

135
2 Gen.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA
REGULACIÓN AUTOMÁTICA DE
UNA UNIDAD TERMOELÉCTRICA

TESIS PROFESIONAL QUE
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO-ELECTRICISTA

PRESENTA:
DON VILORIA BARAZARTE

DIRECTOR DE TESIS:
M. en C. RENÉ LARA SÁNCHEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

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

El presente trabajo fue elaborado durante un período relativamente largo. En 1977, la compañía eléctrica nacional de Venezuela, CADAPE, (equivalente a la Comisión Federal de Electricidad, CFE), envió a Italia a un grupo de técnicos venezolanos, para que la ENEL (Ente Nazionale per L'energia Elettrica) le diera entrenamiento teórico-práctico en plantas termoeléctricas de gran potencia, con regulación electrónica, como parte del proyecto "Planta-centro", cuyo diseño y asesoría fue realizado por especialistas ingleses y venezolanos; la construcción y montaje de la planta le fue encomendada a la empresa alemana KWU y la formación de recursos humanos a la empresa estatal italiana ENEL.

Este trabajo, sobre la regulación electrónica de plantas termoeléctricas intenta dar una visión global de la regulación automática, partiendo del análisis teórico hasta llegar a su puesta en práctica en problemas concretos. Este enfoque pretende establecer un equilibrio entre teoría y práctica que permita, por una parte, dar cuenta de la importancia de la teoría y, por otra, de la profunda interrelación de ésta con las transformaciones tecnológicas; hecho éste que nos obliga a la lectura y estudio de artículos actuales sobre la materia.

La estructura de la tesis responde a las necesidades de una

exposición del análisis que facilite su comprensión, guiada por la búsqueda del balance entre la teoría y sus aplicaciones.

En el capítulo 1 hacemos una revisión teórica de la regulación electrónica y la ilustramos con un análisis gráfico. En el capítulo 2 analizamos la regulación automática y su relación con las características del proceso, introduciéndonos simultáneamente en el análisis de la regulación de la unidad termoeléctrica; en este capítulo se incorporan 2 anexos que contienen información sobre la regulación de la unidad termoeléctrica "Planta-centro", en Venezuela y sus especificaciones que pensamos complementan los objetivos del capítulo. En el capítulo 3 revisamos diversos métodos de calibración de los sistemas de regulación y, se plantea un ejemplo de cálculo de la calibración de dichos sistemas. En el capítulo 4, se establece una comparación de las estrategias de regulación para plantas termoeléctricas con diferentes tipos de calderas. En el capítulo 5 describimos todos los sistemas de regulación de la unidad y sus normas de ejercicio. En las conclusiones, se recogen los aspectos más relevantes tratados en los capítulos anteriores y se indica el lugar que tienen las termoeléctricas para cubrir la demanda de carga a nivel nacional. Por último presentamos las fuentes principales de información que fueron utilizadas para la elaboración de la tesis.

Es conveniente hacer notar que el presente trabajo, fue ini-

ciado con los apuntes de trabajo elaborados en las diferentes plantas italianas y el realizado en el proyecto "Planta-centro" en Venezuela, durante el período 1977-1979 y posteriormente, en el 80, se le dió cuerpo de tesis durante el seminario que dirigió el M. en C. René Lara Sánchez. Sin embargo, es hasta enero del 85 cuando se retoma el trabajo realizado y se organiza para su impresión.

Soy consciente de que este trabajo no hubiera sido posible: primero, sin el entrenamiento, durante un año, que recibí en Italia y, después, sin el trabajo que desempeñé durante 2 años en "Planta-centro", como responsable de la regulación de la turbina, por lo que tengo una deuda inmensa para con los trabajadores italianos (en Italia y en Venezuela), los trabajadores alemanes responsables de la construcción y puesta en marcha, así como con los trabajadores venezolanos, con los que compartí experiencias; no se me olvida la deuda contraída con los libros, artículos y clases con mis maestros y discusiones con mis amigos que constituyeron mi soporte, tanto para la realización de esta tesis como para mi formación profesional.

1

C A P I T U L O 1.

1.- TEORIA DE LOS MODOS DE REGULACION

Los diversos modos de regulación se distinguen en base al comportamiento en el tiempo de la acción regulante "Y", en función de la variable regulada "X". La acción Y se desarrolla a través de una señal eléctrica o neumática a la que corresponde una posición determinada del órgano regulante.

1.1- REGULACION A DOS POSICIONES (ON-OFF)

En la regulación a dos posiciones el elemento final de regulación se mueve, con una cierta rapidez, desde una posición extrema a la otra, según que el valor de la variable controlada sea mayor o menor que el valor prefijado.

En general las dos posiciones, en que puede encontrarse el elemento final de regulación, son abierto o cerrado, sin embargo no faltan casos de posiciones intermedias.

Las ecuaciones del funcionamiento del regulador:

$$Y = Y_1 \quad \text{para} \quad X < X_0$$

$$Y = Y_2 \quad \text{para} \quad X > X_0$$

Donde Y_1 y Y_2 son las señales de salida del regulador a las

que corresponden las 2 posiciones del órgano de regulación.

X es la variable controlada en donde X_0 es el valor prefijado.
(Ver figura 1).

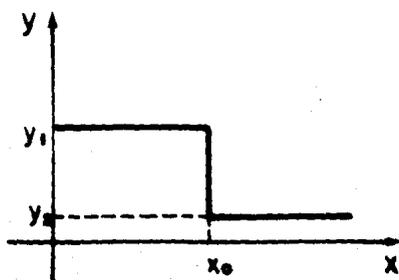


Fig. 1

En la regulación a dos posiciones, no puede existir una condición estable de equilibrio entre alimentación y carga, por lo tanto no se puede tener un valor constante de la variable controlada (potencia de la carga).

Esto porque a la posición de máxima apertura (Y_1) del órgano regulante corresponde una alimentación mayor de carga y viceversa en la posición (Y_2). En consecuencia la variable controlada oscilará en torno a un valor medio con amplitud y frecuencia dependiente de los parámetros del proceso.

Otro tipo de regulación a dos posiciones usado comúnmente en la industria es el que introduce un intervalo entre los valores de la variable controlada en la cual se tiene el pasaje del órgano final de regulación de una posición a otra. (Ver figura 2).

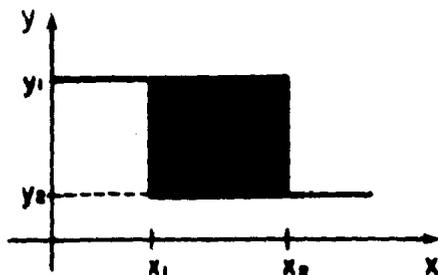


Fig. 2

El intervalo x_1-x_2 es llamado banda diferencial del regulador y en dicha banda la señal regulante "Y" asume el valor máximo cuando la variable controlada está en disminución. Obviamente, la introducción de una banda diferencial resulta benéfica, en cuanto reduce la frecuencia de intervención del órgano regulante, con el consecuente menor uso del mismo.

La amplitud de oscilación de la variable es mayor por el hecho que el órgano final de regulación permanece mayor tiempo en la posición de máxima o mínima apertura a la cual corresponden, respectivamente, el exceso o la falta de alimentación respecto a la carga.

Por lo tanto, entre más amplia es la banda diferencial, mayor es la amplitud y menor es la frecuencia de la oscilación.

La regulación a dos posiciones es adoptada en todos aquellos procesos en los cuales las inevitables oscilaciones de la variable regulada, no son peligrosas al desarrollo del proceso.

De lo anterior se deduce que, la capacitancia y las resistencias juegan un papel importante en este tipo de regulación, en cuanto establecen la constante de tiempo y el retardo de transferencia del proceso.

Mientras mayor es la capacitancia, mayor es el tiempo de reacción y por ende menor será la frecuencia de oscilación; menor es la resistencia, menores son los retardos de transferencia, consecuentemente mayor rapidez de respuesta que contiene la amplitud de la oscilación.

Concluyendo, se puede decir que la regulación a dos posiciones se adopta para aquellos procesos que presentan elevada capacitancia, pequeños retardos de transferencia y en los cuales las variaciones de carga son raras y pequeñas.

1.2- REGULACION PROPORCIONAL

La regulación proporcional está caracterizada por la relación de proporcionalidad entre la señal de salida (acción regulante) y la señal de entrada (variable regulada) al regulador.

La ecuación del regulador es:

$$Y - Y_0 = \frac{1}{P} K_p (X - X_0) \quad (I)$$

Y = Valor instantáneo del grado de apertura del órgano regulante.

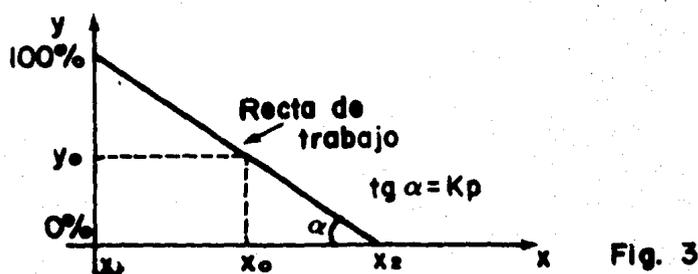
Y_0 = Valor inicial del grado de apertura del órgano regulante.

X = Valor instantáneo de la variable regulada.

X_0 = Valor prefijado de la variable regulada (SET POINT).

K_p = Factor constante de proporcionalidad que coincide con la ganancia del regulador.

Se escoge el signo + ó - según que el proceso requiera un aumento o disminución de la apertura de la válvula al crecer la variable regulada. (Ver figura 3).



La inclinación de la recta de trabajo del regulador depende de K_p ; ya que una vez fijado al set point X_0 , para $X=X_0$ debe ser $Y=Y_0$, al variar K_p , varia la inclinación de la recta de trabajo, pero, siempre pasará por el punto. (X_0, Y_0) .

1.2.1.- BANDA PROPORCIONAL

Se define como banda proporcional del regulador a la excursión X_p , de la variable regulada necesaria para hacer cumplir al órgano regulante todo el curso. (Ver figura 4).

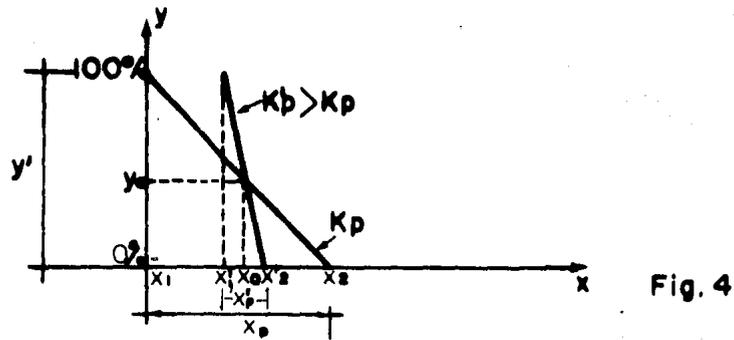


Fig. 4

De esta figura se desprende que al aumentar la ganancia del regulador, se reduce su banda proporcional.

Expresando la ecuación I en valores relativos:

Y_1 = Desplazamiento total del órgano regulante

$$e = \frac{x - x_0}{x_2 - x_1} \quad ; \quad \text{El error } (x - x_0) \text{ referido al campo de variabilidad } x_2 - x_1$$

$$\therefore \frac{y - y_0}{y^1} = \frac{K_p^1}{y^1} (x - x_0) \quad \dots \quad \text{(II)}$$

$$\text{de la gráfica } K_p^1 = \frac{y^1}{x_2^1 - x_1^1} \quad \dots \quad \text{(III)}$$

Sustituyendo III en II:

$$\frac{Y - Y_0}{Y^1} = \frac{X - X_0}{X_2^1 - X_1^1} \quad \text{de donde}$$

$$\frac{Y - Y_0}{Y^1} = \frac{X - X_0}{X_2 - X_1} \cdot \frac{X_2 - X_1}{X_2^1 - X_1^1} \quad \dots \text{ (IV)}$$

La relación $B = \frac{X_2^1 - X_1^1}{X_2 - X_1}$ representa la banda proporcional del regulador referida al campo de medida $X_2 - X_1$ de donde:

$$Y_r - Y_{0r} = \frac{1}{B} e \quad \dots \text{ (V)}$$

Y_r y Y_{0r} son los valores relativos, instantáneo e inicial de la apertura del órgano regulante.

En la figura siguiente se muestra el comportamiento a régimen de la variable regulada y de la acción regulante para un proceso previsto de regulación proporcional. (Ver figura 5).

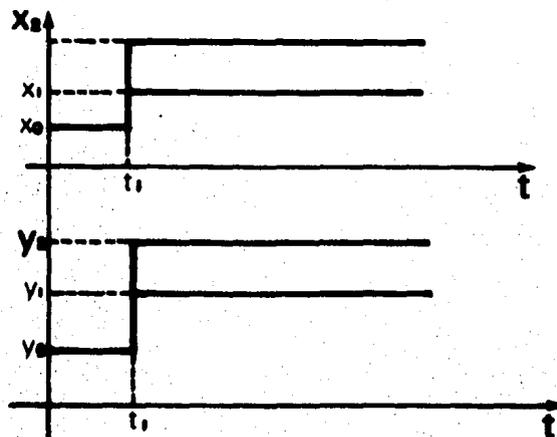


Fig. 5

Al tiempo $t \leq t_1$, el proceso está en equilibrio con la variable regulada al Set Point X_0 a la que corresponde una apertura Y_0 de la válvula de regulación. Al tiempo $t = t_1$, interviene una perturbación (variación de la carga o de la alimentación, etc.) que provoca una desviación de la variable controlada desde X_0 a X_1 . El servomotor, ahora, comandado del error $X_1 - X_0$ separa el órgano regulante elevándolo a la posición Y_1 en la que viene restablecido el equilibrio entre alimentación y carga.

Para un error mayor ($X_2 - X_0$) la válvula de regulación sufrirá un desplazamiento mayor ($Y_2 - Y_0$).

Derivando ambos miembros de la ecuación (V):

$$\frac{dy_r}{dt} = \frac{1}{B} \cdot \frac{de}{dt}$$

Que demuestra como la velocidad de desplazamiento del órgano regulante es proporcional a la velocidad de variación de la variable regulada.

Por ejemplo, si hacemos un análisis gráfico (Ver figura 6) de las características de la regulación con acción proporcional, haciendo referencia a un proceso constituido de un calentador en el cual, un fluido viene calentado con vapor saturado cuyo caudal es regulado en función de la temperatura del fluido calentado.

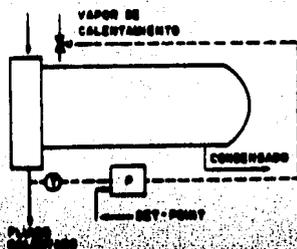


Fig. 6

Se fija la banda proporcional del regulador cuya acción hace corresponder al Set Point X_0 una apertura Y_0 de la válvula de regulación. La recta de trabajo del regulador es la (I) de la figura 7.

El proceso es tal que, sin la acción de regulador, a cada apertura de la válvula, a paridad de carga, hace corresponder una determinada temperatura del fluido calentado según la característica representada por la recta de carga (1) de la figura 7.

El punto de intercepción 0 de las dos rectas en la figura 7 representa, por ende, el punto de trabajo del sistema: proceso + regulación.

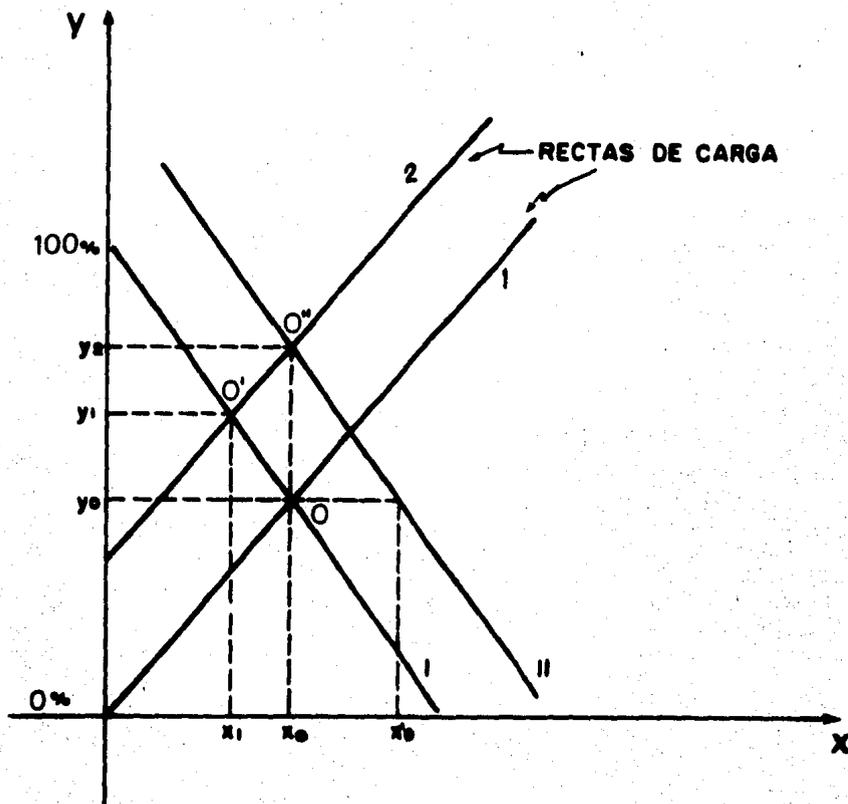


Fig. 7

Una variación de carga, por ejemplo, en aumento, provoca un desplazamiento de la recta de carga del proceso, porque, siendo aumentado el caudal de fluido por calentar, deberá aumentar correspondientemente, a paridad de temperatura, el caudal de vapor y consecuentemente la apertura de la válvula.

La recta de carga se convierte en la recta (2) de la figura anterior y el punto de trabajo se desplaza de 0 a 0^1 al que corresponde un descenso de temperatura de X_0 a X_1 y un aumento de la apertura de la válvula de Y_0 a Y_1 .

Es evidente, por esto, que la acción proporcional, para adecuar la alimentación a la carga y restablecer el equilibrio del proceso, necesita de un error (desviación) entre el valor de la variable controlada y el valor prefijado. La importancia del error a régimen depende de la banda proporcional y es tanto menor, con la misma carga, cuanto menor es la banda proporcional.

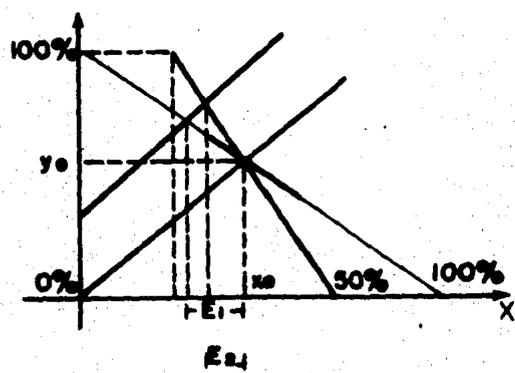


Fig. 8

En la figura 8 se observa, que a igualdad de desplazamiento de la recta de carga, el error E_1 , correspondiente a una banda proporcional del 100% es mayor que el error E_2 correspondiente a una banda proporcional del 50%.

Con la misma banda proporcional, que se escoge en base a otras consideraciones, una vez que la carga varíe de manera de rendir intolerable el error a régimen se puede manualmente actuar sobre el regulador para reducirlo o anularlo. La operación consiste en desplazar manualmente el Set Point de X_0 a X_1 con lo que la recta de trabajo del regulador se desplazará paralelamente a sí misma (la banda proporcional permanece igual) de modo de determinar la apertura Y_0 de la válvula en correspondencia del nuevo Set Point x_0^1 (recta de trabajo) de la figura 7.

De este modo se desplaza el punto de trabajo a O'' al que corresponde nuevamente un valor X_0 de la variable controlada, pero con una apertura Y_2 de la válvula.

Lo anterior nos muestra el comportamiento a régimen de un proceso dotado de regulación proporcional.

1.3.- RESPUESTA DINAMICA Y VALORACION DEL MARGEN DE ESTABILIDAD DEL SISTEMA

En la figura 5, se despreció la constante de tiempo que, como

se dijo, caracteriza cada tipo de regulador, sea este eléctrico o neumático por la cual se comporta, despreciando resistencias y tiempos muertos, como un sistema de primer orden. La función de transferencia será, por lo tanto, del tipo:

$$\frac{K_p}{1 + T J W} \quad \text{con } T: \text{ constante de tiempo y}$$

K_p : ganancia estática del regulador.

Si se aplica a un proceso de primer orden una regulación con acción proporcional y se desprecian las resistencias y los tiempos muertos, la cadena de regulación que resulta, puede esquematizarse con referencia a la figura 5 del siguiente modo:

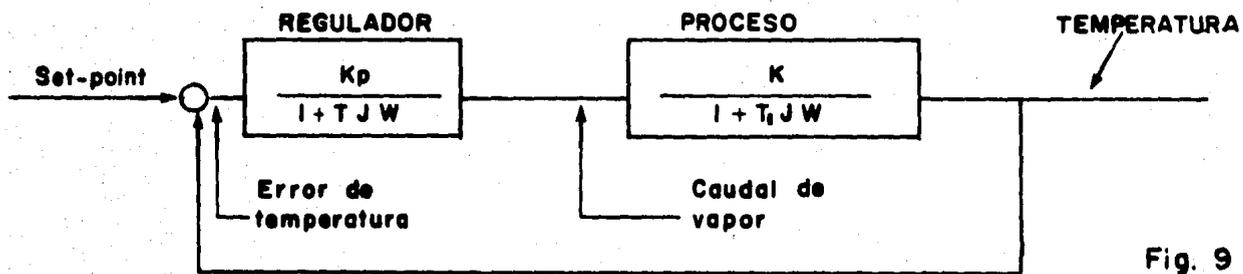


Fig. 9

En la figura 9 el proceso constituido por el calentador ha sido esquematizado con un bloque con ganancia K y constante de tiempo T_1 .

Para examinar este sistema, en lo referente a la estabilidad, basta expresar el diagrama de Nyquist, de la función de transferencia total a cadena abierta.

$$\frac{K_p \cdot K}{(1+TJW) (1+T_1JW)}$$

El diagrama de Nyquist se realiza viendo el comportamiento de la función de transferencia anterior a los límites:

$$\lim_{W \rightarrow 0} \frac{K_p \cdot K}{(1+T_1JW) (1+TJW)} = K_p \cdot K$$

$$\lim_{W \rightarrow \infty} \frac{K_p \cdot K}{(1+T_1JW) (1+TJW)} = \lim_{W \rightarrow \infty} \frac{K_p \cdot K}{1+JW (T_1+T) - TT_1W^2}$$

Despreciando la unidad y $JW(T_1+T)$ respecto de TT_1W^2 debida a que $W \rightarrow \infty$ tenemos entonces:

$$\lim_{W \rightarrow \infty} \frac{K_p \cdot K}{1+(T_1+T)JW - TT_1W^2} = \lim_{W \rightarrow \infty} \frac{-K_p \cdot K}{TT_1W^2} \quad \text{que implica que}$$

la expresión tiende a cero a lo largo del semieje real negativo, es decir, con fase π

Se obtiene así la representación de Nyquist de la figura 9.

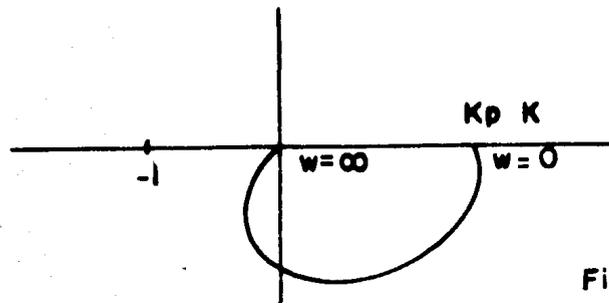


Fig. 10

La figura 10 muestra que, despreciando los retardos debidos a las resistencias y a los tiempos muertos, el sistema es intrinsecamente estable.

La presencia inevitable de los retardos de transferencia y de los tiempos muertos, modifica la característica frecuenciométrica del sistema, provocando una rotación en sentido horario de toda la curva, como se indica en la figura 11.

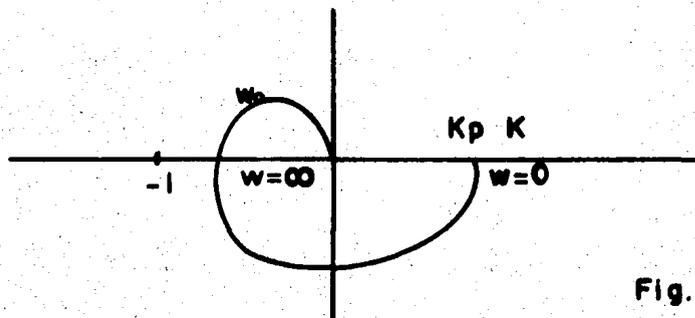


Fig. 11

Las oscilaciones resultan de amplitud creciente, constante o decreciente dependiendo de si el coeficiente de amplificación de la cadena de control sea ≥ 1 . Pero la ganancia de la cadena está dada por el producto de las funciones de transferencia del proceso y del regulador por lo cual para el mismo proceso, depende del regulador.

Se puede afirmar, por consiguiente, que un sistema de regulación entra tanto más fácilmente en oscilación, cuanto mayor son los retardos y cuanto mayor es la ganancia, ó cuanto menor es la banda proporcional del regulador.

Refiriéndonos al diagrama de bloques (figura 9), la función de transferencia del proceso está dada por la relación entre variaciones del potencial de la carga (temperatura) y las variaciones de la alimentación (caudal de vapor), esto es, el inverso de la capacitancia. Por lo tanto, se puede decir que mayor es la capacitancia del proceso, mayor se puede tener la ganancia del regulador, sin peligro para la estabilidad.

En definitiva, la regulación proporcional encuentra aplicación todas las veces que el proceso consiente de tener un error a régimen que es tanto más pequeño cuanto menor es la banda proporcional del regulador. Se tiende por lo tanto, a trabajar con la banda pro-

porcional mínima compatible con las características del sistema en base a las siguientes consideraciones:

Entre más grande es la capacitancia del proceso, menor es la banda proporcional que se puede asignar al regulador.

Entre más grandes son los retardos que los tiempos muertos del sistema, más amplia debe ser la banda proporcional.

En este segundo caso, la regulación proporcional es eficiente sólo si las variaciones de carga son de pequeña importancia, de manera que, comporte errores a régimen de importancia menor, a pesar de la amplia banda proporcional.

En general se busca de regular la banda proporcional sobre un valor intermedio de manera de tener una curva de respuesta ligeramente subamortiguada. Esta solución de compromiso tiende a limitar el error a régimen siempre, asegurando al sistema un cierto margen de estabilidad.

1.4- REGULACION CON ACCION INTEGRAL

La regulación con acción proporcional es aplicable a procesos que tienen gran capacitancia y estén sujetos a modestas variaciones de carga. En el caso que el proceso presente una pequeña capacitancia y esté sujeto a variaciones de carga de notable importancia, la regulación proporcional portaría a un notable error entre

el valor de la variable regulada y el Set Point, cosa que, en la mayor parte de los casos, resulta inaceptable. Se recurre entonces a la regulación con acción integral que, presenta la notable y preciada característica de anular el error a régimen.

La ecuación que individua al funcionamiento de un regulador con acción integral se expresa en términos relativos, de la siguiente manera:

$$Y_r - Y_{0r} = K_i \cdot \int_e^t e dt \dots (1)$$

Y_r y Y_{0r} Son los valores relativos de la apertura instantánea e inicial del órgano de regulación.

K_i Es un parámetro dependiente de las características del instrumento de regulación.

$e = \frac{X - X_0}{X_2 - X_1}$ Constituye el error relativo al campo de funcionamiento del instrumento.

En la ecuación anterior se observa que la apertura de la válvula de regulación depende del valor del error y del tiempo de persistencia de tal error.

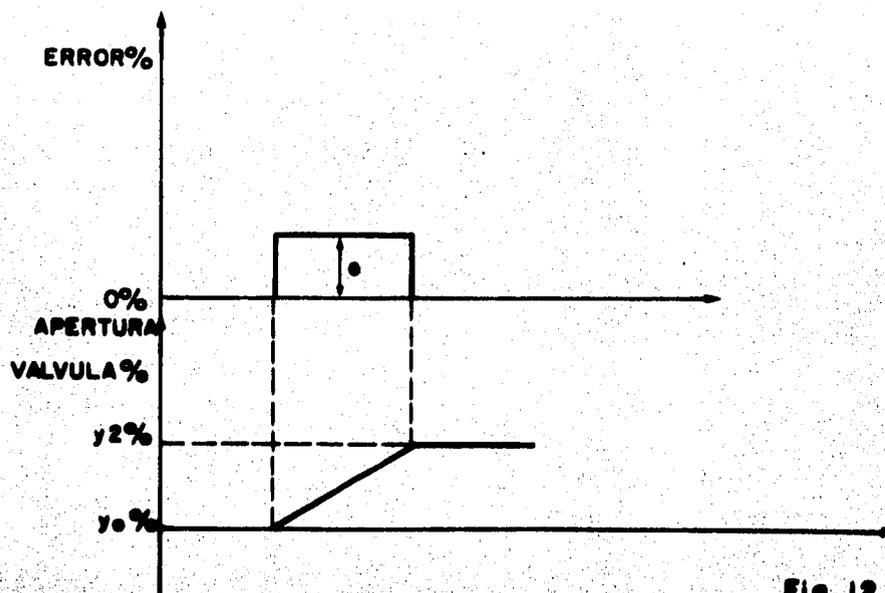


Fig. 12

En la figura 12 se reporta gráficamente la respuesta de un instrumento de regulación con acción integral, con la hipótesis que la variable controlada sufra una variación a escalón.

Apenas aparece el error "e" la válvula comienza a moverse según la integral del error hasta que, éste se anula y la válvula se queda en la nueva posición Y_r .

Derivando ambos miembros de la ecuación:

$$\frac{dY_r}{dt} = K_i e \quad (2)$$

Lo que implica que la velocidad con la cual se desplaza el órgano regulante es proporcional al valor instantáneo del error según el coeficiente de proporcionalidad K_i , que, por esto, es llamado factor de velocidad.

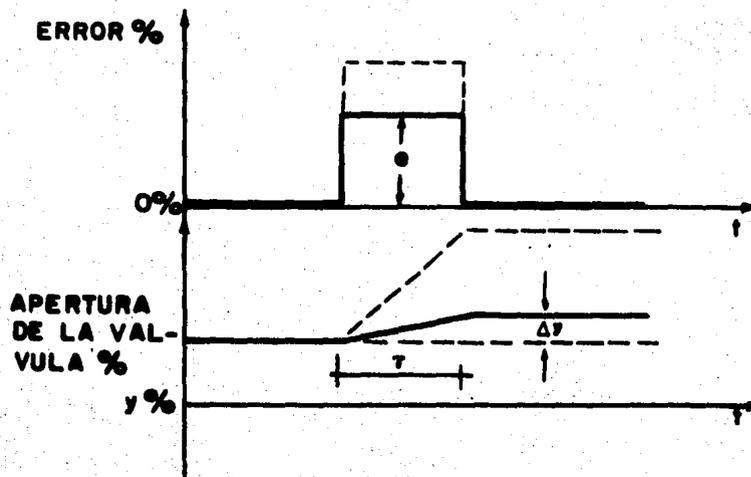


Fig. 13

Del examen de la figura 13, se puede ver que, cuanto mayor es el valor instantáneo del error, mayor es la velocidad de desplazamiento del órgano regulante, de acuerdo con la ecuación anterior.

$$K_i = \frac{dY_r}{dt} / e$$

Con la hipótesis de variación a escalón de la variable controlada la Y varía linealmente en el tiempo como en la figura 13, por lo cual:

$$\frac{dY_r}{dt} = \frac{\Delta Y}{T}$$

y por lo tanto:

$$K_i = \frac{\Delta Y}{T \cdot e} \quad (4)$$

Veamos ahora el comportamiento del regulador en régimen sinusoidal.

$$\text{Sea, } e = E e^{j\omega t}$$

Para el cual por linealidad del sistema:

$$Y_r = Y e^{j(\omega t - \varphi)}$$

∴ La ecuación (1) se convierte en:

$$\begin{aligned} Y e^{j(\omega t - \varphi)} &= K_i \cdot \int E e^{j\omega t} dt \\ \therefore Y e^{j(\omega t - \varphi)} &= \frac{K_i}{j\omega} \cdot E e^{j\omega t} \end{aligned}$$

La función de transferencia del regulador integral será:

$$\frac{Y e^{J(Wt - \varphi)}}{E e^{JWt}} = \frac{K_i}{JW}$$

De la cual se concluye que el regulador con acción integral provoca un desfase de 90° en retardo de la señal de salida (posición de la válvula) respecto a la señal de entrada (error).

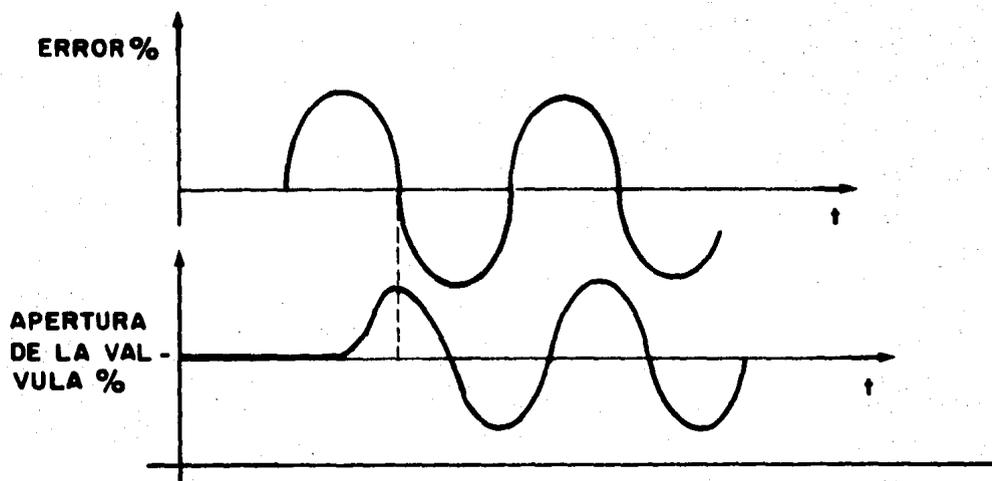


Fig. 14

En la figura 14 está representada la respuesta en el tiempo, para una variación sinusoidal del error.

El regulador, en el caso ideal en el cual no existen retardos de transferencia y tiempos muertos, introduce un retardo entre la variable regulada y la acción regulante. Si a este retardo se suman

aquellos inevitables debidos a la capacitancia, resistencia y tiempos muertos del proceso y del regulador, se puede facilmente alcanzar los 180° de desfasamiento a los cuales el sistema entra en oscilación.

El regulador con acción integral tiende, a la inestabilidad. Esta tendencia es tanto más sentida cuanto mayor es la velocidad de integración, es decir, cuanto mayor es K . En efecto, en tal caso al manifestarse un error "e" el regulador integral entra rápidamente en acción desplazando velozmente el elemento móvil del órgano final de regulación. Pero, dada la alta velocidad de integración (K , grande) y la baja velocidad de respuesta del proceso (elevados retardos), el elemento final por ej.: la válvula será abierta más de lo necesario antes que la variable retorne al Set Point (error cero).

El signo del error, por esto, se invierte y el regulador porta a la válvula rápidamente en cierre antes aún que el error sea nuevamente anulado. Tal comportamiento se repite periódicamente, con continuas pendulaciones de la variable controlada en torno al valor prefijado.

En el regulador con acción integral es necesario, por lo tanto, actuar sobre la velocidad de integración a modo de adaptarla a la velocidad de respuesta del proceso.

En definitiva una regulación con acción integral se presta bien para el control de aquellos procesos que tengan una capacidad pequeña, pequeñas resistencias, pequeños tiempos muertos y en los cuales las variaciones de carga sean lentas y de pequeño valor.

1.5.- REGULACION CON ACCION PROPORCIONAL + INTEGRAL: P+I

Se ha visto que la acción integral une, a la apreciable propiedad de reportarse la variable regulada al valor del Set Point, el inconveniente de tender a la inestabilidad cuando el proceso presenta considerables retardos.

En tal caso se debe reducir excesivamente la velocidad de intervención de la regulación, lo que constituye un gran inconveniente cuando se deban neutralizar al momento de aparecer desequilibrios imprevistos. Por otro lado, la velocidad de desplazamiento del órgano regulante es proporcional al valor del error por lo cual, al aparecer, la acción correctiva es lenta y alcanza su plena eficacia en un segundo tiempo.

Al contrario un regulador con acción proporcional permite una mayor rapidez de comando, en cuanto la velocidad de desplazamiento del órgano regulante es proporcional a la velocidad de variación del error. Por lo que la regulación proporcional es la más idónea para hacer frente a desequilibrios imprevistos, presentando solo

el inconveniente de dar lugar a un error de proporcionalidad, tanto mayor cuanto mayor es el desequilibrio.

Nace, ahora, la necesidad de combinar juntos los dos tipos de reguladores, para poder utilizar las ventajas de ambos.

En un regulador con acción P+I la relación que atraviesa la señal de entrada y la de salida, en términos relativos, se expresa del siguiente modo:

$$Y_r - Y_0r = \frac{1}{B}e + K_i \int e dt \quad (8)$$

El regulador provoca un desplazamiento del órgano regulante, rápido y proporcional al error y sucesivamente una acción integral más lenta que anula el error de proporcionalidad. Alcanzando el equilibrio, la acción proporcional desaparece ($e=0$), y el órgano final de regulación permanece bajo el control de la sola acción integral.

En general, en los reguladores P+I, se define la velocidad de integración en base al número de repeticiones al minuto, es decir, al número de veces que la acción integral repite en un minuto la señal de salida del regulador proporcional. En el caso de la figura 15

$$Y = \frac{\Delta Y}{\frac{1}{B} e T} ; r = \begin{array}{l} \text{No. de repeticiones} \\ \text{al minuto} \end{array} \quad T = t_2 - t_1$$

y de (4) $\frac{\Delta Y}{eT} = Ki \quad \therefore r = Ki.B$

El inverso del número de repeticiones al minuto representa, el tiempo de restitución, es decir, el tiempo después del cual la acción integral iguala la acción proporcional.

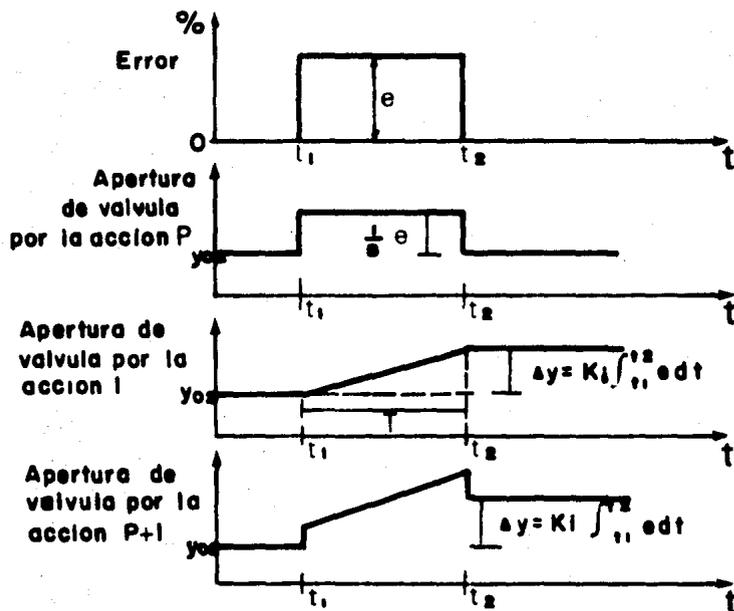


Fig. 15

La ecuación (8) se puede escribir:

$$Y_r - Y_0 r = \frac{1}{B} e + \frac{r}{B} \cdot \int_{t_1}^{t_2} e dt \quad (9)$$

El regulador con acción P+I está, en general, dotado de dos comandos manuales que actúan separadamente sobre la banda proporcional y sobre el número de repeticiones al minuto. La regulación de la banda proporcional y del número de repeticiones por minuto (velocidad de integración) son efectuadas teniendo en cuenta las características del proceso regulado.

Menor es la banda proporcional y mayor es el número de repeticiones al minuto, más enérgica es la acción regulante y mayor es la posibilidad del sistema de entrar en oscilación.

Es evidente, por lo tanto, que en los procesos que presentan considerables retardos, si se acompaña la acción proporcional de una acción integral demasiado marcada disminuye el margen de estabilidad de todo el sistema. Es necesario, entonces, actuar sobre la banda proporcional y sobre el número de repeticiones al minuto en el sentido de aumentar la la., y reducir el segundo.

En definitiva la acción P+I se adopta con éxito en el control de procesos que estén sujetos a amplias y frecuentes variaciones de carga en cuanto es capaz de reaccionar inmediatamente en el sentido de restituir la variable controlada al Set Point.

Su empleo es, aconsejable en los procesos que no presenten retardos y tiempos muertos considerables que, constriñendo por motivos de estabilidad a reducir el número de repeticiones al minuto, rinden la acción de restitución muy lenta.

1.6.- REGULACION CON ACCION DERIVATIVA

Se ha visto que en un regulador con acción P+I más grandes son los retardos del proceso, mayor debe ser la banda proporcional y menor el número de repeticiones al minuto.

Esto comporta el grave inconveniente, que para considerables variaciones de carga, la acción proporcional provoca amplias desviaciones de la variable regulada respecto al Set Point, desviaciones que la acción integral puede anular sólo muy lentamente por la baja velocidad de integración.

El inconveniente puede ser eliminado introduciendo en el sistema de regulación una acción derivativa.

Un regulador con acción derivativa esta gobernado por la siguiente ecuación:

$$Y_r - Y_{0r} = K_d \cdot \frac{de}{dt} \quad (10)$$

La posición del órgano regulante es proporcional a la velocidad con la cual la variable controlada se separa del Set Point.

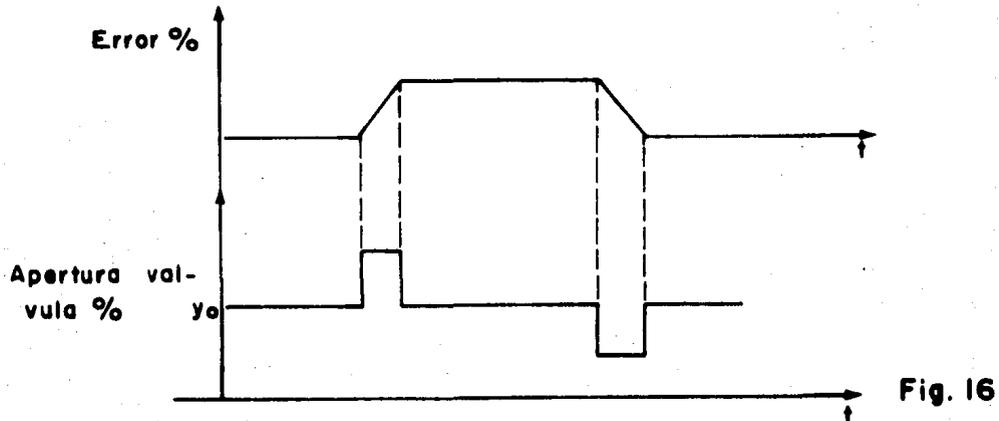
De la ecuación (10) se puede notar que la acción derivativa sola no puede comenzar a hacer alguna acción regulante a régimen. En efecto, cualquiera que sea el valor de la variable regulada X, a condición de que sea constante, será:

$$\frac{de}{dt} = \frac{d}{dt} (X - X_0) = \frac{dX}{dt} = 0 \quad \text{y por lo tanto}$$

A régimen será siempre $Y_r = Y_{0r}$

La acción derivativa interviene sólo en los transitorios como

se puede ver en la figura 16.



Por esta limitación intrínseca, la acción derivativa viene usada solo en combinación con la acción proporcional ó proporcional + integral.

La ecuación del regulador con acción derivativa en régimen sinusoidal nos da:

$$Y e^{J(Wt - \varphi)} = K_d \frac{d}{dt} E e^{JWt}$$

de donde:

$$Y e^{J(Wt - \varphi)} = K_d J W E e^{JWt}$$

La función de transferencia del regulador con acción derivativa es entonces:

$$\frac{Y e^{J(Wt - \varphi)}}{E e^{JWt}} = K_d J W \quad (11)$$

De la cual se concluye que el regulador con acción derivativa provoca un desfaseamiento de 90° en adelanto, de la acción regulante respecto de la variable regulada.

En la figura 17 se representa la respuesta de un regulador de este tipo para una variación sinusoidal del error.

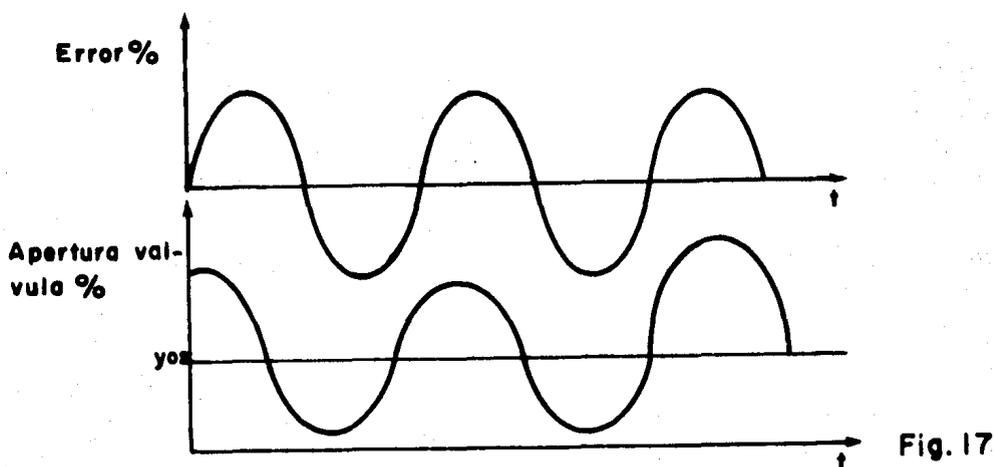


Fig. 17

El adelanto introducido por la acción derivativa puede compensar los retardos debidos a la resistencia de transferencia, capacitancia y tiempos muertos del proceso, con obvias ventajas para la estabilidad. La acción derivativa, tiene, por lo tanto, la prerrogativa de conferir estabilidad a los sistemas de regulación.

1.7.- REGULACION CON ACCION PROPORCIONAL + DERIVATIVA: P+D

Se ha ya dicho que la acción derivativa sola no es apta para corregir un fuera de equilibrio estable por lo que siempre va acompañada a una regulación con acción proporcional o proporcional + integral.

La ecuación característica de un regulador con acción P+D es:

$$Y_r - Y_{0r} = \frac{1}{B} e + K_d \frac{de}{dt}$$

Durante la variación de la variable regulada, la acción derivativa provoca un desplazamiento del órgano regulante tanto mayor cuanto más veloz es la desviación.

Una vez alcanzado el nuevo régimen, la acción derivativa desaparece y el equilibrio es mantenido por la sola acción proporcional.

Se tiene, de este modo, una acción de anticipo que inicialmente desplaza el órgano regulante, más de cuanto habría hecho la sola acción proporcional con un consecuente mejoramiento de la acción regulante especialmente para los procesos afectos de considerables retardos.

En la figura 18 se reporta la respuesta de un regulador P+D

a una variación a rampa del error.

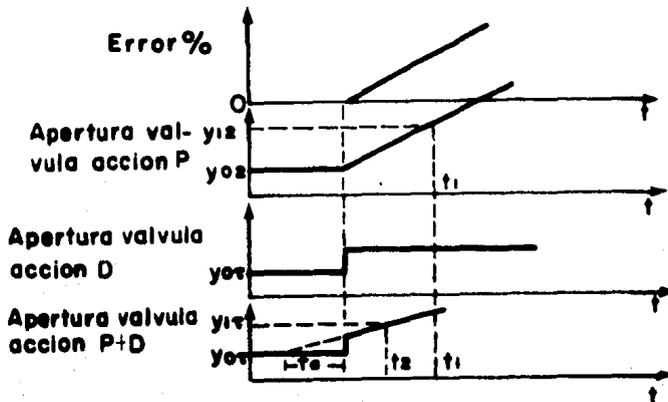


Fig. 18

Del examen de las gráficas (figura 18) se ve que la respuesta de un regulador con acción P+D es igual a aquella de un regulador con simple acción proporcional que haya intervenido con un buen anticipo igual a T_d .

El tiempo T_d se define tiempo de anticipo. Ahora se puede escribir la ecuación 12 en función de tiempo de anticipo T_d y haciendo referencia a la figura 18, por lo tanto, tenemos:

$$e = Kt$$

La acción proporcional será:

$$Y_r - Y_0r = \frac{1}{B} Kt$$

La acción P+D:

$$Y_r - Y_0 r = \frac{1}{B} e + K_d \cdot \frac{de}{dt}$$

$$Y_r - Y_0 r = \frac{1}{B} K t + K_d \cdot K$$

El tiempo empleado por el órgano de regulación para alcanzar una determinada posición está dado, en los dos casos, respectivamente por:

$$Y_1 r = Y_0 r + \frac{1}{B} K t_1 \quad (\text{acción p})$$

$$Y_1 r = Y_0 r + \frac{1}{B} K t_2 + K_d \cdot K \quad (\text{acción P+D})$$

Igualando los dos miembros se tiene:

$$\frac{1}{B} K t_1 = \frac{1}{B} K t_2 + K_d K$$

$$t_1 - t_2 = T_d = K_d \cdot B$$

$$\Rightarrow K_d = \frac{T_d}{B} \quad \text{sustituyéndola en la (12) tenemos:}$$

$$Y_r - Y_0 r = \frac{1}{B} e + \frac{T_d}{B} \cdot \frac{de}{dt} \quad (13)$$

La adición a la acción proporcional de una acción derivativa permite de usar bandas proporcionales muy estrechas, sin, por esto, disminuir el margen de estabilidad del sistema gracias al anticipo introducido por la acción derivativa que compensa en parte los re-

tardos de respuesta.

La acción derivativa, simula un temporal aumento o disminución de la banda proporcional del instrumento, ya sea que la variable regulada se esté acercando o alejando del Set Point.

El regulador con acción P+D viene empleado en el control de procesos con pequeña capacitancia cuando se quieren compensar eventuales considerables retardos de transferencia.

Es necesario que la capacitancia sea modesta para que la acción derivativa resulte eficaz, sólo cuando las desviaciones de la variable son rápidas.

En efecto, en los procesos que tienen grandes constantes de tiempo, es decir, gran capacitancia, la velocidad de variación del error es demasiado baja para generar una señal derivativa tal que actúe eficientemente sobre el proceso.

1.8.- REGULACION CON ACCION PROPORCIONAL + INTEGRAL + DERIVATIVA: P+I+D

La acción derivativa sumada a la proporcional permite mejorar el comportamiento de los procesos lentos, pero presenta el inconveniente de admitir un error a régimen. Cuando se desea anular tal error se recurre a una regulación con acción P+I+D. Esa goza

de la ventaja relativa a los tres tipos de reguladores y por ende se puede considerar como la acción regulante más completa que, con una oportuna escogencia de la banda proporcional, del número de repeticiones al minuto y del tiempo de anticipo, puede adaptarse a cada tipo de proceso. Obviamente ésta es particularmente indicada para la regulación de procesos que presentan considerables retardos.

$$\text{La ecuación es: } Y_r - Y_0 r = \frac{1}{B} e + \frac{r}{B} \cdot \int edt + \frac{T_d}{B} \cdot \frac{de}{dt}$$

En la figura 19 se reporta la respuesta del regulador con una variación a escalón de la variable regulada.

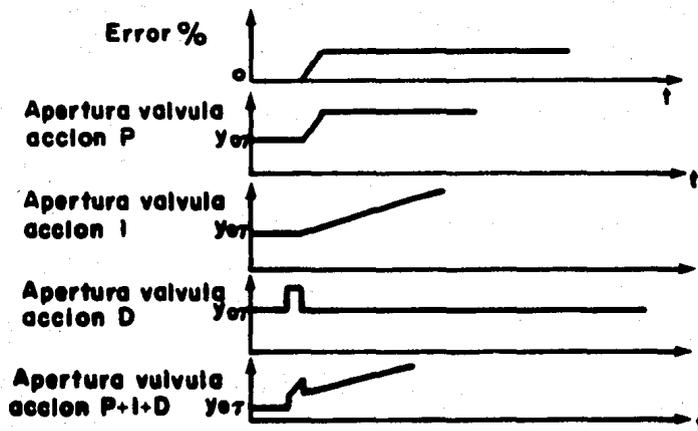


Fig. 19

La señal de salida depende del valor del error (acción P), de su duración (acción I) y de la velocidad de variación (acción D).

Tal regulador tiene todas las características ya descritas por el regulador P+I más la gran ventaja de que la acción derivativa reduce el tiempo empleado por la variable para reformar al Set Point. El regulador P+I+D, por lo tanto, es particularmente apto para el control de procesos que presenten grandes retardos, los cuales requieren una banda proporcional amplia y bajo número de repeticiones al minuto.

Esto comporta que, para amplias variaciones de carga, la acción proporcional introduce un considerable error entre la variable regulada y el Set Point, error que la sola acción integral alcanza a anular en un tiempo muy largo. La presencia de la acción derivativa con un oportuno tiempo de anticipo, reduce el tiempo de restitución.

1.9.- REGULACION CON ACCION P+I CON SEÑAL DE PRE-REGULACION

Todos los tipos de regulación precedentemente descritos no dan solución satisfactoria cuando en el sistema están presentes tiempos muertos considerables y en particular cuando el proceso tiene un tiempo de reacción muy pequeño. La misma acción derivativa no aporta mejoramiento en cuanto que, durante el tiempo muerto no puede intervenir, y cuando interviene su acción puede ser demasiado

enérgica, en relación a la velocidad de respuesta del proceso. Por esta razón, la acción derivativa, más que mejorar el comportamiento, puede sin duda llevarlo a la inestabilidad. Una solución satisfactoria del problema se puede tener mediante la introducción en la cadena de regulación de una o más señales auxiliares independientes y teniendo un tiempo muerto pequeñísimo, llamadas "Señales de pre-regulación".

Un caso clásico de proceso caracterizado por tiempo muertos considerables es aquel que se desarrolla en los bancos de sobrecalentadores de una caldera. Se sabe que la temperatura del vapor de admisión a la turbina debe ser regulada en un valor constante de tal modo de permanecer dentro de los límites del proyecto. Uno de los sistemas más usados para la regulación de temperatura es aquel de inyectar agua en el vapor, en cantidad tal de mantener siempre constante la temperatura del vapor mismo.

Por obvios motivos de seguridad y economía, se prefiere subdividir el sobrecalentador en dos partes interponiendo la inyección de agua entre el primer y el segundo banco.

Lo que deriva en un circuito de regulación con tiempos muertos considerables debidos al tiempo empleado por el fluido regulante para atravesar el segundo banco.

Se recurre entonces a un esquema de regulación como el señalado en la figura 20.

Una señal proporcional a la temperatura del vapor sobrecalentado en salida, comparada con el valor del Set Point, por medio de un regulador con acción P+I regula la apertura de la válvula sobre el agua de enfriamiento.

Para estabilizar el circuito de regulación y reaccionar tempestivamente a eventuales perturbaciones que puedan hacer variar la temperatura (por ejemplo, variaciones de la carga o del poder calorífico del combustible) se introduce en la cadena de regulación una señal de temperatura tomada inmediatamente después del atemperador y por lo tanto sin tiempo muerto.

Esta viene derivada y enviada por medio del sumador y actúa sobre la válvula de regulación. Apenas la temperatura tiende a variar, interviene inmediatamente esta señal de pre-regulación que posiciona la válvula de manera de oponerse a la variación. En un segundo tiempo el regulador P+I restablece la temperatura de salida al valor del Set Point.

En otros términos la señal auxiliar anticipada constituye una señal de tendencia que hace de modo que el sistema de regulación sea con acción P+I+D, en la cual la acción derivativa,

no resintiendo del tiempo muerto, esta en grado de compensarlo.

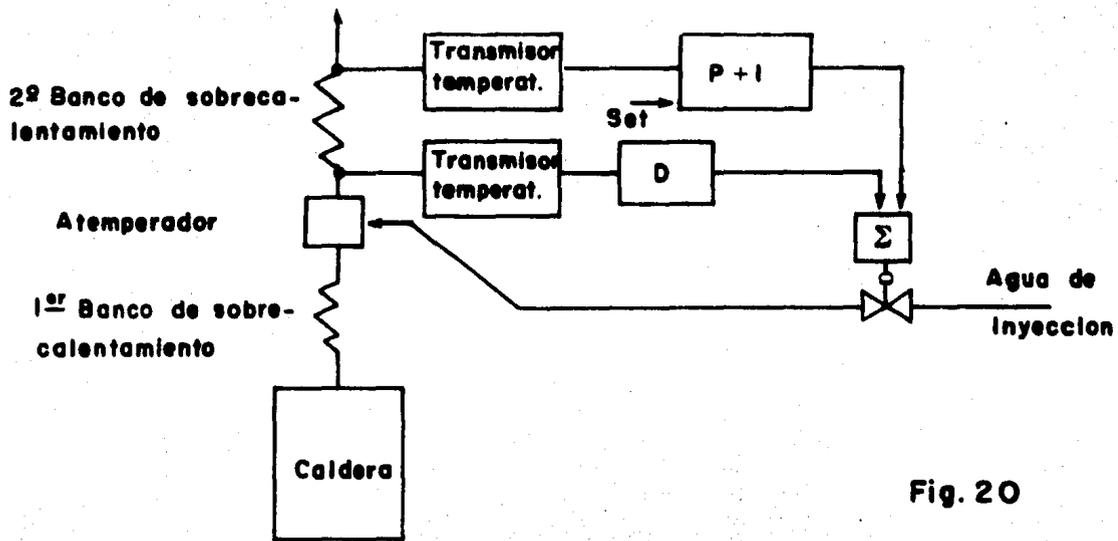


Fig. 20

2

C A P Í T U L O 2.

2.- REGULACION AUTOMATICA

2.1.- LA REGULACION AUTOMATICA Y LOS PROCESOS INDUSTRIALES

En una planta se asiste a la ejecución de muchos procesos con el fin de operar, según determinados intentos, sobre la materia y sobre la energía.

A la regulación automática es confiado el objetivo de controlar el complejo de aparatos que participan en la ejecución de un proceso, para mantener constantemente en respuesta a los datos de proyecto sus características.

Nace la necesidad de tomar medidas de temperaturas, presiones, caudales, niveles, conductibilidad, etc. en los varios puntos bajo control, manipular oportunamente y a menudo integrarle con informaciones externas al proceso, para enviar las oportunas modificaciones actuando sobre los elementos finales de regulación.

Se comprende, entonces, como tal control deba ser continuo y preciso a modo de mantener el equilibrio dinámico indispensable para obtener del proceso las prestaciones previstas en el proyecto.

Se demanda, por tanto, a los instrumentos propuestos a la regulación automática precisión y sensibilidad.

Al hombre le corresponde la tarea de controlar la eficiencia

de la intervención de la regulación automática y de intervenir con rapidez y competencia en caso de fallas.

2.1.1. LOS PROCESOS INDUSTRIALES

Un proceso está constituido del conjunto de las operaciones ejecutadas por medio de aparatos sobre la materia y sobre la energía con el fin de conseguir determinados objetivos.

Los procesos industriales se pueden dividir en 2 grandes categorías:

- Procesos de energía
- Procesos de materia

2.1.1.1. PROCESOS DE ENERGIA

En estos procesos la energía viene provista de un sistema que la transforma, en parte la almacena y en parte la restituye bajo forma de carga útil y de pérdidas.

Llamando "Carga" la suma de la carga útil más las pérdidas y "Alimentación" la cantidad de energía entregada al sistema, se puede decir que está en equilibrio cuando la alimentación es igual a la carga.

Existe siempre en estos procesos un parámetro que es el índice de un equilibrio alcanzado entre carga y alimentación llama-

do "Potencial de la Carga".

POR EJEMPLO:

- En un intercambiador de calor el potencial de la carga, índice de la igualación entre las Calorías entrantes (Alimentación), y las Calorías salientes (Carga) es la temperatura del fluido saliente.

- En un sistema turbina-alternador el potencial de la carga es el número de giros del rotor que, si varía indica que existe un desequilibrio entre par motor y par resistente.

2.1.1.2 PROCESOS DE MATERIA

En estos procesos la materia (Alimentación) viene provista de un sistema que la acumula e inmediatamente o después de un cierto tiempo la restituye (Carga).

También aquí existe un índice del equilibrio alcanzado entre alimentación y carga, es decir, un "Potencial de Carga".

POR EJEMPLO:

- En un depósito de agua el potencial de la carga es el nivel, en un recipiente de gas en presión es la presión, en un proceso de condicionamiento químico puede ser el PH del fluido saliente.

2.1.2 LA CADENA DE REGULACION

Una cadena de regulación automática se puede esquematizar con

el esquema a bloques siguiente:

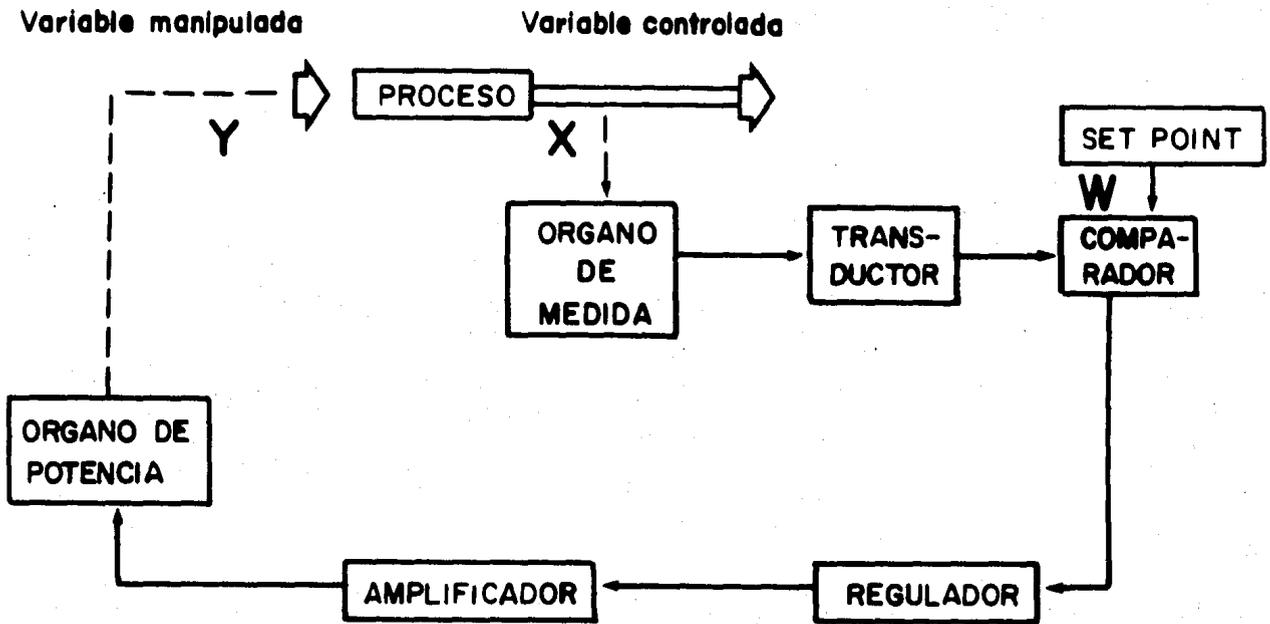


Fig. 1

La función de la cadena de regulación es de medir el valor de la dimensión deseada en una zona del proceso y de operar en modo de limitar las desviaciones respecto a un valor prefijado (Set Point).

Tal dimensión es llamada "Variable Controlada". El regulador compara tal variable con el valor prefijado que viene preventivamente impuesto del exterior (Set Point) y, en base al signo y a la relevancia del error (Valor medido - valor de Set Point) trasmite una señal al elemento final de regulación.

Esta señal, por medio del elemento final de regulación, controla otra variable del proceso, llamada VARIABLE MANIPULADA o REGULANTE, que actúa directamente o indirectamente sobre la variable controlada a fin de recomponer el equilibrio del proceso.

2.1.3 CARACTERISTICAS DE LOS PROCESOS

El estudio de las características de los procesos es de primaria importancia en el proyecto de los circuitos de regulación. De éste depende en efecto, la escogencia del tipo de acción regulante más idónea y de las características para asignar al regulador.

2.1.3.1 PROCESOS AUTOREGULANTES Y NO AUTOREGULANTES

Algunos procesos poseen características intrínsecas que limitan dentro de ciertos valores las desviaciones del potencial de la carga, reaccionando tempestivamente a un desequilibrio entre alimentación y carga a fin de restablecer el equilibrio.

Estos son, de los sistemas intrinsecamente reaccionantes que

reciben el nombre de PROCESOS AUTOREGULANTES.

El proceso es tal que ejecuta por sí solo una acción reguladora por tanto se presta mejor a ser regulado en cuanto, por así decir, colabora con el sistema de regulación para el establecimiento de un nuevo equilibrio.

En un proceso no autoregulante un desequilibrio entre alimentación y carga conduce a un desequilibrio del potencial de carga sin que el proceso pueda, en algún modo reaccionar.

2.1.3.2 CAPACITANCIA O RECEPTIVIDAD

La capacitancia de un proceso es medida por la regulación entre la variación de la alimentación y la correspondiente variación del potencial de la carga (Variable de referencia).

Es, por lo tanto necesario definir el potencial de la carga respecto al cual se calcula la capacitancia.

Un proceso con gran capacitancia resiente poco las variaciones de la alimentación y por tanto, presenta dotes de gran estabilidad y en la mayor parte de los casos facilita la tarea de la regulación. Por otro lado, una gran capacitancia hace que el proceso responda con lentitud a las eventuales correcciones aportadas por la regulación sobre la alimentación introduciendo,

así, un retardo en la respuesta.

En la figura 2 se representan cualitativamente las curvas de respuesta 1 y 2 para dos procesos con capacitancia pequeña y grande respectivamente, para una variación a escalón de la alimentación.

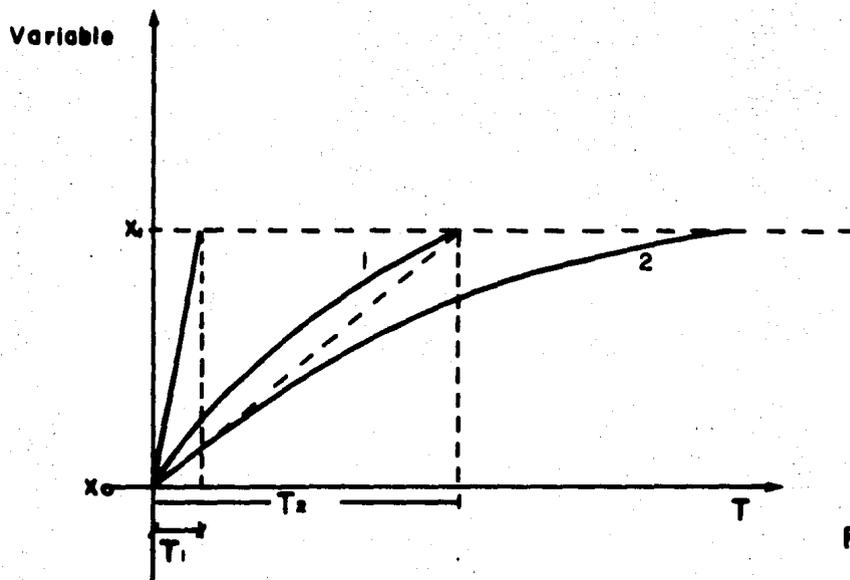


Fig. 2

- X. Es el potencial de la carga al tiempo $t=0$,
- X_1 Es el potencial de la carga al cual se reportan los dos procesos por efecto de la variación a escalón de la alimentación.

Se puede fácilmente notar que el proceso dos, con capaci-

tancia mayor, tiene también una constante de tiempo T mayor.

2.1.3.3 RESISTENCIA

La segunda causa de retardo en la respuesta de los procesos es debida a la resistencia, entendida como obstáculo a la transmisión de energía o de materia. La resistencia de un proceso así entendida, tiene como consecuencia el retardar el efecto sobre el potencial de la carga de una variación de la alimentación. Este retardo es llamado retardo de transferencia. Y es sin lugar a dudas desfavorable a los fines de la regulación del proceso porque limita la velocidad con la cual se puede intervenir en las correcciones del potencial de la carga.

En la figura 3 está representado el proceder del potencial de la carga en el tiempo, en un proceso con resistencia, para una variación a escalón de la alimentación.

El retardo introducido por la resistencia se indica con T_r mientras que con T se indica la constante de tiempo debido a la capacitancia del proceso.

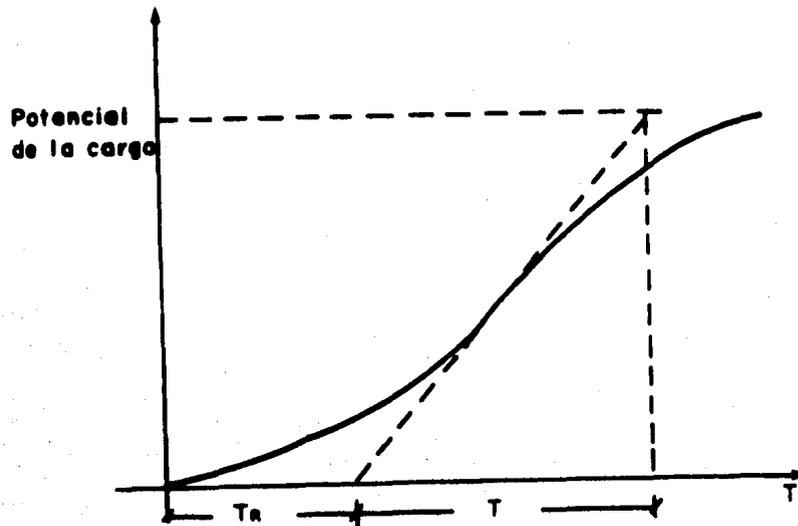


Fig. 3

2.1.3.4 TIEMPO MUERTO, RETARDO CINEMATICO

Otro tipo de retardo del cual es necesario tener en cuenta para los fines de una buena regulación es el retardo cinemático que introduce un tiempo muerto en la respuesta de los procesos. Los retardos cinemáticos son independientes del tipo de proceso y dependen únicamente de la distancia del elemento de medida de la zona de regulación. Las eventuales variaciones del potencial de la carga que se presentan en el proceso son entonces advertidas por el elemento sensible con un retardo de tiempo dado por la regulación entre el espacio que debe recorrer el fluido para alcanzar el elemento sensible y su velocidad, Se comprende de in-

mediato que el tiempo muerto es muy desventajoso desde el punto de vista de la regulación de los procesos en cuanto el sistema de control solo puede intervenir después que el desequilibrio haya sido advertido por el elemento sensible.

En tal intervalo de tiempo el proceso se ejecuta sin ninguna posibilidad de control y puede tenerse, por lo tanto, cualquier perturbación sin que la regulación pueda intervenir.

Se debe notar que a este tiempo muerto se necesita añadir aún aquellos de los elementos sensibles y los otros componentes de la cadena de regulación.

En la figura 4 se representa para un proceso con capacitancia, resistencia y tiempo muerto, la curva de respuesta a una variación a escalón de la alimentación.

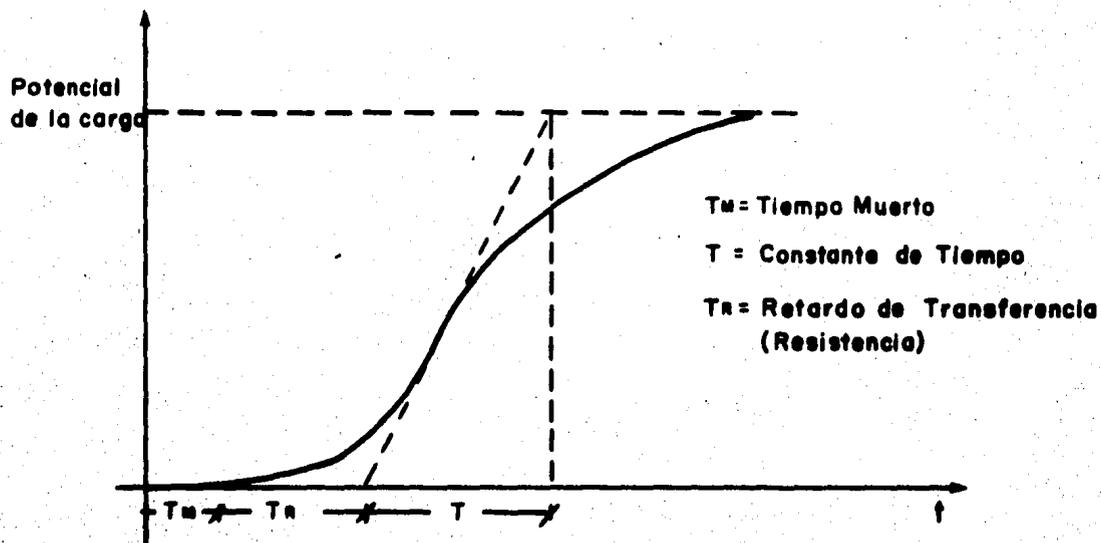


Fig. 4

2.1.3.5 EFECTO DE LOS RETARDOS

La acción de control de una cadena de regulación, es influenciada por los retardos introducidos por el proceso (Capacitancia, resistencia y tiempo muerto) y por aquellos introducidos por los mismos componentes de la cadena de regulación. Basta pensar en los retardos que provienen de los elementos de medida, de los transmisores si son de tipo neumático y del mismo regulador.

La incidencia relativa de estos retardos de tiempo depende, obviamente, de la característica del proceso. Un proceso con una gran capacitancia tiene una inercia notable y por tanto los retardos de los componentes del circuito de regulación devienen despreciables con respecto a la constante de tiempo del proceso.

Los tiempos muertos y los retardos de transferencia provocan defasamientos en el tiempo entre la variable controlada y la acción correctiva y esto puede llevar al inicio de oscilaciones cuando el desfase alcanza los 180° .

Las oscilaciones resultan de amplitud creciente, constante o decreciente según que el coeficiente de amplificación de la cadena de control sea $\neq 1$ ó lo que es lo mismo, según que el diagrama de Nyquist de la función de transferencia a cadena abierta envuelva o no el punto - 1.

En el diagrama de Nyquist, se puede observar el efecto de los retardos con referencia a la estabilidad de los sistemas.

Basta pensar que un retardo angular corresponde a una rotación del vector GH (Función de transferencia a cadena abierta) en sentido horario el que se traduce en una rotación de la curva entera.

De la figura 5 se puede ver como un retardo de tiempo, que comporta la rotación de la curva (1) (representante del comportamiento del sistema considerado sin retardos) hasta hacerla coincidir con la curva (2) hace inestable el sistema.

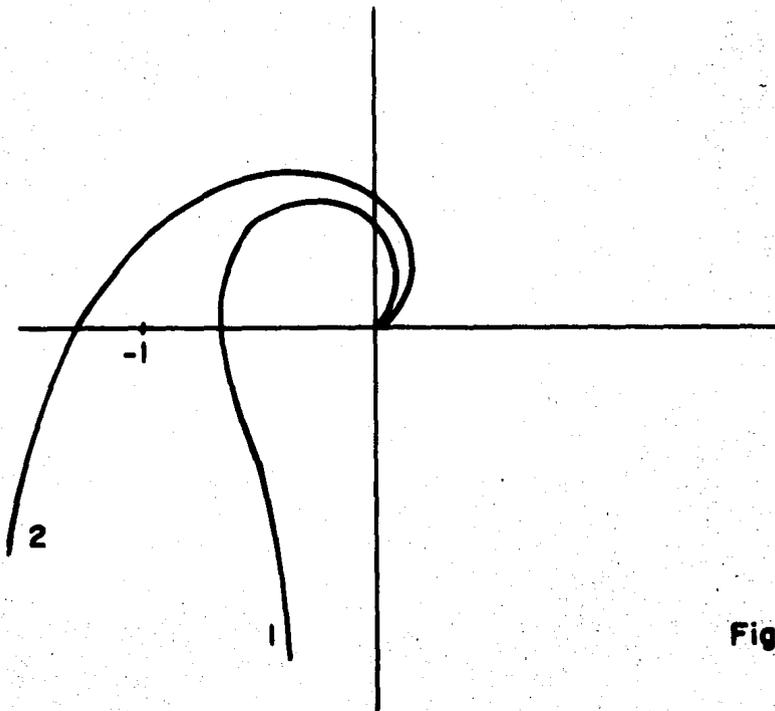


Fig. 5

2.2 REGULADORES ELECTRONICOS

La facilidad de disponer energía eléctrica y la absoluta ausencia de retardo de transmisión han hecho poner, en los últimos años, la atención de los constructores sobre la posibilidad de empleo de los circuitos electrónicos en el campo de la regulación.

Los reguladores electrónicos están constituidos, en general, de amplificadores dotados de elevada ganancia, oportunamente realimentados.

La ganancia elevada hace que la tensión, inmediatamente antes del amplificador sea casi nula.

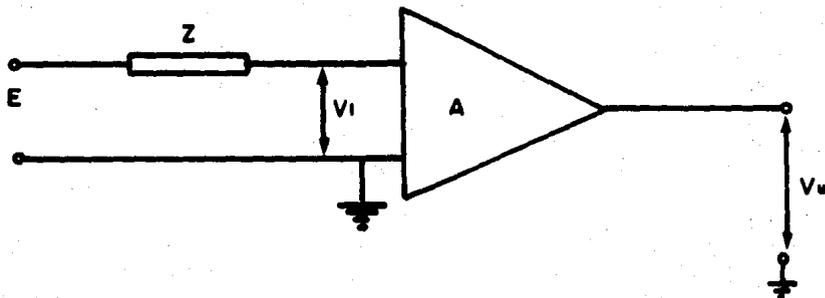


Fig. 1

A= ganacia del amplificador.

Actuando oportunamente sobre el circuito de realimentación, se puede adaptar el amplificador para funcionar como regulador con acción P, P+I, P+D, P+I+D.

2.2.1 REGULADOR ELECTRONICO CON ACCION PROPORCIONAL

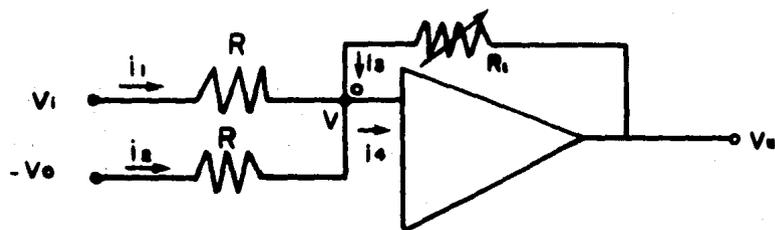


Fig. 2

V_u es la tensión de salida del transmisor, proporcional al valor instantáneo de la variable regulada.

V_0 es una tensión de referencia proporcional al Set Point o valor prefijado, que se le cambia de signo antes de meterla al amplificador.

R_1 es la resistencia de realimentación.

Aplicando el principio de Kirchoff al nodo "0" obtenemos:

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_4$$

Donde i_4 representa la corriente de base del amplificador, la cual es despreciable respecto a i_1, i_2 y i_3 por lo cual se puede escribir con buena aproximación.

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

$$\frac{V_i - V}{R} + \frac{-V_o - V}{R} + \frac{V_u - V}{R_1} = 0$$

Debido a la alta ganancia del amplificador, se puede despreciar la tensión V . $\therefore \frac{V_i - V_o}{R} = \frac{-V_u}{R_1}$

$$V_u = -\frac{R_1}{R} (V_i - V_o) \quad \text{es decir}$$

que la tensión de salida es proporcional según la relación $\frac{R_1}{R}$ a la de entrada $(V_i - V_o)$ que a su vez es proporcional al error entre la variable controlada y el valor prefijado. El amplificador se comporta, por lo tanto, como un regulador con acción proporcional y ganancia igual a $\frac{R_1}{R}$

Actuando sobre R_1 es posible regular la banda proporcional del instrumento.

2.2.2 REGULADOR ELECTRONICO CON ACCION INTEGRAL

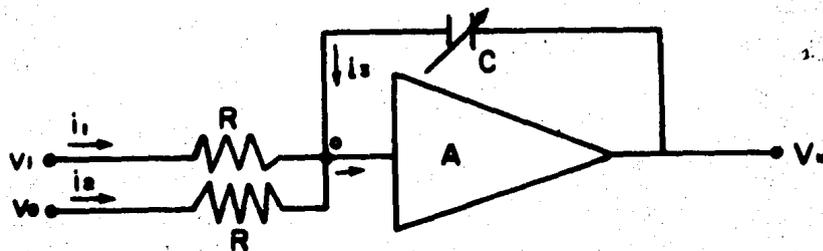


Fig. 3

La realimentación es obtenida mediante una impedancia capacitiva. La señal de entrada proporcional a la magnitud regulada y la relativa al Set Point son aplicadas antes de las resistencia R.

Por Kirchoff al nodo "0" y despreciando la corriente de entrada al amplificador se tiene:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

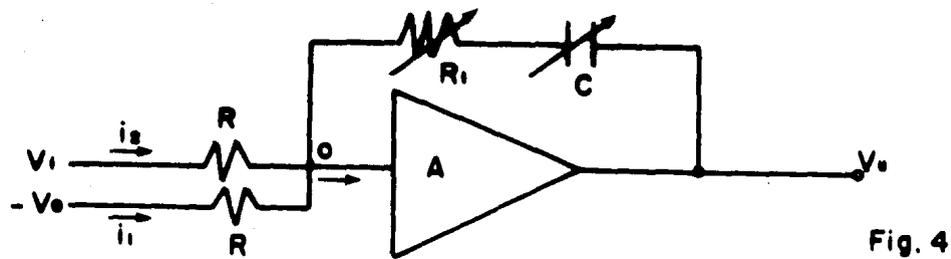
$$\frac{V_i - V_o}{R} + c \frac{dV_u}{dt} = 0$$

$$V_u = - \frac{1}{Rc} \cdot \int_0^t (V_i - V_o) dt + V_o$$

con V_o , dependiendo de la carga del condensador "c" al tiempo $t=0$ el sistema se comporta como un regulador con acción integral.

Actuando adecuadamente sobre el valor de la capacitancia c se puede variar la velocidad de integración del regulador.

2.2.3 REGULADOR ELECTRONICO CON ACCION P+I



Por

Kirchoff: $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ y

Despreciando la tensión V del nodo "0".

$$v \frac{V_i - V_o}{R} + c \frac{d}{dt} (V_u - V_{R1}) = 0$$

integrando.

$$V_u = V_{R1} - \frac{1}{Rc} \cdot \int_0^t (V_i - V_o) dt$$

de donde:

$$V_{R1} = R_1 i_3 = -R_1 (i_2 + i_1) = -\frac{R_1}{R} (V_i - V_o)$$

$$\therefore V_u = -\frac{R_1}{R} (V_i - V_o) - \frac{1}{Rc} \cdot \int_0^t (V_i - V_o) dt$$

que es la ecuación de un regulador con acción P+I.

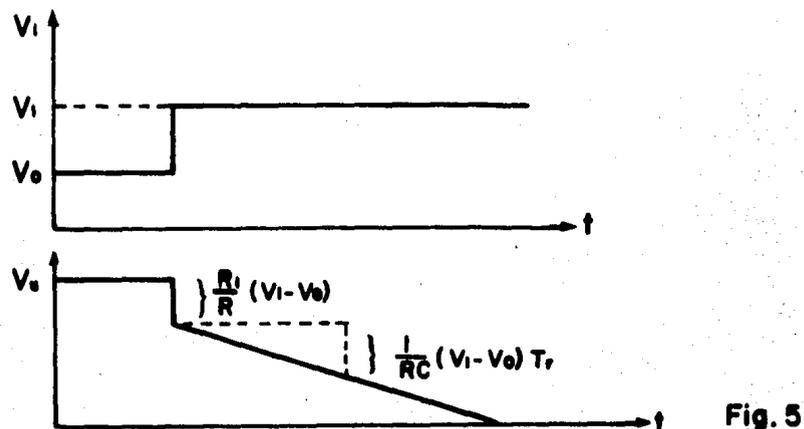
Es de notar que la acción P+I es obtenida dotando al sistema de una realimentación elástica. En efecto, al aparecer un des-

equilibrio a escalón, el condensador c se comporta como un corto circuito, y el sistema resulta análogo al de la figura 2, dando origen a una acción regulante del tipo

$$V_u = - \frac{R_1}{R} (V_i - V_o)$$

Sucesivamente el condensador comienza a cargarse, incrementando la tensión V_u según la integral en el tiempo del desequilibrio mismo.

Regulando adecuadamente la resistencia R_1 y el condensador c se puede actuar en el sentido deseado, sobre la banda proporcional y sobre el número de repeticiones al minuto.



Haciendo: $(V_i - V_o) = \text{cost}$

$$V_u = - \frac{R_1}{R} (V_i - V_o) - \frac{1}{RC} (V_i - V_o)T$$

Después del tiempo T_r , tiempo de restitución, la acción, integral iguala a la acción proporcional, por lo que se tiene:

$$\frac{R_1}{R} (V_i - V_o) = \frac{1}{R_c} (V_i - V_o) T_r$$

donde $T_r = R_1 c$ y el No de repeticiones al minuto $N_r = \frac{1}{R_1 c}$

2.2.4 REGULADOR ELECTRONICO CON ACCION DERIVATIVA

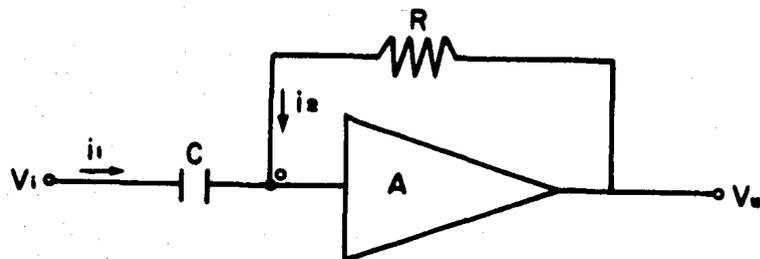


Fig. 6

La realimentación se obtiene con la resistencia R y la señal V_i , proporcional al valor instantáneo de la variable regulada, se aplica antes del condensador c .

Aplicando Kirchoff al nodo "0" y despreciando la corriente de ingreso del amplificador se tiene:

$$i_1 + i_2 = 0$$

despreciando la tensión V del nodo "0":

$$c \frac{dV_i}{dt} + \frac{V_u}{R} = 0$$

$$V_u = -Rc \frac{dV_i}{dt} \Rightarrow \text{que se comporta como un regulador con acción derivativa.}$$

2.2.5.- REGULADOR ELECTRONICO CON ACCION P+D

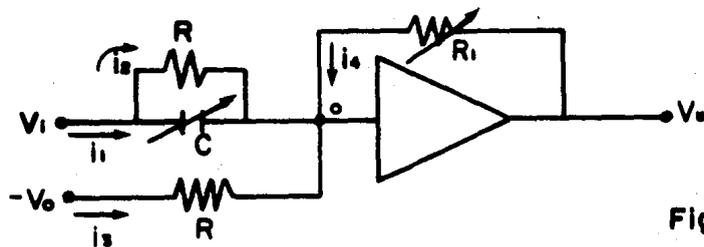


Fig. 7

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0$$

$$c \frac{dV_i}{dt} + \frac{V_i}{R} - \frac{V_o}{R} + \frac{V_u}{R_1} = 0$$

$$V_u = -\frac{R_1}{R} (V_i - V_o) - R_1 c \frac{dV_i}{dt} \Rightarrow$$

Se comporta como un regulador con acción P+D.

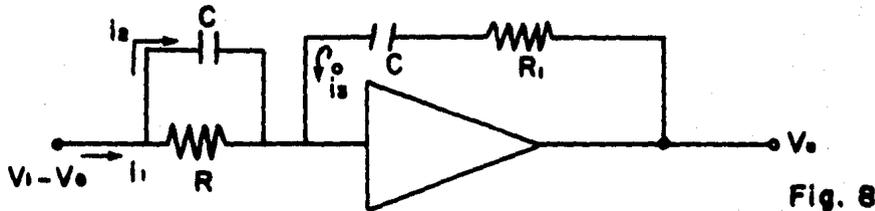
Regulando, adecuadamente, la resistencia R_1 y el condensador c , se puede actuar en el sentido deseado, sobre la banda proporcional y sobre el tiempo de anticipo.

Apenas la tensión V_i tiende a variar, el condensador c cortocircuita la resistencia R y el circuito se comporta como el

de la figura 6, provocando, con acción derivativa, una variación de la tensión V_u .

Por otra parte, en condiciones de régimen, el condensador c bloquea la corriente i_1 y el dispositivo se comporta como aquel de la figura 2 con pura acción proporcional.

2.2.6 REGULADOR ELECTRONICO CON ACCION P+I+D



$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

$$\frac{V_i - V_o}{R} + c \frac{d(V_i - V_o)}{dt} + c \frac{d(V_u - V_{R1})}{dt} = 0$$

donde V_{R1} es la tensión instantánea en los extremos de la resistencia R_1 integrando

$$\frac{1}{R} \int (V_i - V_o) dt + c(V_i - V_o) + c(V_u - V_{R1}) = 0$$

de donde:

$$V_u = V_{R1} - \frac{1}{Rc} \int (V_i - V_o) dt - (V_i - V_o)$$

$$V_{R1} = R_1 i_3 = -R_1 (i_1 + i_2) = - \frac{R_1}{R} (V_i - V_o) - R_1 c \frac{d(V_i - V_o)}{dt}$$

$$V_u = - \left(\frac{R_1}{R} + 1 \right) (V_i - V_o) - \frac{1}{Rc} \int (V_i - V_o) dt - R_1 c \frac{d(V_i - V_o)}{dt}$$

∴ El sistema de la figura 8 se comporta como un regulador con acción P+I+D.

2.3 EXIGENCIAS DE LOS MODOS DE REGULACION

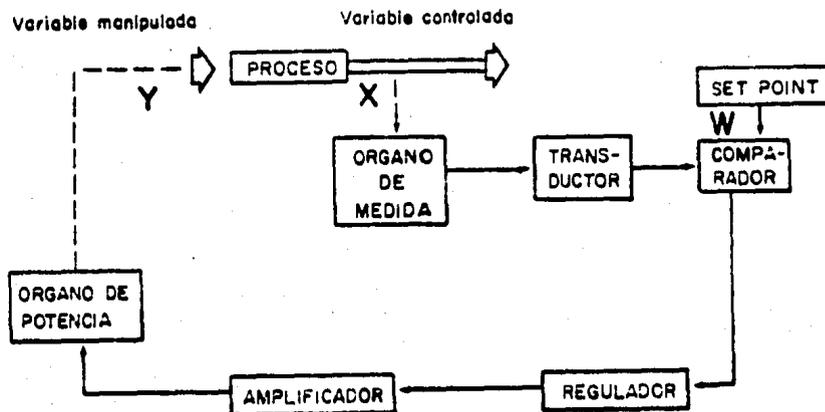


Fig. 1

2.3.1 REGULADOR P (DE ACCION PROPORCIONAL)

Se usa un regulador P en las plantas de capacidad relativamente grandes ó donde exista un apreciable retardo de respuesta

en el circuito de regulación. Establece una relación lineal entre el error de regulación e , y variaciones de la dimensión regulante (Y) y por consecuencia entre la dimensión (variable) regulada X y la posición del órgano regulante (servomotor).

2.3.1.1 CARACTERISTICAS

- 1.- Realimentación estática del servomotor a la variable regulada X .
- 2.- Error a régimen distinto de cero, tanto más pequeño como mayor sea la ganancia estática del regulador.

La variación " Y " de la variable regulante es proporcional en cada instante al error " X ".

2.3.2 REGULADOR "I"

No es usado generalmente en la práctica por motivos de estabilidad.

Su principal función es imponer a régimen que el error entre el valor real y el valor deseado sea siempre nulo.

La velocidad de respuesta del servomotor es directamente proporcional al error " X " y su acción actúa hasta la completa anulación del error.

2.3.3. REGULADOR PI

Cuando en un circuito de regulación P, por cuestiones de estabilidad, se está obligado a usar una ganancia K_p muy baja (estatismo muy alto), por lo cual la desviación del valor medido respecto del deseado se convierte muy grande o inaceptable, ó cuando se quiere que tal error o régimen sea nulo, se recorra a un regulador que utiliza ambas acciones P + I.

Se tiene así un regulador astático (sin estatismo) o isodrómico (equilibrado). De esta manera se obtiene la ventaja de la acción integral a régimen y el efecto estabilizador de la acción proporcional durante los transitorios.

2.3.3.1 CARACTERISTICAS (PI)

- Buena estabilidad del sistema.
- Retorno exacto al valor prefijado de la dimensión regulada.

La acción P determina la acción estabilizante sobre el sistema de regulación, mientras que la acción I continúa a actuar hasta que se anule la desviación.

2.3.4 REGULADOR PD

Cuando el proceso a regular tiene un "tiempo muerto" o una constante de tiempo muy grande, es decir, que responde con mucha

lentitud a los esfuerzos, o también cuando se desea una regulación muy rápida se usa el regulador PD. En el cual se suman una acción puramente proporcional P y una acción solamente derivativa D haciendo sensible la dimensión regulante a la velocidad de variación de la dimensión regulada. Esta última acción se consigue a través de un derivador que siente la dimensión regulada y dá en la salida una señal igual a la derivada de la dimensión regulada misma.

La acción derivativa resulta transitoria y provoca una acción correctiva cuando en la dimensión regulada comienza a manifestarse un desequilibrio y termina cuando esta ha alcanzado un valor estable cualquiera que sea aunque sea muy diferente del valor deseado (depende del valor del coeficiente K_p).

2.3.4.1 CARACTERISTICAS PD

- Rapidez de respuesta.
- Error residuo de regulación debido al error proporcional.

La acción D junto a una acción P le confiere al regulador la capacidad de intervenir con una acción que es función de la velocidad de variación de la dimensión regulada.

2.3.5 REGULADOR PID

Se usa en las plantas caracterizadas por una gran capacidad,

combinada con un marcado retardo en la respuesta del circuito de regulación, y donde se producen frecuentes variaciones de carga de considerable tamaño.

La regulación de temperatura en un intercambiador de calor etc. Tal regulador realiza todas las tres acciones: P + I + D.

La acción integral en efecto, anula a régimen el error residuo que la acción proporcional determina; la acción derivativa produce una acción anticipatoria sobre la proporcional reforzándola, en fase transitoria, con una acción mucho más enérgica.

2.3.5.1 CARACTERISTICAS PID

- Estabilidad (acción P)
- Rapidez de respuesta (acción D)
- Error nulo a régimen (acción I).

2.4.- REGULACION MECANO-HIDRAULICA DE LA TURBINA*

En una planta termoeléctrica, lo más importante es la turbina, porque dependiendo del valor de los parámetros que ella maneje, serán construidos o ajustados los otros equipos. Para referencia general ver figura 1.

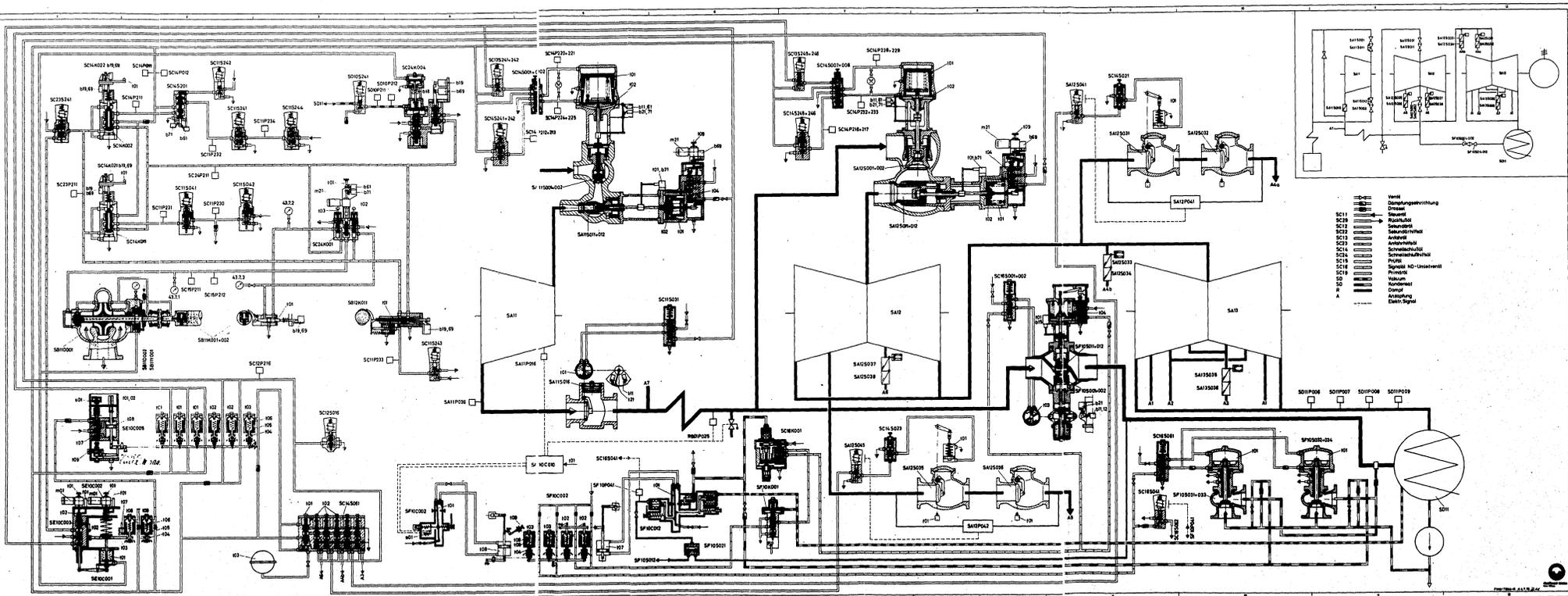
2.4.1.- SISTEMA AGUA-VAPOR

La planta termoeléctrica del Centro funciona con un ciclo rankine regenerativo con recalentamiento y llamado también ciclo de expansión completa. (Ver figura 2).

Este ciclo tiene siete extracciones la A7 en la línea que va al recalentador, la A6 y A5 en la octava etapa de la turbina de media presión en cada succión de la máquina; la A4 a la salida de la turbina de media presión (MP) y las A3, A2 y A1 en la sexta, quinta y cuarta etapa de las turbinas de baja presión (BP) respectivamente.

El agua de reposición es tratada en una columna aniónica, una catiónica y un lecho mixto ambas; del generador de vapor sale vapor sobrecalentado que va a la turbina de alta presión (AP) en dos líneas, que llegan a un colector de donde salen cuatro líneas que van a las válvulas de cierre rápido y regulación de vapor (4 en

* Lo expuesto en este inciso puede considerarse una síntesis que se fundamentó muy especialmente en la tesis "Regulación hidráulica en la turbina de la termoeléctrica del Centro". Ing. Mec. Marina Español. Universidad Central de Venezuela, 1979. Caracas, Venezuela.



SC11	Drum
SC12	Drum
SC13	Drum
SC14	Drum
SC15	Drum
SC16	Drum
SC17	Drum
SC18	Drum
SC19	Drum
SC20	Drum
SC21	Drum
SC22	Drum
SC23	Drum
SC24	Drum
SC25	Drum
SC26	Drum
SC27	Drum
SC28	Drum
SC29	Drum
SC30	Drum
SC31	Drum
SC32	Drum
SC33	Drum
SC34	Drum
SC35	Drum
SC36	Drum
SC37	Drum
SC38	Drum
SC39	Drum
SC40	Drum
SC41	Drum
SC42	Drum
SC43	Drum
SC44	Drum
SC45	Drum
SC46	Drum
SC47	Drum
SC48	Drum
SC49	Drum
SC50	Drum
SC51	Drum
SC52	Drum
SC53	Drum
SC54	Drum
SC55	Drum
SC56	Drum
SC57	Drum
SC58	Drum
SC59	Drum
SC60	Drum
SC61	Drum
SC62	Drum
SC63	Drum
SC64	Drum
SC65	Drum
SC66	Drum
SC67	Drum
SC68	Drum
SC69	Drum
SC70	Drum
SC71	Drum
SC72	Drum
SC73	Drum
SC74	Drum
SC75	Drum
SC76	Drum
SC77	Drum
SC78	Drum
SC79	Drum
SC80	Drum
SC81	Drum
SC82	Drum
SC83	Drum
SC84	Drum
SC85	Drum
SC86	Drum
SC87	Drum
SC88	Drum
SC89	Drum
SC90	Drum
SC91	Drum
SC92	Drum
SC93	Drum
SC94	Drum
SC95	Drum
SC96	Drum
SC97	Drum
SC98	Drum
SC99	Drum
SC100	Drum

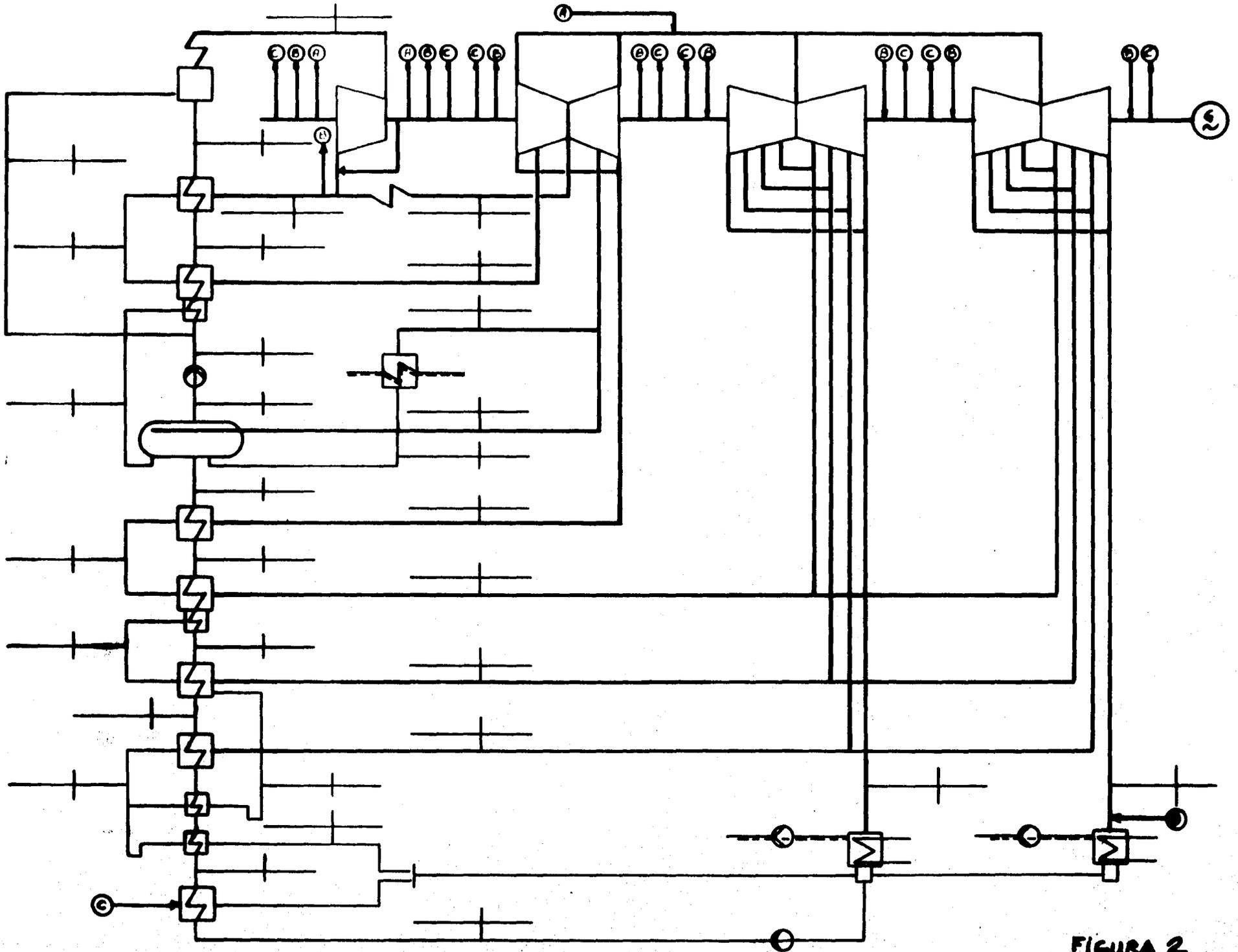


FIGURA 2

total); de la turbina de AP salen dos líneas al recalentador (RH) en donde se toma la extracción A7 para el calentador A7 de AP, para calentar el aire de la combustión y al tanque de agua de alimentación o desgasificador en caso de cargas parciales, del recalentador salen cuatro líneas a la turbina de media presión que es de doble flujo y cuatro entradas. De esta salen dos líneas que se bifurcan para las turbinas de baja presión (2) de donde el vapor sale en condición de vacío, lo que mejora el rendimiento del ciclo.

Las extracciones A3, A4, A5 y A6 se ponen en servicio después de haber alcanzado el 10% de la carga, con lo que se ha obtenido las presiones mínimas para el calentamiento.

Para mantener la presión del tanque de agua de alimentación a baja carga (menos del 10%) se utiliza vapor de la extracción A7 reducido a la presión correspondiente.

En el arranque del turbogruppo, para el calentamiento de las turbinas o cuando ocurre alguna falla cerrándose las válvulas de cierre rápido y regulación, el vapor producido por la caldera, al no poder entrar a la turbina de AP, es desviado por el llamado By-pass de AP, para ser atemperado por inyección de agua fría, bajando así su presión y temperatura antes de que entre al recalentador intermedio, tampoco entra a la turbina de media presión desviándose al By-pass de baja presión, donde es atemperado convenientement para llevarlo a condiciones de presión y temperatura apro-

piadas para entrar al condensador.

2.4.2- TURBINA

La máquina consta de cuatro turbinas parciales, una de alta presión y una de media presión de doble flujo y dos de baja presión también de doble flujo todas dispuestas sobre un eje común, conocida como tandem-compound (un solo eje). El eje de la turbina y el eje del alternador están rígidamente acoplados entre sí.

El juego de paletas de la parte de alta presión, se compone de una etapa de acción pura (paletas toberas) y nueve etapas de sobrepresión con el 50% de reacción (paletas móviles).

La energía correspondiente al salto entálpico entre el vapor delante de las toberas y el de la cámara es convertido en energía cinética en las paletas toberas, para ser transmitida como energía de rotación al rodete de la turbina a través de las paletas móviles.

2.4.2.1.- TURBINA DE ALTA PRESION (AP)

La admisión del vapor es a través de cuatro cajas de toberas dispuestas en la carcasa.

2.4.2.2.- TURBINA DE MEDIA PRESION (MP)

La carcasa está dividida axialmente ya que trabaja a menor presión. Es de doble flujo por lo que las fuerzas axiales de em-

puje serán iguales y se compensan. Presenta una carcasa exterior y otra interior.

2.4.2.3- TURBINA DE BAJA PRESION (BP)

Dos unidades de doble flujo dos carcasas, la interior completa, está montada en la exterior de modo que se pueda dilatar en forma radial, conservando su posición céntrica respecto al rodete, y de forma axial desde un punto fijo.

El rotor de la turbina AP se apoya sobre dos cojinetes, una radial en el lado frontal y una radial-axial en el acoplamiento al rotor de la turbina (MP).

El cojinete radial-axial, reúne las funciones de un cojinete radial de dos cuñas y las de un axial que trabaja en ambas direcciones, y así absorbe los momentos restantes de las fuerzas axiales. El rotor de la turbina MP, y los de BP llevan un cojinete radial por cada rotor, que van siempre en el extremo final de su respectivo eje.

2.4.3.- SISTEMA DE REGULACION HIDRAULICA DE LA TURBINA

La función principal de la regulación de la turbina es, igualar la potencia producida por ésta a la entregada por el generador a la red de transmisión, pero mientras la potencia del generador

depende del consumo, la potencia que genera la turbina es esencialmente función de la cantidad de vapor que se le suministra. El sistema turbina y generador es uno solo, por lo que el consumo de vapor será función de las necesidades de la red.

2.4.3.1.- REGULACION POR ESTRANGULAMIENTO

En este método para aumentar o disminuir la potencia, se cierran ó se abren más las válvulas de estrangulación situadas a la entrada de la turbina.

2.4.3.2.- REGULACION POR EL GRADO DE ADMISION

En la cual idealmente no se produce estrangulamiento alguno y se reduce la potencia por disminución del caudal de vapor. La cantidad de vapor es determinada por la caldera.

Las válvulas están abiertas.

2.4.3.3.- REGULACION MIXTA

Combina 1) y 2).

En el sistema estudiado, la regulación generalmente es del tipo 1), ya que los dispositivos de control actúan sobre las válvulas de regulación del vapor.

En esta situación es la turbina la que decide la cantidad de vapor que debe producir la caldera, conociéndose esto como

"CALDERA SIGUE TURBINA" ó "CALDERA EN SEGUIMIENTO" ó "TURBINA GUIA", pero si ocurre alguna falla en la caldera que haga variar su producción, la turbina se adaptaría, conociéndose entonces como "turbina sigue caldera" ó "turbina en seguimiento" ó "CALDERA GUIA".

Utilizando solamente la regulación antes descrita se simplificaría el manejo de los controles, pero sólo se podría hacer cuando la exigencia de la red es constante; por esto lo que se usa sobre todo cuando no se trabaja a plena carga es la regulación mixta.

2.4.3.4.- ELEMENTOS PRINCIPALES DEL SISTEMA DE REGULACION HIDRAULICA

Los elementos principales del sistema de regulación hidráulica son los siguientes: (Ver figura 1).

- Regulador hidráulico de velocidad (SE10C001)
- Regulador de carga (SE10C003)
- Convertidor electrohidráulico (SE10C005)
- Válvulas de cierre rápido y regulación.

La señal es detectada por el medidor de velocidad (SB11D002), el cual es coaxial al rotor de alta presión de la bomba principal (SB11D001). En la cámara anular externa llega el aceite, y atraviesa unos orificios calibrados; por efecto de la rotación, este aceite adquiere una fuerza centrífuga, que se opone al movi-

miento, dando origen a una presión en la cámara periférica.

Esta fuerza es función de la velocidad angular de la turbina por lo tanto se puede usar como señal regulable.

$$F_c = mv^2/2 = kmw^2, \quad k = \text{cte} \quad \text{y el caudal de aceite es cte.}$$

$P = F_c/A$, donde el área es cte.

$$P = f(w^2)$$

Esta señal actúa sobre la membrana (tol) del regulador de velocidad, y éste modula otra señal que envía al convertidor electrohidráulico, el cual actuará sobre los ocho émbolos consecutivos, que a su vez regulan el fluido de las válvulas de regulación de vapor.

2.4.4.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA REGULACION HIDRAULICA

El parámetro principal a controlar en la regulación es la presión del fluido en el circuito.

Para lograr los valores deseados de presión en las diferentes líneas, se usan los émbolos consecutivos, en los cuales el casquillo y el émbolo de vacío pueden desplazarse.

El émbolo consecutivo actúa como control, no permitiendo que varíe la presión en las tuberías que van a las diferentes válvulas

cuando ocurre una variación en la presión inicial, se desplaza el émbolo de vacío y así sale más o menos fluido por las ranuras según tiendan a abrir o cerrar, no registrándose por esto alteraciones en la presión (Fig. 3).

2.4.5 DESPLAZAMIENTO DEL CASQUILLO

Si queremos modificar la presión, desplazamos el casquillo, con esto saldrá más o menos fluido y así la presión aumenta o disminuye en consecuencia.

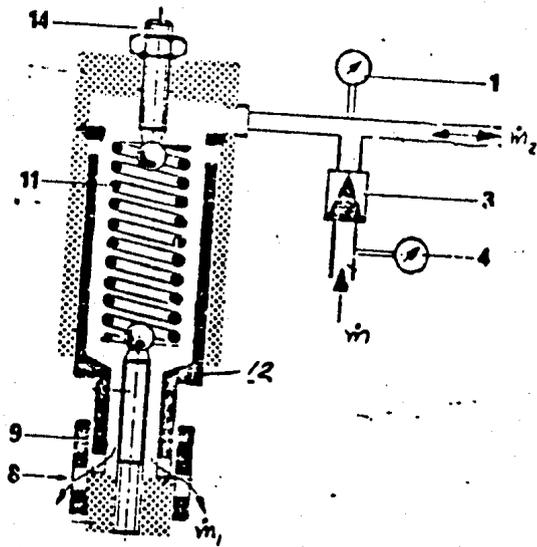
La fuerza del resorte es función del desplazamiento de éste. Después de haberse desplazado el émbolo de vacío, el resorte también lo hace con lo que aumenta su fuerza (Figura 4), y por eso la presión del fluido y la fuerza del resorte siempre están en equilibrio.

2.4.6 REGULADOR DE VELOCIDAD

Sus elementos principales son fuelle (t01) y resorte (t02), cuya compresión es graduable por medio de un volante. Ambos oponen sus desplazamientos entre sí, la diferencia entre la fuerza del resorte y la del fuelle se convierte en desplazamiento a través de la palanca. (t03).

La señal que viene del convertidor hidráulico de medición (SB11D002) actúa sobre la membrana del regulador.

EMBOLO CONSECUTIVO



- 12: émbolo vacío
- 1, 4: manómetros
- 3: estrangulador
- 11: resorte
- 8: ranura
- 9: casquillo
- 14: tornillo regulable

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m} = \text{cte.}$$

ejemplo: $\dot{m}_1 = 1 \text{ lt/min}$ y $\dot{m}_2 = 2 \text{ lt/min}$
 $\Rightarrow \dot{m}_3 = 3 \text{ lt/min}$

FIGURA 3

si: $\dot{m}_2 = 3 \text{ lt/min}$, $\dot{m}_1 = 0$
 para que $p = \text{cte}$, para lo cual se debe desplazar el émbolo

DESPLAZAMIENTO DEL CASQUILLO

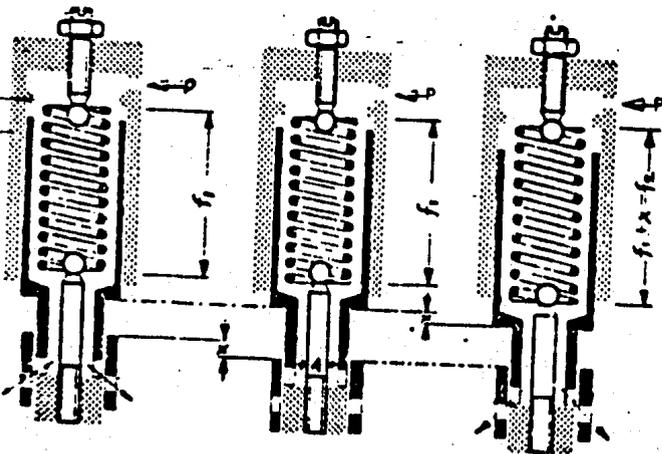
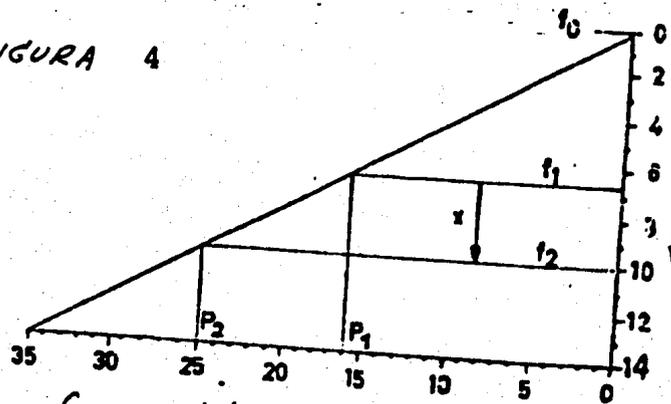


FIGURA 4



desplazamiento del resorte (mm)

La fuerza del resorte: $F_R = k_f \cdot x$, $x = \text{cte}$; y la fuerza por la presión
 $F_p = A \cdot p$, $A = \text{cte}$, deben ser iguales:
 $F_p = F_R \therefore p = \frac{k}{A} \cdot f$ y por ser $F = p/A$
 quedando $F = f[f]$

El regulador de velocidad está compuesto esencialmente de una membrana de regulación (8), el resorte de ajuste (13), el casquillo (5) y el émbolo consecutivo (4). (Figura 5).

En el empalme a1, hay aceite primario proveniente del convertidor hidráulico de medición. La membrana adicional (a), evita que por una fuga en la membrana de regulación (8), pueda llegar aceite primario al circuito hidráulico de mando.

Este aceite es evacuado a través del empalme c, en caso de una fuga en la membrana (9).

La presión de aceite determina a través de la membrana (8) y la biela (10), la posición de la palanca oscilante (11). El resorte de ajuste (13) actúa en contra de esta presión, su tensión puede modificarse a mano ó con ayuda del motor (16). La palanca oscilante (11) va fija al casquillo (5), el cual puede deslizarse sobre el extremo inferior del émbolo consecutivo (4), que se mantiene en su posición por el resorte de tracción (3) contra la presión secundaria (empalme b).

El émbolo y el casquillo tienen unas hendiduras que en caso de una superposición normal saldrá tanto liquido de mando como sea necesario para mantener en equilibrio la presión secundaria y la fuerza del resorte de tracción (Ver figura 5).

REGULADOR DE VELOCIDAD Y CARGA

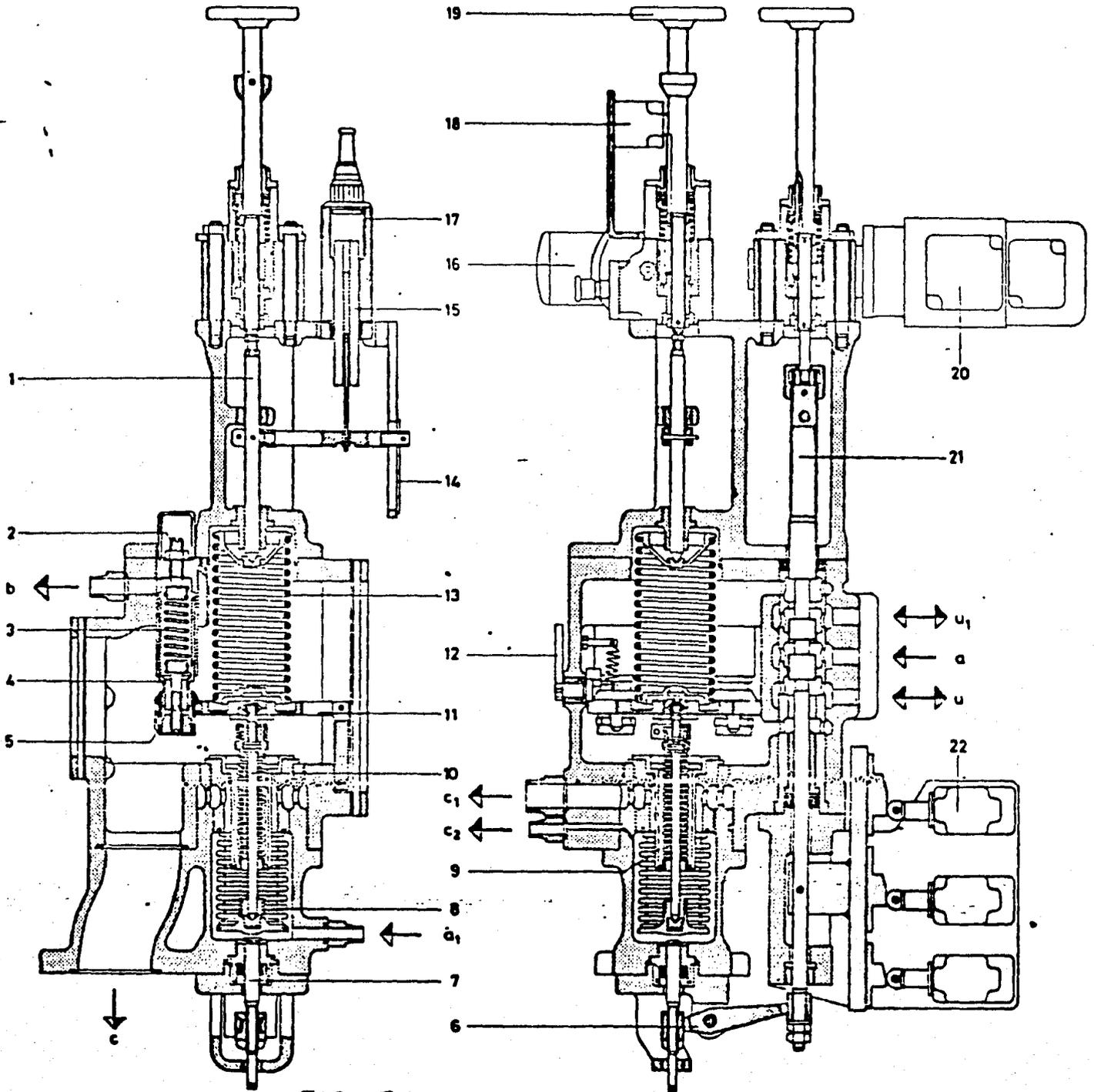


FIGURA 5

- a Líquido de mando
- a₁ Aceite primario
- b Líquido auxiliar secundario
- c Reflujo
- c₁ Líquido de fuga
- c₂ Purga de aire
- u Líquido de arranque
- u₁ Líquido auxiliar de arranque

- 1 Biela
- 2 Tornillo de ajuste
- 3 Muelle de tracción
- 4 Embolo consecutivo
- 5 Casquillo
- 6 Palanca
- 7 Bulón
- 8 Membrana de regulación
- 9 Membrana
- 10 Biela
- 11 Palanca oscilante
- 12 Palanca para prueba de CR
- 13 Muelle de ajuste del número de revoluciones
- 14 Escala
- 15 Transformador diferencial

- 16 Motor para el dispositivo de ajuste del número de revoluciones
- 17 Teletransmisor eléctrico de posición
- 18 Interruptor final para la indicación de posición
- 19 Volante
- 20 Motor para el dispositivo de arranque y limitador de abertura
- 21 Corruera
- 22 Interruptor final para la indicación de posición

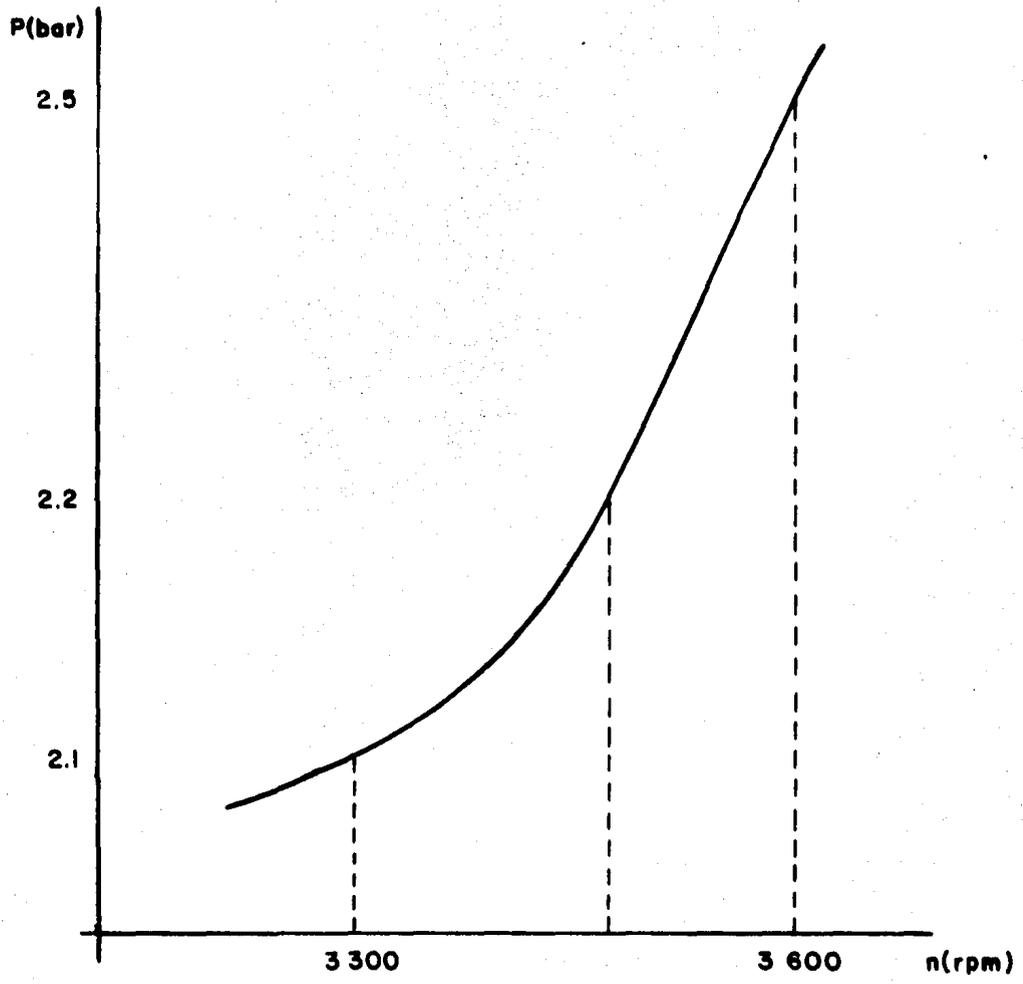


Fig. 6

A cada posición de la palanca oscilante (11), corresponde una determinada tensión del resorte de tracción (3), y con ella una presión en el aceite secundario que determina una posición de las válvulas reguladoras de vapor.

Cuando baja la presión del aceite primario por una reducción del número de revoluciones, la palanca oscilante (11) y el casquillo (5) se mueven hacia abajo por influencia del resorte de ajuste (13), reduciéndose la superposición de las hendiduras del casquillo y del émbolo. Esto origina un aumento de la presión en el circuito secundario y se incrementa la apertura de las válvulas de regulación del vapor.

El regulador de velocidad empieza a actuar para un cierto valor de presión (Ver figura 6), originado por un número de revoluciones específicas para el cual inician su apertura las válvulas de regulación.

2.4.7 REGULADOR DE CARGA

La regulación de velocidad y carga dependen del volumen de vapor que regulan las válvulas de la turbina (Ver figura 7).

Para explicar el principio de la regulación de carga, utilizaremos un modelo mecánico.

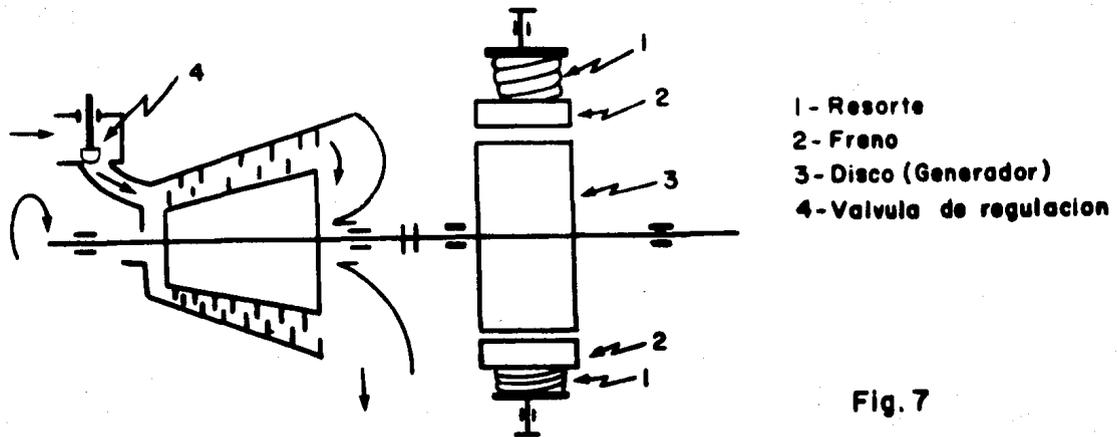


Fig. 7

En la figura 7 se ve que está acoplado a la turbina el generador que se representa por un disco, ese disco puede ser frenado. Al soltar el freno y abrir las válvulas de regulación, el turbogruppo llega a una velocidad por ejemplo de 3600 rpm, si se acciona el freno se reduce el número de revoluciones, aunque el recorrido de las válvulas de regulación quede igual.

Para mantener constante la velocidad es necesario un regulador pendiente del número de revoluciones, el cual abre y cierra

las válvulas de regulación lo necesario según el valor de éstas. (el regulador anteriormente descrito).

La actuación del freno corresponde en la realidad a una "multitud" de motores que consumen la potencia producida por el generador. La conexión de otro motor significa una carga adicional para el generador. En el modelo esta carga adicional está representada por el freno. Para mantener constante el número de revoluciones en esta situación, debe ser aumentado el volumen de vapor entrante.

La potencia producida debe ser igual a la consumida, si no ocurre esto se modifica el número de revoluciones.

Una vez sincronizado el turbogruppo a la red, si seguimos abriendo las válvulas de regulación con el regulador de velocidad (apretando el resorte de este regulador con el servomotor SE10C002) no aumenta el número de revoluciones, sino la carga es enviada a la red de interconexión quedando constante e igual a los otros generadores. Vemos entonces que el regulador de velocidad después de la sincronización, funciona como regulador de carga o regulador de potencia.

2.4.8 CONVERTIDOR ELECTRO HIDRAULICO

Es el elemento de conexión entre los circuitos de regula-

ción electrónica y el sistema hidráulico de regulación de la turbina.

Está integrado por una válvula de distribución (t07), una bobina móvil (y01) y el émbolo (to5). Este último acciona una palanca que varía en los ocho émbolos consecutivos la presión del fluido que actúa sobre las válvulas reguladoras de alta y media presión. La señal que emite es de acuerdo a la recibida del regulador de velocidad, en una acción proporcional.

Los principales componentes del convertidor son:

El sistema de bobina de electroimán de succión (8), la camisa (10), la válvula piloto, el pistón amplificador (2), pistón de fuerza inicial o de empuje (3), y los sistemas de retroalimentación eléctrica y mecánica. (Figura 8).

El control de señales del gobernador eléctrico opera la camisa (10) que va al sistema de bobina del electroimán de succión (8).

Esta camisa puede deslizarse arriba y abajo sobre el tope final de la válvula piloto (11) y determina la posición de la válvula a la manera de un pistón de empuje. La válvula y la camisa tienen lumbreras las cuales controlan el movimiento de fluido secundario auxiliar de la conexión b1.

CONVERTIDOR ELECTROHIDRAULICO

- 1- transformador diferencial
- 2- pistón amplificador
- 3- pistón de empuje
- 4- camisa
- 5- eje
- 6.7- palanca
- 8- bobina
- 9- cilindro amplificador
- 10- camisa
- 11- válvula piloto
- 12- resorte ajustable
- 13- tornillo ajustable
- 14- resorte de tensión

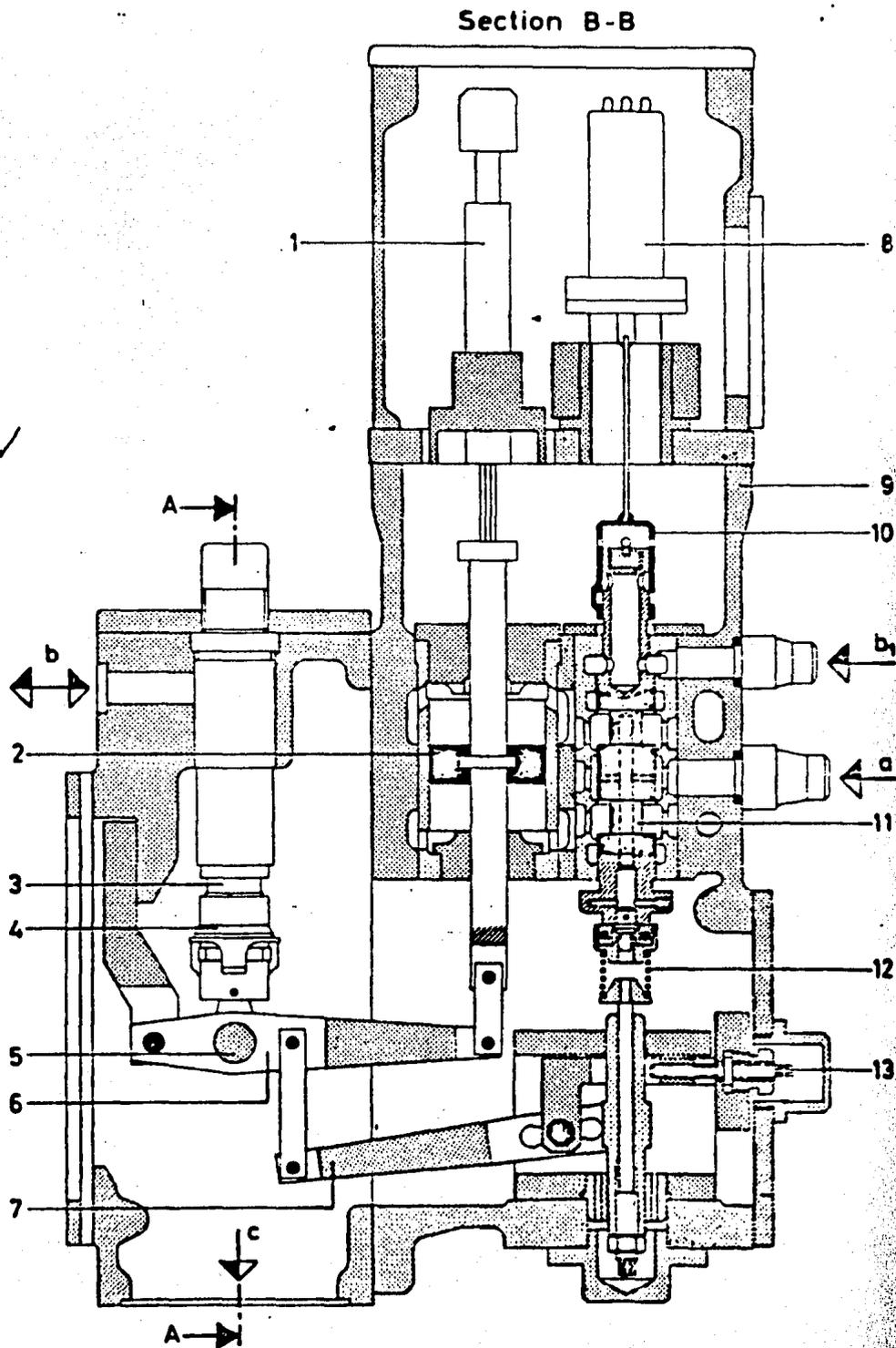


FIGURA 8

En la condición estudiada, la válvula piloto está en su posición media y la presión de fluido actuante sobre la cara de la válvula esta en equilibrio con la fuerza del resorte (21).

La válvula piloto es mantenida en rotación constante mediante emisiones de fluido de control de los hoyos tangenciales, para dar gran libertad de movimiento, lográndose así una respuesta altamente sensitiva.

Cuando la válvula piloto es desviada de su posición media, el control de fluido de conexión es alimentado con el espacio superior e inferior del pistón amplificador (2), mientras que el espacio sobre el lado opuesto es abierto para el retroceso del fluido. El resultado del movimiento del pistón es transmitido por la palanca (6) para la camisa (4), las cuales, por turno, pueden deslizarse sobre el pistón de empuje (3). La camisa (4) tiene partes las cuales controlan el flujo de fluido para la sobrecubierta. (Ver figura 8).

2.4.9 VALVULAS. FUNCIONAMIENTO

La función esencial es regular la entrada de vapor a la turbina. En esta central se efectúa la regulación por estrangulación del flujo, para lo cual se recurre a la no uniformidad en la abertura de las válvulas.

Las válvulas son: una de cierre rápido (on-off) y una de regulación (posicionadora). Están montadas juntas en una caja común, formando 90° sus respectivos émbolos siendo el vapor perpendicular a cada uno de ellos.

Son ocho cajas en total, cuatro en la turbina de AP y cuatro en la de media presión situadas dos a ambos lados de cada turbina.

Las válvulas de cierre rápido tienen una doble función, proveen a la turbina de una especie de aislante desde la línea principal de vapor e interrumpe rápidamente el suministro de vapor cuando ocurre el disparo ante una situación de peligro.

Las de regulación abren o cierran la entrada de flujo de acuerdo a la velocidad de la máquina.

El pistón del servomotor, el cual opera la válvula de control, está sujeto al resorte del disco de fuerza, en dirección cerrada y a presión hidráulica en dirección opuesta.

La posición de la válvula es determinada por la presión del fluido bajo el pistón, el cual es controlado a través de una válvula piloto ó de un sistema de aceite.

2.4.10 ARRANQUE DE LA TURBINA CON EL SISTEMA DE REGULACION HIDRAULICA

Inicialmente la turbina gira con ayuda del dispositivo hidráulico de giro del eje y posteriormente el aumento de velocidad se efectúa con las válvulas reguladoras de vapor (SA11S011a014 y SA12S011a014).

Para hacer el arranque hidráulico, el dispositivo de ajuste de velocidad (SE10C002) está en posición mínima y el regulador eléctrico (SE10C005) en posición máxima.

Las válvulas de cierre rápido de vapor vivo (SA11S001 a 004) y las válvulas reguladoras de vapor (SA12S011 a 014) están cerradas porque el circuito del medio de cierre rápido está sin presión.

En la secuencia para el arranque, primero actúa el dispositivo de arranque y apertura (SE10C003), los émbolos consecutivos están en posición válvulas reguladoras cerradas, no hay presión en el fluido auxiliar secundario que va al convertidor electrohidráulico.

Presurizando el circuito de arranque se abren primero las válvulas de cierre rápido, luego un aumento de la presión del aceite secundario que va al convertidor (SE10C005) abre lentamente las válvulas reguladoras a través de los émbolos consecu-

tivos, hasta que la turbina llegue a un 85-90% de la velocidad nominal. Momento en que interviene el regulador de velocidad (SE10C001), y mantiene constante la velocidad.

2.5 CIRCUITOS ELECTRONICOS DE LA REGULACION DE TURBINA

Toda la regulación electrónica de turbina da el mando al convertidor electrohidráulico, el cual comanda según un orden prestablecido las válvulas de regulación del SH, las válvulas de regulación del RH y las válvulas de no retorno de las extracciones.

2.5.1 CONVERTIDOR ELECTROHIDRAULICO

El convertidor electrohidraulico es el elemento de conexión entre los circuitos de regulación electrónica y el sistema hidráulico de regulación de la turbina. Transforma la señal eléctrica de regulación en señal hidráulica de regulación y la amplifica antes de transmitirla a los actuadores (órganos de potencia).

Cuando se funciona con la regulación hidráulica tradicional de turbina, el convertidor desempeña su segunda función, es decir, amplifica la señal hidráulica proveniente del regulador hidráulico. Los dos comandos eléctrico e hidráulico que entran al convertidor están asociados de modo que prevalezca el menor.

El convertidor electrohidráulico es piloteado por medio de un

amplificador de potencia (0 + 250 MA) del regulador de las válvulas de turbina (turbine throttle valve controller), el cual elabora las salidas de los reguladores de carga y de velocidad, después de haberles comparado con la posición efectiva de las válvulas reguladas.

2.5.2 REGULACION DE VELOCIDAD

La regulación de velocidad sirve para arrancar la turbina, hacerla rodar a velocidad de calentamiento, lanzarla velozmente en la proximidad de eventuales velocidades críticas y llevarla a la velocidad de sincronismo.

Permite también de tomar carga hasta $\pm 10\%$ pero, no constituye una regulación fina de la frecuencia. Tal regulación es confiada a una cadena separada que corrige la regulación de carga.

El Set Point de velocidad viene generado comandando a impulsos un prefijador motorizado, cuya salida viene elaborada por un generador de función y del circuito llamado "SET POINT MASTER SPEED" (ver figura 1), cuyo objetivo principal es el de permitir la intervención del "Stress Evaluator".

La salida del "SET POINT MASTER SPEED" es la referencia de velocidad, usada para pilotear la regulación PID y proveer a la regulación de las válvulas de la cuota de señal función de la velocidad.

2.5.3 "SET POINT MASTER SPEED" (Ver figura 1)

El "Set Point Master Speed" esta formado por tres circuitos en serie, un amplificador con ganancia de cerca de 40 que tiene el objetivo de verificar si existe una diferencia entre el "Set Point" impuesto y el elaborado por el pilotaje de la regulación, un integrador y un inversor necesario para que la señal a la salida sea de polaridad inversa respecto a la de la entrada, para poder hacer la comparación.

El comportamiento del integrador es el siguiente:

Consideramos los contactos a y b como estan representados en la figura 1: las señales a la entrada y a la salida del "SET POINT MASTER SPEED" son el S.P., impuesto y el S.P. limitado respectivamente. A la entrada del integrador está presente una señal de cero volt cuando el S.P. limitado es igual al impuesto.

Si se produce una variación del S.P. impuesto, después del circuito amplificador se presenta la señal diferencia amplificada cerca de 40 veces.

Tal señal corresponde a la tensión máxima de señal para una diferencia de 2.5%. El circuito integrador hace variar su salida con una velocidad proporcional a la tensión presente en la entrada, entonces para variaciones del S.P. impuesto mayores del 2.5% la velocidad será máxima y el S.P. limitado vendrá alcanzando en

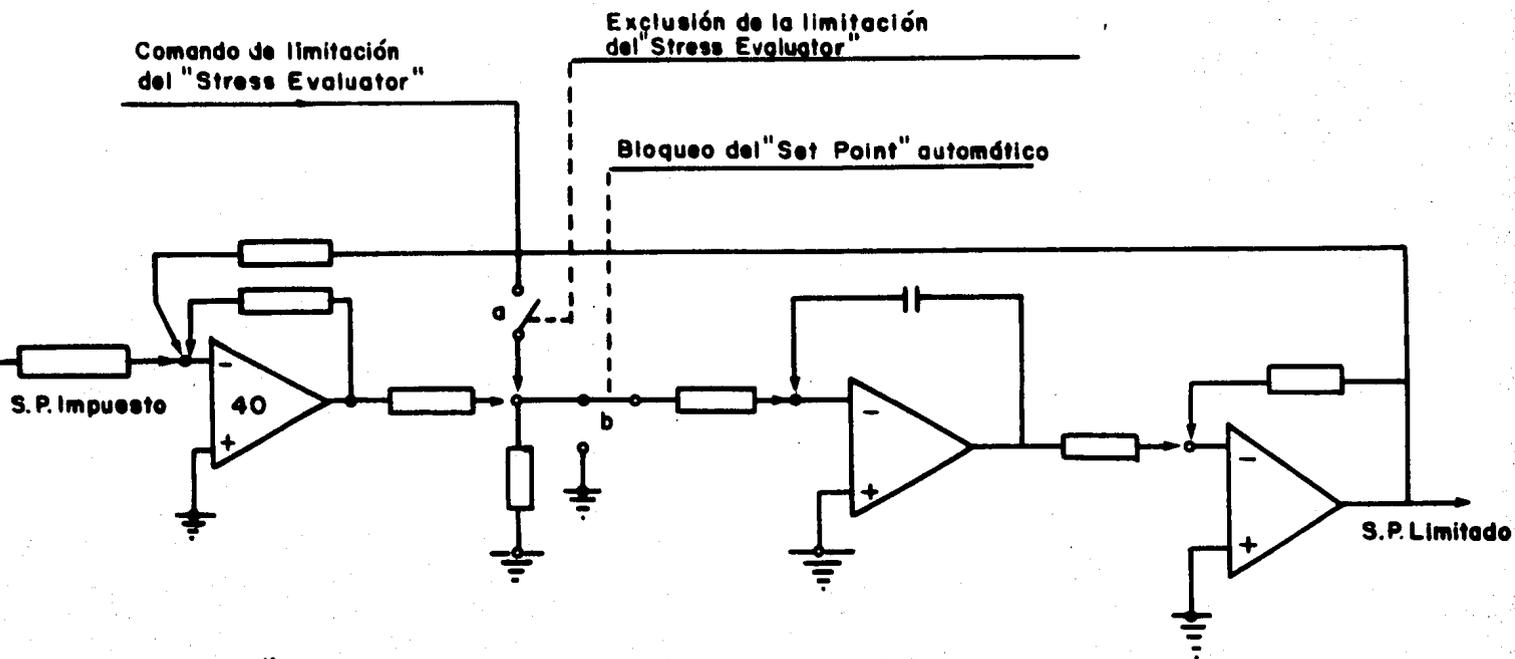


Fig. 1.-"Set Point Master Speed"

un tiempo relativamente muy breve; para variaciones menores del 2.5% la velocidad de integración se reducirá proporcionalmente.

Cerrando el contacto a, es posible controlar con el circuito del "Stress Evaluator" la tensión de entrada al integrador. La tensión a la salida del circuito de control del "Stress Evaluator" viene sumada algebraicamente a la salida del amplificador.

De esta manera se tiene una tensión de control de la velocidad del integrador que, para variaciones de S.P. impuesto mayores del 2.5%, depende solamente de la influencia del "Stress Evaluator", por lo que la salida del S.P. Master Speed" ser verá limitada o disminuida si se reduce a cero el margen de aumento de velocidad.

Apenas se tenga a disposición un nuevo margen viene a cesar la influencia del "Stress Evaluator" y el "Set Point Master Speed" dará a la salida un S.P. limitado igual al impuesto. En caso de falla del "Stress Evaluator" viene puesta a tierra la entrada del integrador y así se bloquea el Set Point limitado al último valor alcanzado.

2.5.4 REGULACION DE LA CARGA

2.5.4.1 "SET POINT MASTER LOAD"

Se imponen desde la sala de maniobras los valores requeridos

de carga y de gradiente de carga, los cuales junto a la eventual señal de limitación proveniente de los circuitos del "Stress Evaluator" son elaborados por el circuito llamado "Set Point Master Load" cuyo funcionamiento es análogo al del "Set Point Master Speed" ya descrito. Si se excluye la intervención limitante de los gradientes con la misma maniobra viene modificado el circuito del "Set Point Master Load" de modo tal que su función de transferencia de I se convierte en P+I.

También consiente la inmediata reducción del Set Point por protecciones de caldera, el integrador del "Set Point Master Load" viene puesto a tierra por falla del "Stress Evaluator".

2.5.4.2 CORRECCIONES DEL SET POINT DE CARGA

El Set Point limitado a la salida del "Set Point Master Load" viene corregido por el regulador fino de frecuencia y enviado a los circuitos de regulación de la caldera. Para la turbina el Set Point limitado viene corregido por la regulación de presión a la admisión, constituida del regulador de presión inicial y del regulador de presión límite.

Si el Set Point así corregido no supera el valor máximo absoluto (impuesto en el armario de instrumentos) viene posteriormente corregido por la misma regulación fina de frecuencia que corrige el Set Point para la caldera.

Sucesivamente intervienen las eventuales limitaciones de la protección y regulación por bajo vacío y del límite de carga impuesto en la sala de maniobras. Si la regulación por bajo vacío no logra reestablecer las condiciones normales de ejercicio y el vacío disminuye ulteriormente, un formador de señal límite enlaza un circuito seguidor del Set Point efectivo de carga, (esto es aquel que ha sufrido todas las limitaciones), al prefijador de Set Point a la entrada al "Set Point Master Speed". En este caso, cuando se puede retomar carga es necesaria la intervención del operador para reponer el prefijador de Set Point al valor requerido.

La salida de la red de corrección del Set Point de carga es la referencia de carga que se compara con la carga efectiva y a través del regulador P+I produce su cuota de participación a la regulación de las válvulas de admisión.

El regulador de carga no se puede excluir por encima de cerca del 10% de carga efectiva.

2.5.5 REGULACION DE LAS VALVULAS

El regulador de las válvulas compara la suma de las regulaciones de velocidad y de carga con la posición efectiva del pistón de comando de modulación del convertidor electrohidráulico y actúa con acción P+I.

Después del regulador se encuentra un convertidor V/I con salida de potencia, que comanda la bobina de pilotaje eléctrico del convertidor electrohidráulico.

La inclusión y la exclusión del comando a dicha bobina están subordinadas a la verificación de las condiciones de la señal y del circuito de campo.

2.6 ELEMENTOS DE MEDIDA (SENSIBLES)

Son aquellos a los cuales es confiada la medida de la variable controlada y, por ende, la tarea de dar comienzo a la acción regulante. La eficacia o bondad de todo el sistema de regulación esta condicionada por la precisión y sensibilidad de los instrumentos de medida. Es importante, por lo tanto, el conocimiento de las características de estos instrumentos, con el objeto de escoger aquellos que mejor se prestan a ser introducidos en el sistema que se quiere controlar. Tales características pueden obtenerse del conocimiento de la respuesta de los instrumentos a señales de ingreso a escalón y senoidales, con los criterios ya vistos para los sistemas de primer y segundo orden.

2.6.1 CARACTERISTICAS ESTATICAS

Las características estáticas son aquellas que se refieren a un régimen estacionario, en el cual no se tenga variaciones de la variable medida. Y son:

2.6.1.1 CAMPO DE MEDIDA (escala graduada sobre carátula)

El campo de medida representa el conjunto de valores comprendidos entre el límite mínimo y máximo de la variable que el instrumento puede medir y es expresión de tales límites.

Por ejemplo: un voltmetro que pueda medir una tensión variable entre 0 a 100 volts tiene un campo de medida de $0 \div 100$ v.

Los campos de medida se pueden aún distinguir en:

- con el cero suprimido: cuando el valor cero de la variable es menor que el límite mínimo del campo de medida (ejemplo: campo de medida: $300 \div 600$ °C).
- con cero central: cuando el valor cero de la variable medida está justo en el centro del campo de medida. (Ejemplo: campo de medida de $0 \div +100$ ° ó de $-100 \div 0$ °C respectivamente).

2.6.1.2 "SPAN"

Está dado por la diferencia algebraica entre el valor máximo y mínimo del campo de medida. Por ejemplo: un instrumento que tenga un campo de medida de $-25 \div +25$ V tiene un "span" de 50V.

Es de notar que la mayor parte de las características de los instrumentos se refieren al "span" en vez de que al fondo de escala.

2.6.1.3 CONFORMIDAD

Representa la capacidad de un elemento de medida de respetar una determinada característica dispuesta entre la entrada y la salida. La máxima diferencia entre la característica real y la característica deseada se llama error de conformidad y se expresa, en general, en por ciento del "span". En la figura 1 el segmento "a" representan el valor absoluto del error de conformidad.

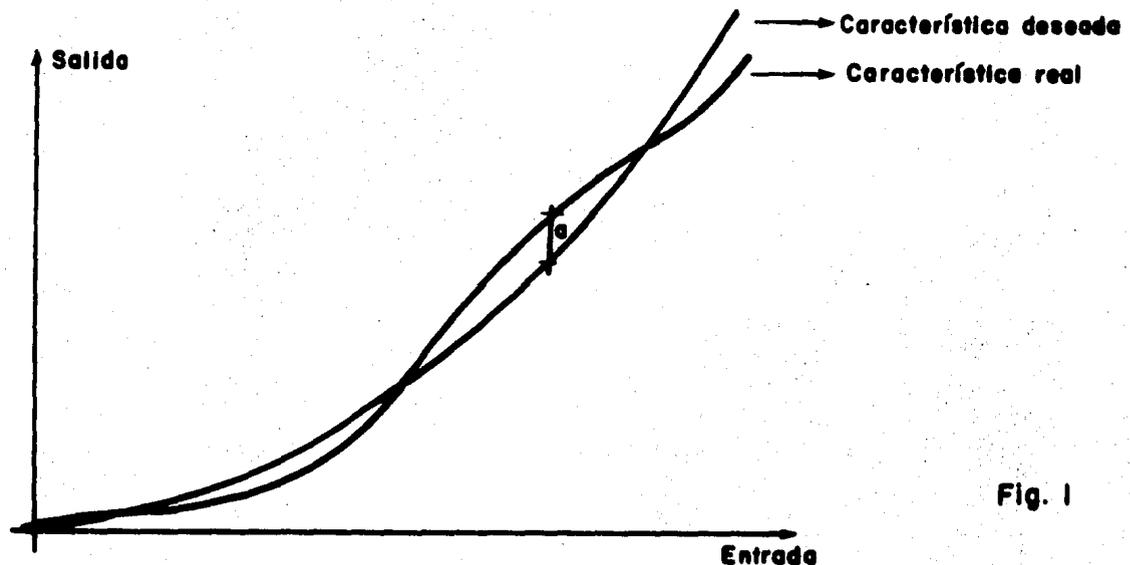


Fig. 1

2.6.1.4 LINEALIDAD

La linealidad es la conformidad relativa a una característica

rectilínea entre entrada y salida. También aquí la máxima diferencia entre la característica real y la deseada representa el error de linealidad. (ver figura 2).

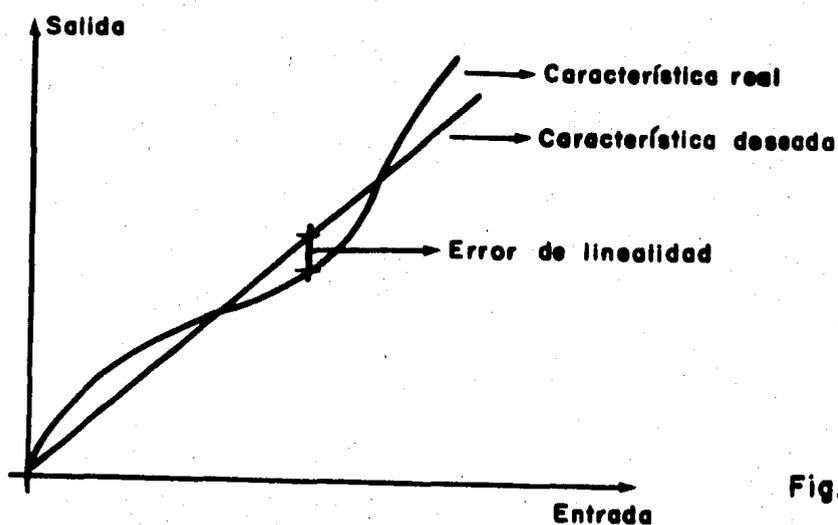


Fig. 2

2.6.1.5 HISTERESIS

Si se hace aumentar la señal de entrada a un instrumento de medida y se lee entrada y salida se obtiene una curva de subida. Si después, se hace regresar a cero la señal de entrada, la señal de salida seguirá otro comportamiento (curva de bajada) que en general se separa de la curva de subida. Esto es debido a la histéresis del instrumento que es dada por la separación máxima

entre la curva de subida y la de bajada (Ver figura 3).

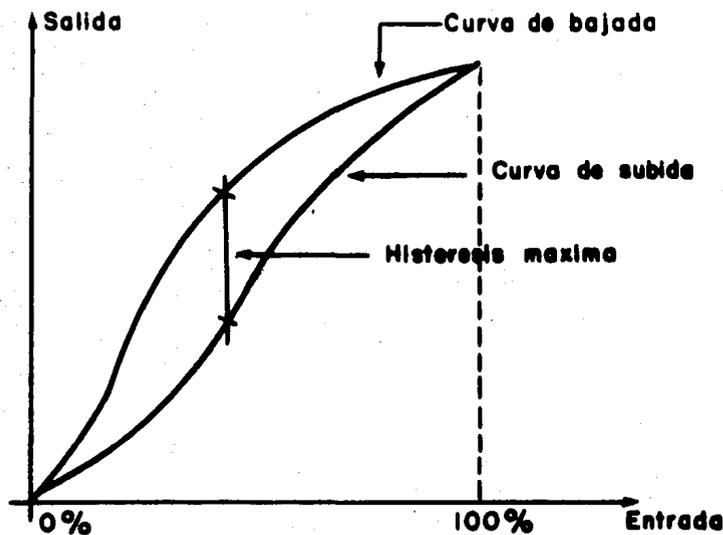
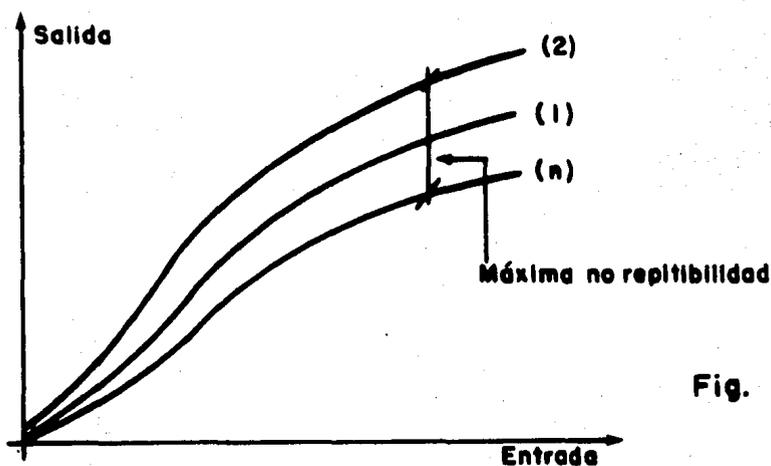


Fig. 3

2.6.1.6 REPETIBILIDAD

Si se hace variar la señal de entrada por ejemplo: en subida y se obtiene la señal de salida correspondiente se obtiene la curva (1) de la figura 4. Se lleva a cero la entrada, se la hace subir nuevamente y se toma la señal de salida correspondiente, se obtiene la curva (2) que, en la mayor parte de los casos, no coincide con la curva (1). Si se repite la experiencia un cierto número de veces, siempre haciendo variar la señal de entrada en el

mismo sentido, (en subida en este ejemplo) se obtienen n curvas, la separación máxima representa el error de repetibilidad del instrumento, en general, expresado en porciento de "span".



2.6.1.7 DERIVA

La deriva consiste en una variación de la señal de salida, después de un cierto tiempo de funcionamiento del instrumento, no originada por una variación de la señal de entrada. Esta debe asignarse, en general, a variaciones de los parámetros físicos del instrumento, en conexión con el envejecimiento de las partes

que lo constituyen, o a variaciones de la tensión de polarización, etc.

2.6.1.8 REPRODUCIBILIDAD

Es una característica muy importante del instrumento, que toma en cuenta los errores debidos a la histéresis, repetibilidad y deriva. De la reproducibilidad depende la bondad del instrumento en cuanto a la capacidad de producir siempre la misma salida en medidas sucesivas efectuadas con el mismo valor de la variable de entrada.

2.6.1.9 PRECISION. ERROR ESTATICO

Las características hasta aquí enunciadas, intervienen en la definición de la precisión del instrumento.

Un elemento sensible se comporta como un sistema del 1° o 2° orden, tal de alcanzar el estado de régimen con una curva más o menos amortiguada de tipo exponencial.

La separación, a régimen, entre la salida efectiva del instrumento y el valor real de la variable medida, representan el error estático. Este será positivo o negativo según que el valor leído del instrumento sea mayor o menor que el valor real. Tal error depende de la calidad intrínseca del instrumento definida en los puntos 3, 4, 5, 6, 7 y 8, que indica el grado de precisión en porcentaje del SPAN.

Por ejemplo: un instrumento de medida de temperatura que tenga un campo de medida de $500^{\circ} \div 600^{\circ} \text{ C}$ (SPAN = 100° C) y que presente un error estático máximo de 2° C tiene una precisión del 2%.

Un error estático grande no es en general deseable, pero no resulta nocivo en una regulación automática que tiene el objeto, como es notorio, de mantener una variable en un valor constante, más que en un valor exacto.

2.6.2 CARACTERISTICAS DINAMICAS. ERROR DINAMICO

Para estudiar las características dinámicas de un instrumento de medida, se lo excita con una señal variable linealmente en el tiempo (una rampa).

Se supone que el elemento sensible, sin error estático, deba sustituir el valor de una variable sujeta a un aumento gradual. Por efecto del retardo debido a la transferencia de materia o de energía, es necesario siempre, un tiempo finito no nulo, para que la salida reproduzca la entrada, En el instante inicial, el valor efectivo y el valor medido coinciden (error estático nulo) (ver figura 5). Sucesivamente el valor efectivo sufre un aumento gradual en el tiempo seguido con un cierto retardo por el valor medido.

Si el valor efectivo crece indefinidamente en el tiempo, después de un breve transitorio, el valor medido seguirá la misma ley de variación, pero con un retardo constante $AB = T$ debido a la constante de tiempo del sistema (figura 5).

Nace por lo tanto, un error constante BC que constituye el error dinámico.

La figura 6 muestra el comportamiento de un instrumento sin error estático durante una variación gradual de la variable desde un valor X a un valor $X + X$.

Se ve que apenas la variable medida comienza a variar, aparece un retardo de medida y por consecuencia, un error dinámico. Cuando la velocidad de variación de la variable comienza a disminuir, el retardo y el error dinámico disminuyen hasta anularse (condición de régimen con error estático = 0).

Se puede aún notar que para un mismo instrumento (a igualdad de constante de tiempo T) cuanto más lenta es la variación de la variable medida, menor es el error dinámico que resulta (ver figura 7 y 8).

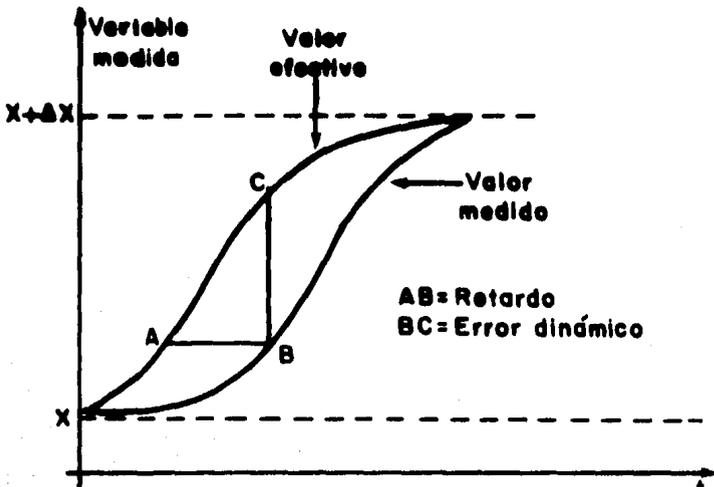


Fig. 6

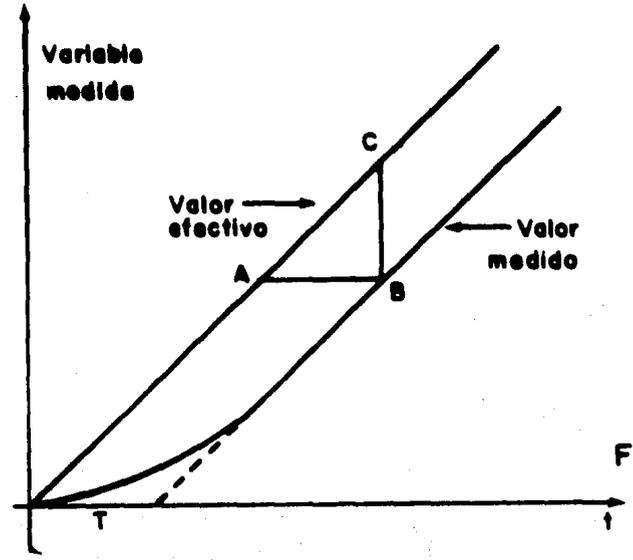


Fig. 5

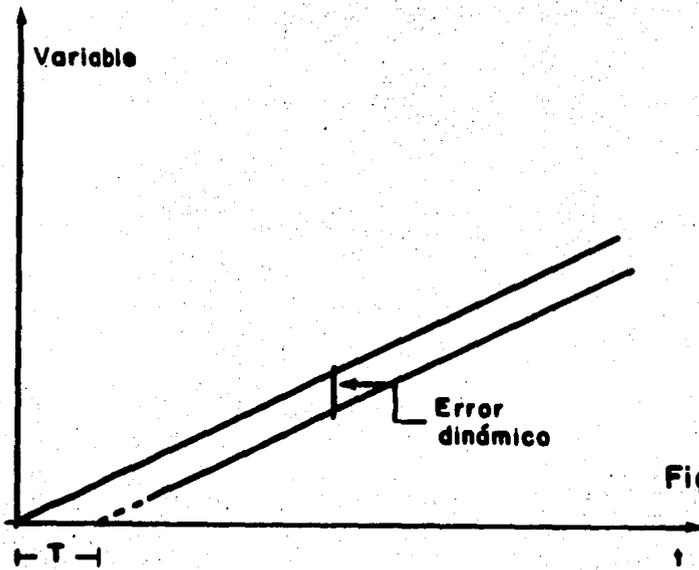


Fig. 8

VELOCIDAD DE VARIACION PEQUEÑA

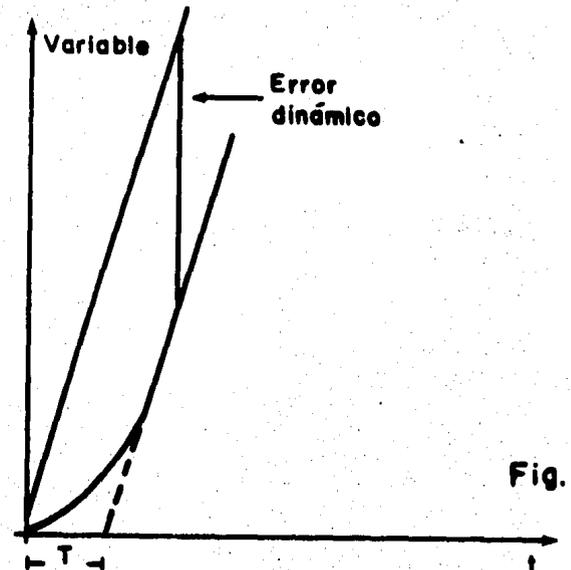


Fig. 7

VELOCIDAD DE VARIACION ELEVADA

El error dinámico, al contrario del error estático, es muy nocivo en la regulación automática, porque introduce un retardo de medida que, sumado a los retardos de los otros elementos del sistema de regulación, puede llevar a fenómenos de inestabilidad como se especificará seguidamente.

La presencia de un error estático implica un error a régimen por el cual el comportamiento dinámico del instrumento se modifica como se representan en la figura 9.

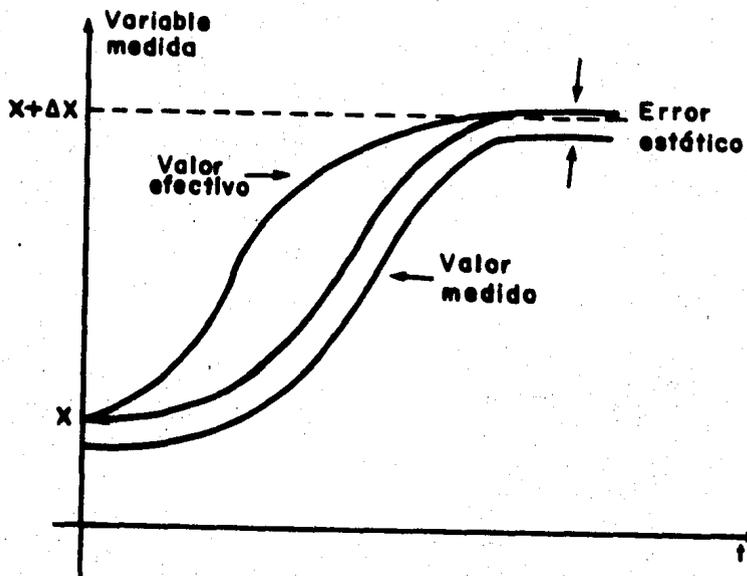


Fig. 9

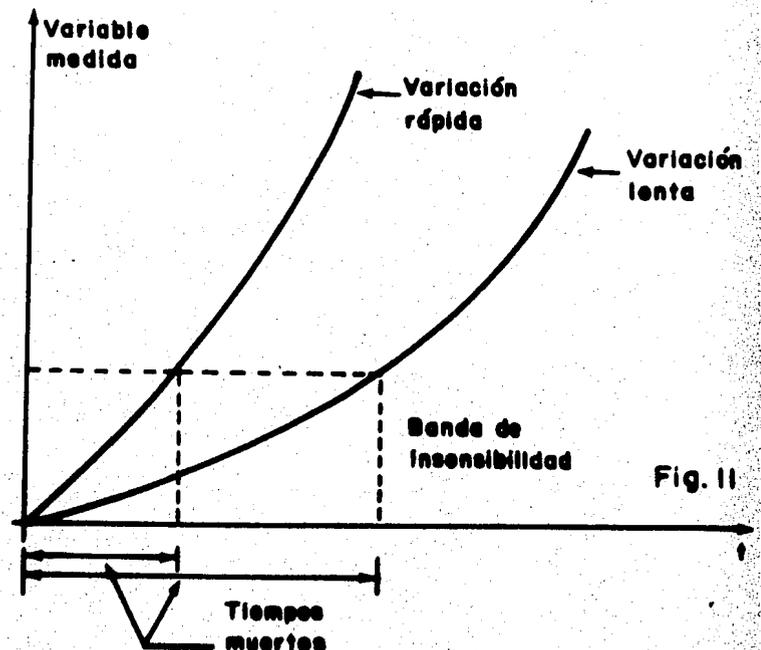
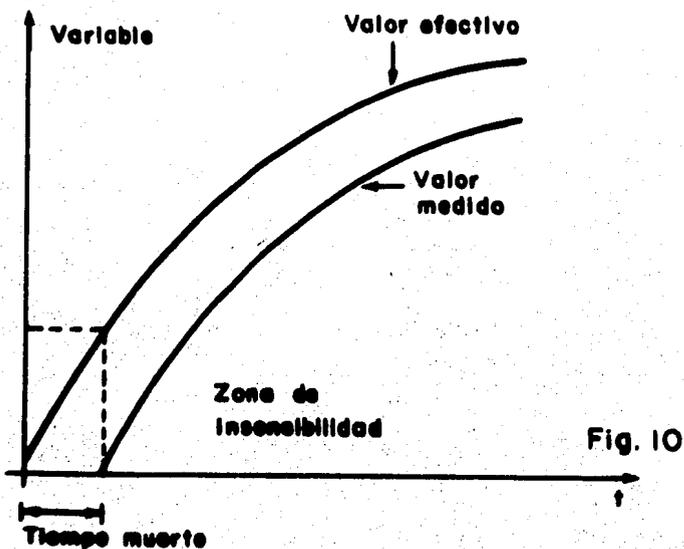
2.6.3 TIEMPO MUERTO Y ZONA DE INSENSIBILIDAD

En régimen dinámico, se puede definir zona de insensibilidad, el campo de variación de la variable dentro del cual no es captada por el instrumento. La presencia de una zona de insensibilidad se puede atribuir esencialmente a fricciones y juegos existentes entre las partes mecánicas que constituyen el instrumento.

Esta provoca un retardo inicial de medida que es dicho tiempo muerto.

Se tiene que, por efecto de la zona de insensibilidad, debe pasar un cierto tiempo antes que el instrumento pueda percibir una variación de la variable medida (figura 10).

La figura 11 muestra, cómo una elevada velocidad de variación de la variable medida reduce sensiblemente los tiempos muertos.



1.- PRINCIPALES VARIABLES A REGULAR

La potencia en las terminales del alternador es la principal variable a regular, lo que implica que generalmente sea la turbina el componente quia de la planta y la caldera deba adecuarse a sus necesidades.

1.1 VARIABLES INDEPENDIENTES (para controlar el proceso).

- 1.- Grado de parcialización al ingreso en turbina.
- 2.- Caudal del agua de alimentación.
- 3.- Caudal del combustible y del aire comburente.
- 4.- Caudal del agua de inyección del vapor SH.
- 5.- Caudal del agua de inyección del vapor RH.

1.2 VARIABLES DEPENDIENTES (resultado del proceso o dimensiones reguladas).

- 1.- Potencia eléctrica.
- 2.- Caudal del vapor SH.
- 3.- Presión del vapor SH.
- 4.- Temperatura del vapor SH.
- 5.- Temperatura del vapor RH.

1.3 VARIABLES QUE PERTURBAN EL COMPORTAMIENTO A REGIMEN DE LA PLANTA.

- 1.- Variación del poder calorífico del combustible.
- 2.- Disminución del coeficiente de transmisión del calor por "ensuciamiento" de las paredes de intercambio.
- 3.- Variaciones del rendimiento de los órganos participantes al proceso y del ciclo termodinámico en general.

1.4 OTRAS INFLUENCIAS PERTURBADORAS (Tanto en el comportamiento dinámico como a régimen de la planta).

- 1.- Variaciones del flujo térmico en caldera debidas a

- la inestable distribución de la temperatura de los humos calientes y en la llama.
- 2.- La cerrada o apertura de las extracciones de la turbina y la consecuente disminución o aumento de la temperatura del agua de alimentación.

2. FORMAS DE REGULACION DE LA UNIDAD

2.1 TURBINA GUIA

La regulación debe intervenir sobre los órganos de la caldera de tal modo que ella produzca la cantidad de vapor pedida por la turbina a las condiciones de temperatura y presión preestablecidas.

2.2 CALDERA GUIA

El objeto es hacer que la producción de vapor por parte de la caldera, a las condiciones entálpicas preestablecidas, sea adecuada a la demanda de la turbina.

REGULACION DE POTENCIA

La contribución que la planta puede dar a la participación en la regulación de la potencia y de la frecuencia de la red, es limitada por un lado por los gradientes de variación de carga admitida por la caldera y por la turbina, y por el otro, de la rapidez con la cual la caldera se adapta a las variaciones a ella impuesta.

Ambas limitaciones dependen de las características de pro-

yecto y construcción de la caldera y de la turbina, y no se puede pensar en variarlas mediante la escogencia de un oportuno sistema de regulación.

La rapidez con la cual la caldera responde a la demanda de la utilización, sin que se produzcan errores (e) excesivos en los valores de la presión del vapor a la salida, depende de su capacidad de acumular y de la inercia térmica que tenga. Esta (la rapidez) será mayor cuanto mayor sea la capacidad de acumular y cuanto menor la inercia térmica.

2.3 "BY-PASS" DE BAJA PRESION (B.P.) REGULACION DE LA PRESION DE VAPOR RH

Esta regulación tiene por objeto o tarea, mantener constante a un valor prefijado la presión del vapor a la salida del RH, hasta el (35%) de la carga máxima y de funcionar como descarga (drenaje) entre el 35% y el 100% de carga.

Para cumplir con su objetivo, el sistema de regulación controla la apertura de 6 válvulas.

2 para la descarga del vapor al condensador.

2 para la descarga del vapor a la atmósfera.

2 válvulas para regular el flujo de agua de inyección (desde las bombas extracción del condensador antes que el vapor ingrese al condensador.

La intervención de esta regulación esta subordinada a otra regulación cuya función es la de proteger, en las diversas condiciones de funcionamiento, el condensador.

Esta última regulación controla la presión del vapor RH después de la válvula "Spill-Over" (descarga del vapor al condensador) y da el consenso a la apertura de éstas sólo si dicha presión resulta inferior a un valor prefijado (19 comienza - 21 cerradas) en caso contrario cierra las válvulas y se abren las válvulas de seguridad a la atmósfera.

2.4 DIVERSAS CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

1.- Regulación automática entre 0 y 35% de la carga.

2.4.1.1 Consenso del regulador de presión límite del condensador.

2.4.1.2 Consenso de apertura de las válvulas de inyección H_2O , en un (100%?) (abre una 1° y luego la otra si es necesario).

Quando se presentan condiciones anormales para el condensador como:

- Alta temperatura
- Alta presión
- Baja presión agua de enfriamiento.

Se provoca automáticamente el cierre de las válvulas Spill-Over.

2.5 REGULACION BY-PASS B.P. ENTRE EL 30% y 100%

La regulación procede de tal modo que:

La dimensión controlada, la presión del vapor RH a la salida de la caldera, sea variable en función de la carga. Tal objetivo se logra haciendo que al regulador lleguen dos señales, una proveniente del transmisor de medida proporcional al valor real de la presión de vapor del RH, la otra del transmisor proporcional al valor de la presión del vapor "en la cámara curtis" de la turbina que se puede mantener creciente linealmente con la carga.

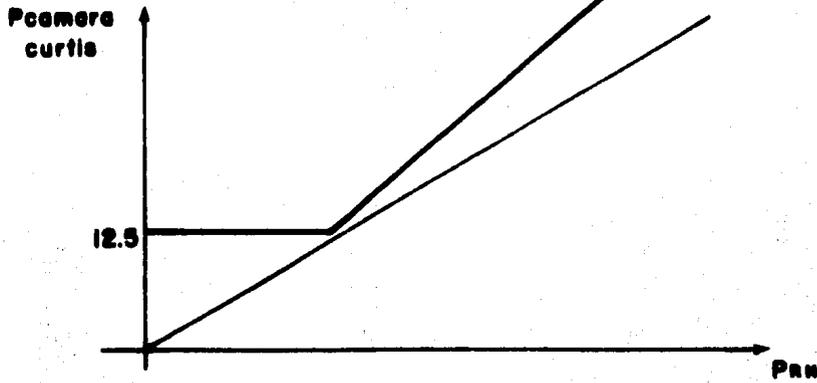
El cambio de la regulación a valor constante ($= 12.5 \text{ kg/cm}^2$) a la variable se da automáticamente.

Con un Set Point se fija el valor al cual deberá intervenir la conmutación. La señal eléctrica proporcional a tal valor viene confrontada con una análoga proveniente del transmisor potenciométrico y proporcional a la presión efectiva proveniente de la cámara curtis. El regulador de conmutación recibe la diferencia entre estas dos señales y comanda la regulación de un tipo al otro.

La regulación es tal que durante el normal funcionamiento de la planta la presión efectiva del vapor RH resulta ser, para diversas cargas, ligeramente inferior al valor de acción del regulador por tanto mantiene cerradas las válvulas de arranque (BY-PASS A.P. BY-PASS B.P.).

Sólo cuando tal valor viene superado por la presión real se

abren las válvulas.



E S P E C I F I C A C I O N E S

1.- CALDERA

TIPO DE CALDERA	CALDERA DE CIRCULACION NATURAL, DE DOS PASOS, CON UN DOMO.
COMBUSTIBLE	FUEL OIL, ARRANQUE CON <u>LIGHT OIL.</u>
DATOS DE DISEÑO PARA CARGA	100%
PRESION DE SALIDA DEL SOBRECALENTADOR	173 AT. ABS.
TEMPERATURA DE SALIDA DEL SOBRECALENTADOR	540°C
CAUDAL DE VAPOR VIVO	1225,5 t/h
PRESION RECALENTAMIENTO INTERMEDIO (RH)	39,3 AT. ABS.
TEMPERATURA ENTRADA RH	338°C
TEMPERATURA SALIDA RECALENTAMIENTO INTERMEDIO (RH)	540°C
CAUDAL RECALENTAMIENTO INTERMEDIO	1123 t/h
FABRICANTE DE LA CALDERA	BORSIG, BERLIN.

E S P E C I F I C A C I O N E S

2. TURBINA

PUNTO DE CARGA	100%
POTENCIA EN BORNES DEL GENERADOR	400 MW
PRESION DE ADMISION VAPOR VIVO	165 AT.ABS.
TEMPERATURA DE ADMISION VAPOR VIVO	538°C
PRESION DE ADMISION VAPOR RECALENTADO	38,5 AT. ABS.
TEMPERATURA DE ADMISION VAPOR RECALENTADO	538°C
REVOLUCIONES DE LA TURBINA	3600 RPM
TOMAS DE PRECALENTAMIENTO AGUA DE ALIMENTACION	7
MODO DE OPERACION	PRESION FIJA CON ETAPA DE REGULACION
CANTIDAD DE TURBINAS PARCIAL	1 TURBINA A.P. 1 TURBINA M.P DE DOBLE FLUJO 2 TURBINAS DE B.P., C/U DE DOBLE FLUJO
FABRICANTE DE LA TURBINA	KWU

3

C A P I T U L O 3.

3.- CALIBRACION DE LOS SISTEMAS DE REGULACION

La eficiencia de un sistema de regulación depende de la certeza o acertada puesta a punto de las varias acciones regulantes del regulador. Los valores más apropiados para asignar a la banda proporcional, al tiempo de anticipo y al número de repeticiones al minuto, dependen del grado de estabilidad deseado para el sistema en cuestión.

Los tres métodos generalmente adoptados para la puesta a punto de los reguladores son:

- Método de las curvas de reacción del proceso
- Método de Zeigler y Nichols
- Método de las oscilaciones amortiguadas

Para la puesta a punto de los reguladores es necesario efectuar las siguientes operaciones:

- Precálculo y predeterminación en escritorio de los valores de partida para la calibración a imponer sobre los reguladores.
- Puesta a punto definitiva de la planta.

3.1.- CALCULO DE LOS VALORES DE CALIBRACION DE LOS REGULADORES EN BASE A LA CURVA DE REACCION DEL PROCESO

Para aplicar este método se abre la cadena de control antes del elemento final de regulación y se imprime una pequeña varia-

ción a escalón a la alimentación del proceso, actuando directamente sobre el servomotor de la válvula y registrando la respuesta.

Los procesos se dividen, como se ha visto, en sistemas no autoregulantes y autoregulantes.

3.1.1.- PROCESOS NO AUTOREGULANTES

Si se le da manualmente al órgano final de regulación una variación a escalón de amplitud " y " la variable controlada " x " varía con velocidad constante. (figura 1).

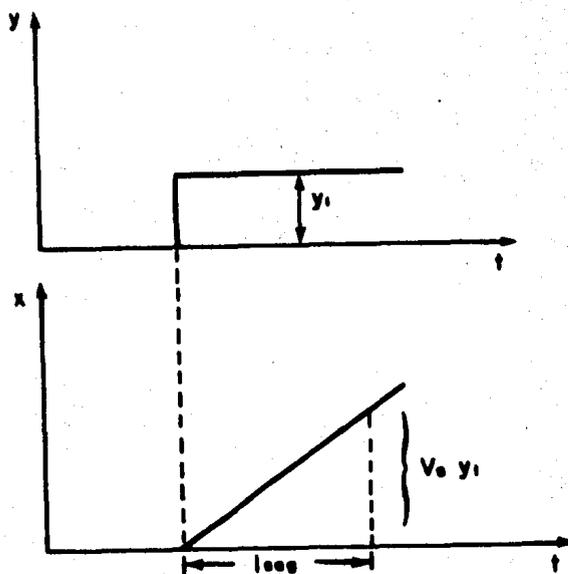


Fig. 1

Se asume entonces como factor característico del proceso la

velocidad V_s con la que se desplaza la variable controlada para una variación unitaria de la posición del órgano regulante.

La variable regulada habrá asumido, por ende, después de un segundo, un valor $X = V_s Y_1$, si el órgano regulante se ha desplazado en una cantidad y_1 , (figura 1).

En general se hace referencia a la magnitud, que es el inverso de la velocidad máxima de variación de la magnitud medida que se tiene cuando se lleva al órgano final de regulación desde la posición completa cerrada a la completamente abierta, es decir, cuando se impone una variación igual a toda la carrera (curso) y_{max} .

3.1.2. PROCESOS AUTOREGULANTES

Si se imprime manualmente al órgano de regulación una variación a escalón y_1 , la variable controlada X varía, con constante de tiempo T , tendiendo asintóticamente a un nuevo valor de equilibrio.

Se asume entonces como características del proceso la constante de tiempo T y la ganancia

$$G = \frac{\text{Variación de la variable controlada}}{\text{Variación de la posición del órgano regulante}}$$

La velocidad máxima de variación de X esta dada por $V = \frac{Gy}{T}$
mientras que la $V_{max} = \frac{G y_{max}}{T}$

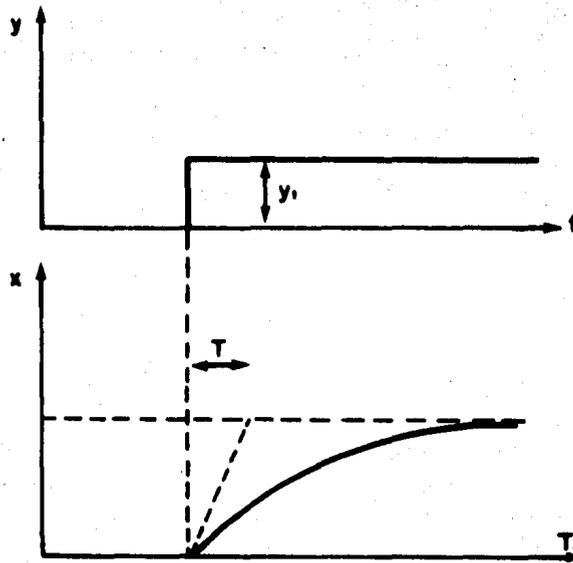


Fig. 2

También en este caso se hace, en general referencia a la magnitud A definida como el inverso de la velocidad máxima de variación de la magnitud medida, o sea:

$$A = \frac{T}{G y_{max}}$$

Otra característica muy importante a considerar en la puesta a punto de los procesos, sean éstos autoregulantes o no, es el tiempo muerto T_m .

En base a estas características se puede obtener los valores preliminares para asignar a la ganancia del regulador, banda proporcional número de repeticiones por minuto y tiempo de anticipo como resulta de la siguiente tabla:

TABLA 1: CÁLCULO PRELIMINAR DE VALORES DE CALIBRACIÓN

TIPO DE REGULADOR	PROCESOS NO AUTORREGULABLES		PROCESOS AUTORREGULABLES	
	UNIDAD DE MEDIDA		UNIDAD DE MEDIDA	
P	$G_p = \frac{\pi}{4} \frac{A}{T_m} y_{max}$ $X_p = \frac{4}{\pi} \frac{T_m}{A}$	[y] [x'] [x]	$G_p = \frac{\pi}{4} \frac{A}{T_m} y_{max} + \frac{1}{2}$ $X_p = \frac{1}{G_p} y_{max}$	[y] [x'] [x]
P+I	$G_p = \text{Idem}$ $X_p = \text{Idem}$ $N_r = \frac{0.3}{T_m}$	Idem Idem rev/min	$G_p = \text{Idem}$ $X_p = \text{Idem}$ $N_r = \frac{0.3}{T_m}$	Idem Idem rev/min
P+I+D	$G_p = \text{Idem}$ $X_p = \text{Idem}$ $N_r = \frac{0.3}{T_m}$ $T_e = 0.5 T_m$	Idem Idem rev/min min	$G_p = \text{Idem}$ $X_p = \text{Idem}$ $N_r = \frac{0.3}{T_m}$ $T_e = 0.5 T_m$	Idem Idem rev/min min

G_p = Ganancia del regulador

X_p = Bandas proporcionales

(X) = Unidad de medida de la magnitud regulada

(y) = Unidad de medida de la carrera del órgano regulante

N_r = Número de repeticiones por minuto

T_a = Tiempo de anticipo de la acción derivativa

Y_{max} = Carrera total del órgano regulante.

Para obtener la banda proporcional que se le va a asignar al regulador se puede recurrir a otras formas basadas siempre sobre características obtenidas de la curva de reacción del proceso.

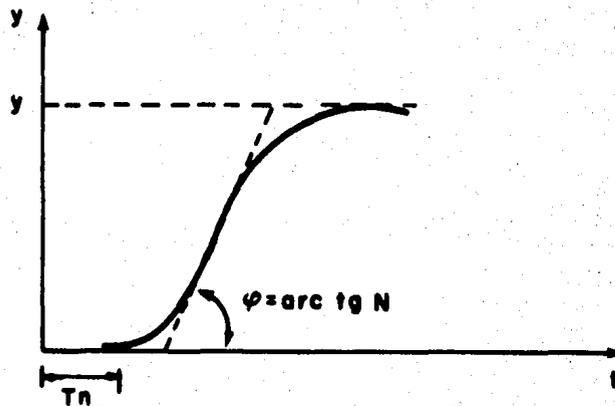


Fig. 3

Los datos previstos por la curva de reacción son:

T_m = Tiempo muerto

N = Pendiente de la curva en el punto de flexión expresada en variaciones porcentuales de la variable por unidad de tiempo.

Se obtiene entonces la regulación proporcional:

$$B = \frac{100 T_m.N}{\Delta Y} \dots (1)$$

Regulación P+I: $B = \frac{110 T_m.N}{\Delta Y} \dots (2)$

Regulación P+I+D: $B = \frac{83 T_m.N}{\Delta Y} \dots (3)$

B = La banda proporcional en por ciento

ΔY = Desplazamiento imprimido al órgano regulante en por ciento de la carrera total.

Los valores de N_r y T_d se obtienen en función del tiempo muerto T_m con las mismas fórmulas de la tabla anterior.

De las relaciones escritas se pueden sacar las siguientes consideraciones de acuerdo con todo lo dicho para los varios tipos de regulación:

- a) Mayor es el tiempo muerto del proceso, más lenta debe ser la acción integral para evitar el surgimiento de oscilaciones.
- b) Mayor es el tiempo muerto del proceso, más enérgica debe ser la acción anticipatoria de la acción derivativa para compensar los efectos.
- c) El efecto estabilizante de la acción derivativa permite adoptar una acción integral más enérgica, sin que por esto disminuya el margen de estabilidad del sistema (regulador P+I: $Nr = 0.3/T_m$; regulador:

$$P+I+D: Nr = \frac{0.5}{T_m}$$

- d) Pasando de un regulador P a un regulador P+I es oportuno aumentar la banda proporcional [cfr. la ecuación (1) y la (2)].

Para compensar la mayor inestabilidad debida a la introducción de la acción integral.

- e) La unión oportuna sucesiva de la acción derivativa con su efecto estabilizante consiente la adopción de una banda proporcional más estrecha.

3.2 REGLA DE ZIEGLER Y NICHOLS

Si en un proceso dotado de regulación con acción P+I+D, en la cual vienen excluidas la acción integral y derivativa llevando a cero el tiempo de anticipo y al infinito el número de repeticiones al minuto, se reduce progresivamente la banda proporcional, si alcanza a obtener oscilaciones permanentes de la variable controlada.

En general, la determinación de la banda proporcional crítica o de pendulación, viene realizada experimentalmente en la fase de puesta a punto definitiva sobre la planta.

Es posible, sin embargo, en base al conocimiento de los parámetros del sistema obtenerla por vía puramente teórica.

Ziegler y Nichols han desarrollado una serie de formulas empíricas que dan los valores para asignar a las variaciones reguladoras en función de la banda proporcional de pendulación y del período de pendulación. Se obtiene así, la siguiente tabla:

TABLA 2: BANDA PROPORCIONAL CRÍTICA O DE PENDULACIÓN

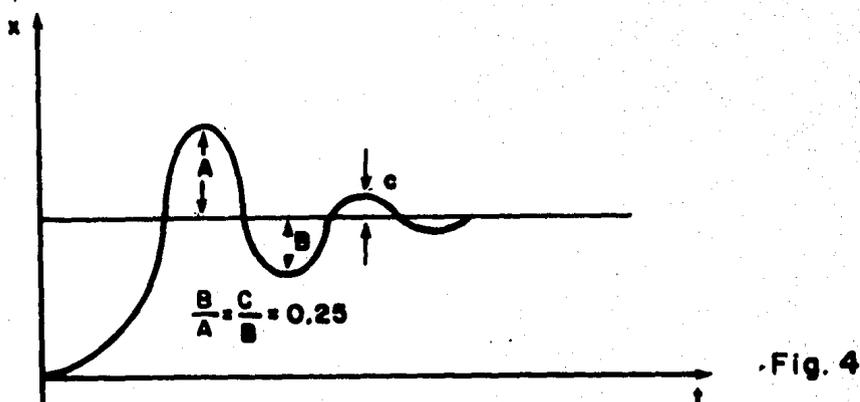
TIPO DE REGULADOR	BANDA PROPORCIONAL	REPETICIONES AL MINUTO REP/MIN	TIEMPO DE ANTICIPO $T_a = \text{min}$
PROPORCIONAL	$2 B_0$	—	—
PROPORCIONAL INTEGRAL	$2.22 B_0$	$\frac{1.2}{P_0}$	—
PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO	$1.66 B_0$	$\frac{2}{P_0}$	$\frac{P_0}{8}$

Donde B_e y P_e son la banda proporcional crítica de pendulación y el período de pendulación obtenidos excluyendo la acción integral y derivativa.

El examen de la tabla nos lleva a las mismas conclusiones de las de los puntos "c", "d" y "e" del parágrafo precedente.

3.3 METODO DE LAS OSCILACIONES AMORTIGUADAS

Otro método práctico para la puesta a punto de un regulador con acción PID es aquel de hacer variar la banda proporcional del instrumento, una vez llevado a cero el tiempo de anticipo y al infinito el número de repeticiones al minuto, hasta obtener una curva de respuesta del tipo de la figura siguiente:



La banda proporcional para asignar al instrumento es aquella por la cual la curva de respuesta sea oscilante amortiguada con una relación de amortiguamiento

$$\frac{B}{A} = \frac{C}{B} = 0.25$$

El número de repeticiones al minuto para asignar a la acción integral es $Nr = \frac{6}{P}$ y el tiempo de anticipo de la acción derivativa es $Ta = \frac{P}{1.5}$ donde P es el período obtenible del registro de la respuesta (figura 4).

3.4.- PUESTA A PUNTO DEFINITIVA SOBRE LA PLANTA DE LA CADENA DE REGULACION

Con el grupo fuera de servicio se necesita proveer a la calibración de los transmisores, a la calibración final de los reguladores, y al control del sentido de intervención de los servomotores en base a la acción directa o inversa de los reguladores.

Con el grupo en servicio es necesario controlar lo siguiente:

Los gradientes de toma y pérdida de carga normal y de "runback".

La acción de "runback" se tiene:

- Por disparo de una maquinaria auxiliar (por ejemplo: un ventilador o una bomba de alimento).
- Cuando cualquier aparato de control alcanza su posición extrema, mientras la señal continúa creciendo.

El ajuste de las ganancias de los aparatos del sistema de control para rendir congruentes las señales de coordinaciones las señales de coordinación de campo (s) de las señales de salida de los transmisores congruentes con aquellas a la salida de los amplificadores etc.

El ajuste de las polarizaciones si por ejemplo: a la salida de un aparato es demandada una tensión variable de 0a 10V en correspondencia de la excursión de la señal de ingreso y esto no es obtenible en base a la caracterfstica del instrumento, se recurre de una oportuna polarización externa.

En la figura 5 se ve como con una polarización fija de -2v es posible trasladar la recta (1) hasta hacerla coincidir con la deseada (2).

Por medio de la polarización se desplaza, por lo tanto, la caracterfstica del instrumento paralelamente a si misma y por medio de la ganancia se varía la inclinación.

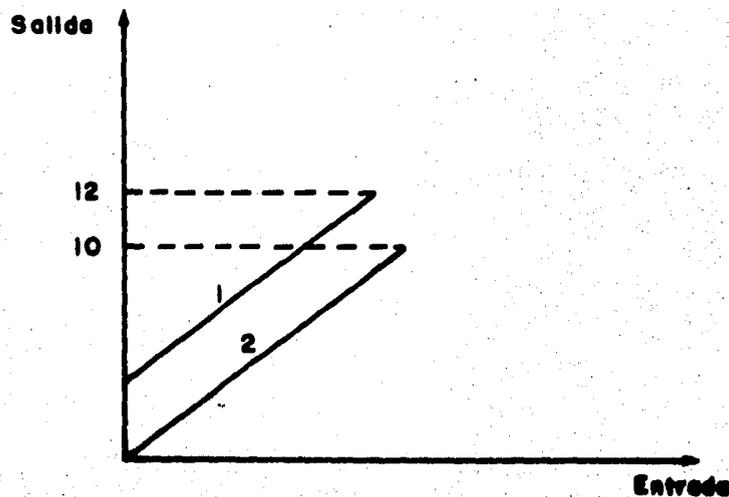


Fig. 5

El ajuste de las desensibilizaciones en fase de balance automático. Cuando se debe pasar un regulador de manual en automático es necesario balancear la señal en automático con la de manual, antes del pasaje.

La desensibilización corresponde a una disminución de la ganancia en fase de balance para evitar fenómenos de inestabilidad y efectuar más rápido la operación.

La puesta a punto de eventuales señales de corrección y de refuerzo.

3.5.- EXAMEN ANALITICO DE UN PROCESO REGULADO

3.5.1.- PROCESO PROVISTO DE REGULACION PROPORCIONAL

Se considera el sistema de regulación relativo a un calentador de combustible.

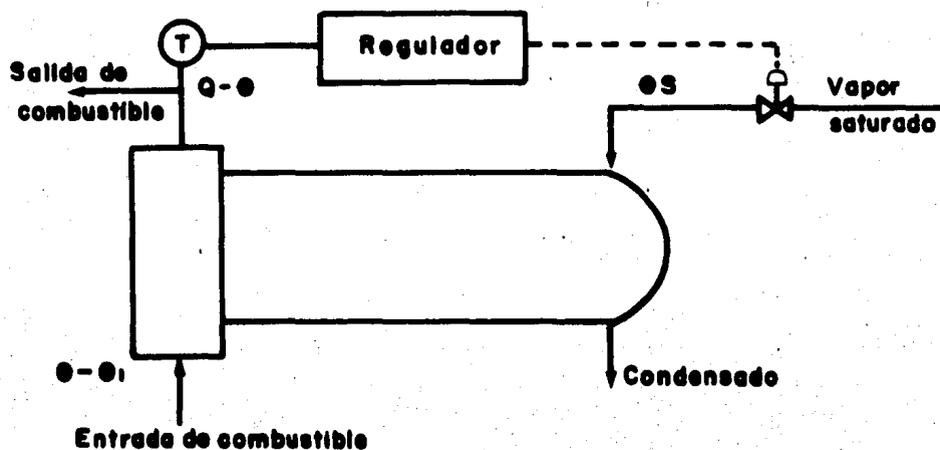


Fig. 1

Una señal proporcional a la temperatura del combustible a la salida es enviada a un regulador que actúa con acción P sobre la válvula que regula la alimentación de vapor al calentador.

La ecuación de equilibrio dinámico, con la hipótesis simplificada que la temperatura del combustible al interior del calentador es igual a la temperatura θ de salida, es:

$$MCn \frac{d\theta}{dt} + Qc_n (\theta - \theta_1) = Ka (\theta_s - \theta) \quad \dots(1)$$

Q = Caudal combustible en Kg/h

Cn = Calor específico del combustible (nafta) en K cal/Kg °C

K = Coeficiente de transmisión térmica de los tubos del calentador en Kcal/m² seg. °C

A = Area de intercambio en m²

M = Peso del combustible contenido en el calentador en Kg.

θ_1 = Temperatura del combustible a la entrada

θ = Temperatura del combustible en el calentador

θ_s = Temperatura del vapor saturado de calentamiento

La ecuación de equilibrio dinámico se obtiene del balance térmico entre calorías entrantes $KA (\theta_s - \theta)$ y calorías salientes $Qc_n (\theta - \theta_1)$. La diferencia conlleva, obviamente, una variación de la temperatura del combustible.

La ecuación de balance térmico instantánea para el vapor es:

$$C \frac{d\theta_s}{dt} + KA (\theta_s - \theta) = Qv\lambda \dots (2)$$

donde:

Qv = Caudal de vapor

λ = Calor latente de condensación del vapor y del condensado contenidos en el calentador.

C = Capacidad térmica global del vapor y del condensado contenidos en el calentador.

Esta ecuación (2) nos dice que el calor de condensación del vapor saturado $Qv\lambda$ en parte es transmitido al combustible $KA (\theta_s - \theta)$ y en parte va a aumentar la temperatura media de la masa vapor - condensado,

$$C \frac{d\theta_s}{dt}$$

Derivando (1) se tiene:

$$MCn \frac{d^2\theta}{dt^2} + QCn \left(\frac{d\theta}{dt} - \frac{d\theta_1}{dt} \right) = KA \left(\frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \right) \dots (3)$$

De la (2) despejando $\frac{d\theta_s}{dt}$ se tiene:

$$\frac{d\theta_s}{dt} = - \frac{KA}{C} (\theta_s - \theta) + \frac{Qv\lambda}{C} \dots (4)$$

De la (1):

$$\theta_s = \frac{MCn}{KA} \frac{d\theta}{dt} + \frac{QCn}{KA} (\theta - \theta_1) + \theta \dots (5)$$

sustituyendo (5) en (4):

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{Qv\lambda}{c} - \frac{MCn}{c} \frac{d\theta}{dt} - \frac{QCn}{c} (\theta - \theta_1) \quad \dots (5)$$

sustituyendo (6) en (3):

$$MCn \frac{d^2\theta}{dt^2} + QCn \left(\frac{d\theta}{dt} - \frac{d\theta_1}{dt} \right) = KA \left[\frac{Qv\lambda}{c} - \frac{MCn}{c} \frac{d\theta}{dt} - \frac{QCn}{c} (\theta - \theta_1) - \frac{d\sigma}{dt} \right]$$

$$MCn \frac{d^2\theta}{dt^2} + QCn \frac{d\theta}{dt} - \frac{QCn}{c} \frac{d\theta_1}{dt} = \frac{KAQv\lambda}{c} - \frac{KAMCn}{c} \frac{d\theta}{dt} - \frac{KAQCn\theta}{c} + \frac{KAQCn\theta_1}{c} - KA \frac{d\sigma}{dt}$$

$$MCn \frac{d^2\theta}{dt^2} + QCn \frac{d\theta}{dt} + \frac{KAMCn}{c} \frac{d\theta}{dt} + KA \frac{d\sigma}{dt} + \frac{KAQCn}{c} \theta = \frac{KAQv\lambda}{c} + QCn \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{KAQCn\theta_1}{c}$$

Multiplicando ambos miembros por C/(KAQCn)

$$\frac{MC}{KAQ} \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{c}{KA} \frac{d\theta}{dt} + \frac{M}{Q} \frac{d\theta}{dt} + \frac{c}{QCn} \frac{d\theta}{dt} + \theta = \frac{Qv\lambda}{QCn} + \frac{c}{KA} \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1$$

$$\frac{MC}{KAQ} \frac{d^2\theta}{dt^2} + \left(\frac{c}{KA} + \frac{M}{Q} + \frac{c}{QCn} \right) \frac{d\theta}{dt} + \theta = \frac{Qv\lambda}{QCn} + \frac{c}{KA} \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1$$

y haciendo $\frac{\lambda}{QCn} = R_1$; $\frac{c}{KA} = R_2$; $\frac{MC}{KAQ} = m$; $\frac{c}{KA} + \frac{MCn+C}{QCn} = n$

$$m \frac{d^2\theta}{dt^2} + n \frac{d\theta}{dt} + \theta = R_1 Qv + R_2 \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1 \quad \dots (7)$$

Que es la ecuación del proceso prescindiendo de la acción del regulador.

Se puede observar que la temperatura a régimen es:

$$\theta_o = R_1 Qv + \theta_1$$

Si se dá una variación escalón $\Delta\theta_1$ en la temperatura de ingreso del combustible, la temperatura θ_1 debido a que Qv permanece constante (ausencia de regulación) e igual a Qv_o , varía con un comportamiento que se puede obtener de la solución de la ecuac. 7 en efecto sustituyendo en 7 a θ_1 , el nuevo valor $\theta_1 + \Delta\theta_1$ y $Qv = Qv_o$ se obtiene a régimen.

$$\bar{\theta} = R_1 Qv_o + \theta_1 + \Delta\theta_1$$

La respuesta transitoria del sistema se obtiene, de la solución de la ecuac., homogénea asociada a la ecuac. 7 que es

$$m \frac{d^2\theta}{dt^2} + n \frac{d\theta}{dt} + \theta = 0$$

Cuya ecuación característica es

$$m\lambda^2 + n\lambda + 1 = 0$$

Cuya solución produce las raíces α_1 y α_2 la solución de la ecuación, homogénea asociada resulta.

$$\theta = c_1 e^{\alpha_1 t} + c_2 e^{\alpha_2 t}$$

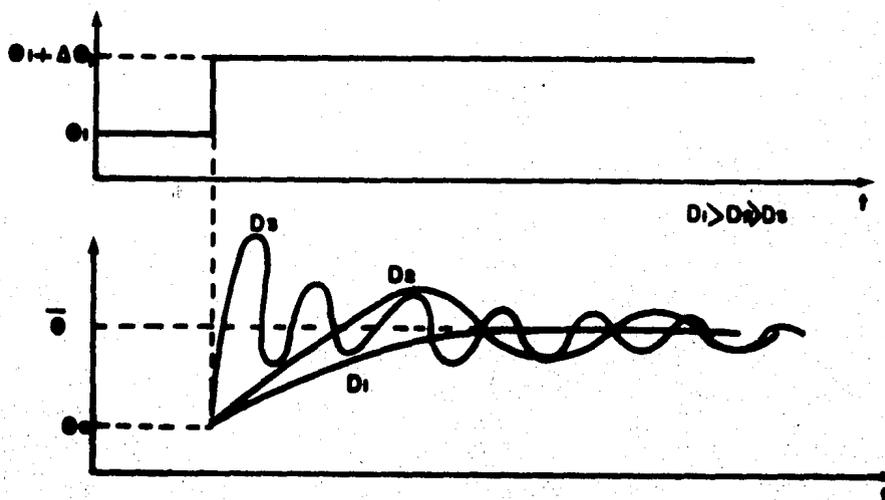
y la solución de la ecuación completa del proceso sin regulador es.

$$\theta = R_1 Q_{vo} + \theta_1 + \Delta\theta_1 + c_1 e^{\alpha_1 t} + c_2 e^{\alpha_2 t}$$

El sistema, por lo tanto, alcanza la nueva temperatura de régimen

$$\theta = R_1 Q_{vo} + \theta_1 + \Delta\theta_1$$

Con un comportamiento aperiódico ó periódico amortiguado según que α_1 y α_2 sean reales o imaginarios.



Es decir, que el sistema se comporta como un sistema de 2do orden y debido a que α_1 y α_2 dependen de m y n el comportamiento de la respuesta transitoria depende de.

- a) De la capacidad térmica global C del vapor y condensado contenidos en el intercambiador.
- b) De la capacidad térmica MC_n del combustible contenido en el intercambiador.
- c) De la resistencia térmica $R = \frac{1}{KA}$

Veamos ahora el efecto del regulador proporcional cuya ecuación es

$$Y - Y_0 = - K_p (X - X_0)$$

Que en nuestro caso, se convierte en:

$$Y - Y_0 = - K_p (\theta - \theta_0)$$

Donde con θ_0 se indica la temperatura prefijada a la cual corresponde la apertura Y_0 de la válvula de regulación del vapor saturado.

Si esta válvula tiene una característica lineal será:

$$Q_v - Q_{v0} = K (Y - Y_0)$$

Por lo cual

$$Q_v - Q_{v0} = - G (\theta - \theta_0)$$

Con $G = K \cdot K_p$

Sustituyendo el valor de Q_v así obtenido, en la ecuación 7 tenemos.

$$m \frac{d^2\theta}{dt^2} + n \frac{d\theta}{dt} + (1 + R_1 G) \theta = R_1 (Q_{v0} + G\theta_0) =$$

$$R_1 (Q_{v0} + G\theta_0) + R_2 \frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1 \dots (8)$$

Que es la ecuación de equilibrio del sistema provisto de regulación proporcional.

Si la temperatura de ingreso del combustible sufre una variación a escalón de θ_1 a $\theta_1 + \Delta\theta_1$ la solución a régimen de la ecuación 8 será.

$$\bar{\theta} = \frac{R_1 (Q_{vo} + G\theta_0) + \theta_1 + \Delta\theta_1}{1 + R_1 G}$$

y como $\theta_0 = R_1 Q_{vo} + \theta_1$ sustituyendo tenemos

$$(1+R_1G) \bar{\theta} = \frac{R_1 [Q_{vo} + G (R_1 Q_{vo} + \theta_1)] + \theta_1 + \Delta\theta_1}{1 + R_1 G}$$

$$(1+R_1G) \bar{\theta} = R_1 Q_{vo} + R_1 G R_1 Q_{vo} + G R_1 \theta_1 + \theta_1 + \Delta\theta_1$$

$$(1+R_1G) \bar{\theta} - R_1 Q_{vo} - R_1 G R_1 Q_{vo} - R_1 G \theta_1 - \theta_1 = \Delta\theta_1$$

$$(1+R_1G) \bar{\theta} - R_1 Q_{vo} (1 + R_1 G) - \theta_1 - R_1 G \theta_1 = \Delta\theta_1$$

$$(1+R_1G) \bar{\theta} - R_1 Q_{vo} (1 + R_1 G) - (1 + R_1 G) \theta_1 = \Delta\theta_1$$

$$(1+R_1G) \bar{\theta} - (1 + R_1G) (R_1 Q_{vo} + \theta_1) = \Delta\theta_1$$

$$(1+R_1G) \bar{\theta} - (1 + R_1G) \theta_0 = \Delta\theta_1$$

$$(1+R_1G) (\bar{\theta} - \theta_0) = \Delta\theta_1$$

$$\bar{\theta} - \theta_0 = \frac{\Delta\theta_1}{1+R_1G}$$

Lo cual demuestra que la separación $\Delta\theta = \bar{\theta} - \theta_0$ (fuera de equilibrio característico de la regulación proporcional) es tanto más pequeña -- cuanto mayor es la ganancia G , es decir, cuanto más pequeña es la --- banda proporcional del regulador.

La respuesta al transitorio del sistema con regulador es dada por la solución de la ecuación homogénea asociada a la ecuación 8.

$$m \frac{d^2 \theta}{dt^2} + n \frac{d\theta}{dt} + (1+R_1 G) \theta = 0$$

cuya solución es:

$$\theta = C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t}$$

con α_1 y α_2 , raíces de la ec. característica

$$m \alpha^2 + n \alpha + (1+R_1 G) = 0$$

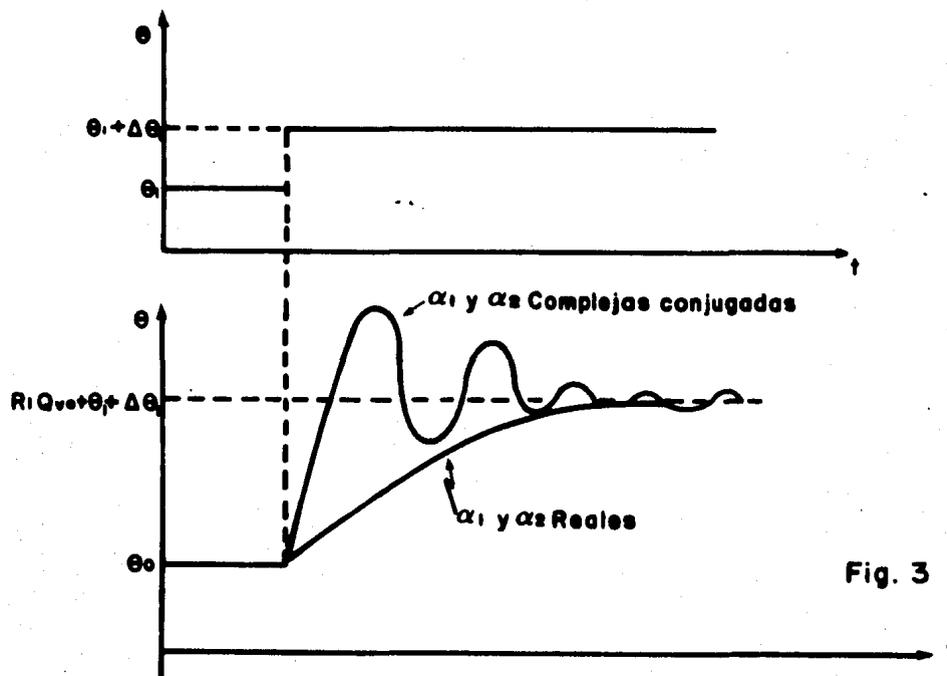
$$\alpha = \frac{n \pm \sqrt{n^2 - 4m(1+R_1 G)}}{2m}$$

para $n^2 \geq 4m(1+R_1 G)$, α_1 y α_2 son reales y la temperatura $\theta \rightarrow \bar{\theta}$ con un comportamiento aperiódico.

Para $n^2 < 4m(1+R_1 G)$ las raíces son complejas conjugadas y el sistema alcanza la temperatura $\bar{\theta}$ con oscilaciones amortiguadas. El comportamiento del sistema, depende con las mismas condiciones, del valor de la ganancia del regulador.

En definitiva se puede decir que, mientras más grande es la ga-

nancia del regulador, con la misma capacidad y resistencia del sistema (contenidas en m y n), menor es el error a régimen entre la variable controlada y el valor prefijado y más relevantes son las oscilaciones. De ahí la necesidad de buscar una solución de compromiso para la banda proporcional del sistema.



3.5.2. PROCESO PROVISTO DE REGULACION P+I

Examinemos ahora el caso en el cual el proceso de la fig. 1 esté dotado de regulación con acción P+I.

$$Y - Y_0 = -K_p (\theta - \theta_0) - K_i \int_0^t (\theta - \theta_0) dt$$

Considerando que la válvula tiene una característica lineal, se tiene:

$$Q_v - Q_{v0} = K (Y - Y_0) \Rightarrow$$

$$Q_v - Q_{v0} = - G (\theta - \theta_0) - I \int_0^t (\theta - \theta_0) dt$$

$$\text{con } G = KK_p \text{ y } I = K.K_i$$

sustituyendo el valor de Q_v en la ecuación 7 se tiene:

$$m \frac{d^2\theta}{dt^2} + n \frac{d\theta}{dt} (1 + R_1 G) \theta = R_1 (Q_{v0} + G\theta_0) - R_1 I \int_0^t (\theta - \theta_0) dt + R_2$$

$$\frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1$$

Que, con la hipótesis de una variación escalón de θ_1 a $\theta_1 + \Delta\theta_1$

=

$$m \frac{d^2\theta}{dt^2} + n \frac{d\theta}{dt} + (1+R_1 G) \theta = R_1 (Q_{v0} + G\theta_0) - R_1 I \int_0^t (\theta - \theta_0) dt + \theta_1 + \Delta\theta_1$$

Derivando ambos miembros con respecto al tiempo se obtiene:

$$m \frac{d^3 \theta}{dt^3} + n \frac{d^2 \theta}{dt^2} + (1+R_1 G) \frac{d\theta}{dt} + R_1 I \theta = R I \theta_0 \quad \dots \quad 9$$

A régimen se tiene $\bar{\theta} = \theta_0$ y la solución completa de la ecuación 9 es:

$$\theta = \theta_0 + C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t} + C_3 e^{\alpha_3 t} \quad \dots \quad 10$$

Donde α_1 , α_2 y α_3 son las raíces de la ecuación característica de la homogénea asociada:

$$m \alpha^3 + n \alpha^2 + (1 + R_1 G) \alpha + R_1 I = 0$$

Cuya solución es muy laboriosa y se buscan otros métodos de indagación para acertar si las raíces α_1 , α_2 y α_3 son reales o si dos de esas son complejas conjugadas con parte real positiva o negativa.

Solo nos resta, en esta parte hacer notar que la solución de la ecuación 9 nos lleva a la conclusión que, cualquier perturbación viene eliminada por la acción integral que lleva siempre, a régimen, la variable controlada al valor prefijado.

En el ejemplo hecho se ve de la ecuación 10 que la temperatura

θ se lleva a régimen al valor prefijado después de un transitorio inicial más o menos grande, dependiendo de la parte real de las raíces α_1 , α_2 y α_3

3.5.3. PROCESO PROVISTO DE REGULACION P + D

Examinemos ahora el caso en el cual el proceso de la fig. 1 esté dotado de regulación con acción P+D.

La ecuación de tal regulador es.

$$Y - Y_0 = - K_p (\theta - \theta_0) - K_p \frac{d\theta}{dt}$$

y debido a que la válvula es a característica lineal se tiene:

$$Q_v - Q_{v0} = K (Y - Y_0)$$

y por lo tanto

$$Q_v - Q_{v0} = - G (\theta - \theta_0) - D \frac{d\theta}{dt}$$

con:

$$G = K \cdot K_p \text{ y } D = K \cdot K_d$$

y sustituyendo el valor de Q_v en la ecuación del proceso

7 se tiene:

$$m \frac{d^2\theta}{dt^2} + n \frac{d\theta}{dt} + \theta = R_1 Q_{v0} - R_1 G (\theta - \theta_0) - R_1 D \frac{d\theta}{dt} + R_2$$

$$\frac{d\theta_1}{dt} + \theta_1$$

Que con la hipótesis de variación escalón de la temperatura de entrada del combustible de $\theta_1 + \theta_1 + \Delta\theta_1$ dá:

$$m \frac{d^2\theta}{dt^2} + (n + R_1 D) \frac{d\theta}{dt} + (1 + R_1 G) \theta = R_1 Q_{v0} + R_1 G \theta_0 + \theta_1 +$$

$$\Delta\theta_1 \dots 11$$

La temperatura θ de régimen será:

$$\bar{\theta} = \frac{R_1 Q_{v0} + R_1 G \theta_0 + \theta_1 + \Delta\theta_1}{1 + R_1 G}$$

y como: $\theta_0 = R_1 Q v_0 + \theta_1$ será:

$$\bar{\theta} - \theta_0 = \frac{\Delta \theta_1}{1 + R_1 G}$$

A régimen el complejo dotado de regulador P+D se comporta análogamente al dotado con regulador P.

La respuesta al transitorio es dada por la solución de la ecuación homogénea asociada de la ecuación 11:

$$m \frac{d^2 \theta}{dt^2} + (n + R_1 D) \frac{d\theta}{dt} + (1 + R_1 G) \theta = 0$$

cuya ecuación característica es:

$$m \alpha^2 + (n + R_1 D) \alpha + 1 + R_1 G = 0$$

de donde:

$$\alpha_{1,2} = \frac{-(n + R_1 D) \pm \sqrt{(n + R_1 D)^2 - 4m(1 + R_1 G)}}{2m}$$

para D bastante grande tal que:

$$(n + R_1 D)^2 \geq 4m(1 + R_1 G)$$

α_1 y α_2 son reales y la temperatura $\theta \rightarrow \bar{\theta}$ con un comportamiento aperiódico.

Para valores de D para los cuales:

$$(n + R_1 D)^2 < 4m(1 + R_1 G)$$

Las raíces α_1 y α_2 son complejas conjugadas con parte real negativa y la temperatura θ alcanza el valor $\bar{\theta}$ con oscilaciones amortiguadas. Las amplitudes de las oscilaciones son mayores mientras más pequeño es D.

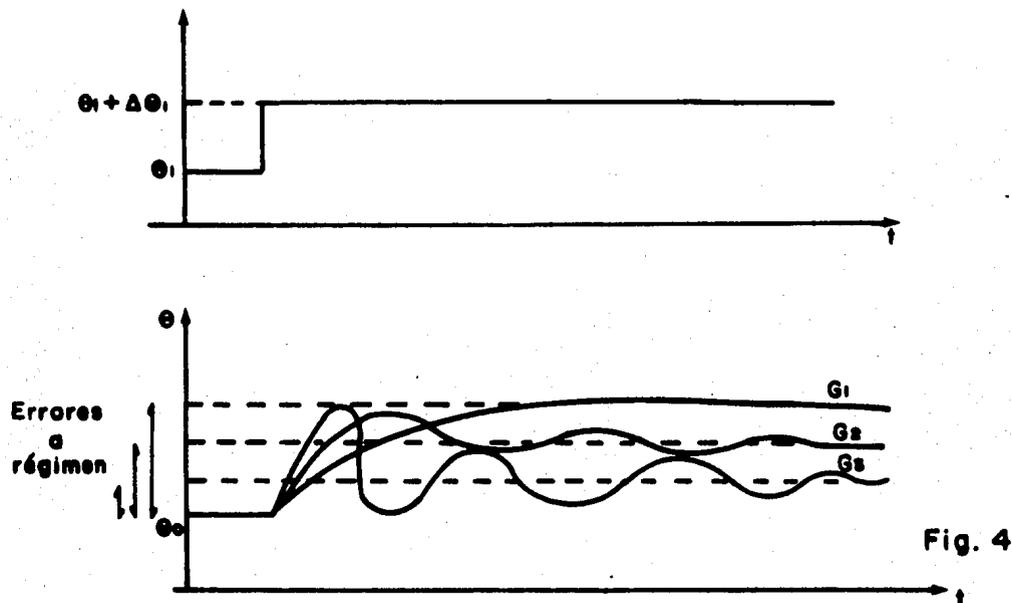


Fig. 4

En definitiva, la introducción de la acción derivativa no modifica el valor final de régimen, pero se hace sentir sólo en el transitorio. Cuanto más importante es la acción derivativa (D elevado),

tanto más reducidas son las amplitudes de las oscilaciones de la variable controlada ver fig. 4.

3.6 EJEMPLO DE CALCULO PRELIMINAR DE LOS VALORES DE CALIBRACION DE UN REGULADOR

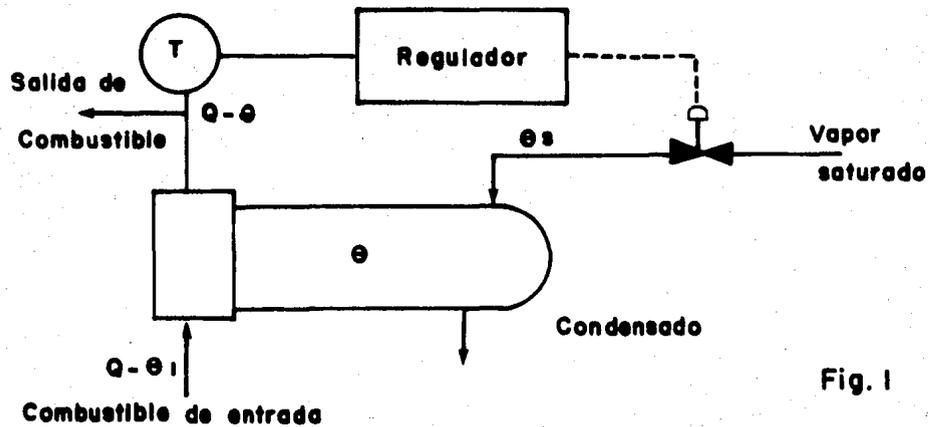


Fig. 1

La ecuación del relativo balance térmico instantáneo es:

$$MCn \frac{de}{dt} + Qcn (e - e_1) = KA (e_s - e) \quad \dots (1)$$

$$\text{Sea } T = \frac{MCn}{Qcn+KA}$$

$$K_1 = \frac{QCn}{QCn+KA}$$

$$K_2 = \frac{KA}{QCn+KA}$$

Entonces la ecuación (1) queda:

$$T \frac{d\theta}{dt} + \theta = K_1 \theta_1 + K_2 \theta_s$$

Que en régimen sinusoidal se convierte en:

$$Tj\omega M e^{j(\omega t - \theta)} + M e^{j(\omega t - \theta)} = K_1 M_1 e^{j\omega t} + K_2 M_s e^{j\omega t}$$

de donde:

$$M e^{j(\omega t - \theta)} = \frac{K_1}{1+Tj\omega} M_1 e^{j\omega t} + \frac{K_2}{1+Tj\omega} M_s e^{j\omega t}$$

De la cual se puede obtener el esquema a bloques:

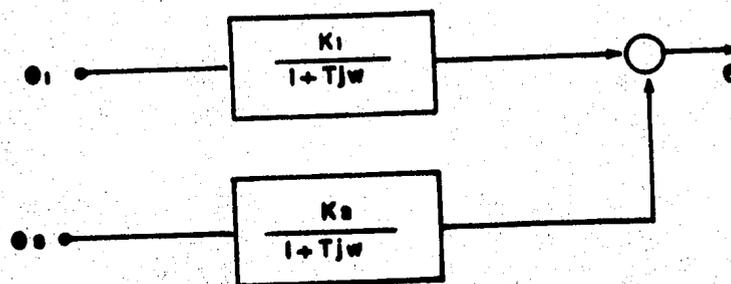


Fig. 2

Considerese un calentador de combustible de las siguientes características:

Superficie de calentamiento $A = 60\text{m}^2$

No de tubos 220 $\left\{ \begin{array}{l} \phi = 3/4" = 19.05 \text{ MM} \\ e = 15' = 4.572 \text{ MM} \end{array} \right.$

$K \doteq 0.0013 \text{ Kcal/m}^2 \text{ seg. } ^\circ\text{C}$

$Q = 18.12 \text{ t/h} = 5.03 \text{ Kg/seg.}$

(Caudal de combustible a carga nominal)

$Q_s = 1.331 \text{ t/h}$ (Caudal de vapor a carga nominal)

$C_n = 0.5 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$ (Calor específico del combustible)

Vapor (temperatura de entrada $\theta_s = 175 \text{ } ^\circ\text{C}$
(presión $P = 8.5 \text{ Kg/cm}^2$)

$$\text{Combustible} \begin{cases} \text{Temp. de entrada} = 27^{\circ}\text{C} \\ \text{Temp. de salida} = 104^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

El calor transferido al caudal Q_s es 645.120 Kcal/h

El volumen aprox. de combustible es dado por:

$$22077 (9.5)^2 \times 4.572 = 285039968.4 \text{ MM}^3 \\ \doteq 285 \text{ dm}^3$$

por lo cual:

$$M = 0.9 \times 285 = 256.5 \text{ Kg.}$$

Habiendo asumido un peso específico del combustible = 0.9 Kg/dm^3

se tiene:

$$T = \frac{256.5 \times 0.5}{5.03 \times 0.5 + 0.0013 \times 60} = 49.5 \text{ seg.}$$

$$K_1 = \frac{5.03 \times 0.5}{5.03 \times 0.5 + 0.0013 \times 60} = 0.97$$

$$K_2 = \frac{0.0013 \times 60}{5.03 \times 0.5 + 0.0013 \times 60} = 0.03$$

El esquema a bloques queda:

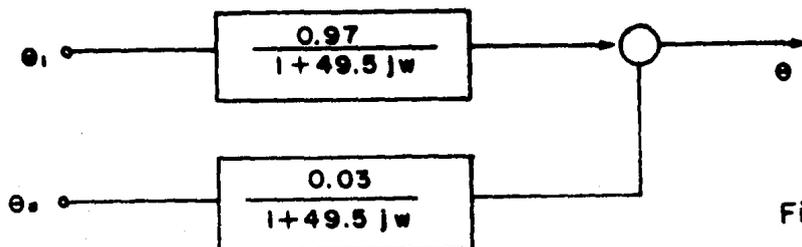


Fig. 3

Encontraremos ahora la función de transferencia que liga el caudal de vapor a la temperatura del combustible θ .

La constante de tiempo del proceso es característica, se necesita determinar el valor de la ganancia estática K.

Después que el caudal de vapor demandado para elevar la temperatura del combustible en condiciones de funcionamiento nominal desde 27°C a 104°C es 1331 Kg/h

se tiene:

$$K = \frac{\Delta\theta}{Q_s} = \frac{77}{1331} \text{ }^{\circ}\text{C/Kg/h} = 0.058 \text{ }^{\circ}\text{C/Kg/h}$$

Por lo cual la función de transferencia buscada es:

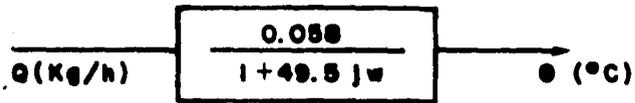


Fig. 4

Para encontrar la función de transferencia que relaciona la apertura de la válvula reguladora con el caudal de vapor, se supone que la válvula tenga una característica lineal y que esté abierta al 80% a la carga nominal (fig. 5)

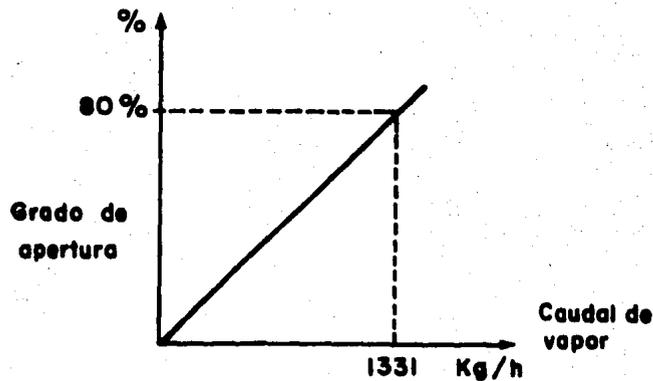


Fig. 5

Despreciando la constante de tiempo de la válvula se tiene que la función de transferencia buscada es:

$$k_v = \frac{1331}{80} = 16.6 \text{ Kg/h/\% APERTURA DE LA VALVULA}$$

El proceso examinado, sin regulador, puede ser, esquematizado así:

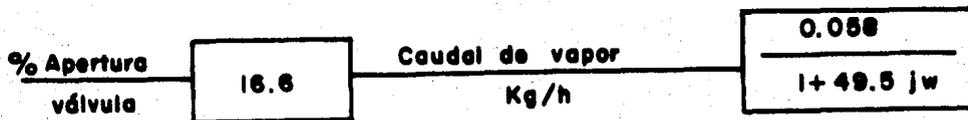


Fig. 6

Se asume un tiempo muerto total de 60 seg. que comprende el tiempo de traslado y el tiempo muerto del instrumento de medida.

La ganancia de la cadena de la figura 6 a régimen es:

$$G = K_v K = 16.6 \times 0.058 = 0.9628 \text{ °C/\% APERTURA DE LA VALVULA}$$

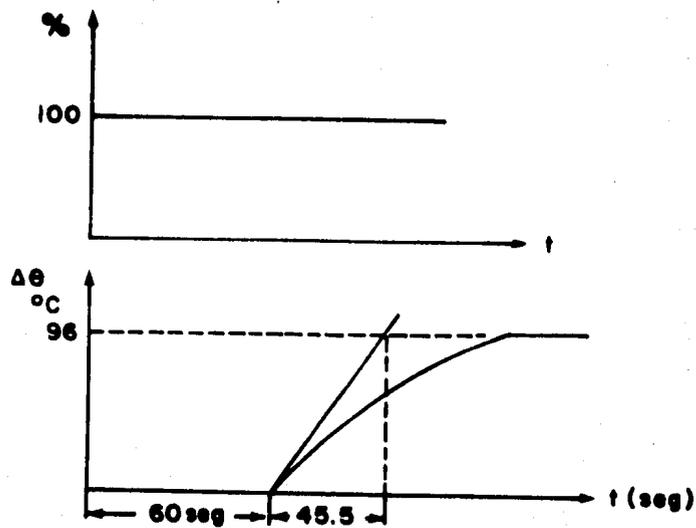


Fig. 7

El diagrama de la fig. 7 nos muestra una variación de la temperatura θ con tiempo muerto = 60 y constante de tiempo = 49.5 seg. para una variación del 100% de la apertura de la válvula.

Se puede obtener los datos indispensables sirviendose de la tabla sobre el cálculo de valores de calibración:

$$G = 0.96 \text{ } ^\circ\text{C} / \% \text{ APERTURA DE LA VALVULA}$$

$$T_m = 1 \text{ min.}$$

$$T = 49.5 \text{ seg.}$$

Velocidad inicial máxima de variación igual a:

$$\frac{26.60}{49.5} = 116 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{min.}$$

de donde:

$$A = \frac{1}{116} \text{ min/ } ^\circ\text{C}$$

Con referencia a la tabla citada se calculan los valores a imponer al regulador suponiendo una acción PID.

a) Ganancia del regulador:

$$G_p = \frac{\pi}{4} \frac{A}{T_m} y_{\max} + \frac{1}{2G}$$

$$G_p = \frac{\pi}{4} \frac{1}{116} \times .100 + \frac{1}{2 \times 0.96} = 1.2 \%$$

APERTURA DE LA VALVULA + $^\circ\text{C}$

b) Banda proporcional:

Si el campo de funcionamiento del regulador es de 0-200 $^\circ\text{C}$ se tiene:

$$B = \frac{1}{1.2} \times 100 \times \frac{1}{200} = 42\%$$

c) Número de repeticiones por minuto:

$$N_r = \frac{0.5}{T_m} = \frac{0.5}{1} = 0.5 \text{ rep/min.}$$

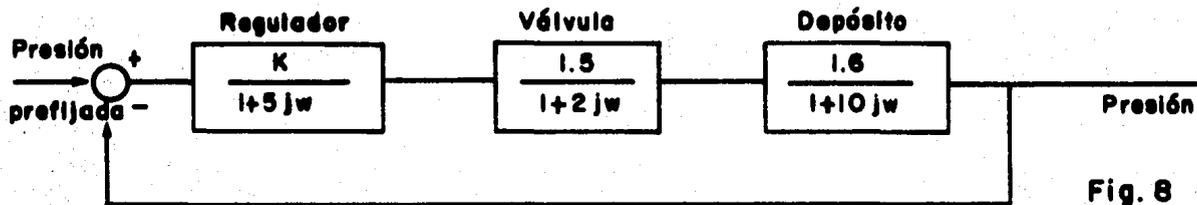
d) Tiempo de anticipo:

$$T_a = 0.5 T_m = 0.5 \text{ min.}$$

3.7 EJEMPLO DE CALCULO CON EL METODO ZIEGLER Y NICHOLS

Dado el sistema de la fig. 8 relativo a la regulación de presión a la salida de un recipiente.

Sean características las funciones de transferencia del regulador, de la válvula y del recipiente, conseguida en régimen dinámico con los métodos vistos hasta ahora.



Se requiere encontrar la ganancia K para asignar al regulador de tal manera que el regulador entre en oscilación permanente.

El diagrama de Nyquist de la función de transferencia a cadena abierta, obtenible con el análisis de los límites para $W \rightarrow 0$ y $W \rightarrow \infty$ es el siguiente:

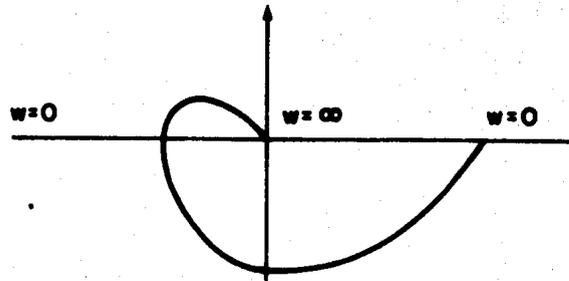


Fig. 9

Buscando la pulsación W_0 para la cual el desfase resulta 180° .

Como la fase es dada por la suma de las fases de los bloques individuales de la fig. 8 se necesita encontrar la pulsación para la cual se tenga.

$$\text{Arctg}5w + \text{Arctg}2w + \text{Arctg}10w = 180^\circ$$

Resolviendo esta ecuación por aproximaciones sustituyendo a W por varios valores. Se observa que para $W = 0.42$ rad/seg. por lo tanto:

$$\text{Arctg } 2.1 + \text{Arctg } 0.84 + \text{Arctg } 4.2 =$$

$$64^\circ + 40^\circ + 76^\circ = 180^\circ$$

Por lo cual la pulsación buscada:

$$w_0 = 0.42 \text{ rad/seg.}$$

A esta frecuencia, si la función representada en la fig. 9 vale 1 en módulo, el sistema, por todo lo dicho, entra en oscilación permanente.

La función de transferencia a cadena abierta es:

$$\frac{K}{1+5 jw} \times \frac{1.5}{1+2 jw} \times \frac{1.6}{1+10 jw} \quad \text{que para } W=0.42 \text{ rad/seg.}$$

da:

$$\frac{K}{1+2.1j} \times \frac{1.5}{1+0.84j} \times \frac{1.6}{1+4.2j}$$

El producto de los módulos es:

$$\frac{K}{\sqrt{1+4.41}} \times \frac{1.5}{\sqrt{1+0.7}} \times \frac{1.6}{\sqrt{1+17.6}} = \frac{K}{2.33} \times \frac{1.5}{1.31} \times \frac{1.6}{4.33}$$

Para que el módulo sea igual a 1 condición para la cual se tienen oscilaciones previamente, debe ser:

$$\frac{K}{2.33} \times \frac{1.5}{1.31} \times \frac{1.6}{4.33} = 1$$

de donde el K crítico es:

$$K = \frac{4.31 \times 1.31 \times 2.33}{1.5 \times 1.6} = 5.5$$

Sobre el regulador supuesto con acción P+I+D, se le impondrá:

a) Ganancia

$$K_p = \frac{1}{1.66}, K = \frac{5.5}{1.66} = 3.3 \text{ \% } \frac{\text{APERTURA VALVULA}}{\text{Kg/ cm}^2}$$

b) Número de repeticiones al minuto

$$N_r = \frac{2}{P_e}$$

como:

$$\omega_e = \frac{2\pi}{P_e} = 0.42 \text{ rad/seg.}$$

se tiene:

$$P_e = \frac{6.28}{0.42} = 14 \text{ seg.} = 0.23 \text{ min.}$$

Por lo tanto:

$$N_r = \frac{2}{0.23} = 8.7 \text{ rep/min.}$$

c) Tiempo de anticipo

$$T_a = \frac{P_e}{8} = 0.028 \text{ min.}$$

4

C A P I T U L O 4.

4. ESQUEMAS DE REGULACION

Se examinarán algunos esquemas de regulación relativos a plantas termoeléctricas con caldera a cuerpo cilindrico y con - flujo de vapor forzado.

El tipo de regulación más idóneo, depende obviamente del comportamiento de los dos tipos de caldera frente a demandas (esfuerzos) a escalón de las alimentaciones o a tomas imprevistas de carga.

Se requiere, por lo tanto, tener en cuenta el comportamiento dinámico del proceso.

Esto conlleva el perfecto conocimiento de sus características como, capacitancia, resistencia, tiempos muertos e interacciones entre las variables medidas.

4.1. COMPARACION ENTRE CALDERA A CUERPO CILINDRICO Y CALDERA A FLUJO DE VAPOR FORZADO.

En el comportamiento dinámico de una caldera, juega un papel importante la flexibilidad entendida como la capacidad del generador de adaptar de una manera más o menos rápida la potencia generada a aquella efectivamente demandada.

Resulta claro como el proyectista debe tener en cuenta - la flexibilidad para adaptar el sistema de regulación con objeto de aprovechar al máximo la capacidad de almacenamiento de la caldera.

Por energía almacenada se entiende el calor contenido ya sea en el flujo o en el metal de los tubos que se encuentran, obviamente a

temperatura más elevada, a cargas más altas. Por otro lado, a presión de salida constante (admisión en turbina) a cargas mayores y por lo -- tanto a caudales mayores, corresponden presiones de fluido más elevadas en la caldera.

A medida que crece la carga, por ende, por el aumento de la densidad del fluido, una mayor masa de líquido se encontrará almacenada en las tuberías (almacenamiento de materia). Después que este fluido se encontrará a una cierta presión y temperatura, se tendrá un almacenamiento de calor tanto mayor cuanto mayor es la carga.

Todo lo dicho lleva a considerar el generador de vapor como un depósito de energía y de materia creciente con la carga.

En una caldera a cuerpo cilíndrico, la necesidad de tener una circulación natural (que pueda ser asistida con bombas de circulación) impone el uso de tubos evaporadores de un cierto diámetro y de altura suficiente, por lo cual la capacidad de almacenamiento de agua y de calor resulta relevante.

De menor cantidad es este almacenamiento para las calderas a circulación forzada donde la diferencia de presión necesaria a la circulación del agua es obtenida con bombas de elevada potencia por lo que el diámetro de los tubos en la cámara de combustión resulta notablemente menor.

Se puede entonces concluir que, ya sea la caldera a circulación natural o a circulación forzada tienen un juego térmico creciente con la carga, cuya cantidad es mayor para la primera y menor para la segunda.

Esto significa que una caldera a circulación forzada responde más rápidamente a las variaciones de carga, pero a esta mayor flexibilidad van en contra excursiones más severas de presión en los transitorios. Lo contrario sucede para la caldera a circulación natural.

Otra diferencia sustancial en el comportamiento de los dos tipos de generadores es la siguiente:

En una caldera a circulación natural las interacciones entre las diversas magnitudes a regular son mínimas por lo cual los sistemas de regulación de temperatura, agua de alimentación y combustión son siempre considerados como sistemas distintos.

Esto no sucede para las calderas a flujo de vapor forzado, en las cuales la interacción entre las diversas magnitudes controladas es notablemente sentida.

En una caldera a flujo de vapor forzado, en efecto, una variación del agua de alimentación o de la actividad de combustión causa una variación de la temperatura del vapor y de la presión de ejercicio. Precisamente, variaciones en el mismo sentido del agua de alimentación influye sobre la temperatura final del vapor en -- sentido opuesto, mientras influyen en el mismo sentido sobre la presión a la salida de la caldera.

Se comprende, entonces, como en los generadores de vapor de flujo de vapor forzado, no sea posible considerar separados los -- sistemas de regulación del agua de alimentación, temperatura y combustión, para que sea necesario, en caso de desequilibrio de una de las magnitudes controladas, actuar intempestivamente en paralelo sobre todas las magnitudes interdependientes.

4.2. REGULACION DE CALDERA EN SEGUIMIENTO

En la regulación de caldera en seguimiento la demanda de carga viene hecha actuando directamente con el limitador de carga o con el variagiros sobre las válvulas de turbina.

La sucesiva variación de presión a la admisión y de caudal de

vapor actúa sobre la alimentación de la caldera que se adecúa así a la carga adecuada.

El sistema presenta una respuesta muy rápida en cuanto produce inmediatamente la nueva carga a expensas de la energía almacenada en caldera.

Sin embargo esto conlleva, inestables variaciones de presión y temperatura, tanto mayor cuanto mayor es la variación de carga y, por ende, cuanta mayor energía toma "prestada" de la caldera.

Por estas características la regulación a caldera en seguimiento encuentra una amplia aplicación en la regulación de calderas con circulación natural que, por el relevante juego térmico, pueden soportar variaciones de carga notables, con limitadas excursiones de la presión final de vapor.

4.3. REGULACION DE TURBINA EN SEGUIMIENTO

En este sistema de regulación la demanda de carga se efectúa variando las alimentaciones de la caldera.

Las válvulas de turbinas, reguladas en función de la pre-

sión a la admisión, descargan el caudal de vapor que la caldera produce en respuesta a la variación de carga.

El sistema presenta una respuesta muy lenta en cuanto que la caldera debe cargarse a su capacidad de acumular antes de dar lugar a la variación de presión de vapor que comanda las válvulas de la turbina.

Presenta sin embargo la ventaja que, no siendo utilizada la energía almacenada no se tienen variaciones de presión y temperatura final del vapor apreciables.

Por estas características tal sistema de regulación ha sido el único adoptado, desde un tiempo para acá para la regulación de generadores con pequeño juego térmico, (calderas con flujo de vapor forzado).

4.4 REGULACION COORDINADA O INTEGRADA

En este tipo de regulación la señal de demanda de carga se envía en paralelo a todos los aparatos de control de la caldera y de la turbina que son considerados como componentes de un único proceso.

Esto permite obtener amplias y rápidas variaciones de carga con mínimas excursiones de presión y temperaturas finales del vapor.

Reune consigo las ventajas de la regulación de caldera en seguimiento y de turbina en seguimiento, por ésto su empleo se está imponiendo para el control de calderas de flujo de vapor forzado subcríticas y supercríticas.

4.5 APUNTES ACERCA DE LA REGULACION COORDINADA DE UNA CALDERA DE FLUJO DE VAPOR FORZADO

La regulación coordinada es la que mejor se adapta a la regulación de calderas de flujo de vapor forzado. Se ha ya observado que, en una caldera de flujo de vapor forzado, una variación del agua de alimentación y de la combustión actúa directamente sobre la temperatura final de vapor. Más precisamente, en funcionamiento a presión constante, la variación de entalpía que sobre el agua de alimentación en el atravesamiento del único tubo según el cual puede esquematizarse la caldera de flujo de vapor forzado, es igual a la relación.

$$Q = \frac{\text{Calor Producido}}{\text{Caudal del Fluido}}$$

Esto significa que, a presión constante la temperatura final es función directa de la relación Q.

El sistema de regulación, por lo tanto, durante las variaciones de carga debe controlar en paralelo la actividad de combustión y el agua de alimentación, buscando mantener constante la relación donde no inflencie la temperatura final del vapor.

Si observamos, aún, que la regulación de las válvulas de turbina influencia en un sentido opuesto a la carga en MW y la presión a la admisión, mientras que una variación de la señal de demanda a la caldera influencia en el mismo sentido la presión y la carga en MW.

La regulación coordinada debe por lo tanto tener en cuenta la presión y el error de carga para desarrollar la oportuna acción correctiva.

4.5.1. ESQUEMA DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA REGULACION COORDINADA

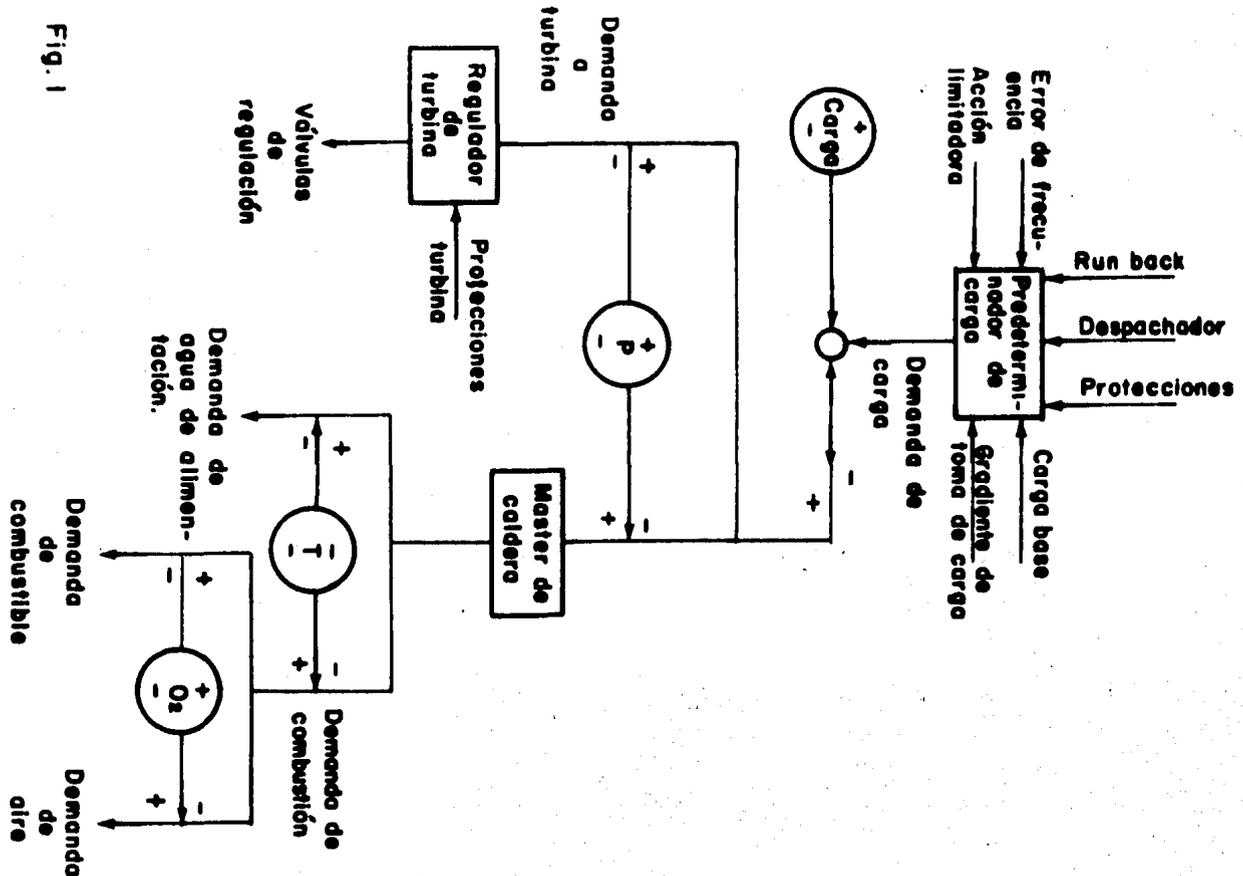


Fig. 1

El sistema de regulación coordinada actúa de acuerdo con lo dicho anteriormente de manera de hacer mínima las interacciones entre las magnitudes significativas del proceso: carga, presión, temperatura del vapor y exceso de aire.

El predeterminador de carga esta constituido de un conjunto de elementos analógicos que modulan la señal correspondiente a la carga base, fijada por el operador y corregida por una señal proporcional al error de frecuencia, con una señal proveniente del despachador de carga, actuando dentro de una banda de participación establecida por el operador mismo.

La señal de demanda de carga es influenciada aún por:

- Acciones limitadoras que al surgimiento de cualquier anomalía de funcionamiento limitan la demanda de carga. Un ejemplo lo tenemos representado por el regulador de presión a la admisión que interviene en acción de cerrar cuando la presión a la admisión desciende por debajo de un cierto porcentaje de la presión nominal.

- Acción de Runback que actúa cuando se dispara cualquier maquinaria auxiliar (ventiladores de aire, bomba de alimentación, etc.) o cuando cualquier aparato de control alcanza la posición de máxima apertura mientras la señal de comando continúa creciendo.

En el primer caso la señal de demanda de carga es reportada automáticamente al valor correspondiente a la carga que el sistema puede dar en las actuales condiciones. En el segundo

caso, la señal de demanda de carga es reportada automáticamente al valor correspondiente a la completa apertura del órgano regulante.

La señal de demanda de carga a la salida del predeterminador puede variar con un gradiente (MW/MIN) prefijado por el operador, dentro de los límites establecidos por los constructores.

La señal de demanda de carga, así formada, es enviada directamente en paralelo a comandar las válvulas de la turbina y las alimentaciones de la caldera con el objeto de:

- Obtener la más rápida respuesta del sistema.

- Minimizar las excursiones de presión, temperatura y porcentaje de O_2 durante las variaciones de carga.

Las acciones finales de control, en base al error de carga, presión, temperatura y porcentaje de O_2 corrige las demandas individuales a la turbina y a la caldera con el objeto de reportar las magnitudes medidas a los valores prefijados.

En la figura 1 los círculos representan las magnitudes medidas (carga eléctrica, presión a la admisión, temperatura del vapor y porcentaje de oxígeno en los gases combustibles) mientras

el signo + o - indica un valor de la variable mayor o menor del prefijado. La flecha saliente del circulo indica la acción correctiva tendiente a aumentar o disminuir la señal de demanda - según el signo del error.

La señal de demanda de carga saliente del predeterminador es comparada con la carga generada y actúa en el mismo sentido sobre la turbina y sobre el master de caldera.

La señal proporcional a la presión, a la admisión es comparada con el Set-Point y el error de presión actúa sobre la demanda a la turbina y a la caldera en sentido opuesto.

Debido a que una variación del agua de alimentación y de la combustión influye en sentido opuesto sobre la temperatura y en el mismo sentido sobre la presión a la admisión, el error de temperatura corrige la relación agua de alimentación combustión a fin de retornar la temperatura al valor prefijado. De esta manera, se -- tendrá un minimo de interacciones sobre la presión del vapor y sobre la carga eléctrica.

Por último el porcentaje de oxígeno en los humos viene comparado con el valor prefijado y el error actúa sobre la relación - aire, combustible para devolverla a las justas proporciones.

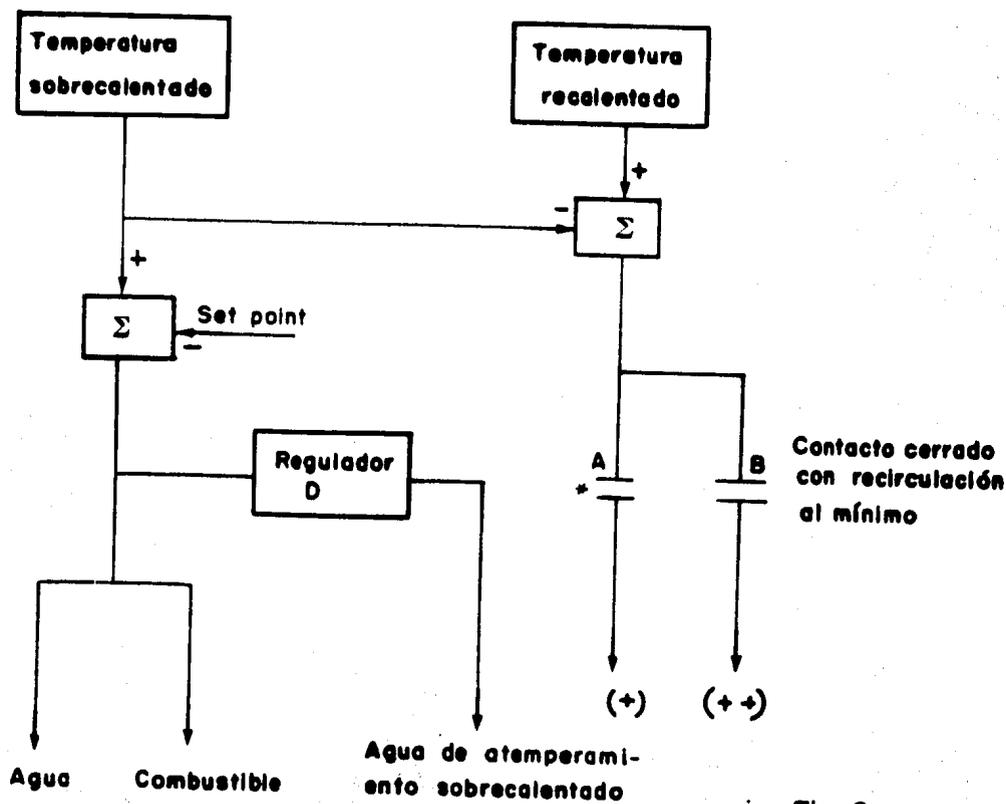


Fig. 2

(*) A: CONTACTO CERRADO, CERRADO CON VALVULA DE ATEMPERAMIENTO CERRADA.

(+) : RECIRCULACION DE GAS

(++) : ATEMPERAMIENTO RECALENTADO

En el sistema coordinado, en general, la regulación de temperatura del vapor recalentado está estrechamente conectada con la del vapor sobrecalentado. Se regula la temperatura del vapor sobrecalentado actuando sobre la relación AGUA/COMBUSTIBLE y se aprovecha la diferencia entre las temperaturas del vapor sobrecalentado y recalentado para accionar sobre la inclinación de los generadores o sobre la recirculación de los gases de la combustión.

En general son también previstos los atemperadores los que aumentan la rapidez de respuesta durante los transitorios.

En particular se puede pensar en encadenar la válvula de atemperamento a un regulador con acción derivativa que actúa solo durante los transitorios, según la figura, 2.

Si la temperatura del vapor sobrecalentado tiende a desviarse del valor prefijado, interviene inmediatamente el regulador con acción derivativa que regula el agua de atemperamento de manera de oponerse a la variación de temperatura.

Sucesivamente intervienen los reguladores P + I que ajustan la relación AGUA/COMBUSTIBLE anulando el error de tem--

peratura.

En este punto la acción derivativa desaparece y la válvula de atemperamento vuelve a su posición inicial.

La temperatura del vapor sobrecalentado hace de Set-Point de la temperatura del vapor recalentado; el eventual error si es positivo, actúa primero en disminución sobre la recirculación de los gases (contacto B abierto) y cuando ésta se encuentra al mínimo, se cierra el contacto B y comienza a abrirse la válvula, - de agua de atemperamiento.

Si en este punto, la temperatura comienza a decrecer, se cierra primero la válvula de agua de atemperamiento (contacto A abierto) y después comienza a aumentar la recirculación de gases.

5

C A P I T U L O 5.

5. ESTUDIO DE CASO: PLANTA CENTRO - VENEZUELA

5.1. FUNDAMENTOS PARA EL ENTENDIMIENTO DE LOS DIAGRAMAS DE BLOQUES

La regulación hidráulica de la turbina está combinada con la regulación electrónica. El campo de las señales es: 0 - 10 v. y en pocos casos de: 0 - 20 ma.

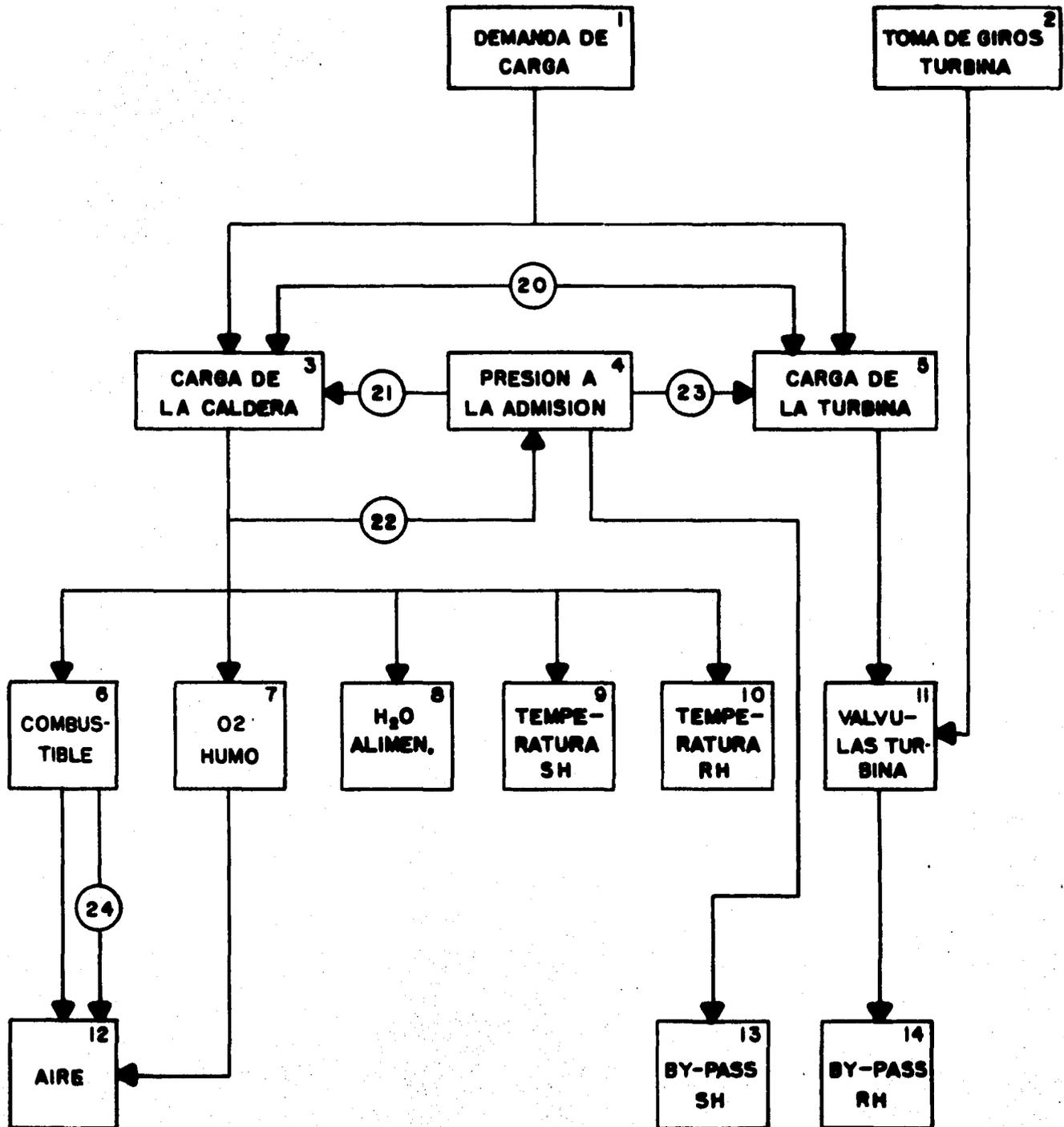
El esquema a bloques muestra la marcha de las señales desde la demanda de carga al posicionamiento de las válvulas de la turbina, de una parte y de la otra a la regulación de carga de la caldera. Se ponen en evidencia la interdependencia entre los diversos bloques.

Cada bloque se desarrolla en los esquemas de 1 al 14. En estos se indican mediante triángulos las señales gufa que proceden en cascada, y mediante círculos las otras señales de interconexión.

Los números al interior de los triángulos indican el bloque de proveniencia o destino. El número al interior de los círculos individualizan la señal, la flecha, el sentido y el número vecino al círculo el bloque con el cual está unido.

El semicírculo numerado indica un punto de prueba. Con línea discontinua se indican las señales lógicas.

ESQUEMA A BLOQUES DE LA REGULACION

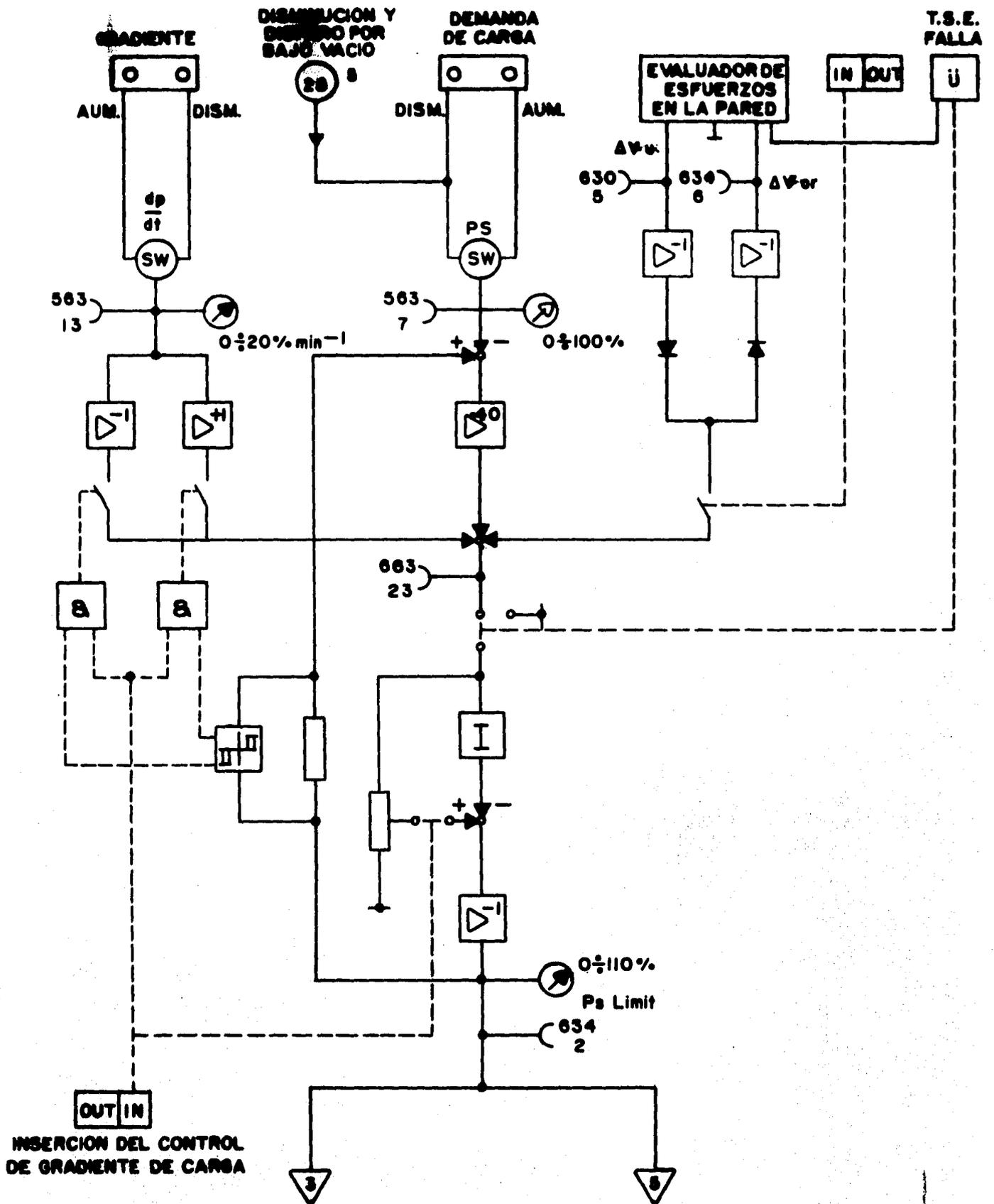


La simbología utilizada es la Din. Se han hecho simplificaciones de los circuitos.

5.2. DEMANDA DE CARGA (Ver diagrama 1)

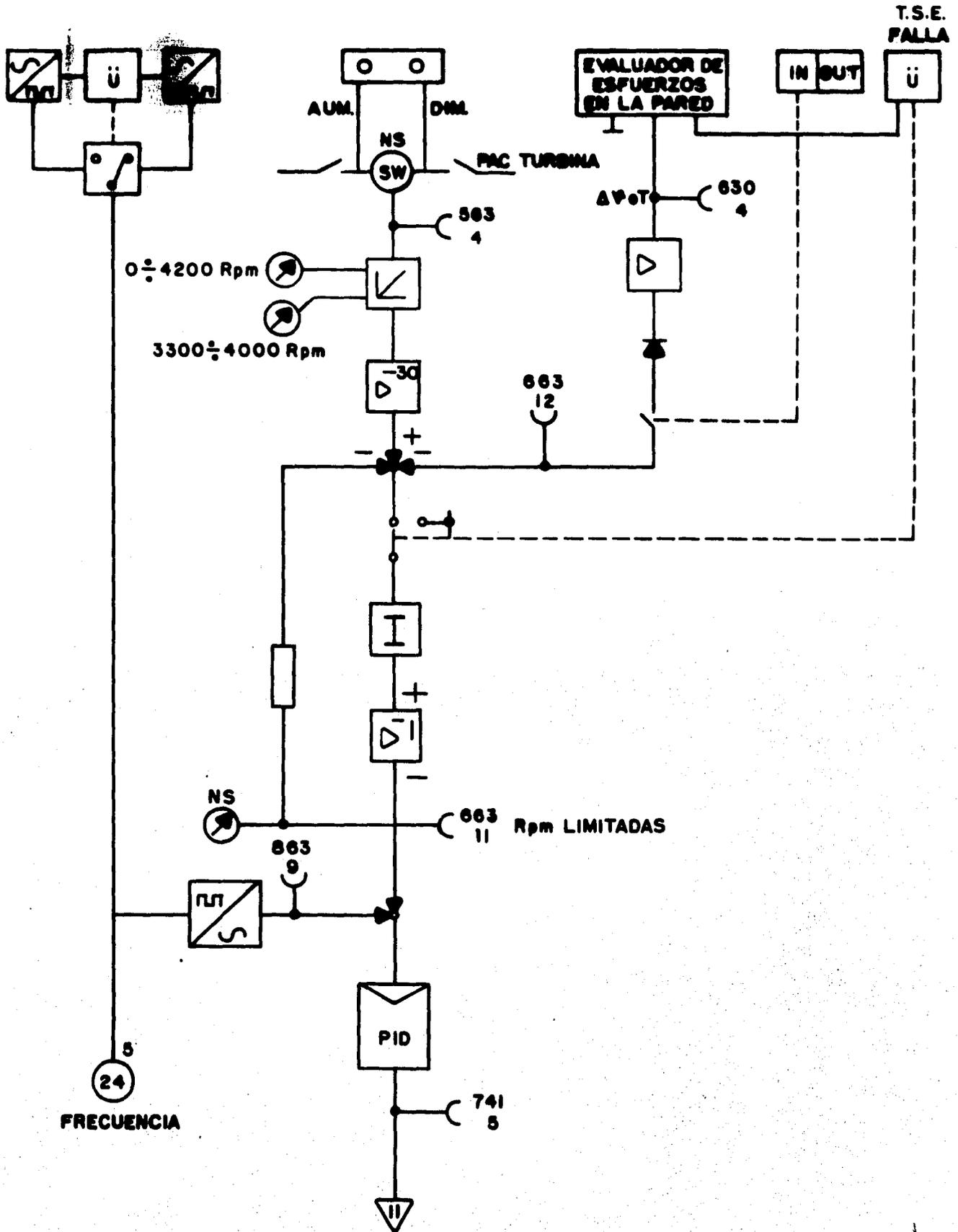
- 5.2.1. El valor de carga deseado, en MW, viene impuesto en el tablero de mando y leído en un indicador con escala; 0-400 MW.
- 5.2.2. La señal 25 reduce el valor de carga deseado en caso de pérdida de vacío e impide la maniobra de aumento hasta que persista el bajo vacío.
- 5.2.3. El gradiente de variación con el cual se desea que la carga impuesta sea alcanzada, se pone en el tablero de mando y se lee en un indicador con escala; 0 - 20 MW.
- 5.2.4. El amplificador con ganancia - 40 transfiere la señal al nodo donde entran las señales limitadoras de gradiente y del "Stress Evaluator".
El control del gradiente de carga puede ser excluido dejando que la señal de demanda de carga sea alcanzada mediante la acción integral del regulador.

DEMANDA DE CARGA



- 5.2.5. En caso de falla del "Stress Evaluator" el circuito se interrumpe y la señal de entrada al integrador permanece fija en el valor alcanzado.
- 5.2.6. La salida del amplificador con ganancia - 1 tiene disponible la señal de demanda de carga y se puede leer en un indicador colocado en el tablero.
- 5.2.7. La señal de demanda de carga va a los bloques 3 y 5 carga de la caldera y carga de la turbina respectivamente.
- 5.3. TOMA DE GIROS DE LA TURBINA (Ver diagrama 2)
- 5.3.1. La velocidad deseada se pone en el tablero y se lee en los indicadores de: 0 - 4200 RPM y 3300 - 4000 RPM.
- 5.3.2. El módulo función de velocidad a la entrada del amplificador con ganancia - 40 caracteriza la rampa de velocidad teniendo en cuenta las exigencias de la turbina y de las velocidades críticas.
- 5.3.3. El "Stress Evaluator" limita en subida la toma de giros. Su acción puede ser excluida. En caso de falla el valor

TOMA DE GIROS DE LA TURBINA



de la señal de velocidad deseada se para en el valor asumido. Tal señal es leída en el indicador con escala 0 - 4200 RPM.

5.3.4. Dos medidores de velocidad a impulsos, vigilados desde un circuito que excluye uno en caso de falla generan la señal analógica de velocidad que se compara en la entrada del regulador PID con la señal de demanda de velocidad y genera el error de regulación.

5.3.5. La señal de demanda de giros va al bloque 11 regulación de válvulas de turbina. La señal 24 va al bloque carga de la turbina.

5.4. CARGA DE LA CALDERA (Ver diagrama 3)

5.4.1. La señal de demanda de carga 1, corregida por la regulación de frecuencia 20, entra en el amplificador con ganancia - 1, después del separador de señales, multiplicada por 0.8 entra en el nodo donde se suma a la señal regulada de presión multiplicada por 0.2; un regulador con acción derivativa transfiere el nodo toda la señal

de demanda de carga.

- 5.4.2. Por medio de un seguidor motorizado y un limitador de gradiente la señal se convierte en la señal de demanda de carga a la caldera y determina la cantidad de combustible, aire, agua, etc.. El seguidor motorizado viene by-paseado por el cierre del contacto bl, del relé B, -- cuando el Set Point de carga de la caldera está en automático. El limitador de gradiente viene by-paseado del contacto cl, del relevador C, (Bloqueo 4), cuando el -- Set Point de presión está en manual.
- 5.4.3. Mediante una ménsula en el panel es posible la conmutación auto/manual del Set de carga de la caldera pero, - sujeta a consenso y protecciones de disparo.
- 5.4.4. El Set de carga de la caldera en manual, puede ser variado mediante una ménsula en el panel que actúa sobre el seguidor motorizado.
- 5.4.5. Un automatismo de Run Back actúa sobre el mismo seguidor para reducir el Set Point de carga, en caso de paso a manual, con el interruptor AT abierto, al valor de --

40% de carga.

5.4.6. La conmutación de auto a manual del Set Point de carga de caldera se produce por las siguientes causas:

- 1.- Botón (pulsante) manual pulsado.
- 2.- Apertura del interruptor de AT
- 3.- Set Point de carga por debajo del 10% con Set de -- presión en auto.
- 4.- Set Point de carga por debajo de 33% con Set de pre_sión en manual.
- 5.- Regulador de carga turbina excluido.

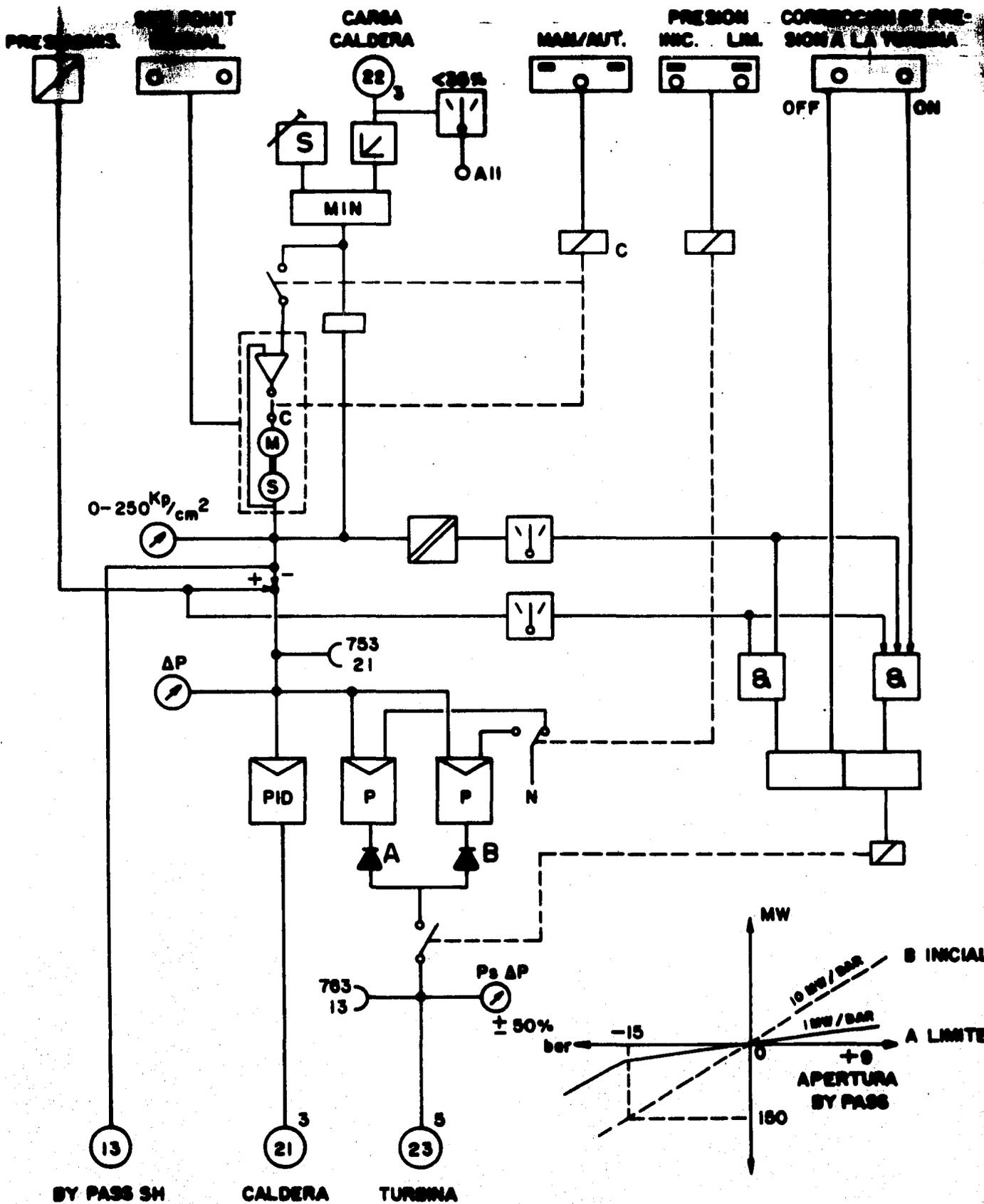
5.4.7. La conmutación de manual a auto viene por las siguien--tes causas.

Botón de auto oprimido con interruptor AT cerrado y des_viación (error) entre antes y después del seguidor, mfi-nimo (menor de 20 MW)

5.5. PRESION A LA ADMISION (Ver diagrama 4.)

- 5.5.1. La señal de demanda de carga de caldera (22), a través de un generador de función lineal con pendiente de 1MW/bar, entra a un selector de mínimo para confrontarse con el Set de presión a la admisión fijado en el gabinete a 165 bar. La señal a la salida del selector, - por medio de un seguidor motorizado entra en el nodo de comparación (confronta) con la presión efectiva y genera el error de regulación para los 3 reguladores.
- 5.5.2. La formación de la señal de presión a la admisión por vía automática puede ser excluida mediante una ménsula sobre el banco (panel).
- 5.5.3. El Set Point manual puede ser variado mediante una ménsula sobre el banco que actúa sobre el seguidor motorizado.
- 5.5.4. Con el regulador PID, se forma la señal de corrección de caldera 21. Con los dos reguladores P se forma la señal de corrección de presión para la demanda de carga a la turbina 23. La selección de uno ú otro regulador P se efectúa mediante una ménsula sobre el banco y determina la inserción del control de presión inicial o el de presión límite.

PRESION A LA ADMISION



5.5.5. La señal de corrección de presión a la demanda de carga de turbina se puede introducir mediante una ménsula sobre el banco si la presión deseada y la presión efectiva están dentro de los límites establecidos.

5.5.6. La exclusión puede ser manual mediante una ménsula ó -- automática por superar los límites preestablecidos.

5.5.7. La presión deseada y el error de presión se pueden leer sobre el banco. Está visible sobre el banco el indicador de balanceamiento para el seguidor motorizado.

5.6. CARGA DE LA TURBINA (ver diagrama 5)

5.6.1. La señal de demanda de carga limitada 1, corregida por la señal de presión 23, por medio de un amplificador in versor, entra en un selector de mínimo junto a la señal de carga efectiva, corregida de un límite de máxima car ga fijada en el gabinete.

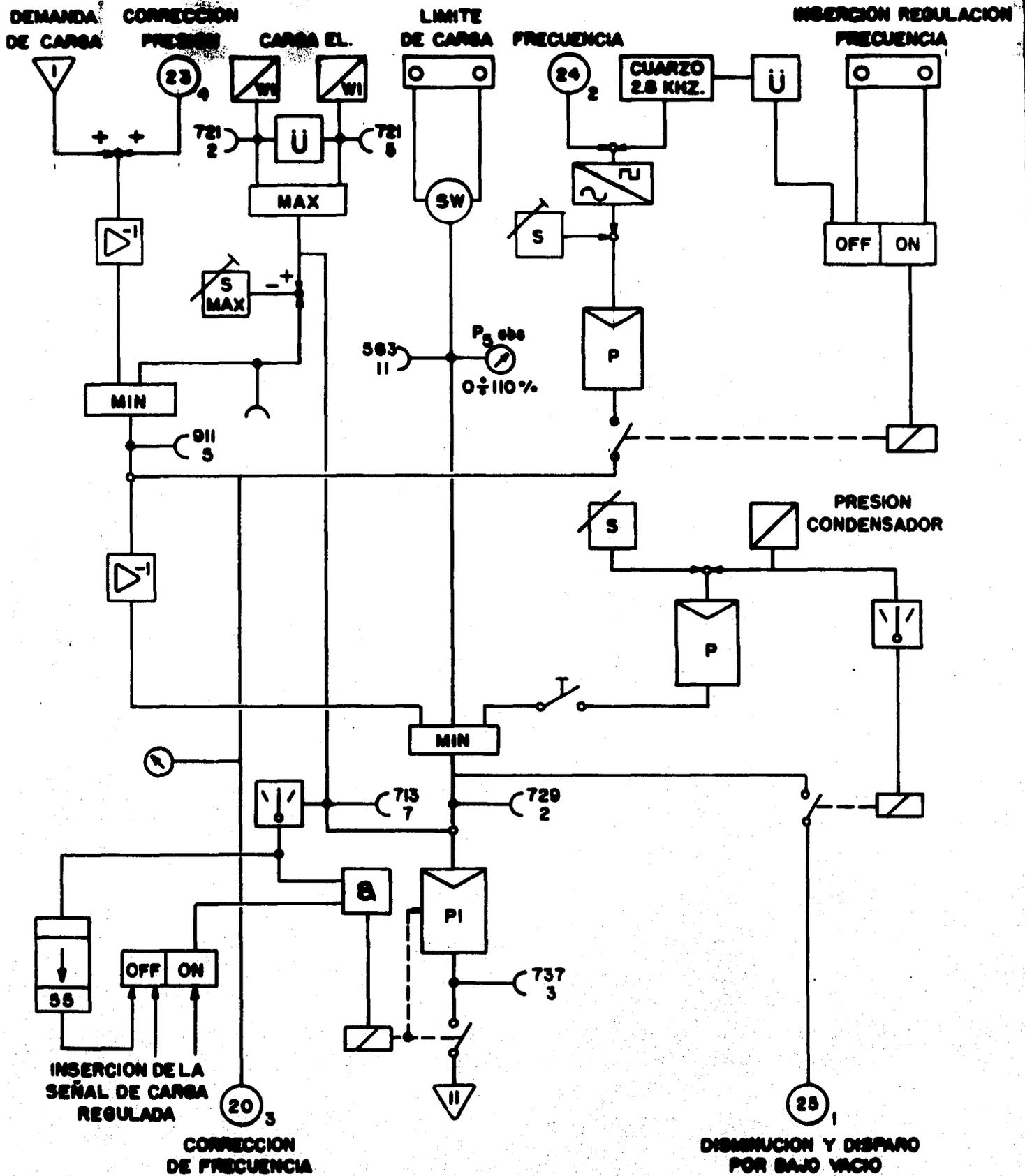
5.6.2. La salida del selector de mínimo, corregida de la señal

de frecuencia viene nuevamente invertida y se manda a un segundo selector de mínimo junto con la señal de carga límite y vacío del condensador.

5.6.3. La señal de frecuencia 24, se confronta con la frecuen--cia del oscilador de cuarzo y después con el Set de frecuencia fijado en el gabinete antes de entrar en el regulador P. La corrección de frecuencia se puede excluir por medio de una ménsula en el banco. El daño del oscilador provoca la exclusión. La señal de frecuencia va también al bloque 3 para la corrección de la carga demanda a la caldera.

5.6.4. La presión medida en el condensador se confronta con el Set de vacío fijado en el gabinete y entra en el regulador (P) cuya salida puede ser interrumpida (en el gabinete) antes de entrar en el selector de mínimo. Un formador de señal límite con la medida del vacío introduce un circuito de RUNBACK, 25 de la demanda de carga.

5.6.5. La señal a la salida del segundo selector de mínimo se compara con la carga medida y forma el error de regu--lación para el regulador PI de la carga de turbina. La señal de salida, va directa al bloque 11, puede ser in-



terrumpida mediante ménsula en el banco 6 automáticamente cuando la carga efectiva desciende por debajo de 60 MW.

5.6.6. Se puede introducir la señal manualmente con el consenso de la señal de carga efectiva que no debe ser distinta de la demandada.

5.7. REGULACION DE COMBUSTIBLE (Ver diagrama 6)

5.7.1. La señal de demanda de carga de caldera 3 entra en el selector de mínimo que verifica si el caudal de aire efectivo es suficiente. Si el caudal es inferior al valor necesario la señal de caudal de aire pasa y manda al combustible; si es superior pasa la señal demanda de carga que se compara con el caudal efectivo y determina el error de regulación.

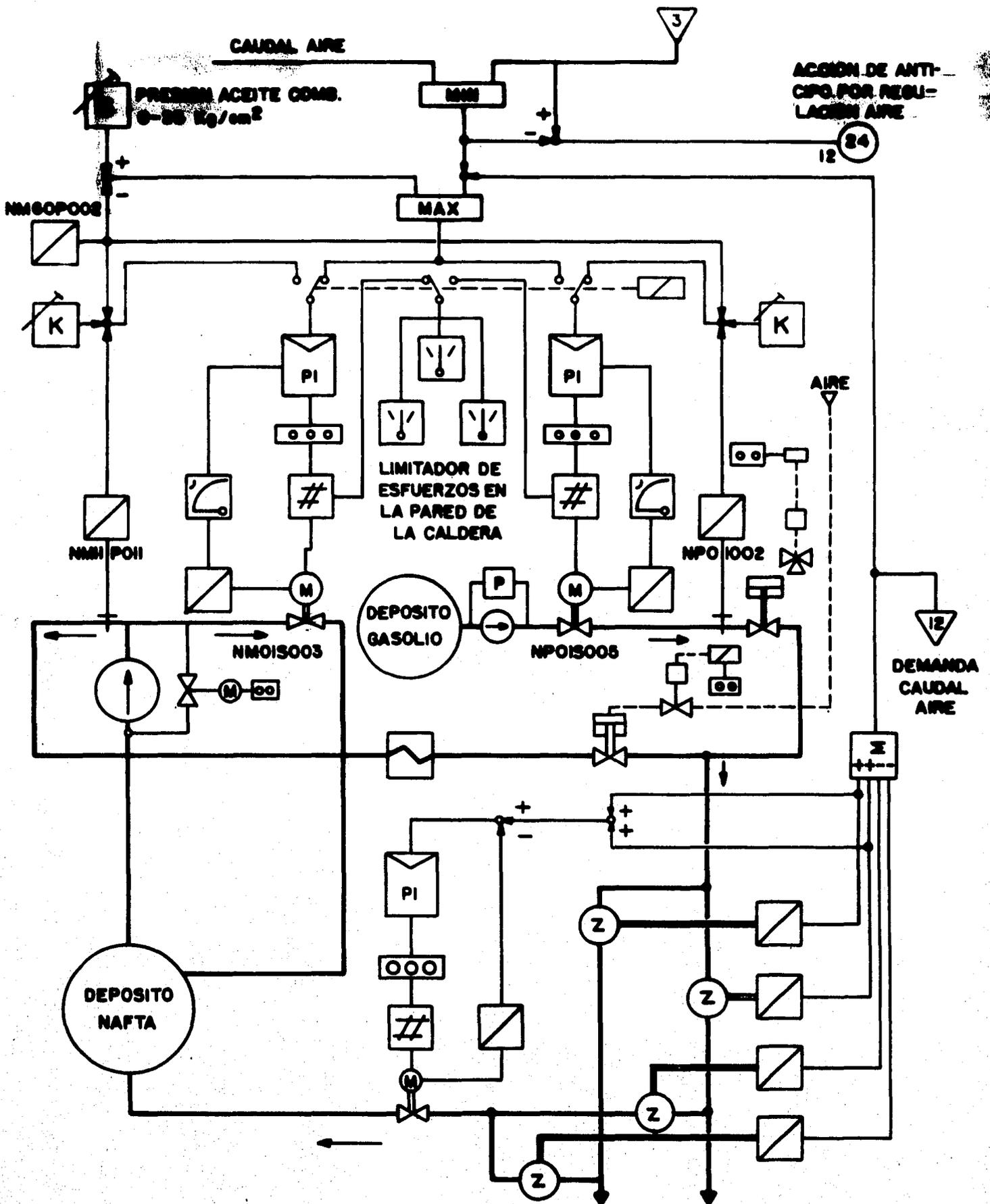
5.7.2. Un error se toma de la comparación entre el Set de Presión, fijado en el banco, y la presión del combustible en la pared posterior a los quemadores. El Set de pre-

sión va entendido como presión (impuesta) mínima. A través del selector de máximo pasa el mayor de los dos errores mencionados, el cual entra en los reguladores de caudal de Nafta y Gasolio.

- 5.7.3. Una acción de anticipo para la regulación del caudal de aire comburente 24, se extrae de la comparación de las señales antes y después del selector de mínimo.
- 5.7.4. Mientras se encuentra en servicio el regulador del caudal de Nafta, el regulador del caudal de Gasolio trabaja como regulador de presión Gasolio y viceversa. Esto es, mantiene los dos circuitos listos para el cambio de combustible.
- 5.7.5. El evaluador de esfuerzos de caldera intercepta las señales a la válvula de regulación del caudal de Nafta y Gasolio.
- 5.7.6. Un circuito de regulación del caudal de recirculación permite mantener constante el caudal de las bombas para diversos caudales a los quemadores. Un bloqueo impide a la válvula de cerrar completamente asegurando una re-

REGULACION COMBUSTIBLE

6



circulación mínima.

5.8. REGULACION DE O₂ EN LOS HUMOS (ver diagrama 7)

5.8.1. La señal de demanda de carga de caldera 3, a través de un generador de función se compara con el valor medido porcentual del oxígeno en los humos.

5.8.2. El error de regulación, por medio del regulador PI, produce la señal de corrección 12 para el caudal de aire.

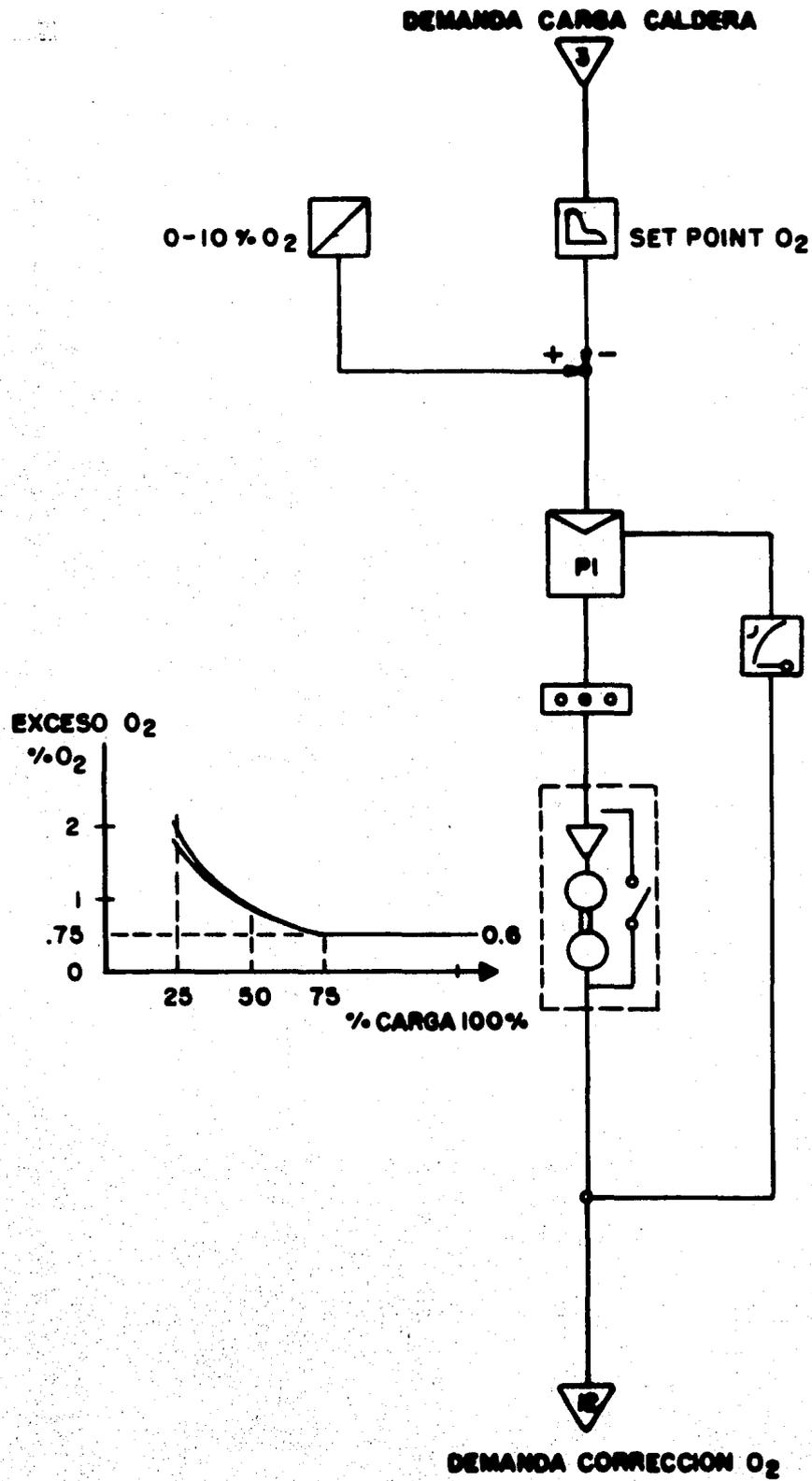
5.8.3. Una estación auto/manual colocada en el panel permite fijar a mano el valor de la señal de corrección estableciendo así el exceso de aire. El exceso porcentual de aire equivale a 5 veces el exceso porcentual de oxígeno.

5.9. REGULACION DE AGUA DE ALIMENTACION (ver diagrama 8)

5.9.1. El nivel del cuerpo cilíndrico se mide en los dos extremos, después de la compensación de presión, las dos se-

REGULACION O₂ EN EL HUMO

7



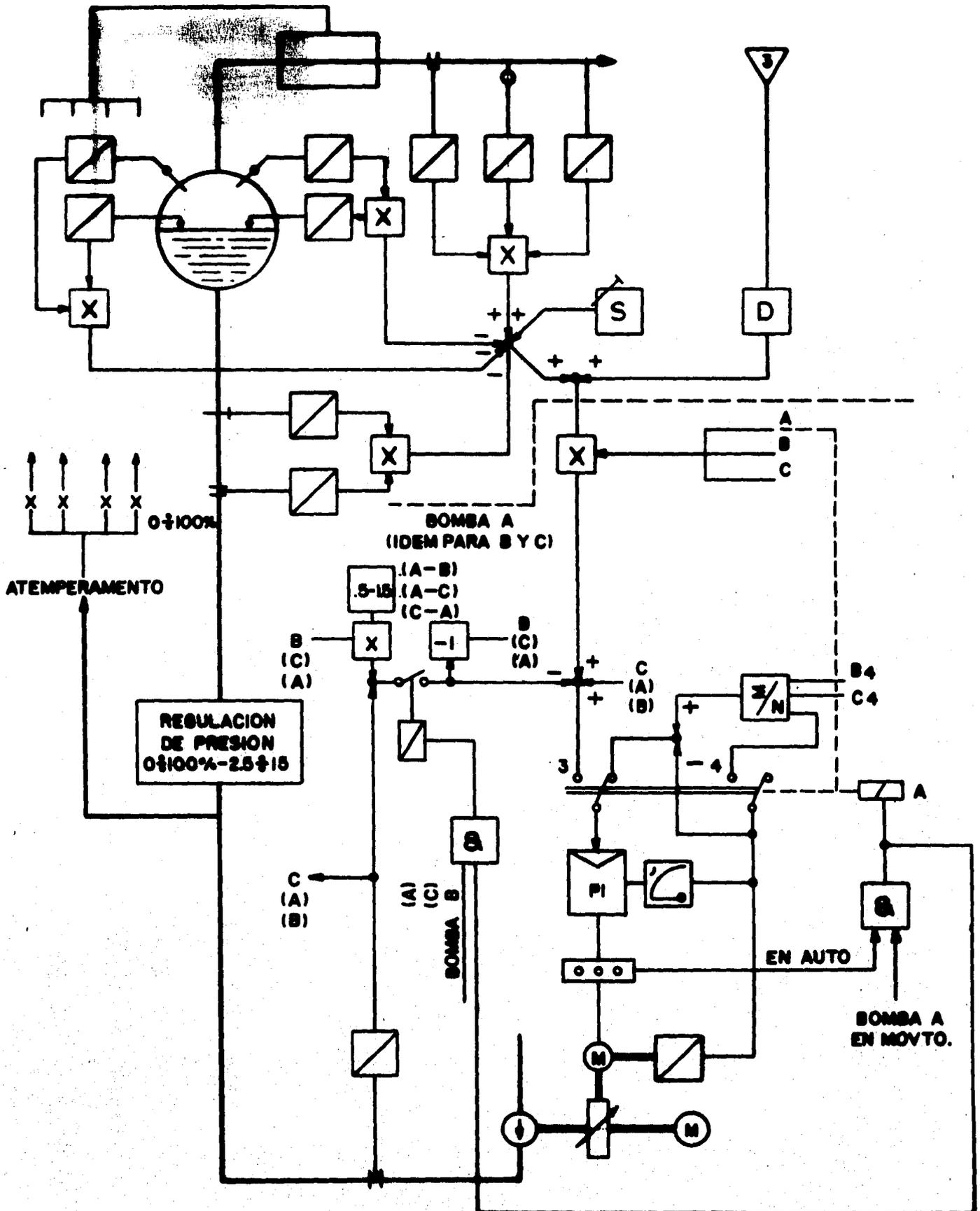
ñales entran en un nodo con el signo negativo. En el mismo nodo entra con el signo positivo el Set Point de nivel regulable al interior del gabinete. Además de esto en el mismo nodo entran con el signo opuesto los caudales de agua y vapor compensados de temperatura (agua) y temperatura y presión (vapor).

5.9.2. El error de regulación viene sumado a la señal, derivada, de la "carga demandada a la caldera" y multiplicado por un coeficiente que depende del N^o, de bombas en funcionamiento y en automático. Tal coeficiente es dos -- con una sola bomba en movimiento y en automático, y es uno en los otros casos.

5.9.3. La señal entra en un nodo repartidor de los caudales entre pares de bombas en movimiento y en automático dicha repartición se efectúa aumentando el caudal de una bomba y disminuyendo el de la otra.

Accionando sobre el Set puesto en la sala de maniobras se regula la relación en el campo 0.5 - 1.5 de los pares AB - BC - CA.

5.9.4. Con el regulador en automático y la bomba parada el error de regulación es sustituido por la señal de segui



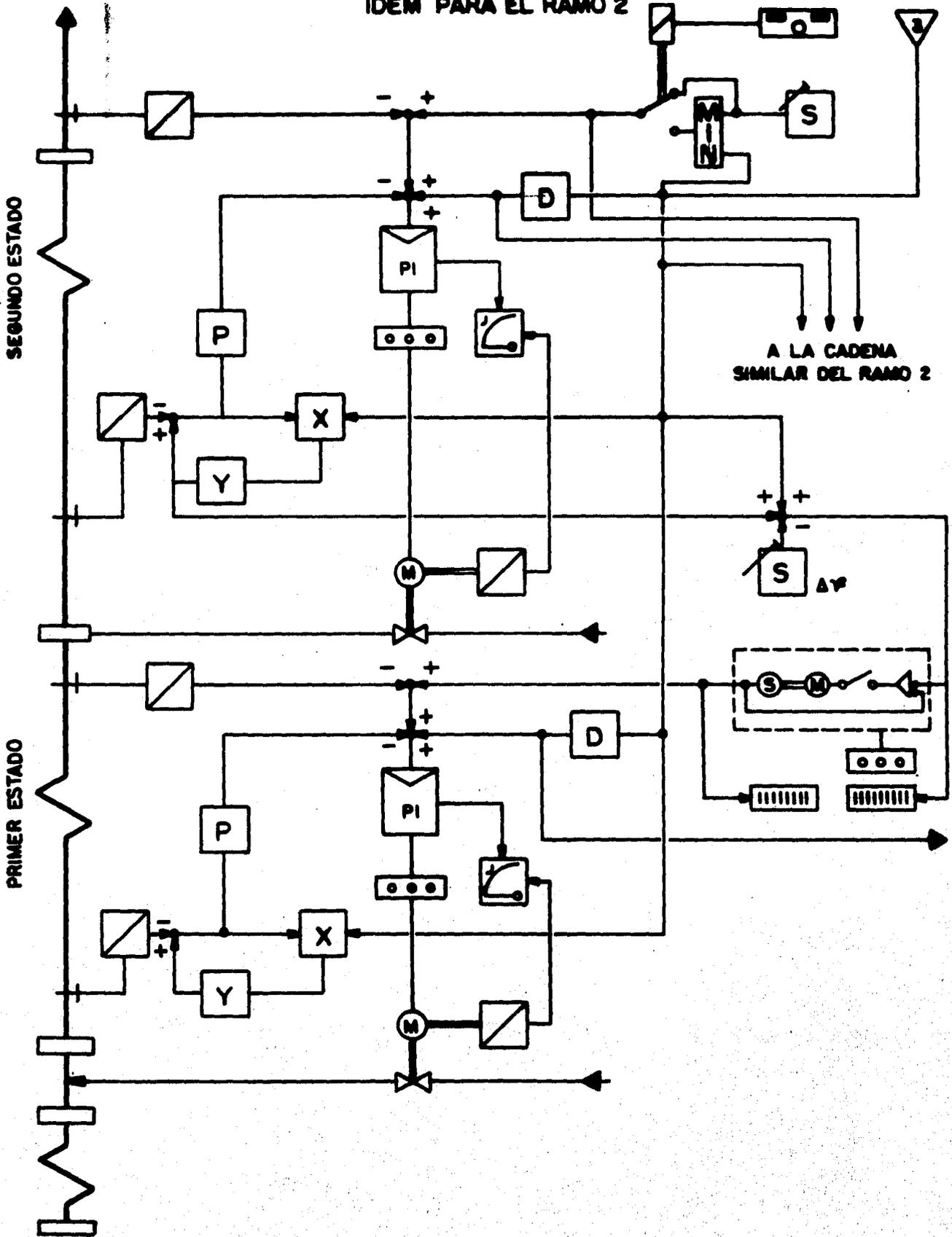
miento resultante de la media de las posiciones de los servomotores de las otras bombas en movimiento y en automático.

5.10. REGULACION DE TEMPERATURA DEL SOBRE CALENTADOR (S.H.)
RAMA No. 1 (Ver diagrama 9)

5.10.1. El Set Point de temperatura final SH, fijado en el banco entra en el selector de mínimo junto con la señal de demanda de carga de caldera 3. La salida del selector se compara con la medida de la temperatura y genera un error de regulación. Este error viene corregido por una acción derivativa de la carga demandada a la caldera y de una señal resultante de la comparación con la demanda de carga de caldera y la medida de la temperatura entre el atemperador secundario y el SH final. Es posible by-pasear mediante ménsula en el banco el selector de mínimo.

5.10.2. En forma idéntica funciona la regulación del primer estadio de atemperamento. La única diferencia es la

RAMO 1
IDEM PARA EL RAMO 2



formación de la señal del Set Point, dicha señal puede ser formada manualmente mediante una ménsula en el banco ó automáticamente de la comparación entre la señal demandada de carga caldera y la salida del integrador de una fracción de la misma señal corregida por un Set Point de $\Delta T.$, fijado en el gabinete.

5.10.3. La otra rama de caldera funciona igual como lo descrito para la rama No. 1.

5.11. REGULACION DE TEMPERATURA DEL RECALENTADOR (R.H.)
(Ver diagrama 10)

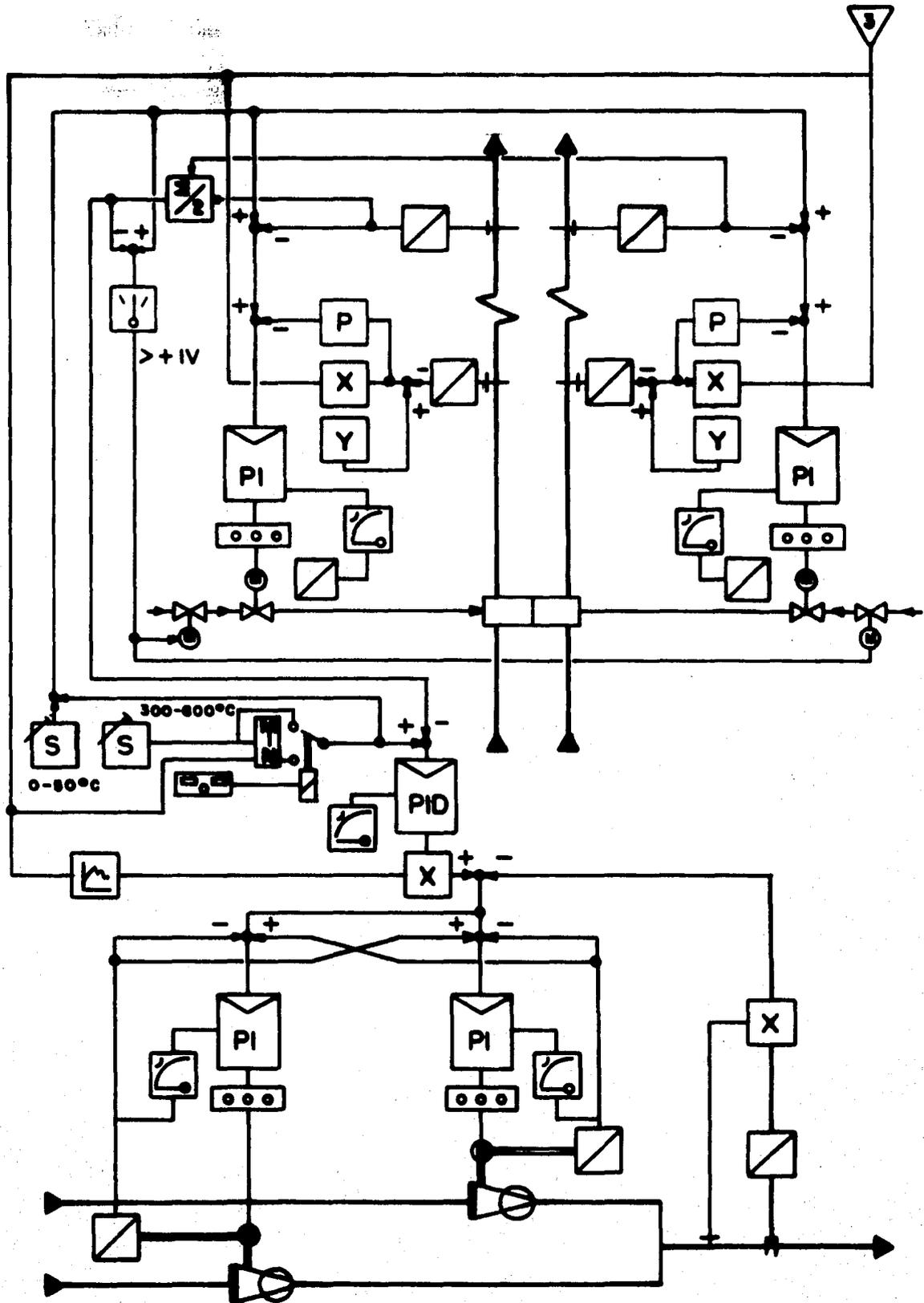
5.11.1. La regulación de temperatura del RH se efectúa principalmente por medio de la regulación de la recirculación de los gases. Como acción de apoyo está previsto un estadio de atemperamento para cada rama de vapor.

5.11.2. El Set Point de temperatura de salida del RH, fijado en el banco con rango de 300-600°C, entra en un selector

de mínimo junto con la señal demanda de carga de caldera 3. La salida del selector se compara con la media de las temperaturas de los vapores de salida del RH y genera el error de regulación para el regulador PID.

5.11.3. La salida de dicho regulador es comparada, después de haber sido corregida por un coeficiente función de la demanda de carga de caldera, con la medida del caudal total del gas que entra a la caldera con corrección de temperatura. La señal generada, corregida de la posición de las compuertas opuestas de regulación --- constituye el error de regulación para los dos reguladores PI. Es posible by-pasear, mediante en el banco, el selector de mínimo.

5.11.4. La señal a la salida del selector de mínimo, sumada a un Set de ΔT entre 0 y 50°C fijado en el gabinete, se compara con las respectivas medidas de temperatura de salida del RH y, corregida por una señal resultante de la comparación entre la demanda de carga de caldera y la medida de la temperatura antes del RH, constituye el error de regulación para los dos regulado--



res de las válvulas de atemperamento.

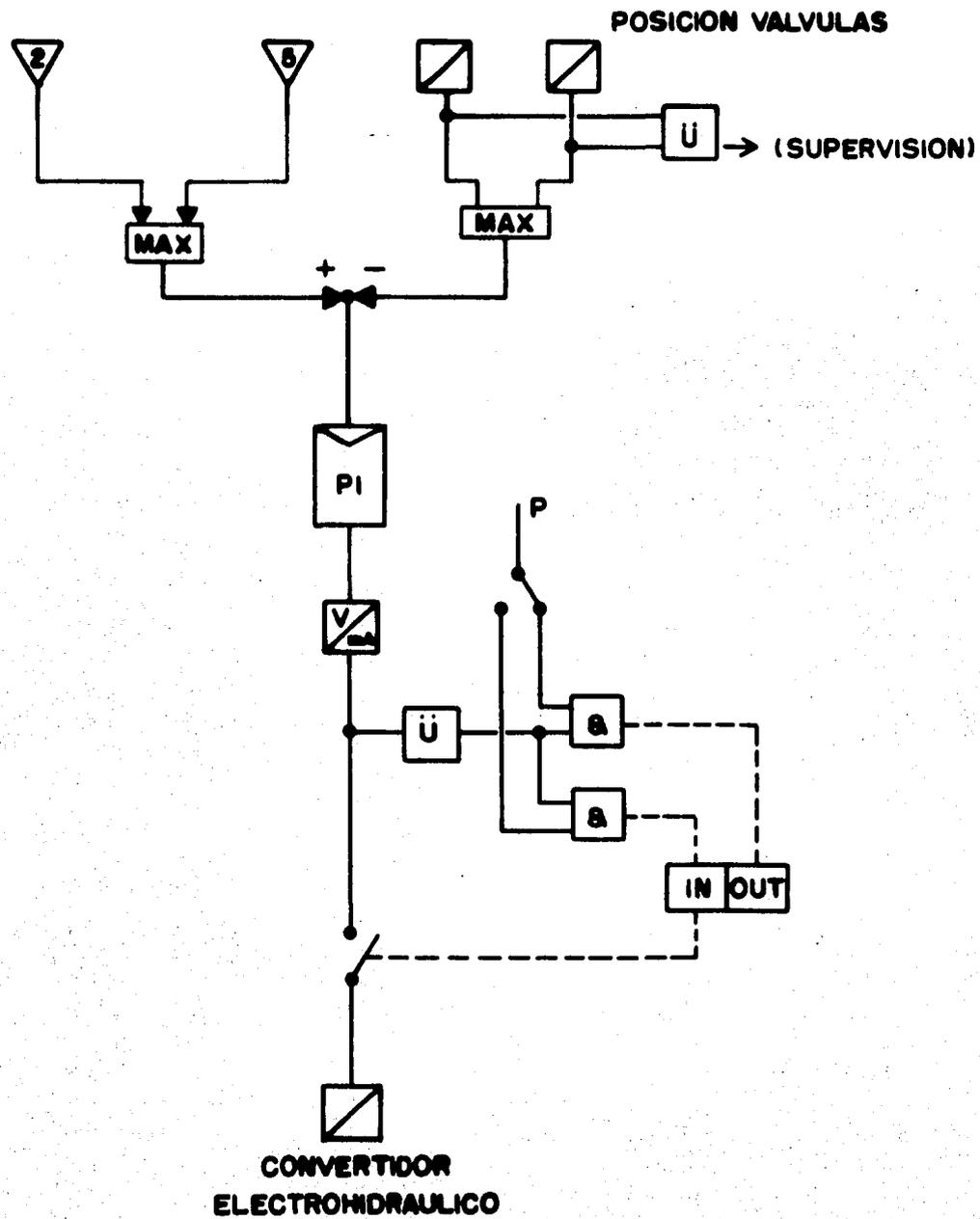
5.11.5. Las válvulas de bloqueo del agua de atemperamento -- son mantenidas cerradas por un circuito que las abre solo si el error de regulación entre la media de las dos temperaturas de salida RH y el Set de temperatura supera el valor mínimo establecido en el gabinete.

5.11.6. Esto reduce al mínimo el efecto de laminación del -- asiento de las válvulas.

5.12. REGULACION DE LAS VALVULAS DE TURBINA (Ver diagrama 11)

5.12.1. La señal de velocidad 2 y la señal de carga 5, demandada a la turbina se comparan en un selector de máximo. La salida se compara con la medida de posición - de las válvulas de regulación de turbina y genera el error de regulación para el regulador PI.

5.12.2. A través de un transductor de tensión corriente la -



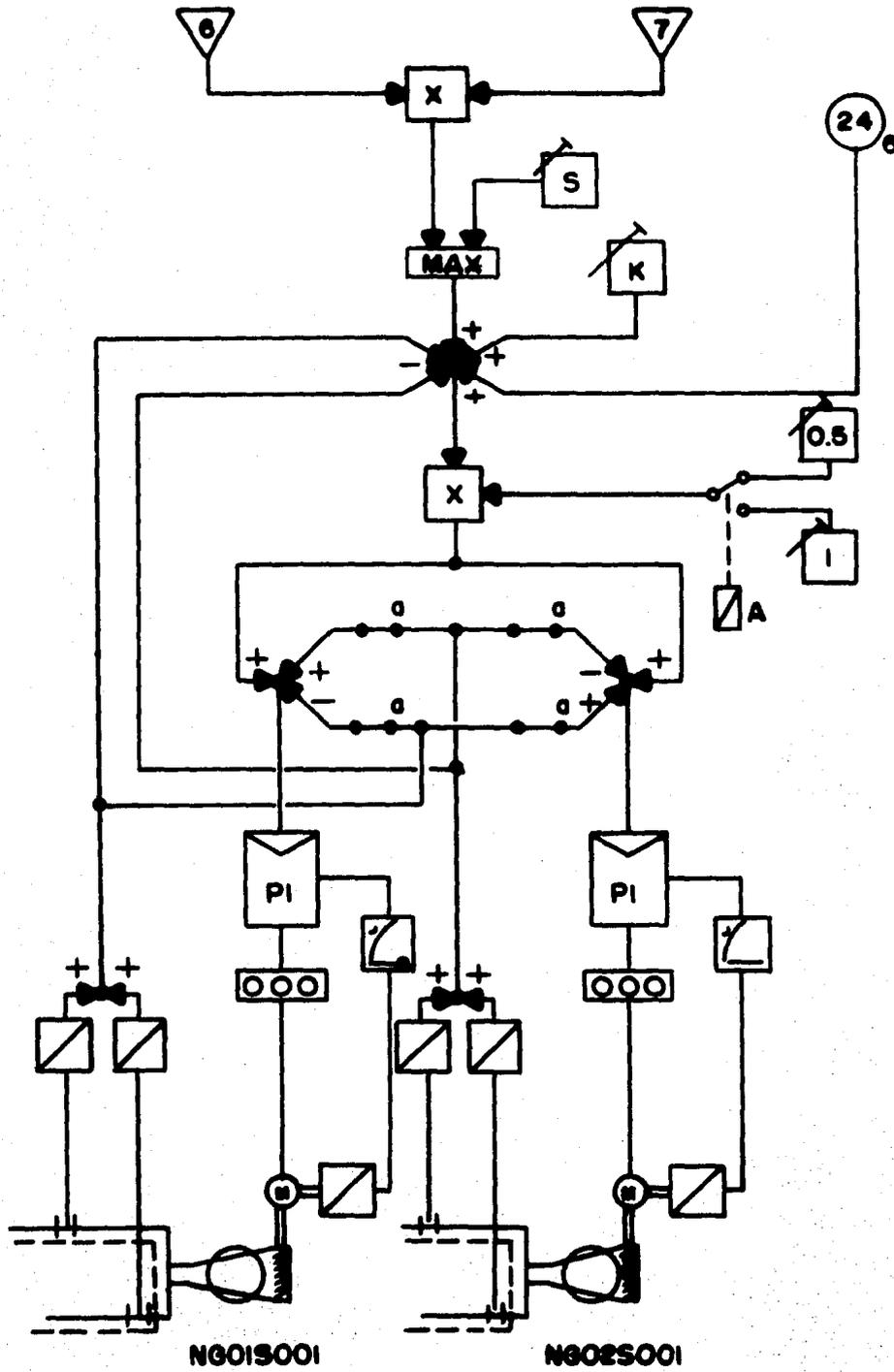
señal va a la bobina del convertidor electrohidráulico.

5.12.3. Un circuito de supervisión vigila la señal al convertidor electrohidráulico y lo excluye en caso de falla. También los transmisores de posición de las válvulas, dos por válvula, están provistos de circuitos de supervisión el cual toma la señal más favorable y dá alarma de falla.

5.13. REGULACION DE CAUDAL DE AIRE (Ver diagrama 12)

5.13.1. La señal de demanda de caudal de aire 6, corregida -- por la señal de regulación del oxígeno en los humos 7, entra en el selector de máximo junto con el Set de caudal mínimo fijado en el gabinete al 30%

5.13.2. La salida del selector entra en un nodo donde confluyen las medidas del caudal total de aire medido en -- los cuatro conductos y previamente sumados por pares, la señal de anticipo de caudal de aire 24 y una constante K, fijada en el gabinete, para tener razón de -



las diversas resistencias de los conductos.

5.13.3. La señal saliente del nodo, multiplicada por 1 ó por 0.5, dependiendo si se encuentra en servicio 1 ó 2, ventiladores respectivamente, entra en los dos nodos de igualación o de ecualización de los caudales para generar el error de regulación para los reguladores de las compuertas de caudal de aire, a la entrada de los 2 ventiladores.

5.13.4. El circuito de igualación o de ecualización de los caudales, excluido cuando un solo ventilador está en servicio, actúa de manera que el aumento del caudal de un ventilador se traduce en una corrección en aumento para el otro ventilador y contemporaneamente -- disminución para el primero.

5.14. REGULACION DEL BY-PASS SH (Ver diagrama 13)

5.14.1. El Set Point de presión 4, sumado a una señal ΔP fijada en el gabinete de 9 bar, entra en el selector de

mínimo junto al set de presión máxima, también fijada en el gabinete a 171 bar. La suma de los 9 bar es excluida por el contacto del relé B cuando el Set Point de carga de caldera está en manual.

5.14.2 La salida del selector de mínimo se compara con el valor medido de la presión de salida del SH y la señal resultante, corregido por el circuito de igualación o de ecualización de las dos ramas, entra en el regulador de la válvula de by-pass.

5.14.3. La válvula está provista de un segundo motor que la acciona con alta velocidad (100% del de curso en 10 seg.).

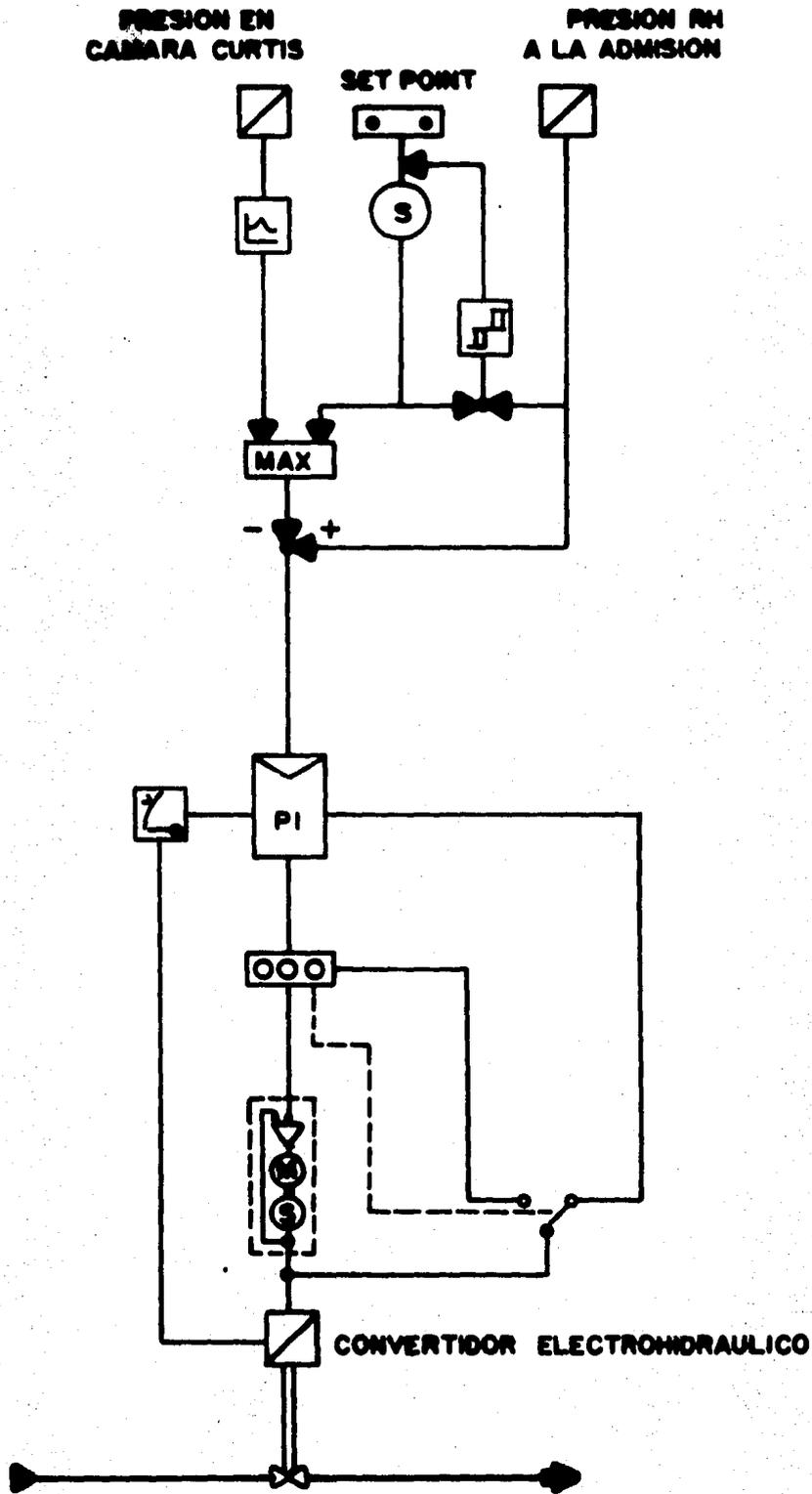
Según la siguiente lógica:

- 1.- Aumento repentino de presión SH
- 2.- Disparo turbina
- 3.- Intervención del revelador de pérdida de carga
RW 80.
- 4.- Pulsante de apertura rápida sobre el banco.

- 5.14.4. Otro circuito abre la válvula a velocidad normal en el caso que con una carga menor del 10%, la temperatura de los gases a la salida de la caldera supere los 500 °C.
- 5.14.5. El vapor descargado al RH por la válvula de by-pass viene enfriando, inyectando agua, del colector de agua de alimentación, directamente conectado al economizador de la caldera, por medio de una válvula reguladora de temperatura del vapor de entrada al RH.
- 5.14.6. El Set Point de temperatura, fijado en el gabinete, se compara con la medida de la temperatura para formar el error de regulación. En el mismo nodo entra una señal de anticipo, tomada, con acción derivativa, de la señal de salida del regulador de la válvula de by-pass.
- 5.14.7. La válvula de atemperamento viene cerrada cuando la válvula de by-pass está cerrada utilizando un fin de curso en cierre de la misma.
- 5.14.8. La otra rama funciona de manera idéntica.

5.15. REGULACION DEL BY-PASS R.H. (Ver diagrama 14)

- 5.15.1. La señal de medida de la presión en la cámara redonda o curvada caracterizada en función de la caída de presión en la turbina AP y de la resistencia de la línea RH, entra en el selector de máximo junto con el Set - de presión manual fijado en el banco.
- 5.15.2. La señal que sale del selector se compara con la medida de la presión a la admisión del RH y forma el error de regulación.
- 5.15.3. Un circuito limita las variaciones del Set Point manual dentro de un intervalo mínimo del error entre el Set Point y la medida actual.
- 5.15.4. La salida del regulador, a través de la estación auto/manual va al convertidor electrohidráulico el cual comanda la válvula by-pass RH.
- 5.15.5. Un circuito de seguimiento asegura el pasaje de manual a automático y viceversa.



5.16. MODOS DE REGULACION DE LA UNIDAD (Normas de Ejercicio)

La regulación de la unidad se efectúa por medio de 3 - circuitos de regulación principales.

- a) Regulación de by-pass.
- b) Regulación de caldera.
- c) Regulación electrohidráulica de turbina.

Son posibles 5 diferentes modos de regulación de la Undad.

- 1) Arranque de la Caldera
- 2) Arranque de la Turbina
- 3) Turbina gufa a presión reducida.
- 4) Turbina gufa a presión nominal.
- 5) Caldera gufa.

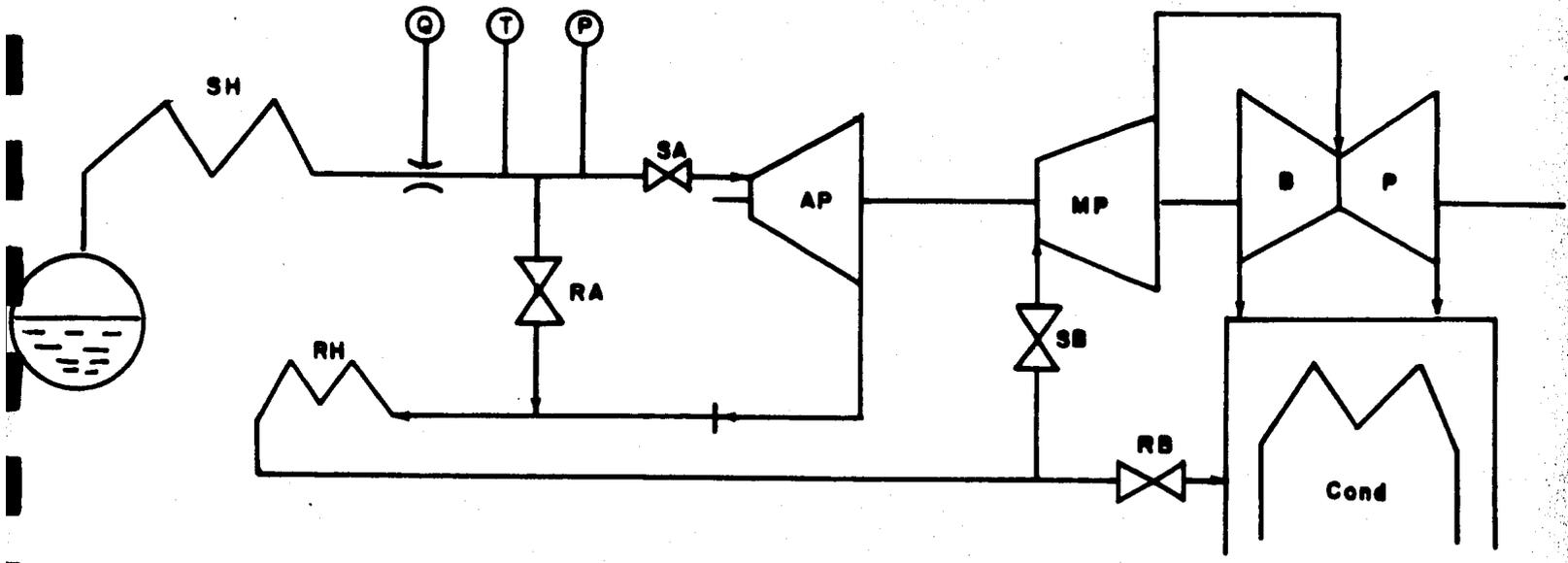
TABLA (RESUMEN)

	Regulación By-Pass a)	Regulación de caldera b)	Regulación E/H de turbina c)
Arranque caldera 1)	Regula la presión de salida del SH y RH	En manual	Excluida
Arranque turbina 2)	Regula la presión	En manual	Regula el número de giros regula la carga mínima (hasta 60 mw)
Turbina guía a presión reducida 3)	En automático válvulas cerradas protecciones operando	Limita el gradiente de carga térmica	Regula la presión a la admisión
Turbina guía a presión nominal 4)	En automático válvulas cerradas protecciones operando	Regula la presión a la admisión	Regula la carga
Caldera guía 5)	En manual SH válvulas cerradas protecciones operando	En manual	Regula la presión a la admisión

5.16.1. ARRANQUE DE LA CALDERA (1)

El arranque de la caldera consiste en la producción de vapor, con las características físico - químicas requeridas --- (presión, temperatura, conductibilidad), para poder arrancar la turbina, previo calentamiento adecuado de las tuberías. Es decir, se produce mediante el aumento progresivo y controlado de la carga térmica.

5.16.2 ESQUEMA DEL CIRCUITO DE VAPOR



5.16.3. REGULACION "BY-PASS" (1, a)

El vapor producido por la caldera se descarga, por medio de las válvulas de by-pass, al condensador.

La cantidad de vapor descargado está dada por el desequilibrio entre la presión a la admisión medida y el Set prefijado.

Las válvulas del by-pass AP, regulan la presión en el SH mientras las válvulas del by-pass MP - BP regulan la presión en el RH.

En caso de falla de la regulación, los dos circuitos de la caldera son protegidos contra las sobrepresiones, por las válvulas de seguridad.

El vapor dirigido al condensador viene enfriado. La falta de enfriamiento bloquea la apertura de las válvulas.

5.16.4. REGULACION DE LA CALDERA (1, b)

En caldera Gufa. Set Point de presión en manual.

La regulación de la carga térmica está en manual. Progresivamente podrán ser puestas en automático las diversas cadenas de regulación que superan el punto de inestabilidad: -- combustible, aire, agua, etc.

En estas condiciones la limitación de gradiente de la carga térmica está excluida. Sin embargo está incluido, en funcionamiento, el evaluador de esfuerzos (Stress Evaluator) de la caldera.

Las regulaciones de nivel del cuerpo cilíndrico y del caudal de aire comburente en los 4 conductos solicitan una atención particular de parte del operador para evitar el bloqueo cuando se opera en manual.

El caudal de aire en los 4 conductos debe ser igualado cuando se cambia la disposición de los quemadores en cuanto el bloqueo interviene por bajo caudal de aire (25%) sobre los conductos individuales.

5.16.5. REGULACION ELECTROHIDRAULICA DE TURBINA (1, c)

La regulación de turbina está excluida.

Es posible seguir las maniobras preliminares al arranque de turbina: calentamiento de tuberías y válvulas, disposición de los dispositivos electrohidráulicos y del PAC de TURBINA.

Es posible incluir la limitación de gradiente de carga térmica (0.8 MW/1' en disminución y 1.5 MW/1' en aumento) pasando el Set Point de presión en automático poniendo previamente el error en cero.

5.16.6. ARRANQUE DE LA TURBINA (2)

Consiste en la fase que va desde la primera entrada de vapor hasta la carga eléctrica de cerca de 60 MW. El vapor producido por la caldera se distribuye entre el condensador y la turbina.

5.16.7. REGULACION BY-PASS (2, a)

Continúa regulando la presión a la admisión, descargando al condensador el vapor en exceso.

5.16.8. REGULACION DE LA CALDERA (2, b)

Idem., como la 5.16.4.

5.16.9. REGULACION ELECTROHIDRAULICA DE TURBINA (2, c)

El regulador de velocidad pone a la máquina a la velo cidad de sincronismo siguiendo una relación que representa la característica principal de funcionamiento de la máquina.

Efectuado el paralelo con la red, el Set de velocidad se coloca automáticamente (cerrado el interruptor de máquina) a 3640 giros, correspondientes a una toma de carga de cerca de 60 MW.

En este momento se procede a fijarse la carga deseada y el relativo gradiente. Con el prefijador de velocidad es po sible variar la carga, en el caso de que el regulador de carga se encuentre fuera de servicio.

El regulador de velocidad es limitado por el evalua-- dor de esfuerzos en las paredes de la turbina (Wall Stress Evalu ator), así como el regulador de carga.

Circuitos de vigilancia están previstos para el eva-- luador de esfuerzos, para el doble medidor de velocidad, para

el doble medidor de posición de las válvulas y para el conver
tidor electrohidráulico.

5.16.10. TURBINA GUIA A PRESION REDUCIDA (3)

La caldera, a la presión nominal de 174 bar, no puede funcionar con una carga térmica inferior al 33%.

La carga que no puede tomar la turbina se envía al -- condensador a través de los by-pass.

Todavía es posible generar vapor a presión reducida, como mínimo a 75 bar (límite de la bomba de alimentación).

A partir de esta presión se puede generar carga eléc
trica, dentro del rango del 10% al 33% de carga térmica, manteniendo las válvulas de by-pass cerradas y por lo tanto sin desviar el vapor al condensador.

A los diversos valores de presión del vapor del SH y RH deben corresponder los relativos valores de temperatura.

5.16.11. REGULACION BY-PASS (3, a)

En automático.

Las válvulas están cerradas. Entran en regulación - cuando la presión a la admisión supera en 9 bar el Set ó supere 171 bar.

Protecciones incluidas.

5.16.12. REGULACION DE LA CALDERA (3, b)

En turbina guía. Set de presión en automático.

La regulación de la caldera limita el gradiente de carga térmica dentro de los valores de 0.8 MW/1' en disminu--
ción y 1.5. MW/1' en aumento.

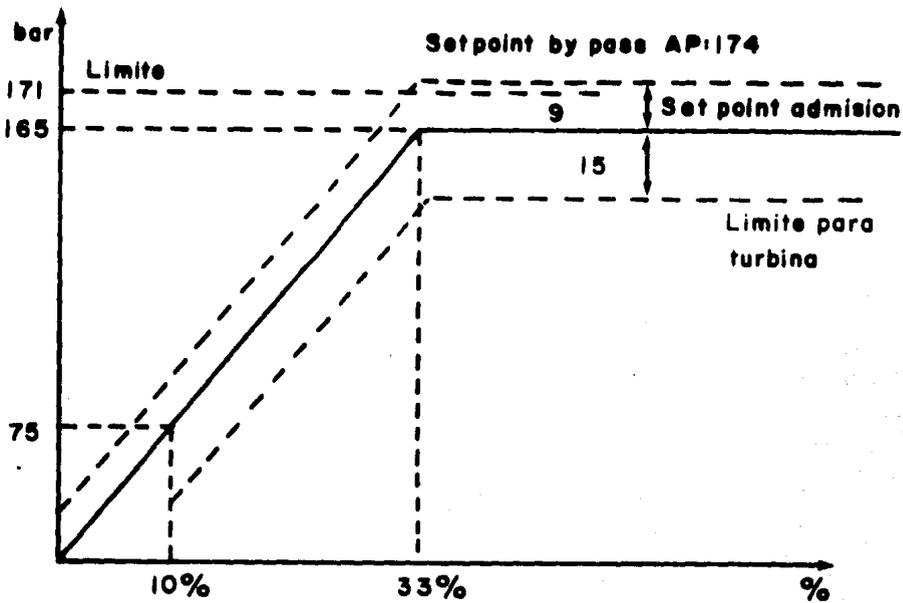
5.16.13. REGULACION ELECTROHIDRAULICA DE TURBINA (3, c)

Regulador E/H incluido. Control de presión inicial incluido.

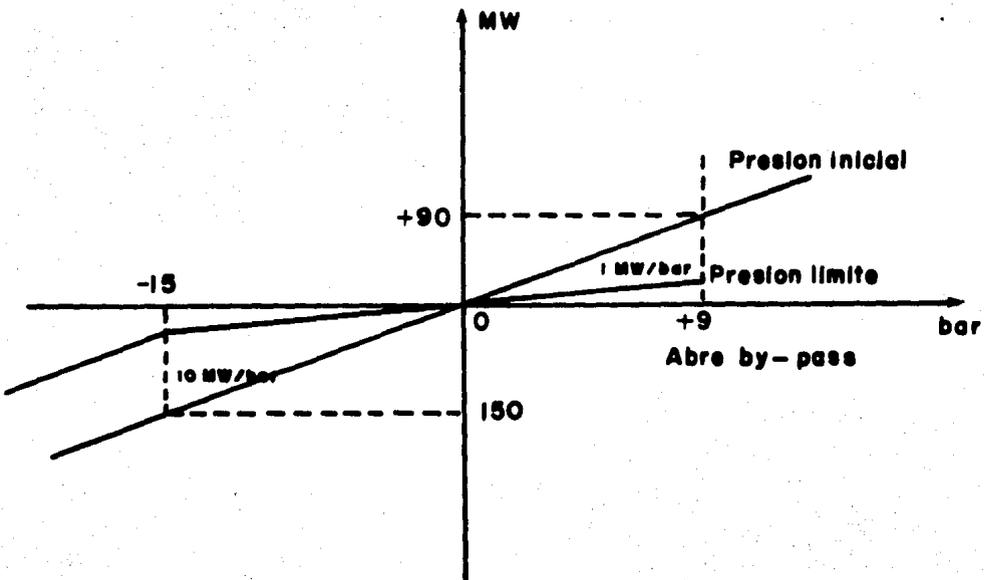
Las válvulas de turbina abren y cierran, variando la carga eléctrica, para equilibrar continuamente las variaciones de presión a la admisión según la relación de 10 MW/bar.

La turbina guía a la caldera dentro de los límites de gradiente tolerados por la caldera.

5.16.14. CURVA DE PRESION Y LIMITES: SUPERIOR E INFERIOR



5.16.15. CURVAS DE PRESION LIMITE Y PRESION INICIAL



5.16.16. TURBINA GUIA A PRESION NOMINAL (4)

En el campo comprendido entre el 33% y el 100% de carga térmica la carga de la caldera corresponde, en equilibrio - de presión, a la carga eléctrica en cuanto todo el vapor generado pasa a la turbina.

Dentro de este campo la regulación de carga de la caldera puede estar en automático y la señal de demanda de carga a la caldera es la misma que demanda carga a la turbina.

El Set de carga de caldera pasa a manual por debajo - del 33% de carga térmica.

5.16.17. REGULACION "BY-PASS" (4, a)

En automático.

Las válvulas están cerradas. Entran en regulación - cuando la presión a la admisión alcance 171 bar.

5.16.18. REGULACION CALDERA (4, b)

En turbina guía. Set de presión en manual. La caldera regula la presión a la admisión.

La señal demanda de carga a la turbina es la misma - que demanda carga a la caldera. El regulador de presión corrige tal demanda para poder mantener constante la presión.

5.16.19. REGULACION ELECTROHIDRAULICA DE TURBINA (4, c)

El regulador E/H se encuentra incluido. El gradiente de carga incluido. Control de Presión límite incluido.

La posición de las válvulas de turbina depende de la carga impuesta en el prefijador de carga, limitado del gradiente, del "Stress Evaluator" y del vacío del condensador. La carga eléctrica viene corregida para compensar las variaciones de frecuencia en la red (banda de participación 4%).

El regulador de presión límite interviene reduciendo la carga cuando la presión a la admisión desciende en 15 bar - por debajo del valor del Set. (1 MW/bar).

Se dispone en el panel (banco) de un prefijador de límite de carga máxima.

5.16.20. CALDERA GUIA; (5)

Cuando el Set Point de carga demandada a la caldera está en manual la caldera produce todo lo que le demande el operador. La carga eléctrica debe adecuarse a la carga de la caldera si se quiere mantener constante la presión a la admisión.

El desequilibrio de presión se traduce en una variación de carga en la turbina de manera que se restablezca el equilibrio de presión. El operador puede entonces variar la carga eléctrica variando manualmente la carga de la caldera.

5.16.21. REGULACION "BY-PASS" (5, a)

En manual con válvulas cerradas para el SH. BY-PASS RH automático.

Están incluidas las protecciones de apertura rápida.

5.16.22. REGULACION CALDERA: (5, b)

Con caldera guía. Set de presión en manual. Pueden estar en automático los circuitos individuales de regulación - del combustible, aire, agua, etc.

5.16.23. REGULACION ELECTROHIDRAULICA DE TURBINA (5, c)

Regulador E/H incluido. Control de Presión inicial incluido.

Las válvulas de turbina abren y cierran, variando la carga eléctrica, para equilibrar las variaciones de presión a la admisión según la relación 10 MW/bar.

Es posible hacer participar la regulación del by-pass al mantenimiento de la presión a la admisión poniendo en automático el by-pass S.H.

6

C A P I T U L O 6.

6. DISCUSION Y CONCLUSIONES

A manera de sintesis conclusiva tenemos que los objetivos de la regulaci3n de la turbina son:

- 1.- En arranque con el grupo a3n fuera del paralelo, regula la velocidad de la turbina seg3n un programa impuesto por el operador.
- 2.- Limitaci3n de la sobrevelocidad en caso de caida de carga y salida del paralelo.
- 3.- Regulaci3n de frecuencia sobre redes aisladas.
- 4.- Regulaci3n primaria de frecuencia y regulaci3n de potencia sobre una red grande.

Hemos visto que para fijar las funciones regulantes de un sistema gen3rico de regulaci3n es necesario conocer algunos par3metros fundamentales.

- 1.- Energ3a regulante (es la energ3a necesaria para hacer variar en una unidad preestablecida la variable regulada)
- 2.- Tiempos muertos
- 3.- Tiempos de accionamiento de los sistemas de comando.

- 4.- Constante de tiempo (tiempo empleado para alcanzar el equilibrio)

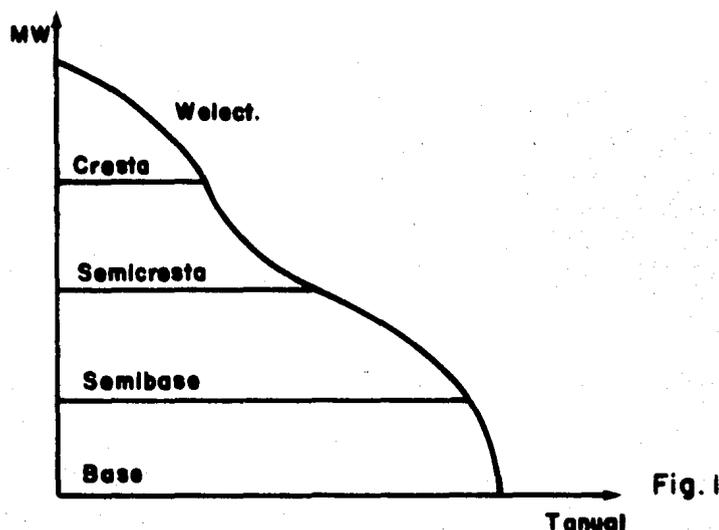
En base a estos parámetros y a las características del proceso regulado, se hace la selección del regulador que, como recordaremos puede ser P, PI, PID.

La mayor parte de los sistemas de regulación de una central térmica se derivan de la unión de cuatro sistemas combinados y coordinados entre sí:

- 1.- Sistema de regulación en cadena cerrada.
- 2.- Sistema de regulación en cadena abierta.
- 3.- Sistema de protección
- 4.- Sistema de bloqueo.

Por último, podemos decir que para optimizar un sistema de regulación es necesaria la búsqueda de la calibración de los valores a dar a las señales ajustables sobre el regulador, de modo tal, que sea garantizada a la variable a regular la máxima estabilidad y que el error entre el valor real y el valor prefijado tenga la mínima amplitud y la mínima duración en el tiempo.

En general, las centrales eléctricas se dividen, según el grado de carga y la utilización de la potencia eléctrica, en: centrales eléctricas de carga base, con el empleo anual de la potencia máxima instalada, de semibase, de semipico y de pico. (ver figura 1)



Las centrales eléctricas con equipos energéticos más perfeccionados y con mejores índices energéticos se cargan en mayor medida. De ahí que los grupos más potentes y de mayor fiabilidad, (es decir, cuya producción ininterrumpida de energía eléctrica esté en concordancia con la demanda por parte de los consumidores y el diagrama de carga), sean más adecuados para cubrir la carga base y semibase; en general estas cargas son satisfechas con las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas de gran potencia. Para satisfacer las cargas de rápida variación, de cresta (pico), los bloques energéticos deben

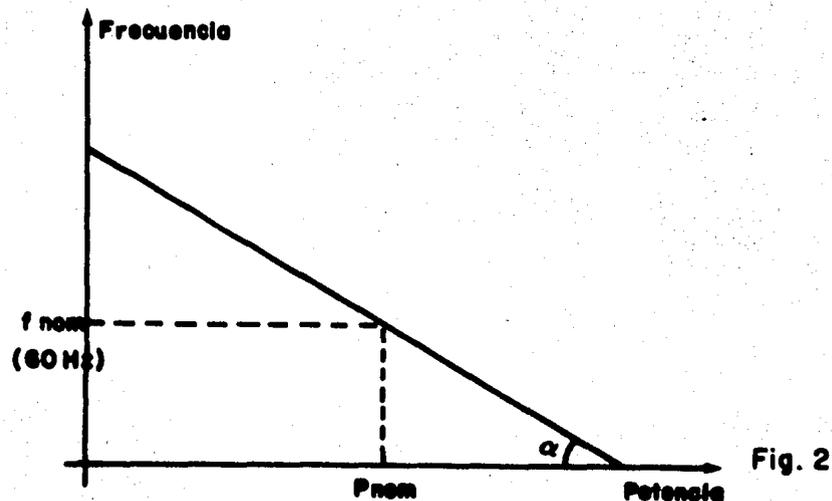
poseer alta maniobrabilidad, o sea, la capacidad de alcanzar y quitar la carga, la rápida puesta en marcha a partir del -- estado no operacional y su rápida parada, sin perjuicio para su fiabilidad; por lo que, para este tipo de carga, son usadas comúnmente las turbinas de gas, las cuales deben formar parte de centrales eléctricas con bloques energéticos de base y semi base. Para los grupos de semibase y semicresta (semipico), se usan generalmente las plantas termoeléctricas que, por su gran maniobrabilidad, sobre todo cuando poseen regulación electrónica, se usan junto con las turbinas de gas, para satisfacer las rápidas variaciones de carga.

PARTICIPACION DE LOS GRUPOS TERMICOS EN LA REGULACION DE FRECUENCIA DE LA RED (Regulación primaria)

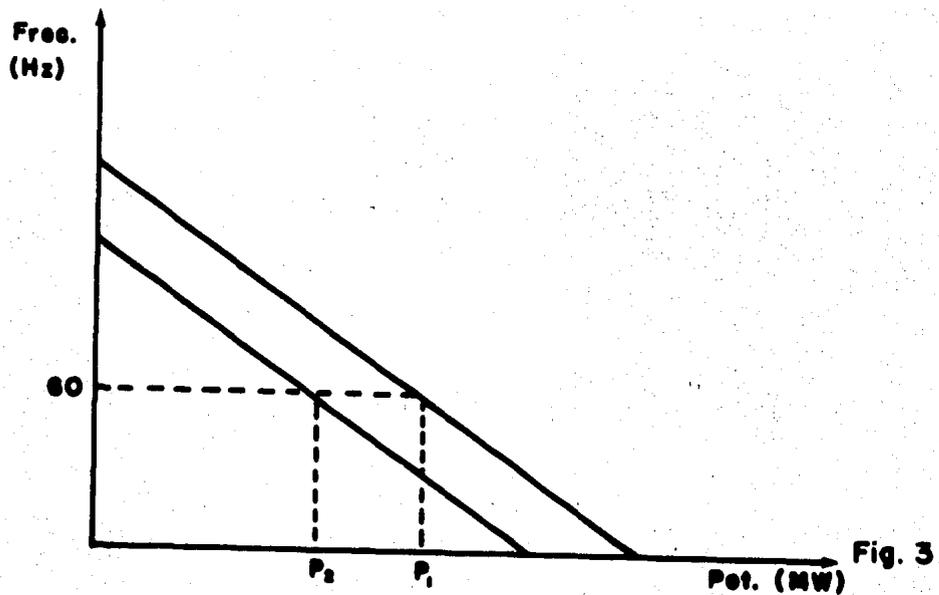
Existe una relación proporcional entre la frecuencia y la potencia activa producida en el sentido de que si la primera aumenta la otra disminuye o viceversa.

En la práctica, esta relación tiene una característica lineal (Ver figura 2) que corresponde al hecho de que el regulador -

es de tipo proporcional. La banda proporcional del regulador de velocidad viene dada por la pendiente de la característica y se le llama "estatismo", al cual podemos definir como la relación $\frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\text{nom.}}}$ y la f_{\max} y f_{\min} son los valores de frecuencia que corresponden, con el regulador de velocidad en una determinada posición, respectivamente a potencia nula y potencia máxima. La relación viene expresada en porcentaje. Se puede decir que el estatismo es la variación de frecuencia en aumento, expresada en porcentaje de la frecuencia nominal (60 Hz) que, partiendo de la carga total, lleva a cero la señal de regulación que provoca el cierre de las válvulas de regulación.



La característica lineal del regulador es válida para una determinada posición del regulador de velocidad, moviendo ésta no se hace otra cosa que desplazar paralelamente a sí misma - la característica. (Ver figura 3) De esta forma se puede variar la potencia a frecuencia constante. A lo fines de la regulación de potencia conviene tener un estatismo lo más bajo posible, en cuanto que una pequeña variación de frecuencia provocará una gran variación de la potencia, con una rápida intervención del regulador. Pero, el estatismo no puede ser demasiado bajo, porque fuertes y rápidas variaciones de carga no son convenientes, en cuanto que al variar imprevistamente el caudal de vapor que entra en la turbina, ésta puede verse sometida a esfuerzos térmicos notables.



7

7.

INDICE

INTRODUCCION

1.	TEORIA DE LOS MODOS DE REGULACION	1
1.1.	Regulación a dos posiciones (ON-OFF)	1
1.2.	Regulación proporcional (P)	4
1.2.1.	Banda proporcional	5
1.3.	Respuesta dinámica y valoración del margen de estabilidad del sistema.	11
1.4.	Regulación con acción integral (I)	16
1.5.	Regulación con acción proporcional + integral (P+I)	22
1.6.	Regulación con acción derivativa (D)	25
1.7.	Regulación con acción proporcional + derivativa (P+D)	29
1.8.	Regulación con acción proporcional + integral + derivativa (P+I+D)	32
1.9.	Regulación con acción P+I con señal de pre-regulación	34

2.	REGULACION AUTOMATICA	38
2.1.	La regulación automática y los procesos industriales	38
2.1.1.	Los procesos industriales	39
2.1.1.1.	Procesos de energía	39
2.1.1.2.	Procesos de materia	40
2.1.2.	La cadena de regulación	40
2.1.3.	Características de los procesos	42
2.1.3.1.	Procesos autoregulantes y no autoregulantes.	42
2.1.3.2.	Capacitancia o receptividad	43
2.1.3.3.	Resistencia	45
2.1.3.4.	Tiempo muerto. Retardo Cinemático	46
2.1.3.5.	Efecto de los retardos	48
2.2.	Reguladores electrónicos	50
2.2.1.	Regulador electrónico con acción proporcional (P)	51
2.2.2.	Regulador electrónico con acción	

integral (I)	52
2.2.3. Regulador electrónico con acción P+I	53
2.2.4. Regulador electrónico con acción derivativa (D)	56
2.2.5. Regulador electrónico con acción P+D	57
2.2.6. Regulador electrónico con acción P+I+D	58
2.3. Exigencias de los modos de regulación	59
2.3.1. Regulador P	59
2.3.1.1. Características	60
2.3.2. Regulador I	60
2.3.3. Regulador PI	61
2.3.3.1. Características	61
2.3.4. Regulador PD	61
2.3.4.1. Características	62
2.3.5. Regulador PID	62
2.3.5.1. Características	63
2.4. Regulación mecano-hidráulica de la turbina	64

2.4.1. Sistema agua-vapor	64
2.4.2. Turbina	66
2.4.2.1. Turbina de alta presión (AP)	66
2.4.2.2. Turbina de media presión (MP)	66
2.4.2.3. Turbina de baja presión (BP)	67
2.4.3. Sistema de regulación hidráulica de la turbina.	67
2.4.3.1. Regulación por estrangulamiento	68
2.4.3.2. Regulación por grado de admisión	68
2.4.3.3. Regulación mixta	68
2.4.3.4. Elementos principales del siste- ma de regulación hidráulica	69
2.4.4. Principio de funcionamiento de la regula- ción hidráulica	70
2.4.5. Desplazamiento del casquillo	71
2.4.6. Regulador de velocidad	71
2.4.7. Regulador de carga	73
2.4.8. Convertidor electro-hidráulico	75
2.4.9. Válvulas. Funcionamiento	77
2.4.10. Arranque de la turbina con el sistema de regulación hidráulica	79
2.5. Circuitos electrónicos de la regulación	

de turbina.	80
2.5.1. Convertidor electro-hidráulico	80
2.5.2. Regulación de velocidad	81
2.5.3. "Set Point master Speed"	82
2.5.4. Regulación de la carga	83
2.5.4.1. "Set Point master load"	83
2.5.4.2. Correcciones del Set Point de carga	84
2.5.5. Regulación de las válvulas	85
2.6. Elementos de medida (sensibles)	86
2.6.1. Características estáticas	86
2.6.1.1. Campo de medida	87
2.6.1.2. "Span"	87
2.6.1.3. Conformidad	88
2.6.1.4. Linealidad	88
2.6.1.5. Histéresis	89
2.6.1.6. Repetibilidad	90
2.6.1.7. Deriva	91
2.6.1.8. Reproducibilidad	92
2.6.1.9. Precisión, Error estático	92
2.6.2. Características dinámicas, Error dinámico	93
2.6.3. Tiempo muerto y zona de insensibilidad	97
ANEXO 1	97.1
ANEXO 2	97.7

3.	CALIBRACION DE LOS SISTEMAS DE REGULACION	98
3.1.	Cálculo de los valores de calibración de los reguladores en base a la curva de reacción del proceso.	98
3.1.1.	Procesos no autoregulantes	99
3.1.2.	Procesos autoregulantes	100
3.2.	Regla de Ziegler y Nichols	106
3.3.	Método de las oscilaciones amortiguadas	107
3.4.	Puesta a punto definitiva sobre la planta de la cadena de regulación	108
3.5.	Examen analítico de un proceso regulado	110
3.5.1.	Proceso provisto de regulación proporcional	110
3.5.2.	Proceso provisto de regulación P+I	120
3.5.3.	Proceso provisto de regulación P+D	123
3.6.	Ejemplo de cálculo preliminar de los valores de calibración de un regulador	127
3.7.	Ejemplo de cálculo con el método Ziegler y Nichols.	136

4.	ESQUEMA DE REGULACION	141
4.1.	Comparación entre caldera a cuerpo cilíndrico y caldera a flujo de vapor forzado	141
4.2.	Regulación de caldera en seguimiento	144
4.3.	Regulación de turbina en seguimiento	145
4.4.	Regulación coordinada o integrada	146
4.5.	Apuntes acerca de la regulación coordinada de una caldera de flujo de vapor forzado.	147
4.5.1.	Esquema del principio de funcionamiento de la regulación coordinada.	149
5.	ESTUDIO DE CASO: PLANTA CENTRO - VENEZUELA	156
5.1.	Fundamentos para el entendimiento de los diagramas de bloques.	156
5.2.	Demanda de carga	157
5.3.	Toma de giros de la turbina	158
5.4.	Carga de la caldera	159
5.5.	Presión a la admisión	161
5.6.	Carga de la turbina	163
5.7.	Regulación de combustible	165
5.8.	Regulación de O ₂ en los humos	167

5.9.	Regulación de agua de alimentación	167
5.10.	Regulación de temperatura del sobrecalentador (S.H.)	169
5.11.	Regulación de temperatura del recalentador (R.H.)	170
5.12.	Regulación de las válvulas de turbina	172
5.13.	Regulación de caudal de aire	173
5.14.	Regulación del "By-Pass" S.H.	174
5.15.	Regulación del "By-Pass" R.H.	177
5.16.	Modos de regulación de la unidad (normas de ejercicio)	178
6.	DISCUSION Y CONCLUSIONES	196
7.	INDICE	202
8.	BIBLIOGRAFIA	210

8

8.

BIBLIOGRAFIA

CANALES, R. y R. Barrera Rivera. Análisis de Sistemas Dinámicos y Control Automático, Ed. Limusa, México, 1977.

CIPRIANI, Franco, Ing. Note Sul Macchinario e le Apparecchiature Delle Centrali Termoelettriche, E.N.E.L., Fusina, Italia, 1974.

DE LA CRUZ G., Rafael y Fernando Masami Matsubara Oda. Control e Instrumentación de Plantas Termoeléctricas Fósiles. Tesis - U.N.A.M., México, 1981.

DISTEFANO III et al. Retroalimentación y Sistemas de Control, Mc. Graw Hill - Shaum, Colombia, 1972.

DORF, Richard. Modern Control Systems, Addison-Wesley, Manila, Filipinas, 1970.

E.N.E.L. Appunti di Telecomandi e Regolazione Automatica, E.N.E.L. Compartimento di Napoli S.P.T. - Servizio Termoelettrico, - Italia, s/f.

E.N.E.L. Principi Generali di Regolazione Automatica, E.N.E.L. Centrale Termoelettrica Turbigo, Italia, s/f.

E.N.E.L. Procedura per l'esercizio dei Gruppi 3-4 di Turbigo - Levante, Italia, 1972

E.N.E.L. Turbine a Vapore, Condensatori ed Impianti di Condensazione, E.N.E.L. Compartimento di Roma. S.P.T./Servizio Termoelettrico, Italia, 1974.

Español, Marina. Regulación Hidráulica en la Turbina de la Termoeléctrica del Centro, Tesis, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 1979.

GABEL, Robert A. et al. Señales y Sistemas Lineales, Ed. Limusa, México, 1975.

Kuo, Benjamín C. Sistemas Automáticos de Control, Edit. --- C.E.C.S.A., México, 1982.

K.W.U. Material de Montaje de Planta Centro 1, Morón, Venezuela, 1979.

LUQUE Luna, Alberto et al. Instrumentación, Control y su Aplicación a una Planta Generadora de Vapor, Tesis, U.N.A.M., México, 1979.

MANZELLI, M. et al. Centrali Termoelettriche, Descrizione e Funzionamento, E.N.E.L. Compartimento di Milano S.P.T./Servizio Termoelettrico, Italia, 1974.

MANZELLI, M. Il Generatore di Vapore ed i suoi Ausiliari, E.N.E.L. Corso di Addestramento Specialistico per Diplomatici Turbigo, Italia, 1974-75.

OGATA, Katsuhiko. Ingenieria de Control Moderna, Ed. Prentice Hall Internacional, Madrid, 1976.

PISANESCHI. La Regolazione Automatica, Strumentazione, E.N.E.L., Corso di Addestramento Specialistico per Diplomatici. Piacenza, Italia, 1977.

PISANESCHI e Calcara. La Regolazione Automatica Analogica nelle Centrali Termoelettriche, E.N.E.L., Corso di Addestramento Specialistico per Diplomatici Livorno, Italia, 1974-75.

RIZHKIN, V. Y. Centrales Termoeléctricas, 2 vs., Ed. Mir, Moscú, 1979.

SHINNERS. Modern Control System Theory and Application. Addison-Wesley, 1972.