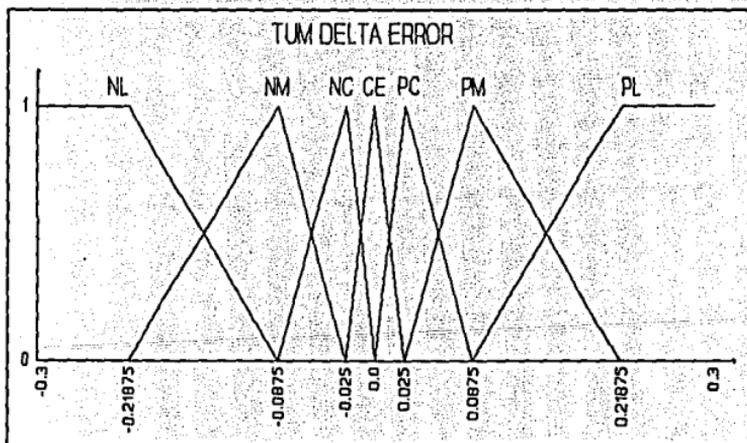


Fig. III.7 Función de membresía para Tum delta error.

Para la función de membresía de Xcr (función de salida), se utilizaron los denominados **singletons**. Un singleton es un conjunto difuso que se representa por una línea vertical que intercepta al eje X en un sólo punto y que, en consecuencia, tiene un grado de membresía igual a 1⁽⁴⁾. Con la utilización de singletons, como se verá posteriormente, se simplifica enormemente el proceso de restricción, ya que la función de membresía de salida se reduce al establecimiento de un arreglo unidimensional en donde cada miembro representa una posición en el eje X de un singleton de salida.

Inicialmente se estableció un valor determinado para cada singleton, durante la etapa de simulación y validación del SCD se fueron ajustando estos valores hasta determinar aquellos con los que se alcanzaron los mejores resultados, estos son:

NL=2.5, NM=5.0, NC=10.0, CE=80.0, PC=150.0, PM=180.0, PL=200.00

III.3.4 ELABORACION DE REGLAS.

Una vez definidos los conjuntos difusos para Tum error y Tum delta error, así como los singletons para la función de salida Xcr, el siguiente paso fué elaborar las reglas que definen las acciones que el control debe realizar de acuerdo a las condiciones de operación del proceso; o en otras palabras, elaborar las reglas que mapean las entradas con las salidas.

En la figura No.III.8 se aprecia un cuadro denominado **tabla de decisiones**⁽⁵⁾. La tabla de decisiones es una herramienta que sirve para obtener las reglas del SCD, ya que en ella se representan todas las posibles combinaciones entre los conjuntos difusos de entrada, Tum error y Tum delta error, así como el resultado de cada combinación, es decir el singleton de salida (para el caso de Xcr).

Tum delta error	Tum error						
	NL	NM	NC	CE	PC	PM	PL
NL	PL	PL	PL	PL	PM	PC	CE
NM	PL	PL	PL	PM	PC	CE	NC
NC	PL	PL	PM	PC	CE	NC	NM
CE	PL	PM	PC	CE	NC	NM	NL
PC	PM	PC	CE	NC	NM	NL	NL
PM	PC	CE	NC	NM	NL	NL	NL
PL	CE	NC	NM	NL	NL	NL	NL

Fig.III.8 Tabla de decisiones.

Como puede apreciarse en la tabla de decisiones, el número de reglas del sistema es igual al múltiplo del número de conjuntos difusos de las variables de entrada. Para este caso, si las variables Tum error y Tum delta error tienen ambas 7 conjuntos difusos conformando su respectiva función de membresía, entonces el número total de reglas del sistema es: $7 \times 7 = 49$ reglas.

La interpretación, en términos lingüísticos, de la tabla de decisiones es muy sencilla; como ejemplo, a continuación se enumera la interpretación de las primeras 7 reglas:

1. Si Tum está muy por abajo de su valor objetivo y está disminuyendo muy rápidamente, entonces abrir al máximo la válvula de admisión de combustible.

(Si Tum error = NL y Tum delta error = NL, entonces XCR = PL).

2. Si Tum está moderadamente abajo de su valor objetivo y está disminuyendo muy rápidamente, entonces abrir al máximo la válvula de admisión de combustible.

(Si Tum error = NM y Tum delta error = NL, entonces XCR = PL).

3. Si Tum está un poco abajo de su valor objetivo y está disminuyendo muy rápidamente, entonces abrir al máximo la válvula de admisión de combustible.

(Si Tum error = NC y Tum delta error = NL, entonces XCR = PL).

4. Si Tum está muy cerca de su valor objetivo y está disminuyendo muy rápidamente, entonces abrir al máximo la válvula de admisión de combustible.

(Si Tum error = CE y Tum delta error = NL, entonces XCR = PL).

5. Si Tum está un poco arriba de su valor objetivo y está disminuyendo muy rápidamente, entonces abrir moderadamente la válvula de admisión de combustible.

(Si Tum error = PC y Tum delta error = NL, entonces XCR = PM).

6. Si Tum está moderadamente arriba de su valor objetivo y está disminuyendo muy rápidamente, entonces abrir un poco la válvula de admisión de combustible.

(Si Tum error = PM y Tum delta error = NL, entonces XCR = PC).

7. Si Tum está muy arriba de su valor objetivo y está disminuyendo muy rápidamente, entonces mantener la apertura actual de la válvula de admisión de combustible.

(Si Tum error = PL y Tum delta error = NL, entonces XCR = CE).

En general las otras 42 reglas se interpretan similarmente a las 7 citadas.

III.3.5 SELECCION DEL METODO DE RESTRICCION (DEFUZZIFICATION).

Para este caso se seleccionó el método del centro de gravedad (COA) ya que, como se vió en la sección II.1.3, es el mejor método para realizar el proceso de restricción; además el método del centroide se simplifica enormemente con el uso de singletons en la función de membresía de la variable de salida, ya que el cálculo del centro de

gravidad se reduce a la obtención del promedio de los singletons de salida multiplicados por el grado de influencia de cada regla disparada, esto es:

$$Z_o = \frac{\sum_{i=1}^n W_i S_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

donde:

Z_o = Centroide en el eje X (acción de control concreta).

W_i = Grado de influencia de la regla i .

S_i = Singleton correspondiente a la conclusión de la regla difusa i .

$i = 1, 2, \dots, n$.

n = Número de reglas disparadas durante el proceso de evaluación de reglas.

III.3.6 SIMULACION Y VALIDACION DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO.

Esta etapa fué de gran importancia dentro del desarrollo del sistema de control difuso (SCD), ya que en base a los resultados obtenidos a través de la simulación, el sistema se fué afinando y ajustando hasta alcanzar su validación. Para simular el SCD se utilizó otra de sus características, ya que aunque emplea lógica difusa, su implementación se desarrolla de manera digital en una computadora personal.

La simulación del SCD se realizó de acuerdo a la estructura mostrada en la figura No.III.9.

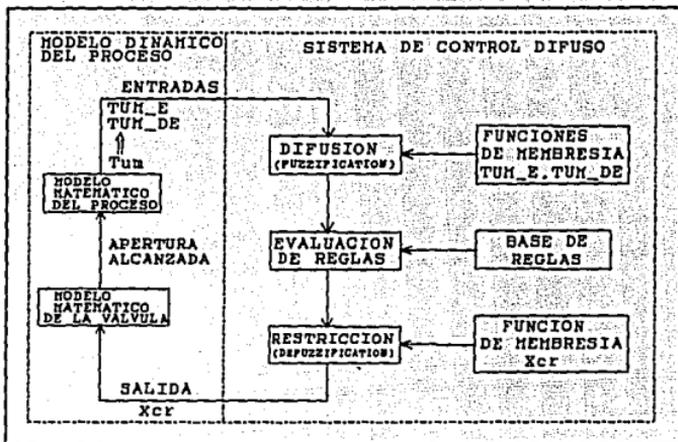


Fig.III.9 Estructura para simular el SCD.

Dentro de esta estructura, el modelo dinámico del proceso es un algoritmo implementado en lenguaje C, el cual se utilizó en la validación del control PI (digital) descrito en [1], y que en este trabajo se emplea como una herramienta para validar el SCD; por lo que a continuación sólo se describirá de manera breve y general, si el lector desea ahondar en el funcionamiento del mismo, puede consultar el apéndice A de esta obra.

El modelo dinámico del proceso está conformado por dos modelos matemáticos: modelo matemático de la válvula de admisión de combustible y modelo matemático del proceso. El primero simula el comportamiento del actuador (válvula de admisión de combustible de los quemadores posteriores) ante la variación de la señal de control (Xcr) recibida; cabe hacer notar que este modelo considera el retardo propio del actuador, además de la variación de la señal de control. El segundo es un modelo no lineal que simula a la sección de recuperación de calor y que permite obtener los valores

de las presiones y temperaturas del vapor sobrecalentado, así como de los gases en el hogar del recuperador, entre otras.

El mecanismo general bajo el que funciona el modelo dinámico del proceso, consiste en que la variación de la apertura de la válvula de admisión de combustible incide en el flujo de combustible hacia los quemadores posteriores, con lo cual se suceden una serie de cambios en las condiciones del proceso, alterándose las presiones y temperaturas ya citadas.

El SCD es un algoritmo implementado en lenguaje C que se encarga de realizar los procesos de difusión, evaluación de reglas y restricción. En este caso, el algoritmo se desarrolló especialmente para este trabajo, por lo que a continuación se describirá detalladamente.

III.3.6.1 ALGORITMO DE CONTROL.

Dentro del algoritmo de control, en primer instancia fué necesario definir cada uno de los conjuntos difusos que conforman las funciones de membresía de las variables de entrada, así como los singletons de la función de salida, en términos digitales entendibles para una computadora. En general, como se mencionó anteriormente, la forma gráfica más empleada para declarar un conjunto difuso es la trapezoidal, la cual es completamente definida identificando sus cuatro vértices: a, b, c y d; tal como se puede apreciar en la figura No.III.10. Como se observa, el grado de membresía correspondiente a cada punto a, b, c y d siempre es conocido siendo 0, 1, 1, y 0 respectivamente. Basándose en lo anterior, la gráfica se puede dividir en tres rangos: [a, b]; [b, c] y [c, d]. Para el caso de los rangos [a, b] y [c, d] el grado de membresía se determina estableciendo la ecuación de la recta entre cada par de puntos; mientras que para el rango faltante [b, c], el

grado de membresía es siempre igual a 1 para cualquier valor comprendido entre este rango.

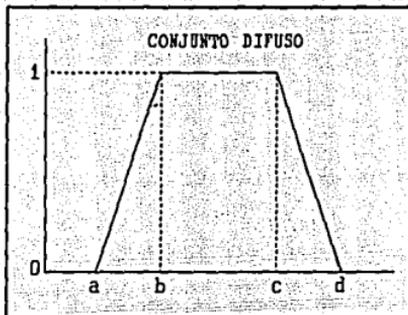


Fig.III.10 Identificación de los 4 vértices de un conjunto difuso trapezoidal.

Resumiendo, para determinar el grado de membresía de cualquier valor x entre el rango $[a, d]$, se tienen las siguientes tres opciones:

- 1) Si $a \leq x < b$ $y = \frac{1}{b-a} (x-a)$ (ecuación de la recta a-b)
- 2) Si $b \leq x \leq c$ $y = 1$
- 3) Si $c < x \leq d$ $y = 1 - \frac{1}{d-c} (x-c)$ (ecuación de la recta c-d)

Existen otras gráficas derivadas de la trapezoidal, las que se muestran en la figura No.III.11; como se observa, la descripción de cada una de ellas se hace también con los mismos cuatro puntos (a, b, c, y d) sólo haciendo las consideraciones que se aprecian.

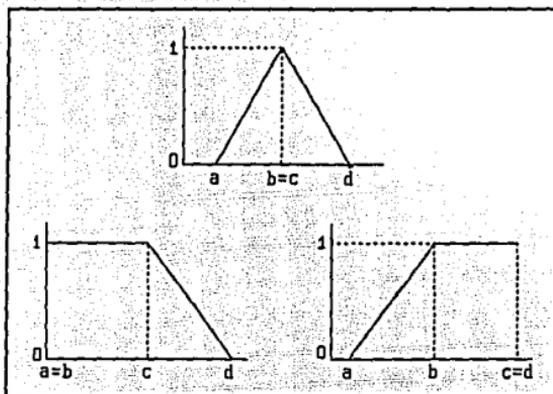


Fig.III.11 Gráficas derivadas de la función trapezoidal.

De acuerdo a lo anterior y a las funciones de membresía establecidas en la sección III.3.3; la definición de los conjuntos difusos que conforman a TUM_E y TUM_DE es la siguiente:

para TUM_E:

NL = [-5.0, -5.0, -3.5, -1.06]
 NM = [-3.5, -1.06, -1.06, -0.08]
 NC = [-1.06, -0.08, -0.08, 0.0]
 CE = [-0.08, 0.0, 0.0, 0.08]
 PC = [0.0, 0.08, 0.08, 1.06]
 PM = [0.08, 1.06, 1.06, 3.5]
 PL = [1.06, 3.5, 5.0, 5.0]

y para TUM_DE es:

```

NL = [-0.3, -0.3, -0.21875, -0.0875]
NM = [-0.21875, -0.0875, -0.0875, -0.025]
NC = [-0.0875, -0.025, -0.025, 0.0]
CE = [-0.025, 0.0, 0.0, 0.025]
PC = [0.0, 0.025, 0.025, 0.0875]
PM = [0.025, 0.0875, 0.0875, 0.21875]
PL = [0.0875, 0.21875, 0.3, 0.3].

```

Por otra parte, la definición de la función de membresía para Xcr se reduce, como ya se citó anteriormente, al establecimiento de un arreglo unidimensional con 7 componentes, esto es:

$$Xcr = [2.5, 5.0, 10.0, 80.0, 150.0, 180.0, 200.0]$$

donde cada componente corresponde al valor de los singletons NL, NM, NC, CE, PC, PM y PL respectivamente.

El segundo paso en la elaboración del algoritmo de control fué la declaración de las reglas del SCD, esto se realizó simplemente trasladando los datos contenidos en la tabla de decisiones a un arreglo bidimensional de $7 \times 7 = 49$ localidades, al que se denomina **matriz de inferencias**, en donde cada localidad contiene el valor del singleton de salida correspondiente a cada una de las 49 reglas componentes del SCD.

Una vez realizadas las definiciones anteriores, se creó una serie de funciones en lenguaje C, que se encargan de realizar las etapas de difusión, evaluación de reglas y restricción. A continuación se describe brevemente cada una de ellas:

Función error().- Esta función realiza el cálculo de Tum error (TUM_E) y Tum delta error (TUM_DE) a partir del valor de la temperatura de vapor sobrecalentado (Tum) y de su valor objetivo (en este caso 800 °K).

Función D_TUM_E(TUM_E).- Esta función tiene como argumento el valor de la variable TUM_E, a partir del cual realiza el proceso de difusión, asignando un grado de pertenencia de TUM_E a cada uno de los conjuntos de su función de membresía.

Función D_TUM_DE(TUM_DE).- Esta función tiene como argumento el valor de la variable TUM_DE, a partir del cual realiza el proceso de difusión, asignando un grado de pertenencia de TUM_DE a cada uno de los conjuntos de su función de membresía.

Función m_min().- Una vez que se ha realizado el proceso de difusión para los valores de TUM_E y TUM_DE, esta función evalúa cada regla, es decir, realiza la operación AND en lógica difusa a través de la cual se obtiene el grado de influencia de cada regla en la conclusión difusa C'; el resultado se almacena dentro de un arreglo bidimensional de $7 \times 7 = 49$ localidades, y al que se denomina **matriz de mínimos**.

Función mp_sp_smin().- Esta función se encarga de realizar el cálculo de los productos $W_i \times C_i$; la operación consiste en multiplicar el elemento 1 de la matriz de inferencias por el elemento 1 de la matriz de mínimos, el elemento dos por el dos, y así sucesivamente hasta obtener los 49 productos, éstos se almacenan en otro arreglo bidimensional de $7 \times 7 = 49$ localidades denominado **matriz de productos**. Así mismo, esta función calcula la sumatoria de los productos anteriores, así como la sumatoria de los grados de influencia W_i de las i reglas disparadas.

Función restric(S_P, S_MIN).- A partir de los valores obtenidos en la función anterior, restric realiza la operación de restricción a través de la cual se determina el valor concreto al que se debe ajustar la válvula de admisión de combustible, en otras palabras, realiza la operación citada en la sección III.3.5.

Función void graf().- Esta función abre una base de datos donde almacena los valores de las siguientes variables: ITER (No. de iteración), Xcr, Tum, Tghr, Tgst, Zo, TUM_E y TUM_DE.

Existen algunas funciones auxiliares que son empleadas por las anteriores, las cuales son:

Función float dif(p1, p2, p3, p4, x).- Esta función determina el grado en que x pertenece al conjunto difuso trapezoidal definido por los cuatro puntos $p1$, $p2$, $p3$ y $p4$.

Función float and(x, y).- Esta función regresa el menor de dos valores: x ó y .

La secuencia de ejecución de cada una de las funciones que conforman el algoritmo de control, se puede apreciar en la figura No.III.12, Así mismo se observa la interacción con el modelo dinámico del proceso, etapa en la cual se perturba el sistema con una función de Tgst.

Una vez descritas las funciones que componen el algoritmo de control, a continuación se describen las pruebas realizadas al SCD, así mismo se presentan los resultados que permitieron efectuar su validación.

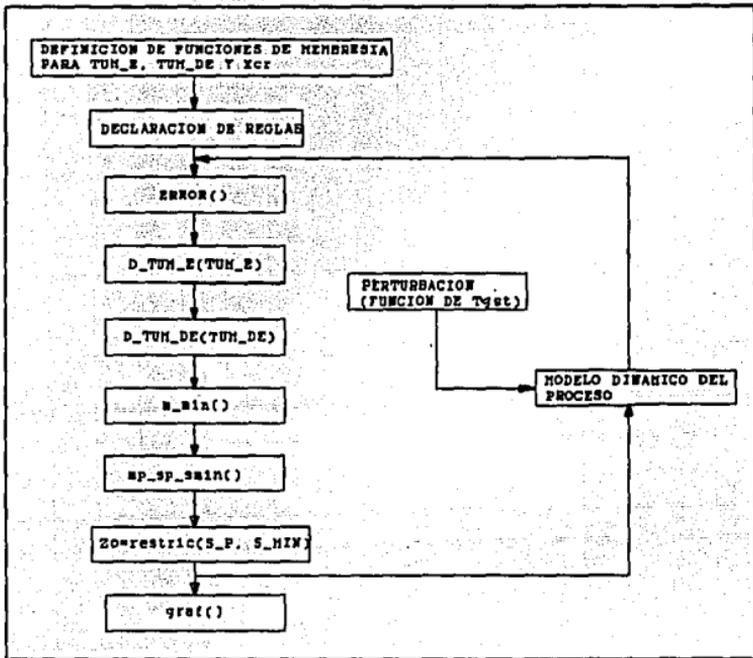


Fig.III.12 Secuencia de ejecución de las funciones del algoritmo de control.

III.3.6.2 PRUEBAS AL SISTEMA DE CONTROL DIPUSO.

Para validar el SCD éste se sometió, a través de la simulación, a diversas pruebas operativas bajo condiciones extremas diversas. Se decidió utilizar las mismas pruebas empleadas en la validación del sistema de control tradicional (PI), ya que los datos y gráficas obtenidos en ellas, fueron el punto de referencia contra el cual se compararon los resultados obtenidos al aplicar el SCD.

Siguiendo una metodología de ensayo y error, el SCD se fué depurando y afinando, para lo cual se ajustó, como ya se indicó, tanto el rango de las variables de entrada, los conjuntos difusos y la tabla de decisiones hasta obtener un control óptimo de los quemadores posteriores.

En cada prueba, la variable afectada para provocar la perturbación, fué la temperatura de los gases a la salida de la turbina (Tgst), ya que como se indicó en la descripción del proceso, la variación de esta temperatura afecta la temperatura de los gases en el hogar del recuperador y en consecuencia la temperatura del vapor sobrecalentado, independientemente del incremento de Tgst debido al paso de los gases por entre los quemadores posteriores.

A continuación se describe cada una de las pruebas realizadas.

III.3.6.2.a) PRUEBA CON UNA PERTURBACION ESCALON.

OBJETIVO: Observar el comportamiento del SCD ante una perturbación pequeña del tipo escalón (gráfica No. 1, página 95).

CONDICIONES: Tum objetivo = 800 °K.

Xcr inicial = 0.8 Pu.

Inicio perturbación: 5ª iteración.

Duración de la perturbación: infinito.

Tgst inicial: 749.123 °K.

Tgst final: 805 °K.

DESARROLLO: El sistema se excita a partir de la 5ª iteración con una función escalón de la temperatura de los gases a la salida de la turbina (Tgst), con lo cual se incrementa bruscamente la temperatura del vapor sobrecalentado (Tum).

RESULTADOS: En la gráfica No. 2 se puede observar el comportamiento de la variable controlada T_{um} tanto para el control digital (PI) como para el SCD. Como se puede apreciar, existe una notable mejoría en la ejecución del control al aplicar el SCD, ya que mientras en éste, el tiempo de establecimiento de T_{um} es de 230 iteraciones, en el control digital (PI) éste es de 550 iteraciones aproximadamente. Así mismo, se observa una mayor precisión en la ejecución del control con el SCD que con el control digital, pues mientras que el primero prácticamente regresa el valor de T_{um} a su valor objetivo ($800\text{ }^{\circ}\text{K}$), el segundo hace que T_{um} oscile alrededor de este valor. Por otra parte, el sobreimpulso alcanzado con el SCD es solamente mayor en $0.5\text{ }^{\circ}\text{K}$ que el alcanzado por el control digital (PI).

En la gráfica No. 3 se observa el comportamiento de la válvula de gas ante la presencia de una perturbación del tipo escalón. En este caso, mientras que en el SCD el valor de la apertura oscila alrededor de 0.58 Pu , en el control digital se estabiliza alrededor de ese mismo valor. La oscilación de la apertura de la válvula de combustible en el SCD se debe a que gracias a esto se logra una estabilización del valor de T_{um} , y no alrevés como sucede con el control digital PI.

De lo anterior se concluye que ante la presencia de perturbaciones bruscas de baja magnitud, el SCD regula la apertura de la válvula de combustible de manera más precisa que el control digital (PI), ya que éste hace que prácticamente el valor de T_{um} se mantenga en su valor objetivo ($800\text{ }^{\circ}\text{K}$), mientras que con el control digital T_{um} oscila alrededor de ese mismo valor.

III.3.6.2.b) PRUEBA CON UNA PERTURBACION RAMPA 1.

OBJETIVO: Observar el comportamiento del SCD ante la presencia de una perturbación rampa ascendente de baja magnitud (gráfica No. 4).

Nota: Hay que hacer notar que de manera estricta, lo que se ha considerado como una función rampa, en realidad es una función diente de sierra.

CONDICIONES: Tum objetivo = 800 °K.
Xcr inicial = 0.8 Pu.
Inicio perturbación: 5ª iteración.
Duración de la perturbación: 30 iteraciones.
Tgst inicial: 749.123 °K.
Tgst final: 806 °K.

DESARROLLO: A partir de la 5ª y hasta la iteración No. 35, el sistema se excita con una función rampa de Tgst, con lo cual se provoca un incremento gradual de Tum.

RESUSLTADOS. En la gráfica No. 5 se puede apreciar el comportamiento de la variable controlada Tum ante la presencia de este tipo de perturbación, tanto para el SCD, como para el control digital. Como puede apreciarse, en este caso la respuesta del SCD es mucho más rápida que la obtenida con el control digital, pues mientras que el tiempo de establecimiento para el SCD es de 110 iteraciones, para el control digital es de 380 iteraciones aproximadamente; lo que representa que el SCD llega a la estabilización en menos de una tercera parte del tiempo ocupado por el control digital (PI). Por otra parte, el sobreimpulso en el caso del SCD (4.3 °K) es menor al sobreimpulso alcanzado en el control PI tradicional (5.7 °K).

En la gráfica No. 6 se puede apreciar el comportamiento de la apertura de la válvula de gas ante la presencia de una perturbación del tipo rampa 1. En esta gráfica se puede apreciar también la mayor rapidez del SCD, ya que el tiempo de estabilización y regreso al valor inicial de apertura, para el SCD es de 160 iteraciones, mientras que para el caso del control PI es de 400 iteraciones aproximadamente. Como se puede apreciar también en la gráfica No.

6, la mayor rapidez de respuesta del SCD se debe a que éste manda cerrar la válvula gradualmente, igual que el control PI, pero alcanzando un valor más bajo (73%) que el control tradicional (75.5%); esto, evidentemente, provoca que el valor de T_{um} se incremente más con el control digital, que con el difuso.

De lo anterior se concluye que el SCD actúa de manera más rápida y precisa que el control tradicional PI ante una perturbación rampa de magnitud pequeña.

III.3.6.2.c) PRUEBA CON UNA PERTURBACION RAMPA 2.

OBJETIVO: Observar el comportamiento del SCD ante la presencia de una perturbación rampa de tipo ascendente de magnitud grande (gráfica No. 7).

CONDICIONES: T_{um} objetivo = 800 °K.
 X_{cr} inicial = 0.8 Pu.
Inicio perturbación: 5ª iteración.
Duración de la perturbación: 160 iteraciones.
 T_{gst} inicial: 749.123 °K.
 T_{gst} final: 813 °K.

DESARROLLO: A partir de la 5ª iteración el sistema se excita con una función rampa ascendente de T_{gst} , la cual desaparece en la iteración No. 165. En este caso, la perturbación es similar a la utilizada en la prueba anterior, con la diferencia de que en ésta se utiliza una rampa de mayor magnitud y duración.

RESULTADOS: En la gráfica No. 8 se aprecia el comportamiento de la variable controlada T_{um} ante la presencia de una perturbación del tipo rampa 2, tanto para el SCD, como para el control digital (PI). Al igual que en el caso anterior, la respuesta del SCD es más rápida

y precisa que la obtenida con el control digital, ya que mientras en el SCD el tiempo de establecimiento de T_{um} es de 400 iteraciones, en el control digital es de 650 iteraciones aproximadamente; además, como puede apreciarse, el valor final de T_{um} en el SCD es prácticamente el valor objetivo ($T_{um}=800 \text{ } ^\circ\text{K}$), mientras que en el control digital existe oscilación alrededor de este valor. Para el caso del sobreimpulso alcanzado, la diferencia es significativa, ya que en el SCD es de menos de $1 \text{ } ^\circ\text{K}$, mientras que en el control digital (PI) es de $6 \text{ } ^\circ\text{K}$ aproximadamente.

En la gráfica No. 9 se aprecia el comportamiento de la apertura de la válvula de combustible ante la presencia de la perturbación rampa 2. Como puede apreciarse, en este caso el cierre de la válvula se realiza de manera más drástica en el SCD, que en el control digital; esto se debe a que el SCD manda cerrar la válvula de acuerdo a la magnitud de la perturbación, es decir, mientras más aumenta la perturbación, más se cierra la válvula de combustible; con esto, se mantiene el valor de T_{um} muy cerca de su valor objetivo.

De acuerdo a lo anterior, se concluye que el SCD actúa con mayor rapidez y de manera más precisa que el control tradicional PI, ante perturbaciones de gran magnitud. Por otra parte, se observa que si la magnitud de la perturbación aumenta gradualmente, el SCD actúa rápidamente ajustando, también de manera gradual, la apertura de la válvula manteniendo el valor de T_{um} muy cerca de su valor objetivo.

III.3.6.2.d) PRUEBA CON UNA PERTURBACION RAMPA 3.

OBJETIVO: Observar el comportamiento del SCD ante la presencia de una perturbación rampa descendente de magnitud grande (gráfica No. 10). Observar el comportamiento del SCD ante una disminución brusca de la temperatura del vapor sobrecalentado.

CONDICIONES: Tum objetivo = 800 °K.
Xcr inicial = 0.8 Pu.
Inicio perturbación: 5ª iteración.
Duración de la perturbación: 160 iteraciones.
Tgst inicial: 749.123 °K.
Tgst final: 640 °K.

DESARROLLO: A partir de la 5ª iteración el sistema se excita con una función rampa descendente de Tgst, la cual desaparece en la iteración No. 165. En este caso, la perturbación provoca una disminución brusca de la temperatura de vapor sobrecalentado Tum.

RESULTADOS: En la gráfica No. 11 se aprecia el comportamiento de la variable controlada Tum ante la presencia de la perturbación rampa 3. Como se puede observar, nuevamente, el SCD resulta ser más rápido en la ejecución del control, ya que el tiempo de establecimiento es de 500 iteraciones, mientras que en el control digital es de 800 iteraciones aproximadamente. Por otra parte, también se aprecia una fuerte oscilación en la respuesta del control tradicional PI, mientras que el control difuso presenta una oscilación mínima.

En la gráfica No. 12 se aprecia el comportamiento de la válvula de combustible ante la presencia de una perturbación del tipo rampa 3. En ella se aprecia como a partir de que se presenta la perturbación, el SCD manda abrir la válvula de manera más rápida que el control digital, esto provoca una saturación en 80 iteraciones, mientras que en el control PI esta saturación se presenta a las 110 iteraciones aproximadamente. Al aplicar el SCD, también puede apreciarse un mayor tiempo de saturación en la apertura de la válvula, ya que esta se mantiene hasta la iteración 280, mientras que el control digital mantiene la saturación hasta la iteración 250 aproximadamente. Después de la saturación, y una vez que desaparece la perturbación, el SCD provoca un cierre paulatino

de la válvula de combustible, hasta llegar a una oscilación mínima alrededor del valor de apertura original (80 %). En contraparte, después de la saturación y una vez que desaparece la perturbación, el control PI provoca una oscilación muy amplia que disminuye lentamente hasta llegar a una oscilación mínima alrededor del valor de apertura original (80 %).

De acuerdo a las observaciones realizadas, se concluye que para éste caso, el SCD actúa de manera más rápida ante perturbaciones por disminución brusca de temperatura, que el control digital PI. Así mismo, la mayor rapidez en la respuesta del SCD evita que el valor de T_{um} oscile haciendo que éste retorne gradualmente a su valor objetivo (800 °K).

BIBLIOGRAFIA

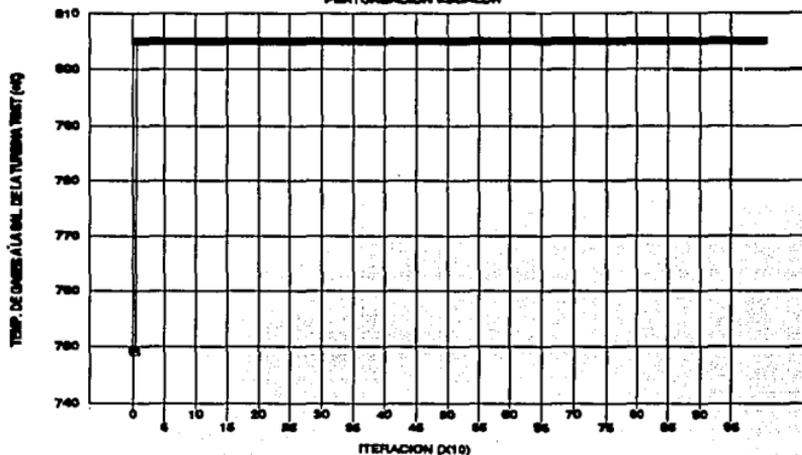
1. Flores, Meza Ruben A.;
"Control de combustión de quemadores posteriores en una unidad de generación de energía eléctrica de ciclo combinado";
UNAM-ENEP Aragón, Tesis de licenciatura, México 1993.
2. Sugeno, Michio;
"Industrial applications of fuzzy control";
North Holland, 1985.
3. Cox, Earl;
"Fuzzy fundamentals";
IEEE Spectrum, October 1990.
pp. 58-61.
4. Viot, Greg;
"Fuzzy Logic in C";
Dr Dobb's Journal, February 1993.
pp. 40-49.
5. Tang, L. Kwok;
"Comparing fuzzy logic with classical controller designs";
IEEE Trans. Syst. Man and Cybern;
Vol. SMC-17, No. 6, Nov/Dec 1987;
pp. 1085-1087.

GRAFICAS

GRAFICAS

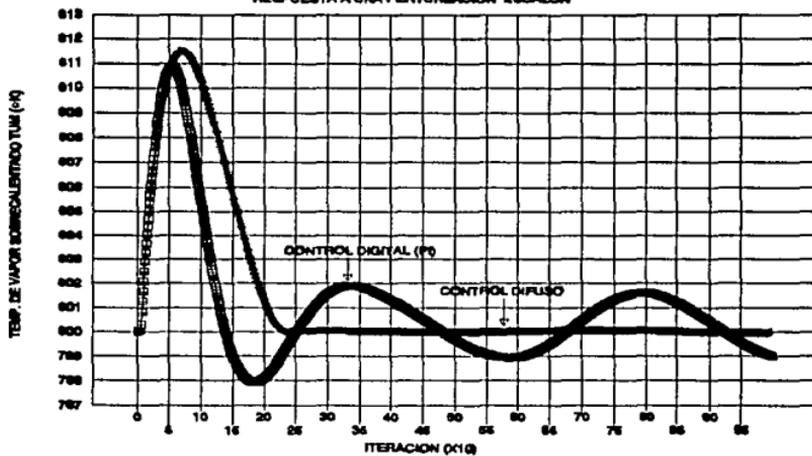
GRAFICA No. 1

PERTURBACION ESCALON



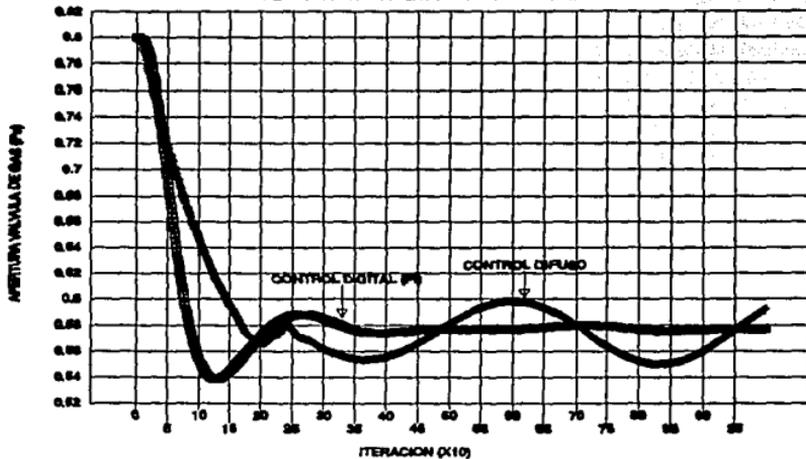
GRAFICA No. 2

RESPUESTA A UNA PERTURBACION ESCALON



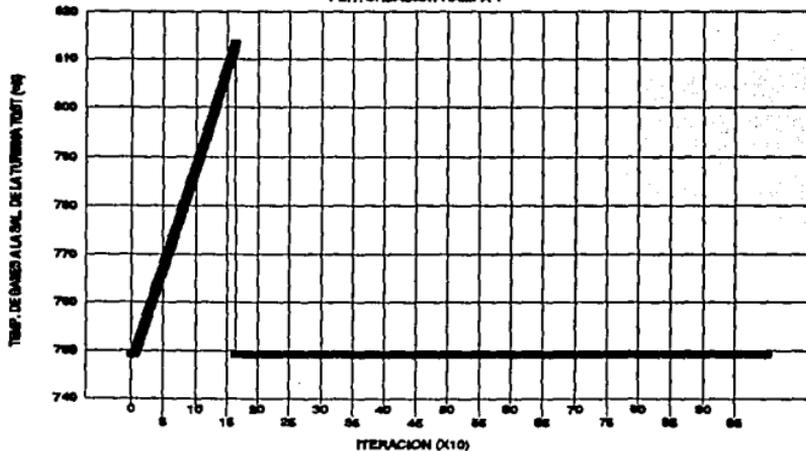
GRAFICA No. 3

RESPUESTA A UNA PERTURBACION ESCALON



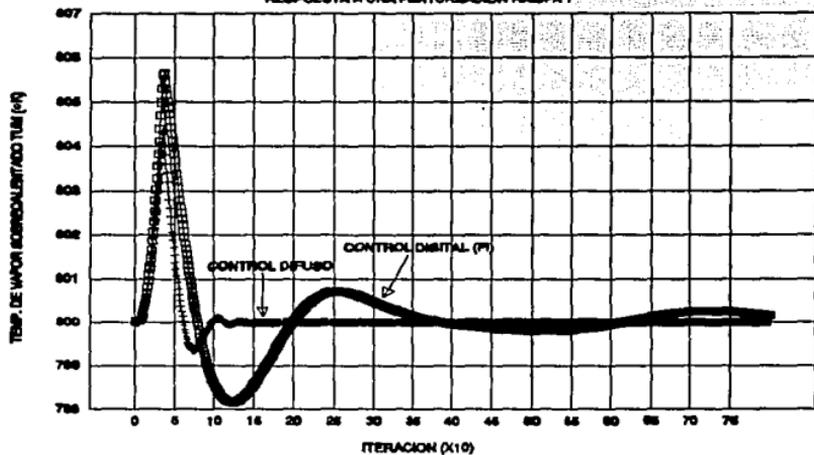
GRAFICA No. 4

PERTURBACION RAMPA 1



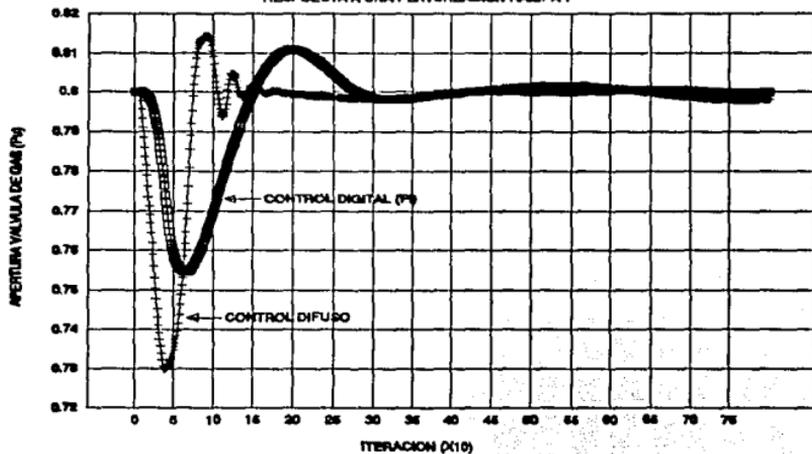
GRAFICA No. 5

RESPUESTA A UNA PERTURBACION RAMPA 1



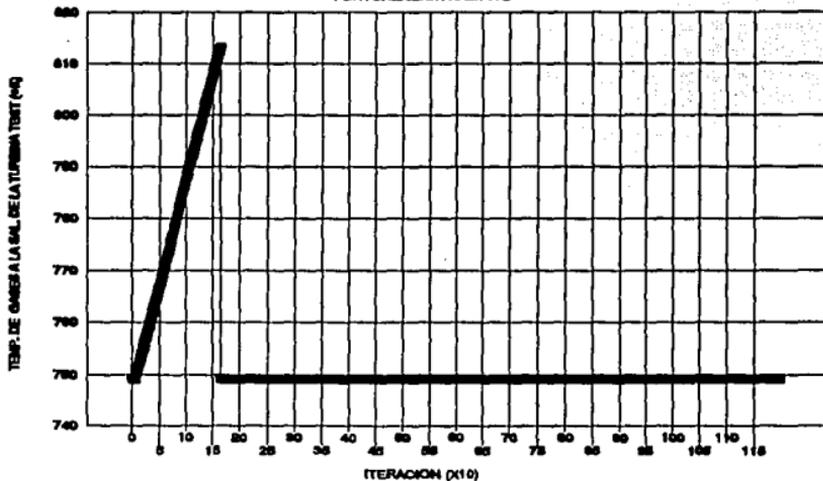
GRAFICA No. 6

RESPUESTA A UNA PERTURBACION RAMPA 1



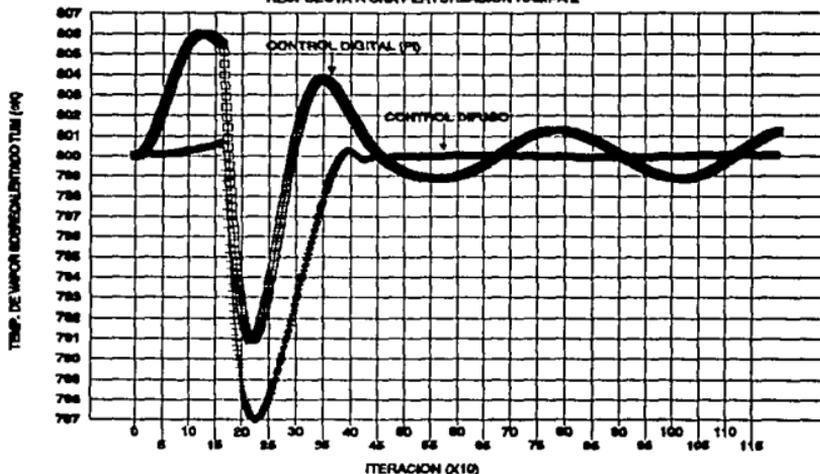
GRAFICA No. 7

PERTURBACION RAMPA 2



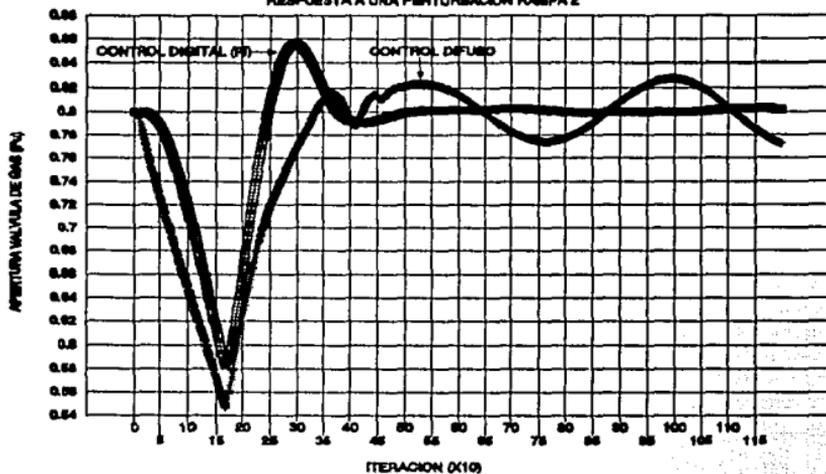
GRAFICA No. 8

RESPUESTA A UNA PERTURBACION RAMPA 2



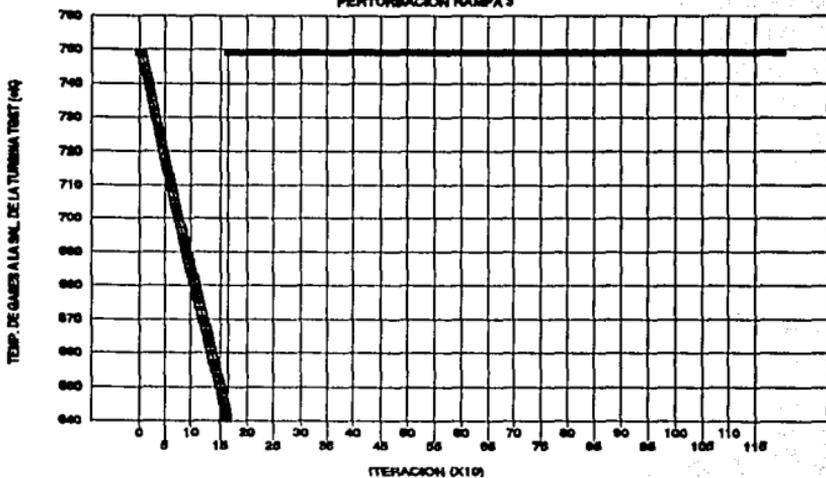
GRAFICA No. 9

RESPUESTA A UNA PERTURBACION RAMPA 2



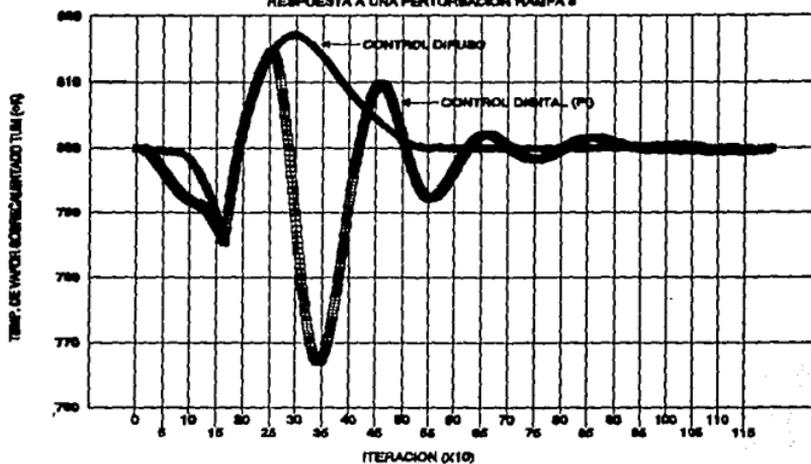
GRAFICA No. 10

PERTURBACION RAMPA 3



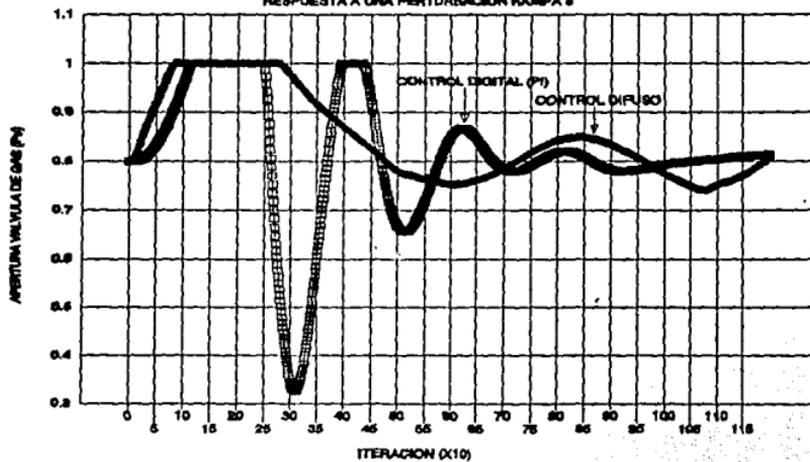
GRAFICA No. 11

RESPUESTA A UNA PERTURBACION RAMPA 8



GRAFICA No. 12

RESPUESTA A UNA PERTURBACION RAMPA 8



CAPITULO

IV

CONCLUSIONES

El objetivo del control de los quemadores posteriores de una central termoeléctrica de ciclo combinado es lograr una temperatura óptima del vapor sobrecalentado (T_{um}) que ingresa a la turbina de vapor, en este caso el valor objetivo de T_{um} se fijó en 800 °K; sin embargo, cabe aclarar que este valor (determinado por el control coordinado) en realidad cambia de acuerdo a la demanda de energía que la central tenga. El valor anterior se eligió porque representa que el sistema está trabajando con una demanda de carga alta, y es cuando el control de los quemadores se hace más crítico.

De acuerdo a los resultados reportados en cada una de las pruebas a las que se sometió el sistema de control difuso (SCD), así como a la comparación de éstos con los obtenidos con el control tradicional (PI) se observan las siguientes mejoras en la ejecución del control:

1.- En promedio, el tiempo de establecimiento de la variable controlada T_{um} en el SCD es la mitad del tiempo obtenido con el control tradicional PI.

2.- Después del sobreimpulso, la oscilación que presenta la variable controlada antes de alcanzar el estado estable es mucho menor a la que se presenta con el control tradicional PI. Si se analizan las gráficas de respuesta, prácticamente se puede decir que en el SCD no hay oscilación, existiendo sólo un sobreimpulso.

3.- El error en régimen permanente es mínimo. Esto quiere decir que el SCD hace que la variable controlada permanezca muy cerca de su valor objetivo con una oscilación mínima alrededor de este punto. En tanto, el control tradicional (PI) presenta una cierta oscilación aún en estado estable.

Además de las mejoras anteriores, para el establecimiento del SCD no se requirió de un desarrollo matemático complejo y, por otra parte, el tiempo ocupado fue mucho menor con respecto al empleado en el establecimiento del sistema de control tradicional. De hecho, el SCD fué más fácil de modelar y más simple de describir y verificar.

De acuerdo a los puntos anteriores, se concluye que el Sistema de Control Difuso resulta ser más eficiente y presenta un mejor desempeño en la ejecución del control. Cabe aclarar que en ambos casos, tanto el control tradicional PI como el control difuso aún pueden ser mejorados efectuando una sintonización más exhaustiva.

Se puede considerar que la aportación más importante de este trabajo es, que a través de él, se demostró la aplicabilidad de la técnica de la lógica difusa en la implementación de sistemas de control; y con su aplicación al control de quemadores posteriores de una central termoeléctrica de ciclo combinado y su validación por medio de la simulación, se demostró que se obtienen mejores resultados que con el control tradicional en los casos en que, como en éste, las variables del proceso son continuas y entre ellas existe una alta no linealidad.

**MODELO DINAMICO
DEL PROCESO**

A.1 DESCRIPCION.

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

- 1) MODELO MATEMATICO DE LA VALVULA.
- 2) MODELO MATEMATICO DEL PROCESO.

A.1.1 MODELO MATEMATICO DE LA VALVULA.

Este modelo simula el comportamiento del actuador ante la variación de la señal de control.

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 A.1.

$$D_{XVGAS} = \frac{(SC_{VGAS} - X_{VGAS})}{T_{VGAS}} \dots \dots \dots (A.1)$$

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

A.1.2 MODELO MATEMATICO 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 A.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.

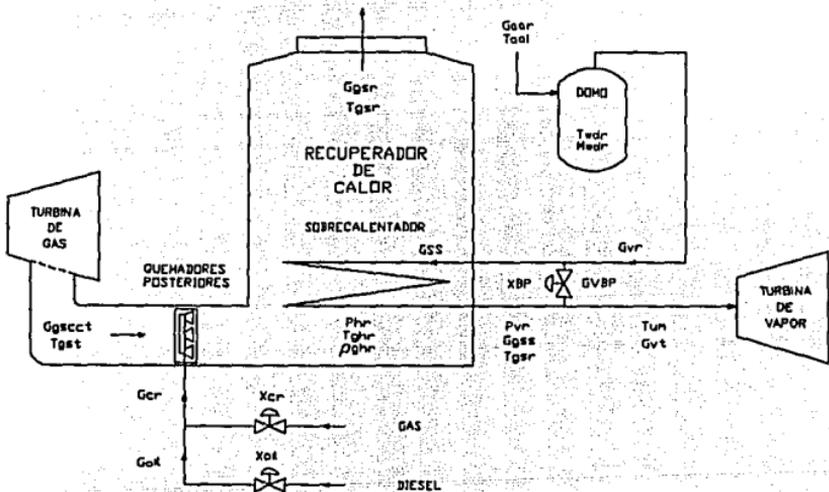


Fig.A.1. Diagrama simplificado de la zona de recuperación de calor. Obsérvese la localización de las variables del modelo dinámico del proceso.

A.1.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DINAMICO DEL PROCESO.

- 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 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 A.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.

A.1.3 PRINCIPALES FORMULAS 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.

$$P_{vr} = \rho_u \cdot T_{um} \cdot R_{v2} \dots \dots \dots (A.2)$$

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.

$$G_{gsr} = C_{vhr} \sqrt{\frac{P_{hr}^2 - P_j^2}{T_{gsr}}} \dots \dots \dots (A.3)$$

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.

$$U_{dr} = K_{dr} \cdot (G_{gsr})^{0.8} \dots \dots \dots (A.4)$$

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

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

- Flujo de gas a quemadores posteriores.

$$G_{cr} = X_{cr} C_{vr} \sqrt{\frac{P_{ig}^2 - P_{hr}^2}{T_{ghr}}} \dots \dots \dots (A.6)$$

- Flujo de vapor producido en el recuperador.

$$G_{vr} = \frac{G_{gsr} C_{pw} (T_{gsr} - T_0) + G_{gsr} K_{vr} (T_{ghr} - T_{wdr})}{H_{vr}} \dots \dots (A.7)$$

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.

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

La presión es directamente proporcional a la temperatura.

- Flujo de vapor a través del BYPASS del sobrecalentador.

$$G_{VBP} = \frac{X_{BP} C_{VBP} G_{VT}}{K_{SS} + X_{BP} C_{VBP}} \dots \dots \dots (A.9)$$

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_{BP}).

- Flujo de vapor a través del sobrecalentador.

$$G_{SS} = G_{VT} - G_{VBP} \dots \dots \dots (A.10)$$

- Temperatura del vapor que sale del sobrecalentador.

$$T_u = \frac{T_{ghr} U_u + C_{PV} G_{SS} T_{wdr}}{C_{PV} G_{SS} + U_u} \dots \dots \dots (A.11)$$

- Temperatura del vapor sobrecalentado.

$$T_{un} = \frac{G_{SS} [H_{VT} + C_{PV} (T_u - T_{wdr})] + G_{VBP} H_{VT} - G_{VT} H_{VT}}{G_{VT} C_{PV}} + T_{wdr} \dots \dots \dots (A.12)$$

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 A.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_{VT}), como variables principales.

De la expresión para el cálculo de Tu (ec. A.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.

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

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

- Densidad de los gases en el hogar del recuperador.

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

- Temperatura de los gases en el hogar del recuperador.

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

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, se puede 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 se puede 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 Sistema de Control Difuso de quemadores posteriores.

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

APENDICE

B

**RESPUESTA CARACTERISTICA
DE LOS SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN**

En los sistemas de control reales se presentan oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar el estado estable, esto se debe básicamente a que poseen elementos que almacenan energía. Esta es la razón por la cual los sistemas de control no responden instantáneamente cuando se les somete a una determinada perturbación.

Normalmente, las características de respuesta de un sistema de control se especifican en términos de la respuesta transitoria a un escalón unitario, esto debido a su fácil generación y a que representa una perturbación drástica.

Naturalmente, la respuesta transitoria tiene significado unicamente cuando se refiere a un sistema estable, ya que para uno inestable no se reduce y queda fuera de control.

Los criterios típicos de comportamiento para caracterizar una respuesta transitoria a una entrada escalón unitario son los siguientes (vease la figura No.B.1):

1. **Sobreimpulso máximo (Sm)**. Se define como la desviación máxima de la salida, por encima del escalón unitario de entrada, durante el régimen transitorio.
2. **Tiempo de retardo (td)**. Se define como el tiempo necesario para que la respuesta al escalón alcance el 50% de su valor final.
3. **Tiempo de crecimiento (tr)**. Es el tiempo requerido para que la respuesta al escalón pase del 10% al 90% de su valor final.

4. **Tiempo de pico.** Se define como el tiempo necesario para que la respuesta alcance el primer pico del sobreimpulso.

5. **Tiempo de establecimiento.** Se define como el tiempo requerido para que la respuesta disminuya y se establezca dentro de un porcentaje determinado de su valor final. Generalmente se utiliza el 5%.

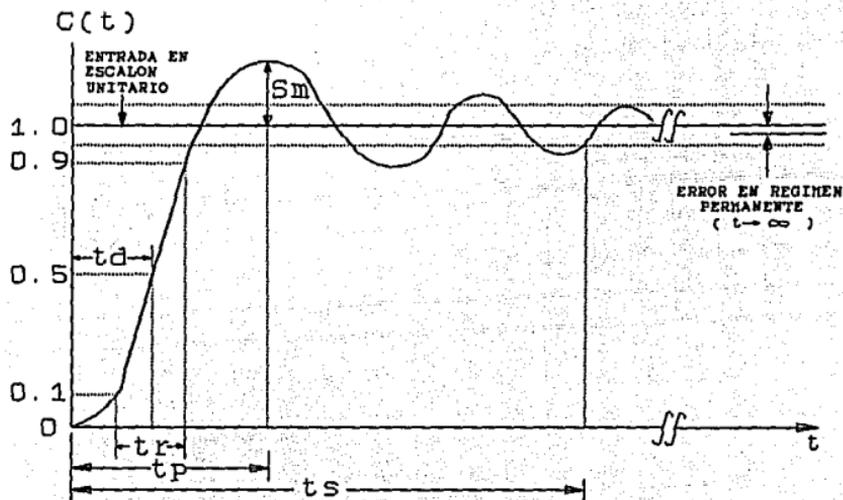


Fig.B.1 Respuesta típica de un sistema de control a un escalón unitario.

ANEXO

11

**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.
Cvoil	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	Coefficiente de transferencia de calor en sobrecalentador.
J	Poder calorífico del gas natural.
Rg	Constante universal de los gases.
Rv2	Constante del vapor 2.
Kdr	Constante.
K6	Constante.
K7	Constante.
K10	Constante.
K11	Constante.
K888	Constante de proporcionalidad.
CVBP	Cv de la válvula de Bypass.
Mwdr0	Masa del domo de la rec. 0.
Taa	Temperatura de agua de alimentación.
Piq	Presión a la entrada de quemadores posteriores.
Pj	Presión atmosférica.

Taai	Temperatura de agua de alimentación de entrada.
T0	Temperatura de referencia.
XBP	Apertura Bypass.
Ggsccct	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 el 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 gases en el hogar del recuperador.
ROghr	Densidad de gases en el 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.
Tger	Temperatura de gases a la salida del recuperador.
Gger	Flujo másico de gases a la salida del recuperador.
Gaar	Flujo másico del agua de alimentación en recuperador.
POT	Variable auxiliar.
Udr	Ceficiente total de transferencia de calor en el domo.
Gcr	Flujo másico de combustible en recuperador.
Gvr	Flujo másico de vapor en recuperador.
Goll	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_GVT3A	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).

HARDWARE

- PC AT-486, 33 MHz.
- IMPRESORA HP LASERJET III.

SOFTWARE

- SISTEMA OPERATIVO: MSDOS.
- MEDIO AMBIENTE DE PRUEBAS: TURBO C.
- PROCESADOR DE TEXTOS: WORD PERFECT versión 5.1.
- LENGUAJE DE PROGRAMACION PARA SIMULACION: LENGUAJE C.
- DIBUJOS: DRAW PERFECT VERSION 1.1, AUTOCAD versión 10.0.
- GRAFICAS: LOTUS 123 versión 2.2.