T
621.3191
LEO

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

" Estudio del sistema estático de control y protección de una turbina a gas"

TESIS DE GRADO

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

Especialización:

POTENCIA

Presentada por:

Patricio Eduardo León Alvarado

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO

2000

CIB
D-20730

T
621.3191
LEO

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de este trabajo y especialmente al Ing. Eduardo León Director de Tesis, por su invaluable ayuda.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MI HERMANO

A ODÍN

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Carlos Monsalve A.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Eduardo León C.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Otto Alvarado M.
MIEMBRO DEL JURADO

Ing. Juan Saavedra M.
MIEMBRO DEL JURADO

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y. el patrimonio intelectual de la misma. a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

Sr. Patricio León Alvarado

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla el estudio estático del control y protección de una turbina a gas que se ha utilizado para generar energía eléctrica, considerando que la unidad pueda operar en paralelo con otras o sola y diseñando los controles y las protecciones lo más simple posibles, pero en base a criterios de estabilidad y confiabilidad en la operación del sistema de control y protección.

En la primera parte se explica la filosofía en que se fundamenta el sistema de control de una turbina a gas y se estudia el diseño del sistema estático de control, el cual considera los siguientes controles principales:

- Control de arranque y parada
- Control de velocidad
- Control de temperatura
- Control de combustible
- Control de compresor
- Control de inyección de agua
- Control de lubricación

En la segunda parte se explica la filosofía en que se fundamenta el sistema de protección de una turbina a gas y se estudia el diseño del sistema estático de protección, el cual considera las siguientes protecciones principales:

- Protección de sobrevelocidad
- Protección de sobretemperatura

- Protección de vibración
- Protección de pérdida de llama
- Protección contra incendio

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	VI
ÍNDICE GENERAL	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
INTRODUCCIÓN	XIV
I. DISEÑO DEL SISTEMA ESTÁTICO DE CONTROL	17
1.1. Filosofía del diseño de control	17
1.2. Control de arranque y parada	19
1.2.1. Criterios de diseño del control de arranque y parada	19
1.2.2. Diseño del control de arranque y parada	24
1.2.3. Control global de arranque y parada	38
1.3. Control de velocidad	38
1.3.1. Criterios de diseño del control de velocidad	38
1.3.2. Diseño del control de velocidad	42
1.4. Control de temperatura	53
1.4.1. Criterios de diseño del control de temperatura	53
1.4.2. Diseño del control de temperatura	56
1.5. Control de combustible	72

1.5.1. Criterios de diseño del control de combustible 71

1.5.2. Diseño del control de combustible 72

1.6. Control de compresor 83

1.6.1. Criterios de diseño del control de compresor 83

1.6.2. Diseño del control de compresor 84

1.7. Control de inyección de agua 88

1.7.1. Criterios de diseño del control de inyección de agua 88

1.7.2. Diseño del control de inyección de agua 91

1.8. Control de lubricación 96

1.8.1. Criterios de diseño del control de lubricación 96

1.8.2. Diseño del control de lubricación 99

II. DISEÑO DEL SISTEMA ESTÁTICO DE PROTECCIÓN 102

2.1. Filosofía del diseño de protección 102

2.2. Protección de sobrevelocidad 106

2.2.1. Criterios de diseño de la protección de sobrevelocidad 106

2.2.2. Diseño de la protección de sobrevelocidad 108

2.3. Protección de sobretemperatura 110

2.3.1. Criterios de diseño de la protección de sobretemperatura 110

2.3.2. Diseño de la protección de sobretemperatura 112

2.4. Protección de vibración 119

2.4.1. Criterios de diseño de la protección de vibración 119

2.4.2. Diseño de la protección de vibración 121

2.5. Protección de pérdida de llama 122

2.5.1. Criterios de diseño de la protección de pérdida de llama 122

2.5.2. Diseño de la protección de pérdida de llama 124

2.6. Protección contra incendio 128

2.6.1. Criterios de diseño de la protección contra incendio 128

2.6.2. Diseño del sistema de protección contra incendio 129

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 134

ANEXO A 138

Tipos de control básicos

ANEXO B 141

Elementos de control y lógicos

BIBLIOGRAFÍA 145

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Programa de flujo de combustible	21
Figura 1.2	Programa de velocidad	23
Figura 1.3	Control de señal de nivel cero	26
Figura 1.4	Control de señal de velocidad mínima	27
Figura 1.5	Control de señal de calentamiento	30
Figura 1.6	Control de señal de aceleración	32
Figura 1.7	Control de señal de velocidad mínima	34
Figura 1.8	Control de señal de paro del motor de arranque	36
Figura 1.9	Control de señal de parada	37
Figura 1.10	Control global de arranque y parada	39
Figura 1.11	Control de velocidad astático	44
Figura 1.12	Control de velocidad estático	47
Figura 1.13	Control final de velocidad	50
Figura 1.14	Respuesta de los controles astáticos y estáticos	54
Figura 1.15	Sistema de medición de temperatura	58
Figura 1.16	Control proporcional de temperatura	60
Figura 1.17	Control de temperatura con compensación ambiental	63
Figura 1.18	Control final de temperatura	67

Figura 1.19 Control de menor señal de combustible 73

Figura 1.20 Sistema de combustible con bomba principal del tipo de desplazamiento variable 75

Figura 1.21 Control de combustible en función de la posición de la servo-válvula 76

Figura 1.22 Sistema de combustible con bomba principal del tipo de flujo constante 79

Figura 1.23 Control de combustible en función del flujo de combustible 81

Figura 1.24 Programa de variación del ángulo de las guías de aire 86

Figura 1.25 Control de compresor 89

Figura 1.26 Sistema de inyección de agua 92

Figura 1.27 Control de inyección de agua 95

Figura 1.28 Sistema hidráulico 98

Figura 1.29 Control hidráulico 101

Figura 2.1 Sistema de protección 104

Figura 2.2 Sistema de protección de sobrevelocidad 109

Figura 2.3 Curvas características para la calibración de alarma y disparo 113

Figura 2.4 Sistema sensor y generador de señales 115

Figura 2.5 Sistema de protección de sobretemperatura 118

Figura 2.6 Sistema de protección de vibración 123

Figura 2.7 Sistema de protección de pérdida de llama 127

Figura 2.8 Arreglo físico del sistema de protección contra incendio 131

Figura 2.9 Sistema de protección contra incendio 132

INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de la tesis se aplica el estudio del diseño estático del sistema de control y protección a una turbina a gas de 40MW y de un solo eje donde están en línea el compresor, turbina y generador eléctrico.

La aplicación del estudio a una turbina a gas se debe a que esta unidad tiene una serie de ventajas, siendo las principales la baja inversión inicial, la facilidad de instalación y la rapidez para entrar en servicio. Estas ventajas hacen que la turbina a gas sea la ideal para suministrar la energía de punta de un sistema eléctrico.

Los componentes principales de una turbina a gas son los siguientes:

- **Compresor**

  A presión atmosférica normal, la combustión de la mezcla combustible-aire no produce suficiente energía, puesto que la energía que se desarrolla es proporcional a la cantidad de aire y para incrementar el aire se utiliza el compresor que hace posible mover en un volumen dado la máxima cantidad de aire.

  La función del compresor es suministrar aire a alta presión a la cámara de combustión. Además, el compresor sirve de medio de enfriamiento de los combustores y la turbina, para mantener la temperatura dentro del generador de gas dentro de los límites de operación. El 25% de aire que pasa por los combustores es utilizado para la combustión y el 75% es utilizado como medio de enfriamiento.

- **Cámara de combustión**

  La cámara de combustión tiene por objetivo suministrar el espacio necesario para la combustión de la mezcla combustible-aire y como resultado se tiene la energía térmica contenida en los gases de la combustión

- **Turbina**

  En la turbina a gas la energía térmica se convierte en energía cinética y por medio de los álabes del rotor de la turbina la energía cinética se convierte en energía mecánica.

- **Generador eléctrico**

  En el generador eléctrico la energía mecánica en el eje del rotor se convierte en energía eléctrica en sus terminales.

  En la Fig. I.1. se presenta los componentes principales de la turbina a gas de la presente tesis.

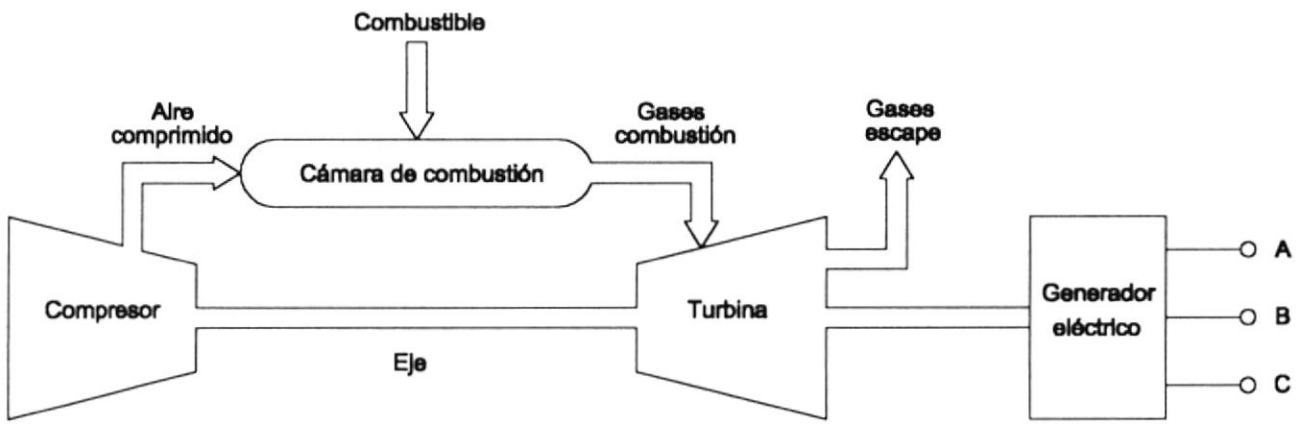


FIGURA I.1. PARTES FUNDAMENTALES DE UNA TURBINA A GAS

Capítulo 1

1. DISEÑO DEL SISTEMA ESTÁTICO DE CONTROL

1.1. Filosofía del diseño de control

La presente tesis trata sobre el estudio del diseño del sistema estático de control de un proceso. El sistema de control tiene por objetivo, ante una perturbación, regular el proceso para que continúe operando normalmente e incrementar la confiabilidad del proceso.

Para que el proceso continúe operando normalmente, después de una perturbación, el sistema de control tiene que ser del tipo proceso continuo, para lo cual en el diseño del sistema de control se aplica el criterio de redundancia por asociación. Esto significa que cuando un control esta regulando el proceso y se produce una perturbación, los controles adicionales tienen capacidad de reemplazarlo.

Los criterios básicos del diseño del sistema de control son los siguientes:

- Confiabilidad durante la secuencia de arranque y en operación normal.
- Respuesta rápida, ante las variaciones de la carga.
- Estabilidad, ante cambios bruscos de carga.

Para que la unidad a gas genere energía eléctrica, el sistema de control debe estar compuesto por cuatro controles básicos principales y son los siguientes:

- Control de secuencia de arranque
- Control de velocidad
- Control de temperatura
- Control de combustible

Los cuatro controles regulan el flujo de combustible a la turbina, de acuerdo a las condiciones de operación de la unidad

El criterio básico del sistema de control es que el control que requiere de menor combustible, es el control que gobierna la unidad.

Para cumplir con el criterio básico del sistema de control, las salidas de los controles de secuencia de arranque, velocidad y temperatura son alimentadas a un circuito que selecciona la menor de las señales de control, para que el flujo de combustible a la unidad sea el menor y con ello proteger a la unidad de sobretemperaturas no permisibles que pueden producir un grave daño a los elementos de la unidad que operan normalmente a alta temperatura.

Además de los controles básicos principales, se tienen los controles auxiliares y estos son los siguientes:

- Control de compresor, el cual regula el flujo de aire que entra al compresor.
- Control de inyección de agua, el cual provee el flujo de agua al sistema de combustión para restringir las emisiones de óxidos de nitrógeno.
- Control de lubricación, el cual mantiene constante la presión de aceite del sistema hidráulico.

1.2. Control de arranque y parada

1.2.1. Criterios de diseño del control de arranque y parada

Los criterios de diseño del control de arranque y parada son los siguientes:

1. Las secuencias de arranque y parada consisten en determinados valores de velocidad que se deben cumplir en los períodos de tiempo de las indicadas secuencias. La programación de combustible en las secuencias de arranque y parada son para que la turbina no este expuesta a excesivos esfuerzos mecánicos y térmicos por un repentino y acelerado incremento o decremento de la temperatura y para evitar una acumulación excesiva de combustible que podría

producir una explosión y como consecuencia temperaturas y esfuerzos mecánicos no permisibles.

2. El control de arranque es el encargado de llevar a la turbina a la velocidad nominal, esto lo realiza de acuerdo a un programa de flujo de combustible durante el período de la secuencia de arranque y se controla la gradiente de incremento de la temperatura para que la turbina no sufra daño. El programa de flujo de combustible se presenta en la Fig. 1.1.
3. En la secuencia de arranque se cumple con el encendido, calentamiento y aceleración. El encendido empieza cuando la turbina alcanza la velocidad de encendido, luego del ciclo de purga, a esta velocidad se permite el ingreso de combustible a la cámara de combustión para el encendido de la mezcla combustible-aire, estableciendo la llama. El calentamiento de la unidad es para evitar el choque térmico que se podría producir al variar rápidamente la temperatura. Al terminarse el tiempo de calentamiento, comienza la aceleración de la turbina, en esta parte el flujo de combustible aumenta gradualmente en forma exponencial hasta el valor máximo permisible. El torque de aceleración de

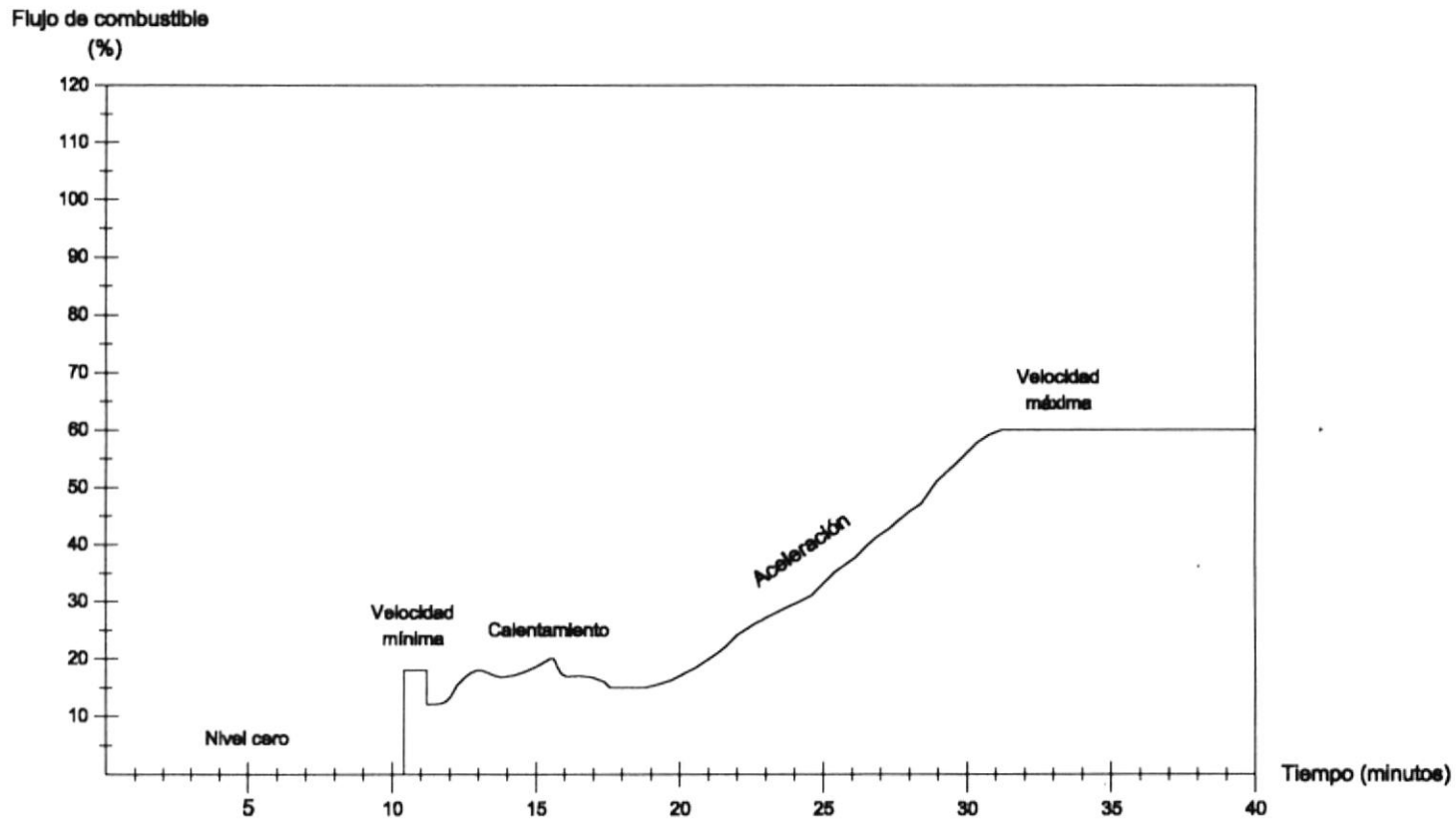


FIGURA 1.1. PROGRAMA DE FLUJO DE COMBUSTIBLE

la unidad es proporcionado por el motor de arranque y por la misma turbina.

4. Durante el proceso de arranque se controla la gradiente de incremento de velocidad para que la turbina no sufra daño. La curva de velocidad de la turbina durante la secuencia de arranque se presenta en la Fig. 1.2.

   Estando fuera de servicio el freno del rotor de la turbina, el motor de arranque acelera la turbina hasta el 30% de la velocidad nominal, al pasar por el 10% de la velocidad nominal sale de servicio el temporizador de purga. El ciclo de purga retira el combustible que puede haber quedado en los combustores de una operación anterior o de un arranque fallido, esto se logra mediante 4 chorros de aire que empujan al combustible hacia fuera de la cámara de combustión. Al final del ciclo de purga la velocidad de la turbina disminuye hasta por debajo de la velocidad de encendido (10% de la velocidad nominal), luego la velocidad se incrementa hasta la nominal.

5. El control de parada regula el flujo de combustible para que la variación de temperatura en la turbina no sea crítica durante el período de parada de la unidad. La secuencia de

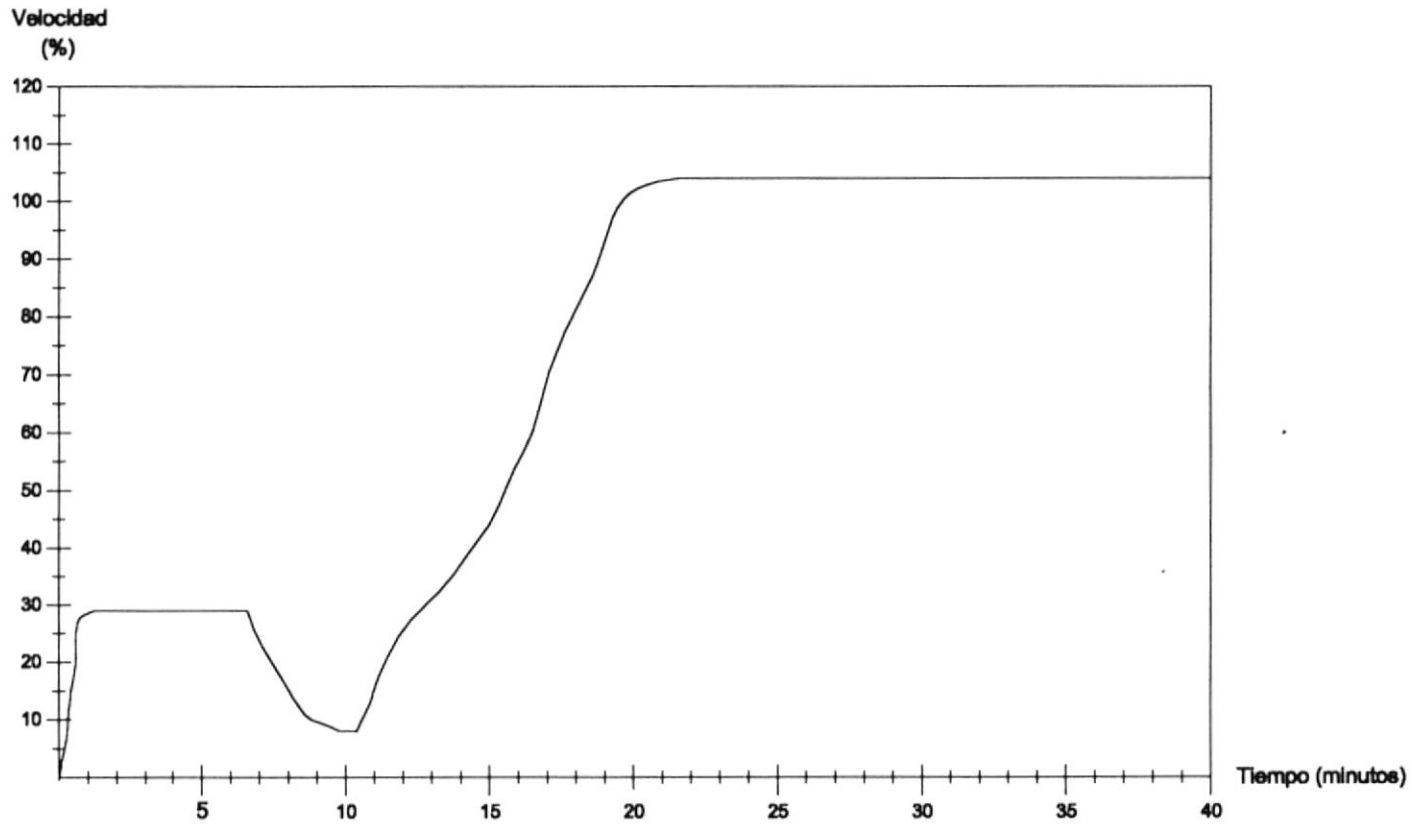


FIGURA 1.2. PROGRAMA DE VELOCIDAD

parada comienza desde que la unidad se encuentra sin carga hasta cuando el rotor se detiene completamente. Se debe reducir el flujo de combustible gradualmente hasta que se apaga la llama, la pérdida de llama se produce aproximadamente al 10% de la velocidad nominal y se cierra la válvula moduladora de combustible, luego la velocidad se disminuye hasta llegar a cero. Los equipos auxiliares salen de servicio gradualmente cuando la unidad tiene el 3% de la velocidad nominal.

1.2.2. Diseño del control de arranque y parada

El diseño del control de arranque y parada comprende el programa de flujo de combustible en las secuencias de arranque y parada. El programa de flujo de combustible tiene las siguientes señales de combustible:

- Señal de nivel cero
- Señal de velocidad mínima
- Señal de calentamiento
- Señal de aceleración
- Señal de velocidad máxima
- Señal de paro del motor de arranque
- Señal de parada

1. Señal de nivel cero

La señal de nivel cero indica que el flujo de combustible a la turbina es nulo, no se introduce combustible a la turbina hasta que esta alcance una determinada velocidad, llamada velocidad mínima o de encendido.

El control de la señal de nivel cero se presenta en la Fig. 1.3.

La velocidad sensada, luego de pasar por el elemento PR/A, es llevada a un elemento comparador, el cual entrega una señal lógica de valor verdadero cuando la velocidad de la turbina es menor al 10% de la velocidad nominal. La señal del comparador va a un elemento convertidor, el cual permite el paso del valor preajustado de nivel cero cuando la señal lógica de entrada del convertidor es el valor verdadero. A la señal del convertidor se le aplica el control K1 y se obtiene la señal de nivel cero.

2. Señal de velocidad mínima

La señal de velocidad mínima se la utiliza para sacar de servicio el temporizador de purga y para enviar el mínimo flujo de combustible a los combustores, el cual es necesario para producir el encendido de la mezcla combustible-aire.

El control de la señal de velocidad mínima se presenta en la Fig. 1.4.

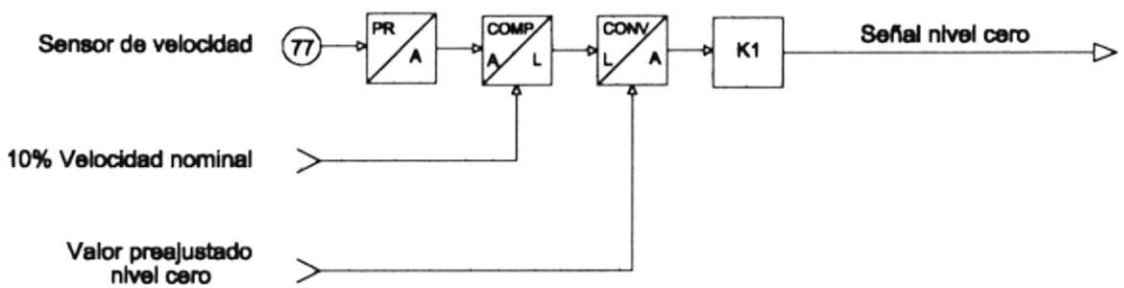


FIGURA 1.3. CONTROL DE SEÑAL DE NIVEL CERO

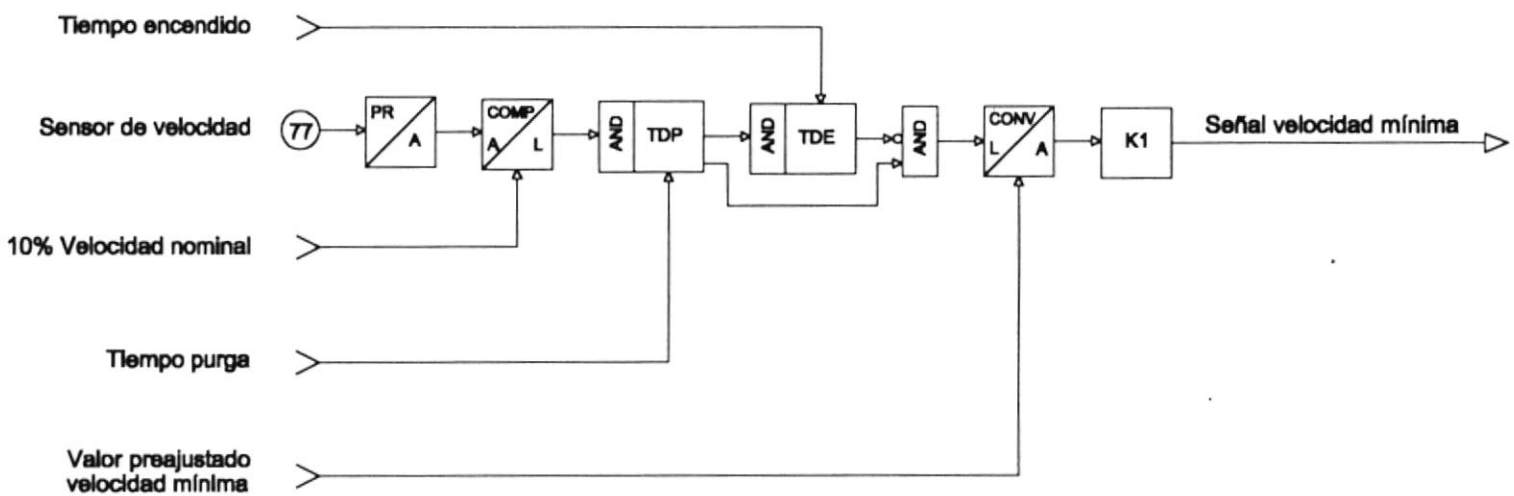


FIGURA 1.4. CONTROL DE SEÑAL DE VELOCIDAD MÍNIMA

La velocidad sensada, luego de pasar por el elemento PR/A, es llevada a un elemento comparador, el cual entrega una señal lógica de valor verdadero cuando la velocidad de la turbina es igual o mayor a la velocidad de 10% de la nominal. La señal lógica de valor verdadero activa el temporizador de purga, cuyo tiempo de retardo es preajustado. Terminado el tiempo de purga, el temporizador de purga da la señal activar el temporizador de encendido. La puerta lógica "AND" pasar la señal de velocidad mínima cuando el temporizador de purga ha terminado su retardo de tiempo y cuando el temporizador de encendido este en retardo de tiempo, esto se realiza para que el flujo de combustible de encendido este presente solo durante el tiempo de encendido. La señal de la puerta lógica "AND" va a un elemento convertidor, el cual permite el paso del valor preajustado de velocidad mínima cuando la señal lógica de entrada del convertidor es el valor verdadero. A la señal del convertidor se le aplica el control K1 y se obtiene la señal de velocidad mínima.

3. **Señal de calentamiento**

La señal de calentamiento da la señal de arranque al temporizador de calentamiento y establece un flujo de combustible inferior a la señal de velocidad mínima, con el

propósito fundamental de que una vez que ha sido detectada la llama en los combustores, reducir el combustible a la turbina a fin de disminuir al mínimo el choque térmico en las piezas que se encuentran en la trayectoria de los gases calientes. El nivel de flujo de combustible de calentamiento es mantenido durante un intervalo de tiempo que varía de uno a dos minutos y que es suficiente para calentar las partes de la turbina y acondicionarlas para la elevación de temperatura.

El control de la señal de velocidad mínima se presenta en la Fig. 1.5.

La señal de llama sensada va a un elemento comparador, el cual entrega una señal lógica de valor verdadero cuando la radiación ultravioleta detectada por los sensores de llama es mayor que la del medio ambiente (preajustada), esta señal lógica activa el temporizador de calentamiento, el cual da el tiempo suficiente para que la temperatura se incremente sin dañar a la unidad. La puerta lógica "AND" envía una señal lógica de valor verdadero cuando el temporizador de calentamiento se encuentre en retardo y permite que el elemento convertidor deje pasar el valor preajustado de

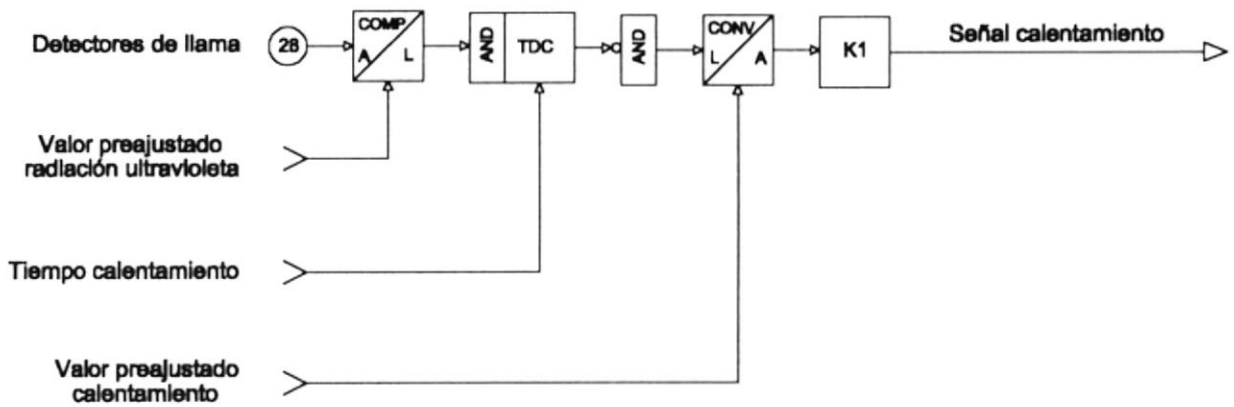


FIGURA 1.5. CONTROL DE SEÑAL DE CALENTAMIENTO

calentamiento. A la señal del convertidor se le aplica el control K1 y se obtiene la señal de calentamiento.

4. Señal de aceleración

La señal de aceleración incrementa el flujo de combustible en forma exponencial por dos razones, la primera es porque la velocidad de la unidad sigue aumentando debido al motor de arranque, lo cual incrementa la masa aire y se cambia la relación combustible-aire y para mantenerla hay que incrementar el combustible. Si no se realiza esto la combustión sería pobre y la unidad se dispara por pérdida de llama. La segunda razón es para continuar acelerando la turbina hasta el 95% de la velocidad nominal.

El control de la señal de aceleración se presenta en la Fig. 1.6.

Cuando el temporizador de calentamiento ha terminado su retardo envía una señal lógica de valor verdadero a una puerta lógica "AND", la cual da una señal lógica de valor verdadero a un elemento convertidor que permite el paso del valor preajustado de aceleración, esta señal pasa a un elemento, el cual entrega el valor preajustado de aceleración de una manera exponencial. A la señal del elemento X^n se le aplica el control K1 y se obtiene la señal de aceleración.

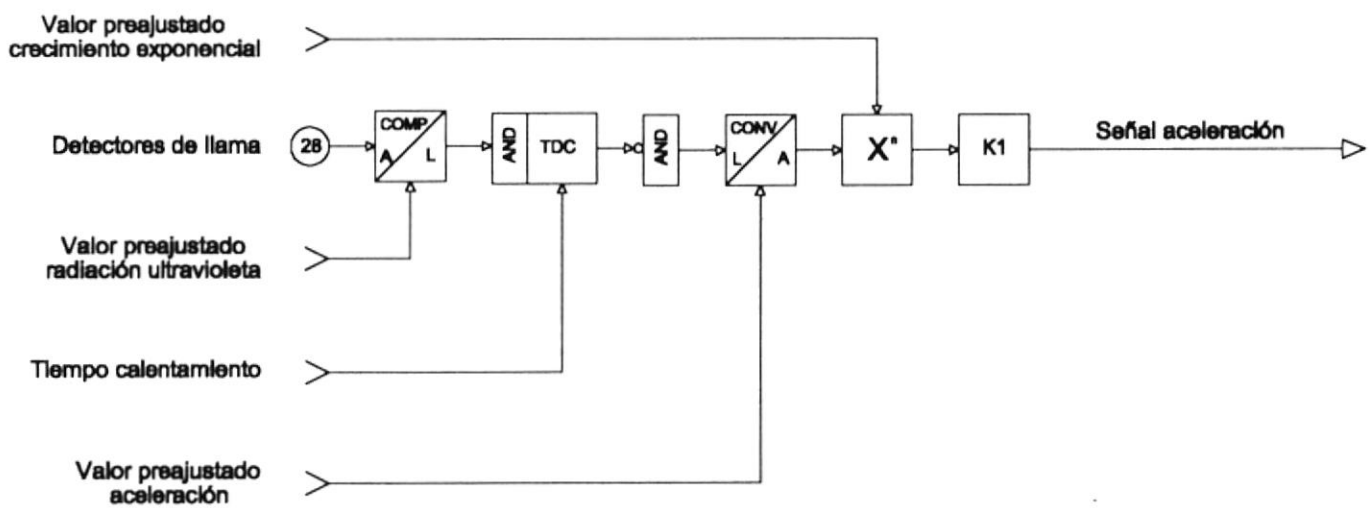


FIGURA 1.6. CONTROL DE SEÑAL DE ACELERACIÓN

5. Señal de velocidad máxima

La señal de velocidad máxima indica que la unidad se encuentra en el 95% de la velocidad nominal y que el período de arranque esta por terminar. Esta señal sigue aumentando el flujo de combustible para que la velocidad se incremente, en el momento que la señal de flujo de combustible del control de arranque es mayor que la señal de flujo de combustible del control de velocidad, se produce el cambio de mando, y pasa a gobernar el flujo de combustible el control de velocidad.

El control de la señal de velocidad máxima se presenta en la Fig. 1.7.

La velocidad sensada, luego de pasar por el elemento PR/A, va a un elemento comparador, el cual da una señal lógica de valor verdadero cuando la velocidad de la turbina es igual al 95% de la nominal. Esta señal lógica pasa a un elemento convertidor que da paso al valor preajustado de velocidad máxima, cuando la señal lógica de entrada al convertidor es el valor verdadero. A la señal del convertidor se le aplica el control K1 y se obtiene la señal de velocidad máxima.

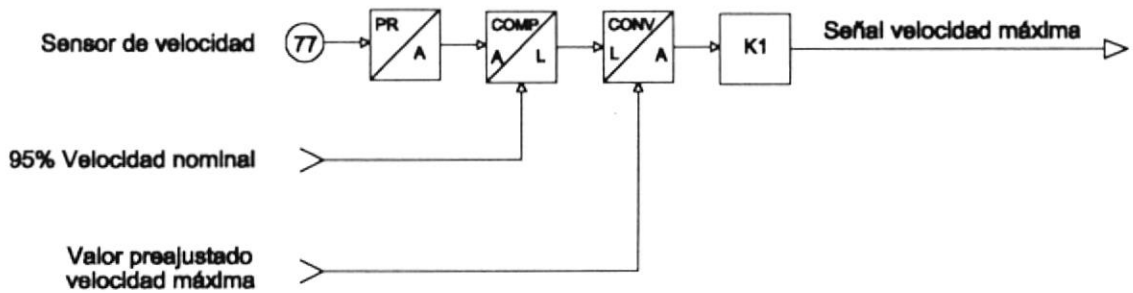


FIGURA 1.7. CONTROL DE SEÑAL DE VELOCIDAD MÁXIMA

6. Señal de paro del motor de arranque

La señal de paro del motor de arranque indica que el motor de arranque se desconecta de la unidad y deja de funcionar, esto se produce al 60% de la velocidad nominal.

El control de la señal de paro del motor de arranque se presenta en la Fig. 1.8.

La velocidad sensada, luego de pasar por el elemento PR/A, va a un elemento comparador, el cual da una señal lógica de valor verdadero cuando la velocidad de la turbina es igual a 60% de la nominal. Esta señal lógica pasa a un elemento convertidor que permite el paso del valor preajustado de paro del motor de arranque, cuando la señal lógica de entrada al convertidor es el valor verdadero. A la señal del convertidor se le aplica el control K1 y se obtiene la señal de paro del motor de arranque.

7. Señal de parada

La señal de parada sirve para desenergizar los equipos y sistemas auxiliares, cuando sale de servicio la unidad o cuando no se puede arrancar la unidad por alguna falla.

El control de la señal de parada se presenta en la Fig. 1.9.

Cuando se da la señal de paro de la unidad se permite el paso al valor preajustado de parada de la turbina en el

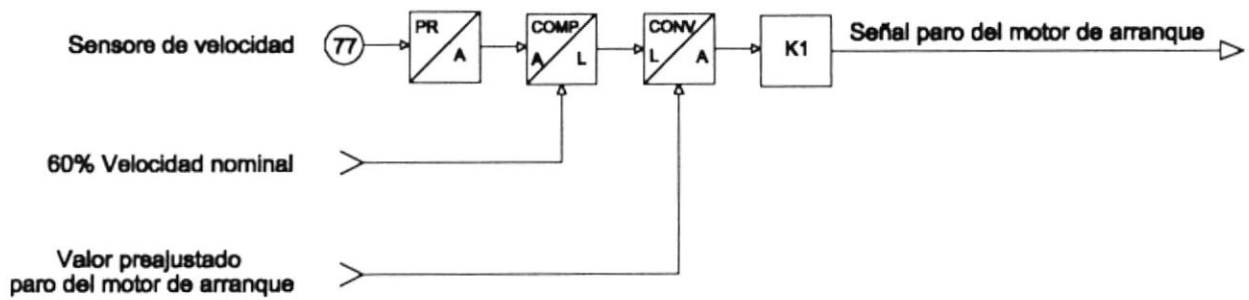


FIGURA 1.8. CONTROL DE SEÑAL DE PARO DEL MOTOR DE ARRANQUE

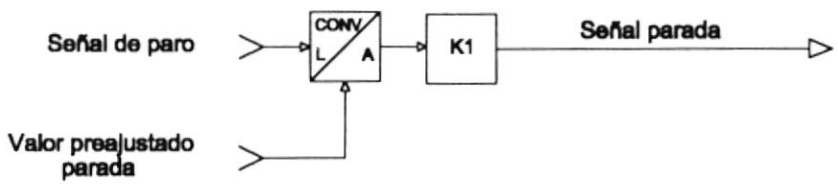


FIGURA 1.9. CONTROL DE SEÑAL DE PARADA

convertidor. A la señal del convertidor se le aplica el control K1 y se obtiene la señal de parada, la cual disminuye el flujo de combustible hasta el cierre de la válvula moduladora de combustible.

1.2.3. Control global de arranque y parada

El diseño del control global de arranque y parada se lo presenta en la Fig. 1.10. y considera las señales de control de las secuencias de arranque y parada. Las señales que cambian el flujo de combustible durante la secuencia de arranque, siendo estas las siguientes: señal de nivel cero, señal de velocidad mínima, señal de calentamiento y señal de aceleración, son recopiladas en un solo elemento amplificador-proporcional, del cual sale la señal que va a controlar la válvula moduladora de combustible. Esta señal pasa por un interruptor lógico con fin de poder interrumpirla en el momento que se da la señal de parada de la unidad.

1.3. Control de velocidad

1.3.1. Criterios de diseño del control de velocidad

Los criterios de diseño del control de velocidad son los siguientes:

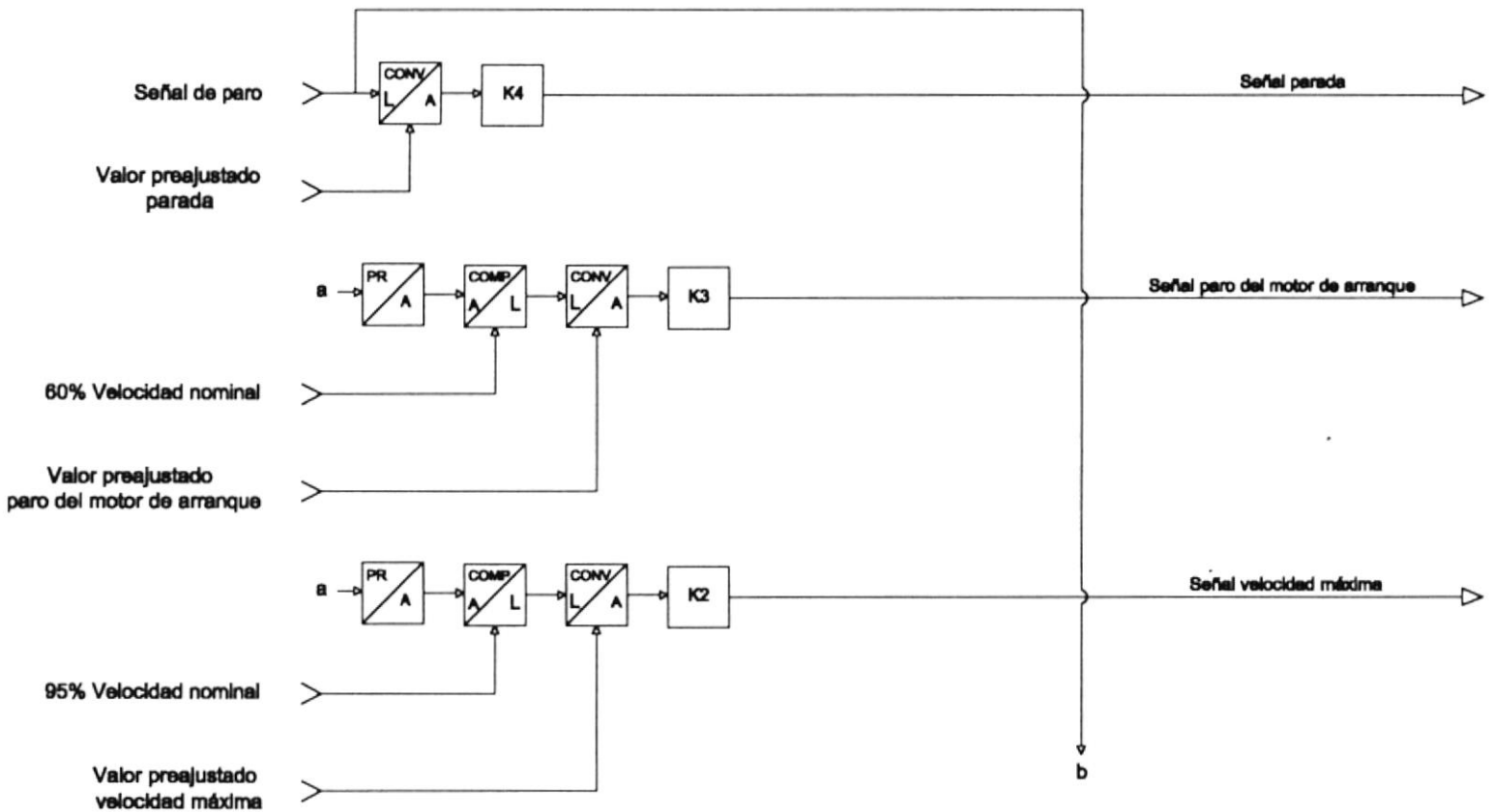


FIGURA 1.10.a CONTROL GLOBAL DE ARRANQUE Y PARADA

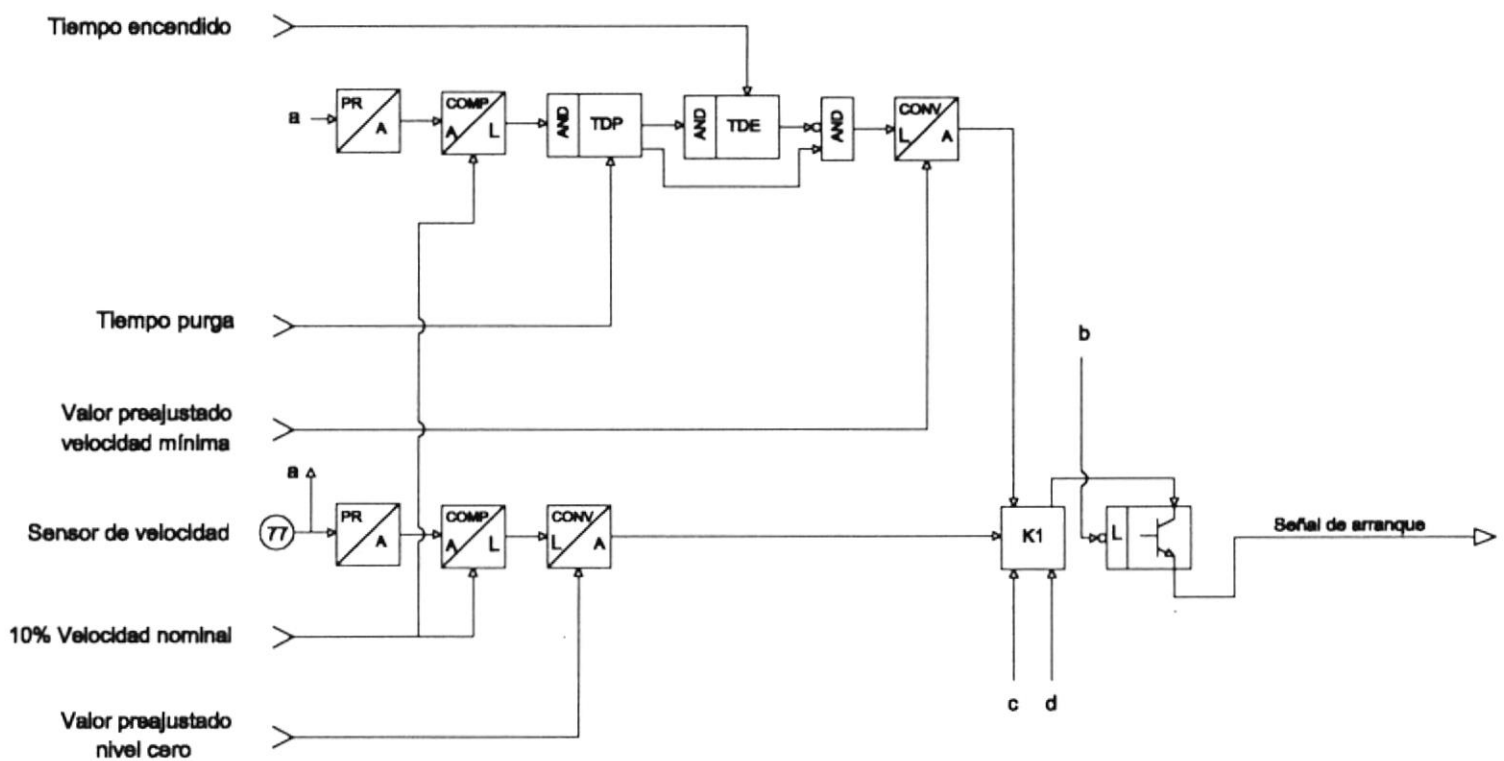


FIGURA 1.10.b CONTROL GLOBAL DE ARRANQUE Y PARADA

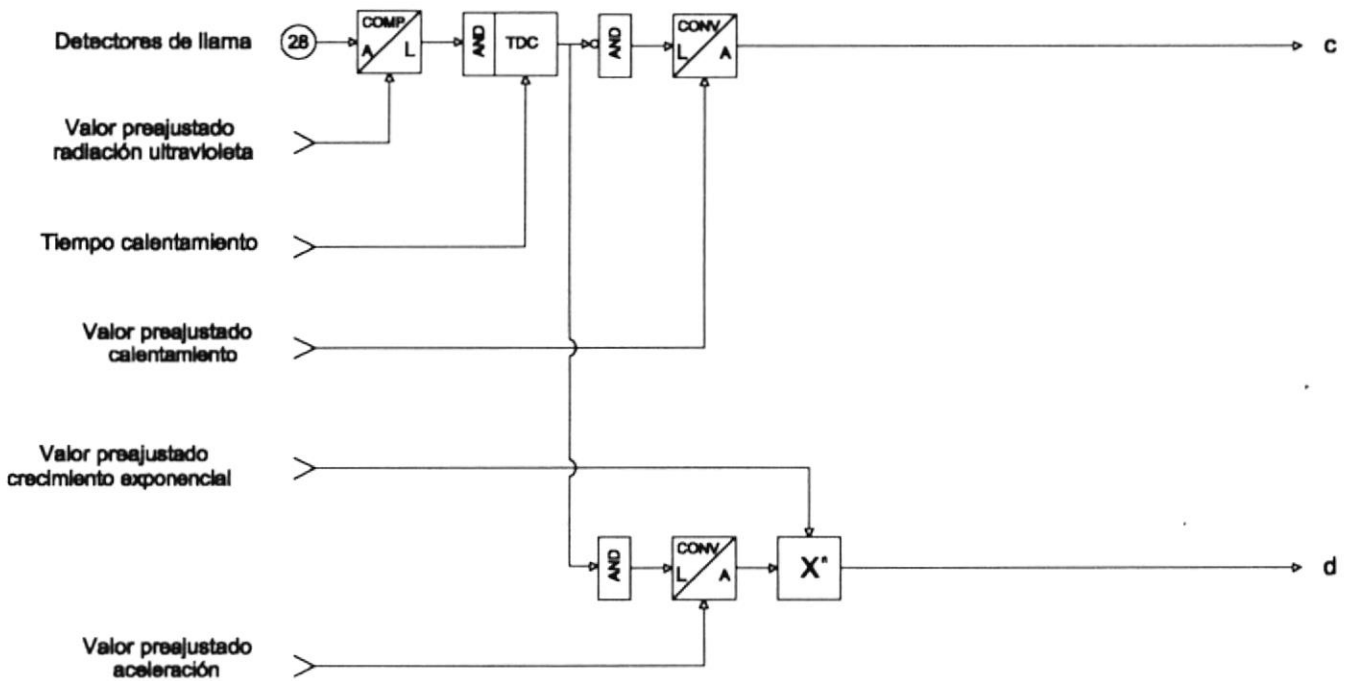


FIGURA 1.10.c CONTROL GLOBAL DE ARRANQUE Y PARADA

1. El control de velocidad de la turbina a gas regula el flujo de combustible una vez que la turbina ha alcanzado el 95% de la velocidad nominal. Las características principales del control de velocidad son las siguientes:
   - Mantener la velocidad de operación dentro del rango permisible en función de la carga.
   - El control tiene que ser estable, es decir, regresar a la velocidad de operación con un mínimo de oscilaciones y en el menor tiempo posible.
   - Regular la carga de la turbina en función de la frecuencia para una repartición estable de carga cuando la unidad opera en paralelo con otras unidades de generación.
2. El sistema de control de velocidad regula la velocidad y la carga de la turbina mediante la resultante de la comparación entre la velocidad de la turbina con el valor de referencia de velocidad. El control regula el flujo de combustible en la cantidad necesaria para mantener la velocidad de operación requerida.

1.3.2. Diseño del control de velocidad

El diseño del control de velocidad comprende el control de velocidad estático, control de velocidad astático y control final de velocidad

1. Control de velocidad astático

El control de velocidad astático mantiene una velocidad determinada de la turbina independiente de las condiciones de carga. Este modo de control se utiliza cuando la unidad generadora es la única que suministra energía a la demanda. El control de velocidad incrementa o disminuye el flujo de combustible dependiendo de la carga para mantener la velocidad constante.

El control de velocidad astático se presenta en la Fig. 1.11.

La velocidad sensada, luego de pasar por los elementos PR/A y K1, va a un elemento comparador, el cual entrega una señal lógica de valor verdadero cuando la velocidad de la turbina es igual al 95% de la velocidad nominal. La señal del comparador va a un interruptor lógica que bloquea la señal de velocidad hasta que la turbina alcance el 95% de su velocidad nominal, este interruptor permite que la velocidad sensada pase al elemento diferencial Δ donde es comparada con la velocidad de referencia.

La velocidad de referencia es la suma de las señales del 100% de velocidad de referencia y del punto de ajuste de velocidad, multiplicadas respectivamente por las constantes de amplificación K2 y K3.

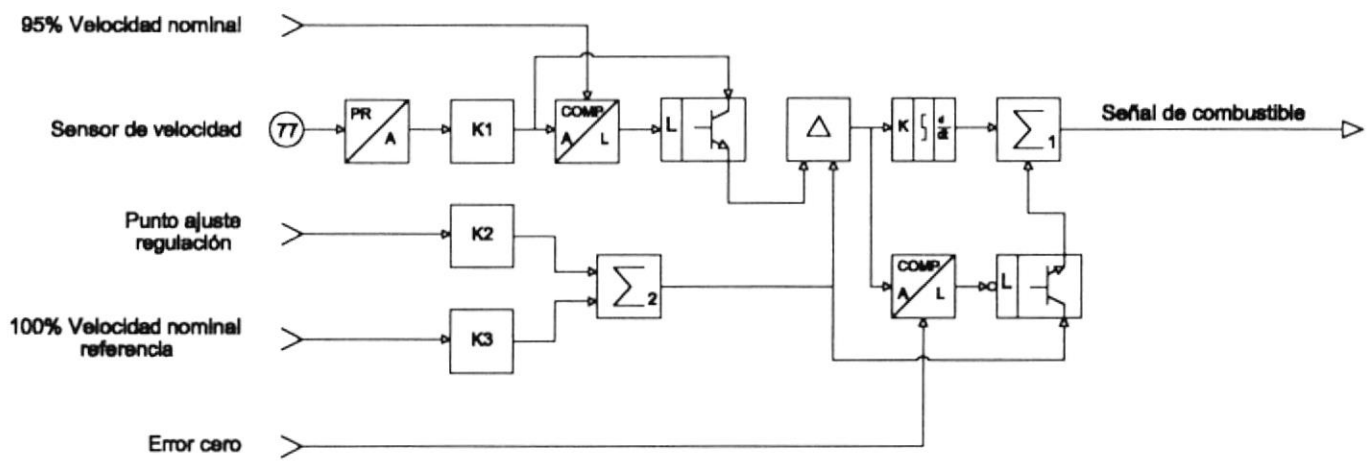


FIGURA 1.11. CONTROL DE VELOCIDAD ASTÁTICO

La señal que sale del elemento diferencial Δ es la señal de error a la que se le aplica el control proporcional-integral-derivativo y va a un comparador analógico-lógico, el cual da la señal a un interruptor lógico cuando el error es diferente de cero para que este permita el paso de la señal de velocidad de referencia al elemento sumador $\Sigma 1$, en donde se suma la señal de referencia con la señal del control proporcional-integral-derivativo. La señal de salida del elemento $\Sigma 1$ entrega la señal de combustible que regula la válvula moduladora.

2. Control de velocidad estático

El control de velocidad estático se lo utiliza cuando la unidad a gas tiene que operar en paralelo con otras unidades y se desea que todas las unidades en servicio operen a plena carga.

El control estático se basa en que la unidad que entra en servicio debe tener la frecuencia del sistema eléctrico, este modo de control permite disminuir la velocidad de la unidad a medida que aumenta la carga del sistema.

Cuando la unidad esta con carga y se mantiene a la velocidad nominal, el flujo de combustible mantiene la velocidad y la carga activa de la unidad. De esta manera el

control de velocidad en realidad regula la carga activa y la velocidad de referencia sirve para especificar la carga activa que tiene el generador.

El cambio de velocidad por variaciones de carga se conoce como regulación del generador o estatismo. Si la carga del sistema tiende a aumentar, la velocidad del generador disminuye y el flujo de combustible aumenta en proporción al estatismo, el aumento de carga se divide en partes iguales a todas las unidades, si todas ellas tienen el mismo estatismo, este comportamiento es la mayor ventaja de este modo de operación. Normalmente se escoge un estatismo de 4%, por lo que el generador tiene una velocidad del 104% de la nominal cuando este en vacío y una velocidad del 100% a plena carga.

En el control estático, cada punto de ajuste de regulación representa un nuevo punto operacional con idéntica característica de pendiente.

El control de velocidad estático se presenta en la Fig. 1.12.

La velocidad sensada, luego de pasar por los elementos PR/A y K1, va a un elemento comparador, el cual entrega una señal lógica de valor verdadero cuando la velocidad de la turbina es igual al 95% de la velocidad nominal. La señal

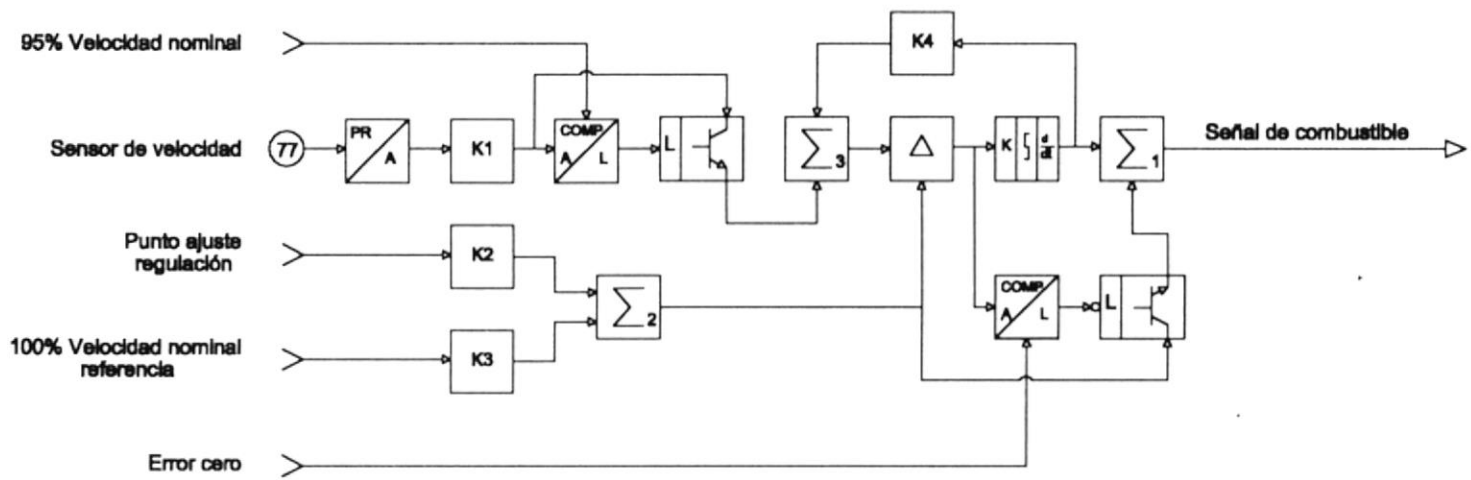


FIGURA 1.12. CONTROL DE VELOCIDAD ESTÁTICO

del comparador va a un interruptor lógico que bloquea la señal de velocidad hasta que la turbina alcanza el 95% de su velocidad nominal, este interruptor permite que la velocidad sensada pase al elemento $\Sigma 1$. En el control estático la señal de error es la resultante de la comparación que se realiza en el elemento diferencial Δ entre la señal de velocidad de referencia y la señal resultante de la suma de las señales de velocidad de la turbina y de estatismo del gobernador en el elemento $\Sigma 3$. La señal de estatismo del gobernador es la señal del control proporcional-integral-derivativo modificada por el elemento proporcional K4.

La señal que sale del elemento diferencial Δ va al control proporcional-integral-derivativo y a un comparador analógico-lógico, el cual da la señal a un interruptor lógico cuando el error es diferente de cero y permite el paso de la señal de velocidad de referencia al elemento sumador $\Sigma 1$, en donde se suma la señal de referencia con la señal del control proporcional-integral-derivativo. La señal de salida del elemento $\Sigma 1$ entrega la señal de combustible que regula la válvula moduladora.

3. Control final de velocidad

El control final de velocidad puede funcionar como estático o astático, y tiene las siguientes característica:

- Capacidad de poder cambiar mediante un selector de transferencia manual o automático (ST) de modo estático a modo astático.
- Capacidad de reducir el flujo de combustible a la unidad si la tasa de aceleración se incrementa del 1% por segundo, con el propósito de proteger a la unidad de sobretemperaturas.
- Capacidad de colocar el punto de ajuste de regulación en el 100,3% cada vez que se abre el disyuntor principal de la unidad. Esto es para reducir la posibilidad de una brusco aumento en la velocidad de la turbina si se abre el disyuntor en condiciones de carga. Una señal lógica proveniente del disyuntor principal debe bloquear el punto de ajuste de regulación en el momento de abrir el disyuntor y ubicarlo en el valor deseado.

El control final de velocidad se presenta en la Fig. 1.13.

La ecuación general de la señal de control de velocidad es la siguiente:

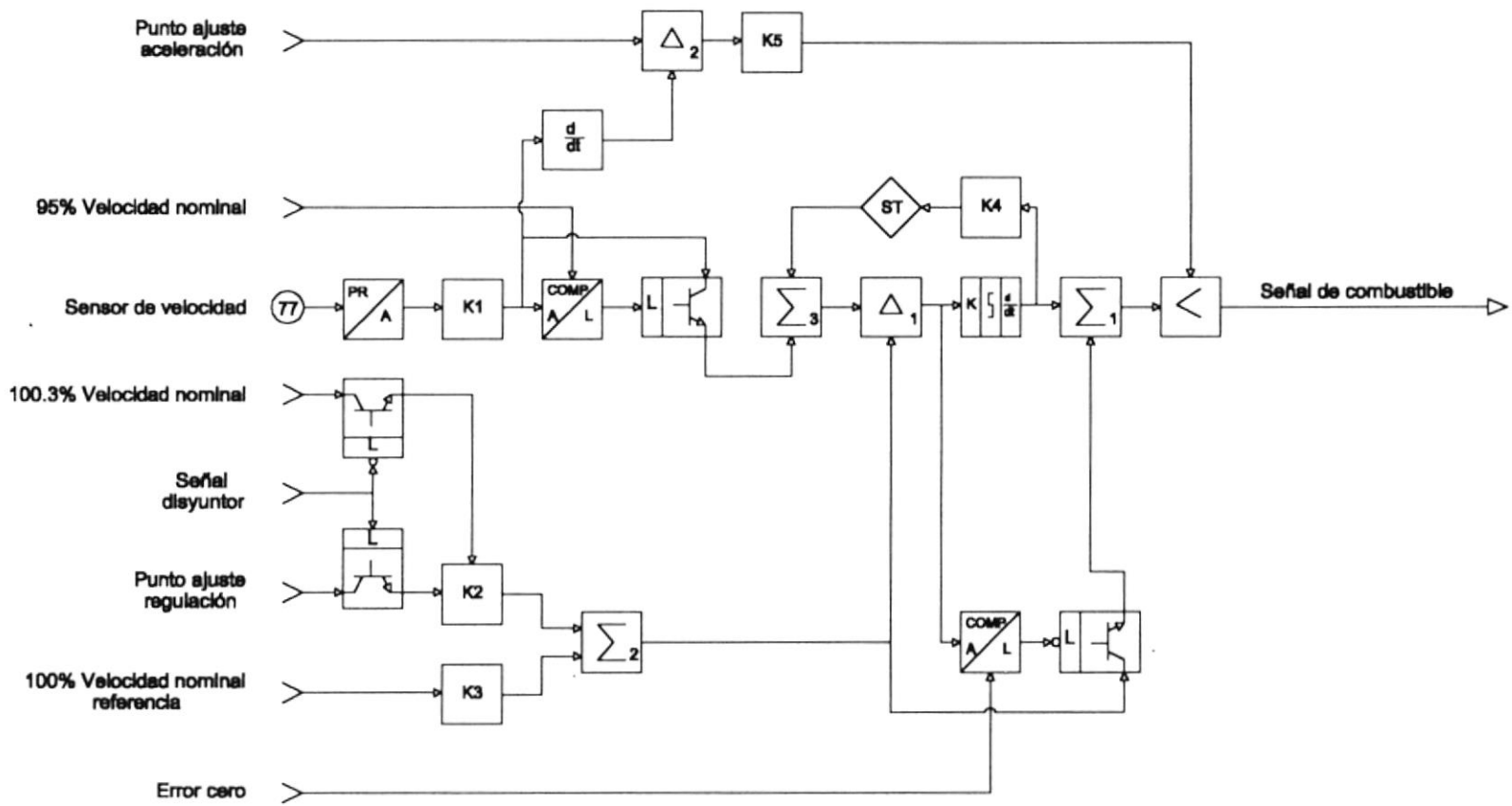


FIGURA 1.13. CONTROL FINAL DE VELOCIDAD

$$SBC = 1/S_1\, V_r + 1/S_2\, \Delta + r/S_2 \sum_{0}^{t} \Delta dt + q/S_2\, d\Delta/dt \qquad (1)$$

donde,

$$\Delta = V_r - V_{rt}, \text{ para el gobernador astático} \qquad (2)$$

$$\Delta = V_r - V_{rt} - SE, \text{ para el gobernador estático} \qquad (3)$$

$$V_r = K_3\, V_{100\%}\, r + K_2\, V_{P.A.} \qquad (4)$$

$$SE = K_4\, SBC \qquad (5)$$

Los términos utilizados son:

SBC, señal de flujo de combustible en unidades de medición

V_r, señal de referencia en unidades de medición

$V_{100\%}$, señal de referencia de velocidad 100% en unidades de medición

$V_{P.A.}$, punto de ajuste de regulación o velocidad en unidades de medición

V_{rt}, señal de velocidad real de la turbina en unidades de medición

Δ, error de velocidad en unidades de medición

SE, señal de estatismo

S_1, banda proporcional en porcentaje

S_2, banda proporcional en porcentaje

r, velocidad de reajuste (en minutos)-1

q, tasa derivativa en minutos

t, tiempo en minutos

De la ecuación general (1), es posible obtener las ecuaciones de los controles astático y estático.

Control astático

$$
\begin{aligned}
SBC &= 1/S_1\,(K_3\,V_{100\%}+K_2\,V_{P.A.}) \\
&+ 1/S_2\,(K_3\,V_{100\%}+K_2\,V_{P.A.}-V_{RT}) \\
&+ r/S_2 \sum_{0}^{T}(K_3\,V_{100\%}+K_2\,V_{P.A.}-V_{RT})dt \\
&+ q/S_2\,d(K_3\,V_{100\%}+K_2\,V_{P.A.}-V_{RT})/dt \qquad (6)
\end{aligned}
$$

En esta ecuación el término $1/S_7\ (K_3\ V_{100\%} + K_2\ V_{P.A.})$ representa la señal anticipatoria de demanda que hace que la respuesta del sistema sea lo suficientemente rápida para tomar la acción correctiva necesaria antes de que la velocidad de la turbina comience a cambiar. Los demás términos de la ecuación solo son representativos cuando las variaciones se prolongan en el tiempo. Las constantes de velocidad de reajuste (r) y banda proporcional (s) deben ser ajustadas adecuadamente a fin de evitar la inestabilidad y las oscilaciones del sistema.

De igual forma la tasa derivativa (q) debe ser ajustada cuidadosamente puesto que si es demasiado grande, podría producirse un ciclaje.

Control estático

$$SBC = 1/S_1(K_3V_{100\%} + K_2V_{P.A.}) + 1/S_2(K_3V_{100\%} + K_2V_{P.A.} - V_{RT} - K_4SBC) + r/S_2 \sum_0^t (K_3 V_{100\%} + K_2 V_{P.A.} - V_{RT} - K_4 SBC)dt + q/S_2\, d(K_3 V_{100\%} + K_2 V_{P.A.} - V_{RT} - K_4 SBC)/dt \qquad (7)$$

En esta ecuación se observa la característica de estatismo propia de este tipo de regulador, puesto que la señal básica de combustible es función de su valor original antes de ocurrido el cambio en el sistema.

En la Fig. 1.14. se presentan las curvas aproximadas de respuesta de los controles astático y estático.

1.4. Control de temperatura

1.4.1. Criterios de diseño del control de temperatura

Los criterios de diseño del control de temperatura son los siguientes:

1. El control de temperatura regula el flujo de combustible que entra a la turbina para mantener la temperatura de los gases de la combustión, dentro de los límites térmicos permisibles. Las temperaturas más altas se producen en los combustores y no se las mide porque los instrumentos utilizados sufrirían daños en un tiempo de operación corto. Además se tiene la dificultad de obtener un buen valor promedio de las

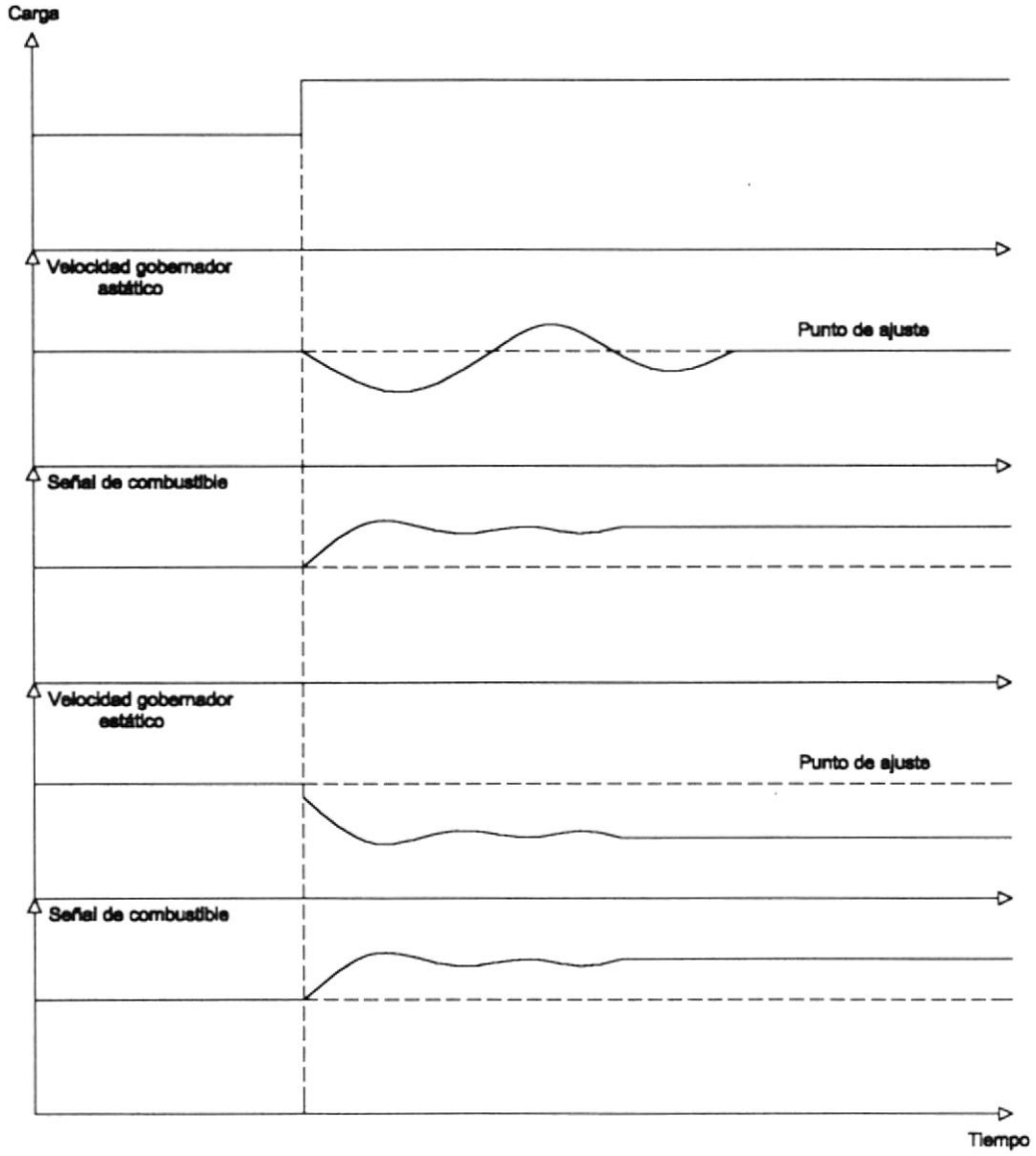


FIGURA 1.14. RESPUESTA DE LOS CONTROLES ASTÁTICO Y ESTÁTICO

temperaturas debido a la disposición disforme de los gases calientes en los combustores. Por lo indicado se realiza las mediciones de temperatura de una manera indirecta, se mide las temperaturas en el ducto de escape de los gases de combustión, estas temperaturas son más bajas y los gases tienen una mejor mezcla lo suficientemente uniforme como para obtener un valor promedio representativo.

2. La temperatura de escape de los gases de combustión es función de la presión de descarga del compresor, y se la indica en la siguiente ecuación:

$$Te = Tf / (Pdc / Pb)^{K} \qquad (8)$$

donde,

Tf = Temperatura de encendido

Te = Temperatura de escape de los gases de combustión

Pdc = Presión de descarga del compresor

Pd = Presión barométrica

K = Constante en función de las características de los gases y de la eficiencia de la máquina

La diferencia entre la presión de la turbina y la presión barométrica indica cuantas veces se comprime los gases de la combustión dentro de los combustores.

La importancia del parámetro presión de descarga del compresor se comprueba que una turbina a gas genera más energía en un día frío que en uno caluroso.

Esto se debe a que la densidad volumétrica del aire frío es mayor que la del aire caliente por lo que se comprime una mayor masa de aire produciendo una mayor relación de presión.

La presión de descarga del compresor cambia significativamente a medida que cambia la velocidad del compresor. Por el contrario, los cambios no son significativos cuando la unidad está operando a un valor de velocidad fijo y las condiciones de aire de entrada al compresor solo cambian en función de la temperatura o presión barométrica.

1.4.2. Diseño del control de temperatura

El diseño del control de temperatura comprende el sistema de medición de temperatura, control proporcional de temperatura, control de temperatura con compensación ambiental y control final de temperatura.

1. Sistema de medición de temperatura

La medición de la temperatura de escape de los gases se la realiza mediante termocuplas, las cuales son elementos constituidos por la unión de dos metales cubiertos por un

escudo de radiación para minimizar el error en la medición, las termocuplas tienen la propiedad de generar una señal de milivoltios en función de la temperatura sensada.

En la medición de la temperatura de escape de los gases se utiliza un número de termocuplás que oscila entre 13 y 24, instaladas alrededor del difusor de la turbina.

Las señales individuales de cada una de las termocuplas son alimentadas a un sistema donde se obtiene el promedio de las señales provenientes de las termocuplas y se compensa las señales de las termocuplas por unión fría y cortes.

Se produce una unión fría cuando los cables de una termocupla se conectan al elemento que entrega la señal. Esta unión fría produce un voltaje en función de la temperatura del punto de conexión y va a se opuesto a la señal de milivoltios generada por la termocupla. Las señales de las termocuplas también son afectadas por los cortes que se producen en los amplificadores y convertidores de señales. Para contrarrestar estos dos efectos se debe compensar la señal de temperatura.

El sistema de medición de temperatura se presenta en la Fig. 1.15.

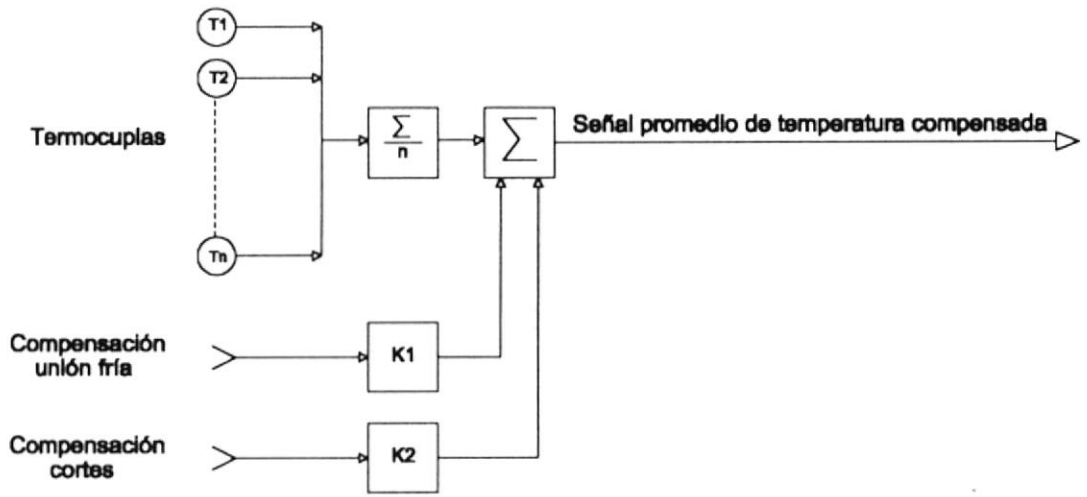


FIGURA 1.15. SISTEMA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Las señales generadas por las termocuplas son alimentadas a un elemento donde se obtiene la señal promedio, la cual es enviada a un elemento sumador, en donde se realiza la compensación por unión fría y cortes debidos a los amplificadores y convertidores. Del elemento sumador sale la señal promedio de temperatura compensada.

2. Control proporcional de temperatura

El control proporcional de temperatura se utiliza exclusivamente en turbinas a gas que trabajan a velocidad constante. En este control se fija la temperatura de escape de los gases requerida, la cual se compara con la temperatura de escape real.

Como se produce cambios en la temperatura ambiente a lo largo del funcionamiento de la unidad, es necesario ajustar el valor de temperatura de escape para poder compararlo con la temperatura requerida preajustada, este ajuste se lo realiza en base al flujo de combustible para mantener la temperatura de encendido. Es por esto que es necesario implementar en el control de temperatura una polarización por la señal de flujo de combustible (SBC).

El control proporcional de temperatura se presenta en la Fig. 1.16.

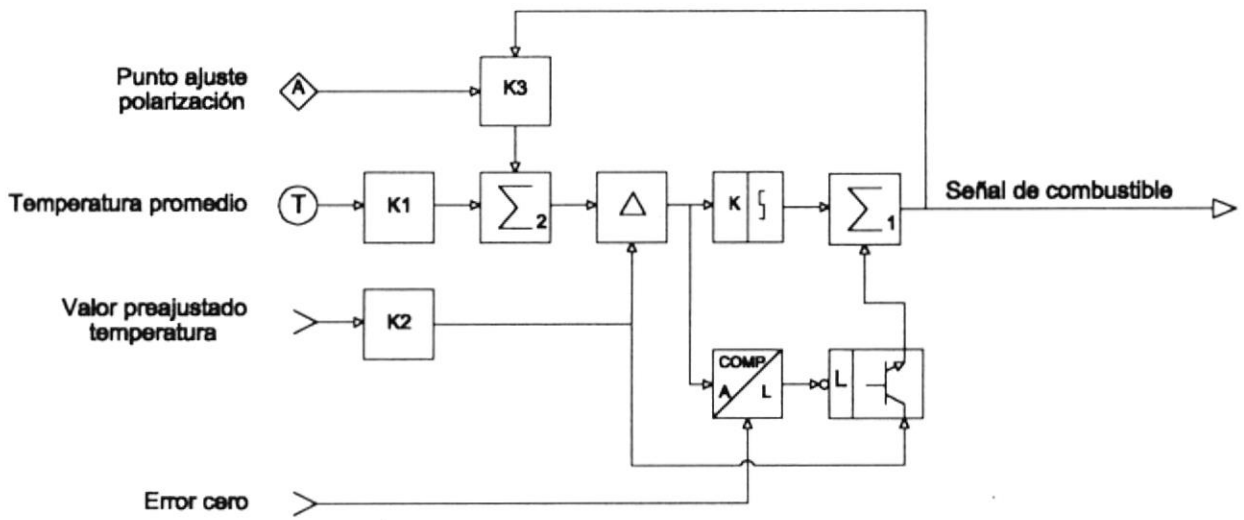


FIGURA 1.16. CONTROL PROPORCIONAL DE TEMPERATURA

La señal promedio de temperatura es amplificada por medio del elemento K1, del nivel de milivoltios a un voltaje DC proporcional a la temperatura de los gases. Esta señal va a un elemento sumador $\Sigma 2$ en donde se alimenta también la señal de flujo de combustible polarizada, la polarización de esta señal se la realiza en el elemento amplificador-proporcional K3 de amplificación variable.

La señal resultante que sale del elemento sumador $\Sigma 2$ es alimentada a un elemento diferencial Δ, en donde es comparada con el valor preajustado de temperatura y se genera la señal de error que es llevada al elemento proporcional-integral, el cual da la señal a un interruptor lógico cuando el error es diferente de cero para que este permita el paso de valor preajustado de temperatura al elemento $\Sigma 1$, en donde se suma el valor preajustado con la señal del control proporcional-integral. La señal de salida del elemento $\Sigma 1$ entrega la señal de combustible que regula la válvula moduladora.

3. Control de temperatura con compensación ambiental

El control de temperatura con compensación ambiental se utiliza en turbinas a gas cuya velocidad de operación es variable.

En este control las variaciones de temperatura del medio ambiente no afectan tanto como las variaciones de velocidad del compresor, por esto se debe compensar en función de la relación de expansión del gas (Pdc/Pb), puesto que esta relación varía considerablemente con los cambios de velocidad, produciéndose en consecuencia variaciones significativas en el valor de referencia de temperatura de escape. El control debe modificar el valor prefijado de temperatura de escape a medida que cambia la relación de expansión con el fin de mantener la temperatura de encendido de la turbina en un valor constante.

En este control se requiere una polarización en función de la presión de descarga del compresor.

El control de temperatura con compensación ambiental se presenta en la Fig. 1.17.

La señal promedio de temperatura es amplificada por el elemento K1. Esta señal se lleva a una elemento diferencial Δ, en donde es comparada con la señal de referencia de temperatura para generar la señal de error que es alimentada al elemento de control proporcional-integral, el cual da la señal a un interruptor lógico cuando el error es diferente de cero para que este permita el paso de la señal de referencia

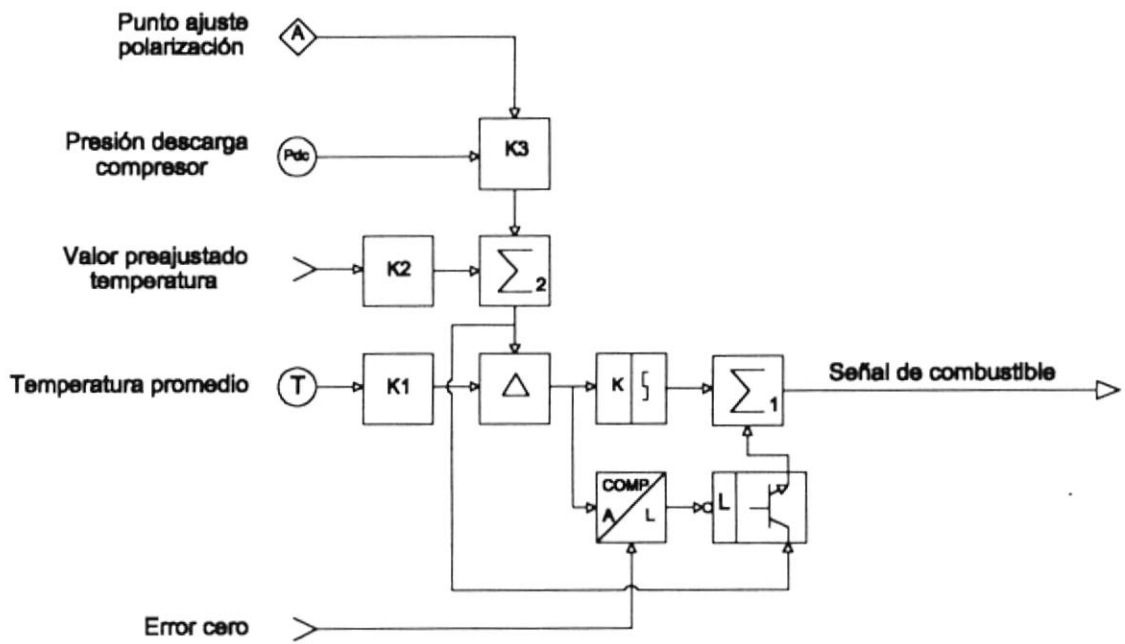


FIGURA 1.17. CONTROL DE TEMPERATURA CON COMPENSACIÓN AMBIENTAL

de temperatura al elemento sumador Σ1, en donde se suma la señal de referencia de temperatura con la señal del control proporcional-integral. La señal de salida del elemento Σ1 entrega la señal de combustible que regula la válvula moduladora.

La señal de referencia de temperatura se obtiene mediante el elemento sumador Σ2, donde se suma las señales de valor preajustado de temperatura y la presión de descarga del compresor Pdc polarizada.

La señal del transductor de la presión de descarga del compresor es amplificada por el elemento K3, el cual tiene ganancia ajustable.

4. Control final de temperatura

El control final de temperatura debe poder operar en cualquiera de las dos formas y también debe tener otras características indispensables para el control óptimo de una turbina a gas.

Las características principales que debe tener este control son:

- Capacidad de operar en cualquiera de las dos formas analizadas. Para esto se debe implementar un selector de

transferencia manual o automático (ST1), mediante el cual se puede escoger indistintamente el modo de operación.

- Capacidad de operar dentro del rango de temperaturas superiores a las normales durante las horas de mayor demanda. Para esto es necesario recalibrar el punto de ajuste de temperatura de escape a un valor más alto. El control debe tener un selector de transferencia manual o automático (ST2) que permita escoger entre estas dos temperaturas de escape.
- Controlar la temperatura en la de arranque de la turbina desde el momento en que termina el período de calentamiento hasta que gobierna el control de velocidad. El máximo incremento de temperatura es de 5°F por segundo, en el momento que se pase este límite el control inserta un valor de incremento menor que el límite permisible. Para esto la señal de temperatura de escape promedio se la lleva a un elemento derivativo que la transforma en una señal de incremento de temperatura en el tiempo y que es alimentada a un elemento monitor de señales (H/) que la compara con el valor límite de 5°F/seg. Cuando no se excede el límite la salida del monitor es una señal cero y cuando se pasa el límite la salida del monitor

va a un interruptor lógico que la bloquea hasta que termine el período de calentamiento y la turbina haya alcanzado el 95% de su velocidad de operación en la secuencia de arranque, para esto se usa una puerta lógica AND. La señal que sale del interruptor es alimentada a otro interruptor lógico el cual bloquea la señal SBC proveniente del elemento sumador $\Sigma 3$ cuando la puerta lógica AND se lo indique.

- Para tener mayor rapidez de respuesta se implementa una señal de demanda anticipatoria que es alimentada al elemento sumador $\Sigma 3$ donde también llega la señal resultante del control correctivo. La señal de demanda anticipatoria es la señal de referencia de temperatura amplificada por un elemento K5.

El control final de temperatura se presenta en la Fig. 1.18.

Las ecuaciones que permiten el cálculo de la señal final de control son las siguientes:

$$SBC = 1/S_3\, T_d + 1/S_4\, \Delta + r/S_4 \sum_{0}^{t} \Delta dt \qquad (9)$$

donde,

$$\Delta = T_d - T_{RG} - T_P, \text{ para control proporcional} \qquad (10)$$

$$\Delta = T_d - T_{RG}, \text{ para control con compensación ambiental} \qquad (11)$$

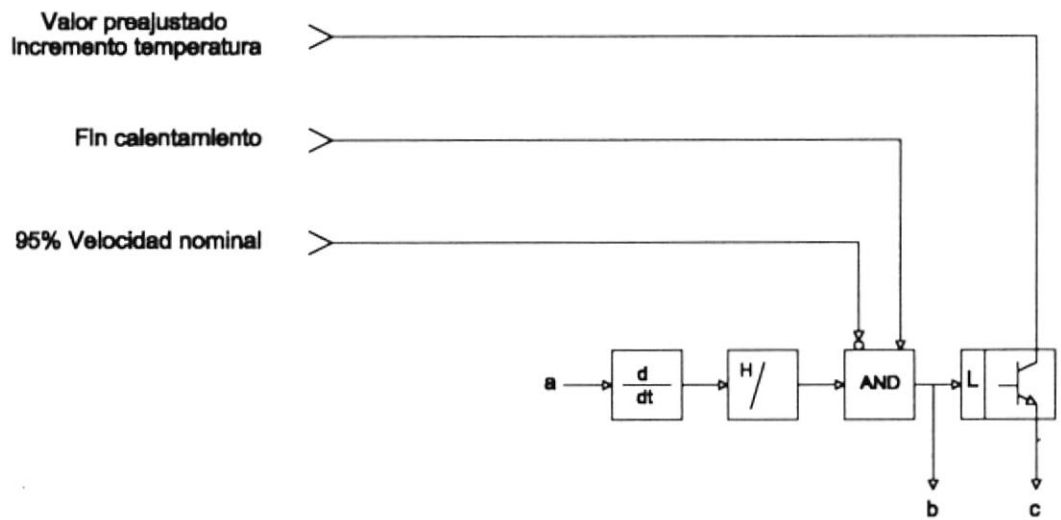


FIGURA 1.18.a CONTROL FINAL DE TEMPERATURA

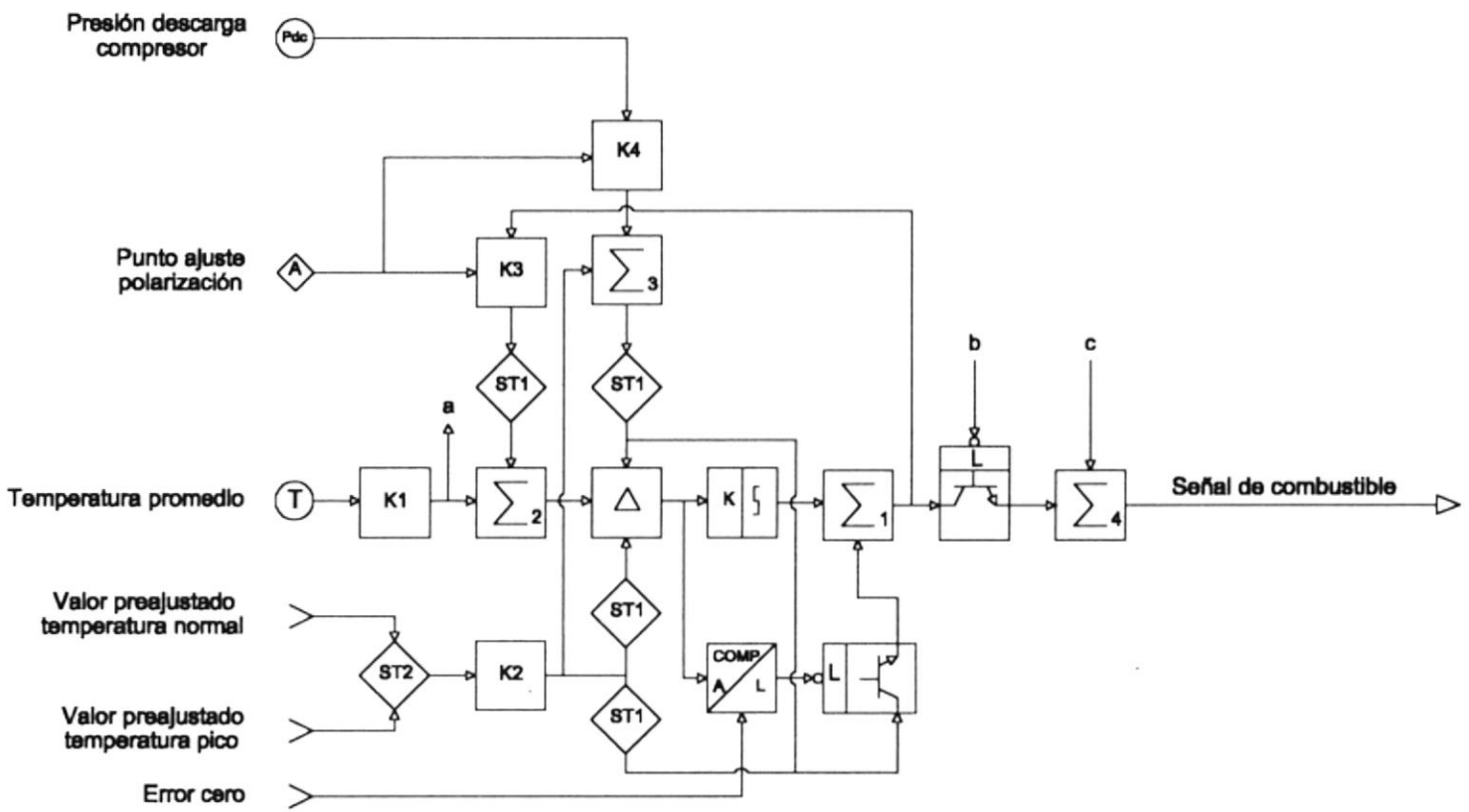


FIGURA 1.18.b CONTROL FINAL DE TEMPERATURA

Para control proporcional :

$$T_d = K_2\ T_{P.A.} \qquad (12)$$

$$.\ T_d = SBC\ tg\phi \qquad (13)$$

Para control con compensación ambiental

$$T_d = K_2\ T_{P.A.} - T_P \qquad (14)$$

$$T_p = (P_{dc}\ K_4)\ tg\phi \qquad (15)$$

Los términos utilizados son:

SBC, señal de flujo de combustible en unidades de medición

T_d, señal de demanda de temperatura en unidades de medición

Δ, error de temperatura en unidades de medición

T_{rg}, señal de temperatura real de los gases en unidades de medición

T_P, señal polarizadora de SBC y P_{dc} en unidades de medición

$T_{P.A.}$, punto de ajuste de temperatura en unidades de medición

$tg\phi$, valor de la tangente del ángulo de polarización de SBC y P_{dc}

r, velocidad de reajuste (en minutos)-1

t, tiempo en minutos

S_3, banda proporcional en porcentaje

S_4, banda proporcional en porcentaje

Luego de definidos los términos que intervienen en la ecuación general (9), se desarrollan las ecuaciones propias de cada tipo de control de temperatura.

Control proporcional de temperatura

$$SBC = 1/S_3\,(K_2\,T_{P.A}) + 1/S_4\,(K_2\,T_{P.A.} - T_{RG} - SBC\,tg\phi) + r/S_7 \sum_{0}^{t}(K_2\,T_{P.A.} - T_{RG} - SBC\,tg\phi)dt \qquad (16)$$

De esta ecuación el término $1/S_3\,(K_2\,T_{P.A})$ representa la señal de demanda anticipatoria y es el más representativo del control por cuanto es el encargado de incrementar la rapidez de respuesta, tomando una acción correctiva antes de que comience a cambiar la temperatura de los gases de combustión.

La particularidad de este control es que la señal final depende de su propio valor SBC, lo que le dá estabilidad puesto que la señal de error actuante es minimizada y por lo tanto el error cero es encontrado fácilmente.

Control de temperatura con compensación ambiental

$$SBC = 1/S_3\,(K_2\,T_{P.A} - P_{dc}\,K_4\,tg\phi) + 1/S_4\,(K_2\,T_{P.A.} - P_{dc}\,K_4\,tg\phi - T_{RG}) + r/S_4 \sum_{0}^{t}(K_2\,T_{P.A.} - P_{dc}\,K_4\,tg\phi - T_{RG})dt \qquad (17)$$

En esta ecuación el primer término es el más representativo por constituír la señal anticatoria de demanda. Los otros dos

términos son influyentes solo cuando se presenta una señal de error.

1.5. Control de combustible

1.5.1. Criterios de diseño del control de combustible

Los criterios de diseño del control de combustible son los siguientes:

1. El control de combustible regula el flujo de combustible de acuerdo a la demanda de gases de la combustión sin arriesgar la vida útil de la unidad.
2. Debido a que el flujo de combustible es el parámetro final de control en una turbina a gas, el criterio básico para la concepción del sistema general del control, es que "el sistema que demande la menor cantidad de combustible para la operación normal de la turbina, es el que gobierna la unidad.

   Para cumplir con el criterio indicado, las salidas de los tres sistemas básicos de control de arranque y parada, velocidad y temperatura son alimentadas a un circuito que selecciona la menor de las señales y por esta razón se llama compuerta de valor mínimo. Debe especificarse que hay una relación directa entre la señal de entrada a la "compuerta de valor

mínimo" y el flujo de combustible que entra a la turbina por lo que al pasar la menor de las señales, el flujo de combustible demandado es el menor.

La salida de la compuerta de valor mínimo alimenta al sistema de combustible que regula el caudal de combustible requerido por el sistema de control gobernante de la unidad.

El control de la menor señal de combustible se presenta en la Fig. 1.19.

Las señales de los controles de secuencia de arranque y parada, velocidad y temperatura van a los elementos K1, K2 y K3 respectivamente.

Luego las tres señales son introducidas a un circuito que selecciona la menor de ellas y por consiguiente corresponde a la menor demanda de combustible.

1.5.2. Diseño del control de combustible

El diseño del control de combustible comprende el sistema de combustible con bomba principal del tipo de desplazamiento variable y sistema de combustible con bomba principal del tipo de desplazamiento fijo.

1. Sistema de combustible con bomba principal del tipo de desplazamiento variable

Este sistemá es el más simple por cuanto responde

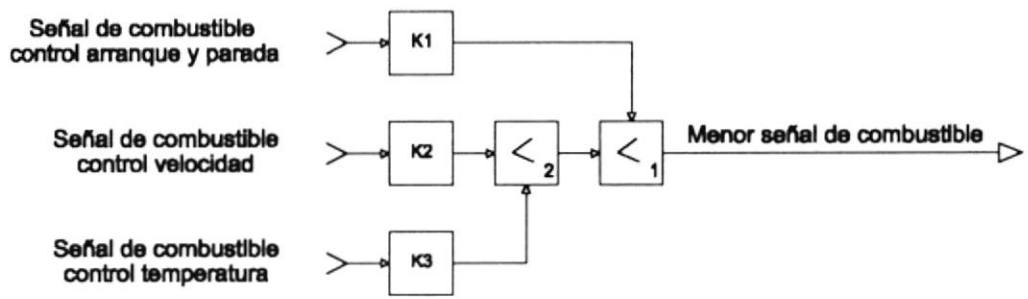


FIGURA 1.19. CONTROL DE MENOR SEÑAL DE COMBUSTIBLE

únicamente a la menor señal de combustible de los controles de arranque, velocidad y temperatura.

El sistema de combustible con bomba principal del tipo de desplazamiento variable se presenta en la Fig. 1.20.

En este sistema, el elemento final de control es una válvula moduladora de combustible y se tiene un elemento que determina la posición de la válvula. La operación de la válvula moduladora permite el incremento o decremento del flujo de combustible a la turbina en función de la carga de la unidad y a un determinado valor de la carga corresponde una determinada apertura de la válvula moduladora.

El control de combustible del sistema considerado se presenta en la Fig. 1.21.

La menor señal de combustible va a un elemento amplificador K1, luego va al elemento Δ para establecer el error con respecto la señal indicadora de la posición actual de la válvula moduladora de combustible. La señal que indica la posición de la válvula es generada mediante un transformador diferencial de variación lineal (LVTD).

La señal de error es enviada a un elemento de control proporcional e integral y luego se suma en la menor señal de

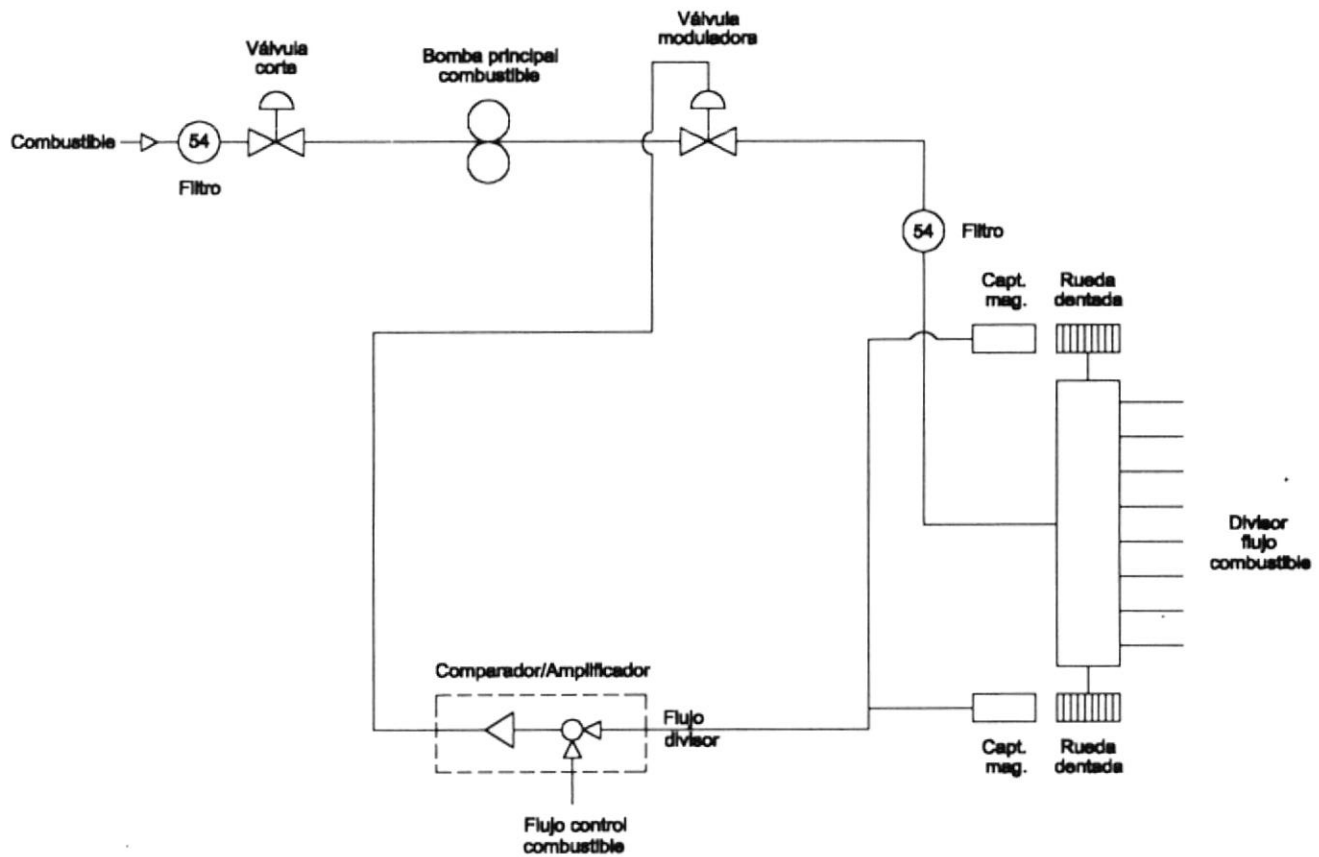


FIGURA 1.20. SISTEMA DE COMBUSTIBLE CON BOMBA PRINCIPAL DEL TIPO DE DESPLAZAMIENTO VARIABLE

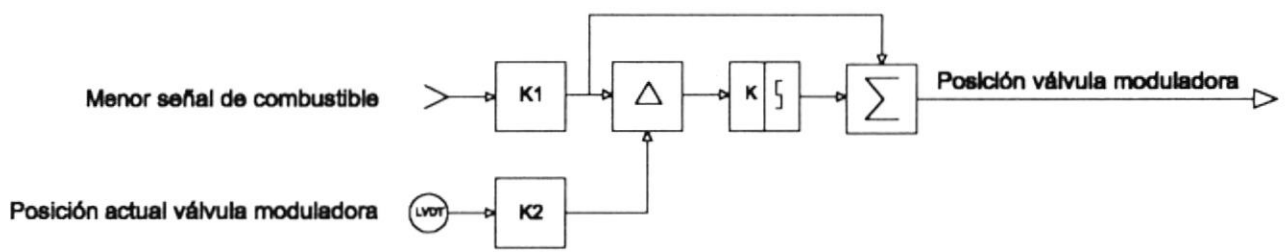


FIGURA 1.21. CONTROL DE COMBUSTIBLE EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN DE LA SERVO-VÁLVULA

combustible y se obtiene la señal que determina la posición de la válvula moduladora.

La posición de la válvula moduladora se la determina por medio de la siguiente ecuación:

$$P = 1/S_5 MSBC + 1/S_6 (K_1 MSBC - LVDT) + r/S_2 \sum_{0}^{t} (K_1 MSBC - LVDT)dt \qquad (18)$$

P, posición requerida de la válvula moduladora en unidades de medición

MSBC, menor señal de combustible medida

LVDT, señal indicadora de la posición real de la servo válvula en unidades de medición

S_5, banda proporcional en porcentaje

S_6, banda proporcional en porcentaje

r, velocidad de ajuste en minutos^{-1}

t, tiempo en minutos

2. Sistema de combustible con bomba principal del tipo de flujo constante

El sistema de combustible con bomba principal del tipo de flujo constante se presenta en la Fig. 1.22.

En el sistema, el combustible es suministrado a la bomba principal de combustible a través de un filtro de baja presión y una válvula de corte de combustible que permanece abierta

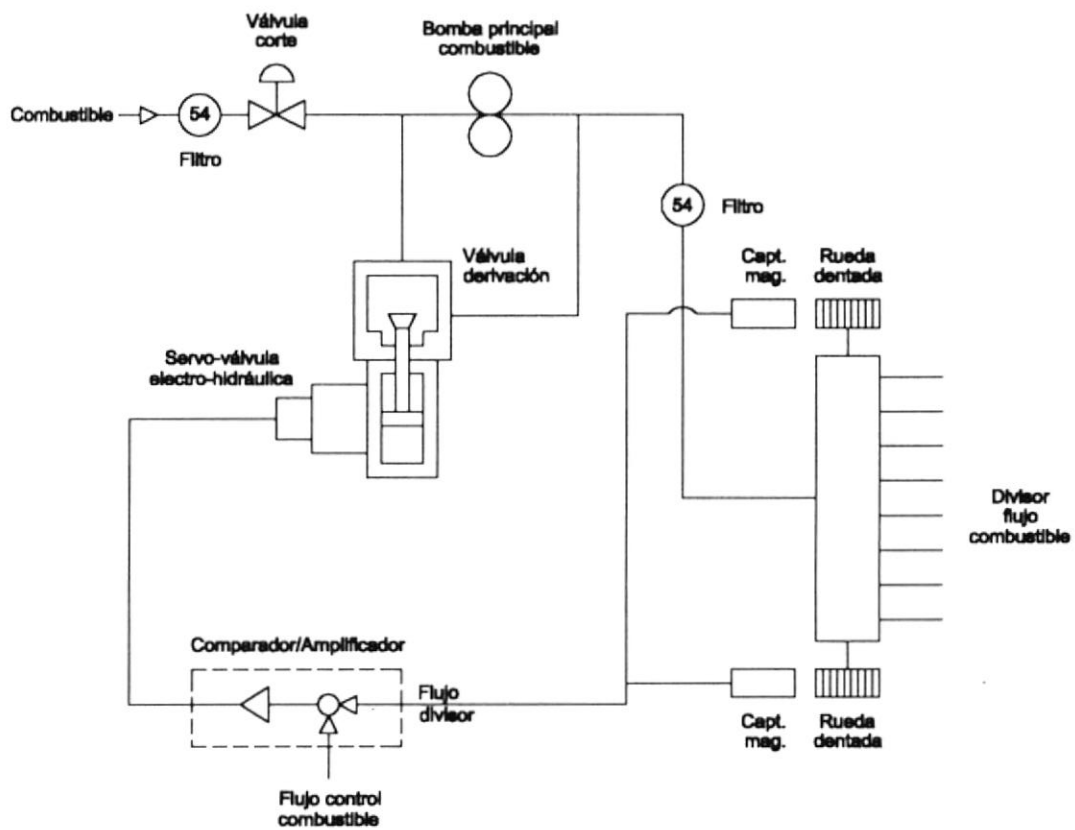


FIGURA 1.22. SISTEMA DE COMBUSTIBLE CON BOMBA PRINCIPAL DEL TIPO DE FLUJO CONSTANTE

cuando se cumplen las condiciones necesarias de presión de aceite. El flujo de combustible proveniente desde la bomba de combustible principal se divide en dos, una parte va a la válvula de derivación y otra parte va al divisor de flujo de combustible.

La válvula de derivación es la encargada de quitar el exceso de combustible impulsado por la bomba, dejando la cantidad de combustible necesaria para la condición de carga existente y envía el excedente a la entrada de la bomba principal. Esta válvula es actuada por un cilindro hidráulico que a su vez es accionado por una servo-válvula electro-hidráulica, y esta última compara el flujo de combustible en el divisor de combustible con el flujo de combustible requerido para las condiciones de carga, esto se realiza en un elemento comparador-amplificador.

La cantidad de combustible exigida por las condiciones de carga, luego de pasar por un filtro de alta presión, va a un divisor de flujo de combustible cuya función es la de repartir el flujo de combustible a los combustores en partes iguales.

Dos sensores magnéticos situados en los extremos del divisor de flujo mide la cantidad de flujo de combustible que fluye a través de este. Los sensores dan una señal de pulso

a una frecuencia proporcional a la velocidad de flujo, la que a su vez es proporcional a la cantidad de combustible entregada a las combustores.

En este sistema el elemento final de control es una válvula de derivación. Esta válvula es controlada por una servo válvula electro-hidráulica, por lo que se puede asumir que el elemento final a controlar es la servo válvula.

El control de combustible del sistema considerado se presenta en la Fig. 1.23.

El control tiene que responder a dos variables principales:

- Menor señal de combustible (MSBC)
- Velocidad de la turbina (N)

La menor señal de combustible (MSBC) es convertida de lógica a analógica y llevada a un elemento proporcional-amplificador K1, el cual esta regulado por la señal de velocidad de la turbina (N).

La señal de salida del elemento K1 es alimentada a un elemento diferencial Δ a donde llega también la señal que representa el flujo de combustible (Fr) que entra a la turbina. La señal Fr viene de una elemento proporcional-amplificador K2 y es la señal generada por los sensores magnéticos de velocidad de flujo de combustible.

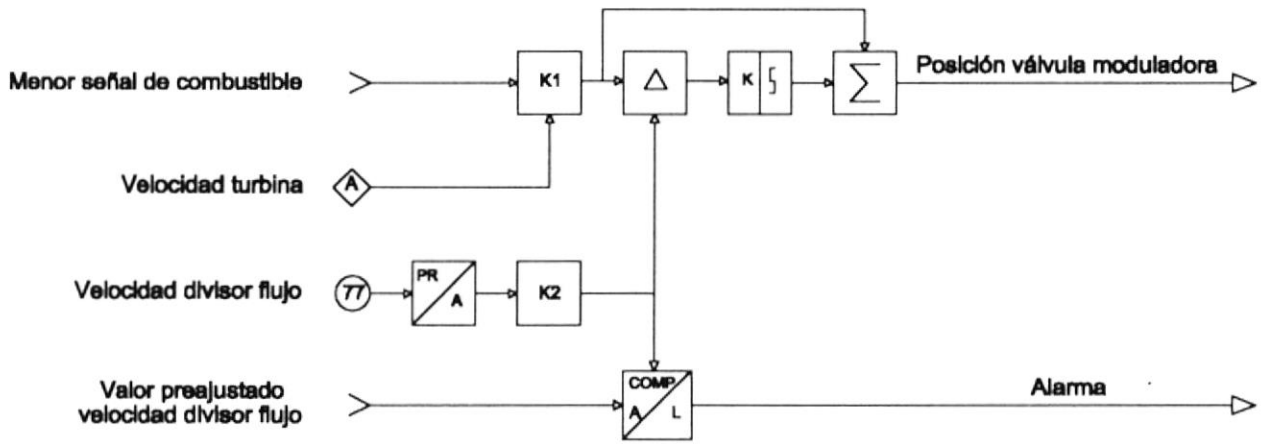


FIGURA 1.23. CONTROL DE COMBUSTIBLE EN FUNCIÓN DEL FLUJO DE COMBUSTIBLE

La señal de error que sale del elemento diferencial Δ va a un elemento de control proporcional-integral y luego a un elemento sumador Σ, donde se suma con la señal proveniente de elemento K1. La señal que sale del elemento sumador Σ constituye la señal que controla la posición de la servo válvula electro-hidráulica.

El control cuenta con una señal de alarma la cual se activa cuando la velocidad de descarga de combustible en el divisor de flujo sobrepasa un cierto valor preajustado, esto con el fin de alertar sobre una posible falla de los sensores de velocidad del divisor de flujo.

La posición de la servo válvula electro-hidráulica se la determinada por medio de la siguiente ecuación:

$$P = 1/S_5 MSBC + 1/S_6 (MSBC - F_r) + r/S_6 \sum_{0}^{t}(MSBC - F_r)dt \quad (19)$$

donde:

$$Fr = (Vdf)\, K_2 \quad (20)$$

Los términos utilizados representan:

MSBC, señal de flujo de combustible correspondiente a la velocidad de la unidad.

F_r, flujo de combustible en el divisor de flujo en unidades de medición

V_{df}, velocidad del divisor de flujo en unidades de medición

S_5, banda proporcional en porcentaje

S_6, banda proporcional en porcentaje

r, velocidad de reajuste en minutos-1

t, tiempo en minutos

1.6. Control de compresor

1.6.1. Criterios de diseño del control de compresor

Los criterios de diseño del control de compresor son los siguientes:

1. El control de compresor regula el flujo de aire que entra al compresor. Este control regula el flujo de aire cuando varía el flujo de combustible durante el período de arranque de la unidad y debido a cambios en la carga para mantener la relación combustible-aire y la combustión sea perfecta.
2. Este control compara la cantidad de aire que existe dentro de la cámara de combustión con la cantidad de combustible que es introducida en ella. La cantidad de aire esta en proporción directa a la presión de descarga del compresor, es decir, a una mayor presión de descarga hay una mayor cantidad de aire.

3. El control del aire de entrada al compresor se lo realiza mediante unas guías o aspas que se encuentran a la entrada del compresor, las cuales permiten un ingreso controlado de aire mediante el ángulo de rotación.

1.6.2. Diseño del control de compresor

El diseño del control de compresor comprende la condición de arranque, condición de carga y control de compresor.

1. Condición de arranque

El período de arranque de la unidad considera el encendido y calentamiento, y la aceleración.

- Encendido y calentamiento, para que en el encendido de la unidad se logre la relación combustible-aire, las guías de aire giran hasta el ángulo de encendido, esta abertura deja pasar la cantidad de aire necesaria para que se produzca la relación combustible-aire, la cual da una combustión perfecta. Se mantiene este ángulo también durante el período de calentamiento, debido a que el flujo de combustible no es aumentado.
- Aceleración, durante el período de aceleración el flujo de combustible se aumenta hasta que la turbina llegue a la velocidad nominal sin carga, por lo cual las guías de aire giran hasta el ángulo de velocidad nominal sin carga o

ángulo mínimo de velocidad nominal para mantener la relación combustible-aire.

2. Condición de carga

Cuando la turbina alcanza la velocidad nominal, la unidad empieza a tomar carga, por lo cual hay que aumentar el flujo de combustible, pero no se aumenta el flujo de aire debido a que primero se debe alcanzar la temperatura deseada de escape de gases. Esta temperatura se alcanza con la cantidad de combustible que se requiere para tener una carga del 30% de la nominal. Entre el 30% y 50% de carga nominal, se varía el ángulo de las guías de aire desde el ángulo mínimo de velocidad nominal hasta el ángulo máximo de velocidad nominal, siendo este último de 90° grados, para mantener los porcentajes de aire y combustible adecuados. Desde el 50% de carga nominal en adelante se sigue aumentando el flujo de combustible, pero no se aumenta el ángulo de las guías de aire, a pesar que la relación combustible-aire no se mantiene, la combustión es casi perfecta y lo que interesa es que se no varíe la temperatura de escape. La variación del ángulo de las guías de aire se presenta en la Fig. 1.24.

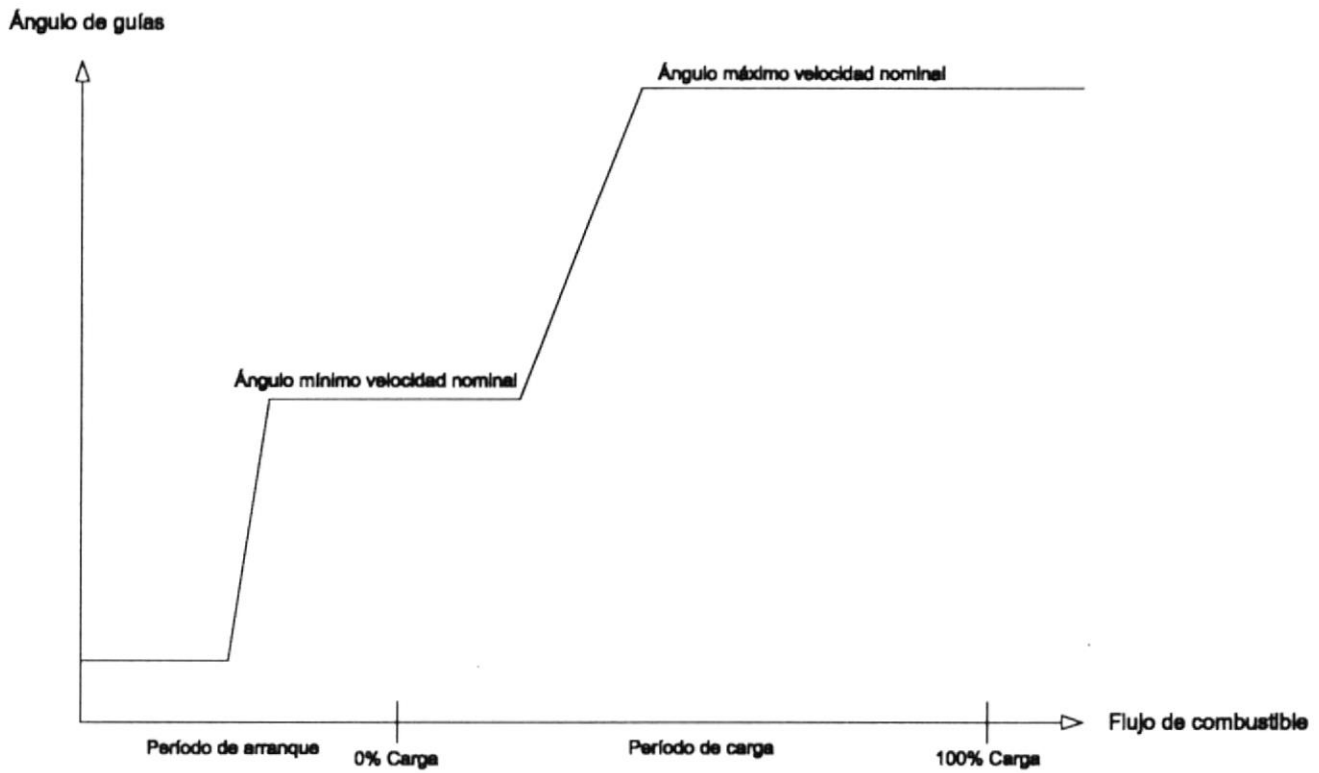


FIGURA 1.24. PROGRAMA DE VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE LAS GUÍAS DE AIRE

3. Control de compresor

En el control de compresor las señales de presión de descarga del compresor y velocidad de flujo del divisor de combustible son llevadas a los elementos amplificadores-proporcionales K1 y K2 respectivamente y luego al elemento diferencial Δ. Estas señales son arregladas de tal manera que si se mantiene los porcentajes de combustible y aire para una combustión perfecta, la comparación de estas señales en el elemento diferencial Δ debe ser cero. Si la cantidad de combustible es mayor que la cantidad de aire el error es positivo, por lo que las guías de aire deben abrirse para que ingrese más aire. Si la cantidad de combustible es menor que la cantidad de aire el error es negativo, por lo que las guías deben cerrarse. El error del elemento diferencial Δ va a los controles proporcional e intregal, de los cuales se obtiene la señal que regula las guías de aire.

Para inhibir la señal de error durante la condición de toma de carga, se utiliza un interruptor lógico 1, el cual interrumpe la señal cuando la carga es menor al 30% de la nominal.

Para que el ángulo de las guías de aire no aumente después de alcanzar el 50% de carga nominal se inhibe la señal mediante un interruptor lógico 2, el cual no permite que la

señal de error pase, si los sensores de posición de las guías de aire indican que el ángulo es máximo.

El control de compresor se presenta en la Fig. 1.25.

La señal de control que regula las guías de aire se la obtiene a partir de la siguiente ecuación matemática:

$$EC = 1/S_7\,(K2\,F_r - K1\,P_{dc}) + r/S_8 \sum_{0}^{t}(K2\,F_r - K1\,P_{dc})dt \quad (21)$$

EC, señal de error

Fr, flujo de combustible en el divisor de flujo en unidades de medición

Pdc, presión de descarga del compresor en unidades de medición

S_7, banda proporcional en porcentaje

S_8, banda proporcional en porcentaje

r, velocidad de reajuste en minutos^{-1}

t, tiempo en minutos

1.7. Control de inyección de agua

1.7.1. Criterios de diseño del control de inyección de agua

Los criterios de diseño del control de inyección de agua son los siguientes:

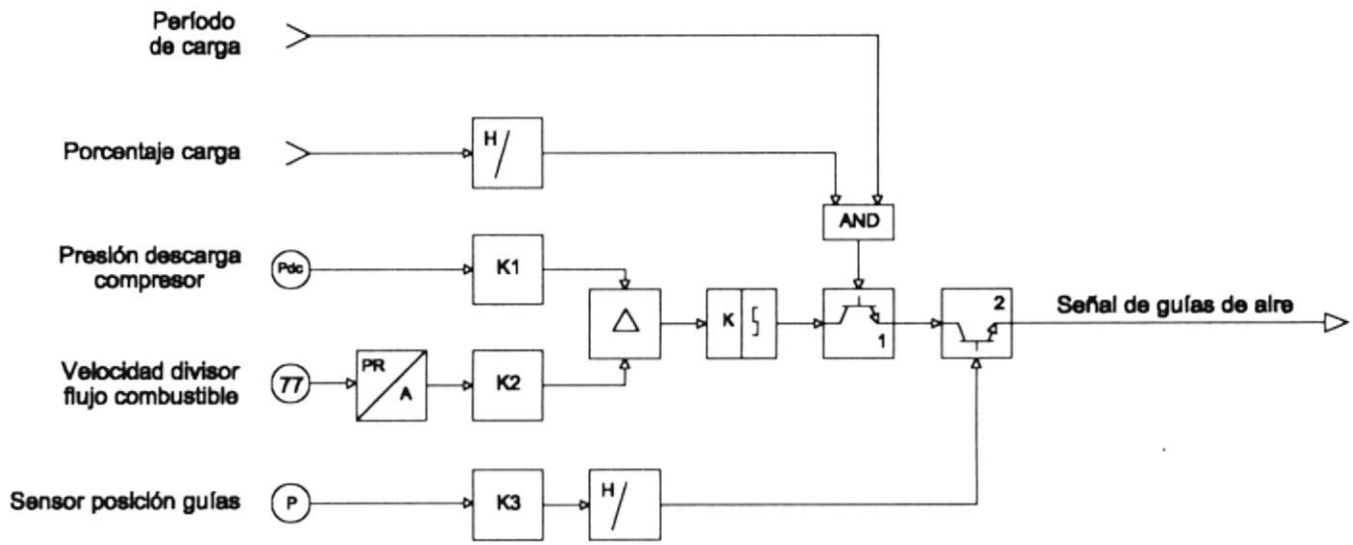


FIGURA 1.25. CONTROL DE COMPRESOR

1. El control de inyección de agua regula el flujo de agua al sistema de combustión para restringir las emisiones de óxidos de nitrógeno, las cuales estan reguladas por la ley de emisiones de gases.
2. La cantidad de agua que se inyecta a la cámara de combustión es una función del flujo de combustible y de la temperatura ambiente, debido a que de estas variables depende el incremento o disminución de los óxidos de nitrógeno. La cantidad de agua que se debe inyectar según la cantidad de combustible se la determina haciendo pruebas de emisión en el lugar donde se instala la unidad.
3. Un sistema básico de inyección de agua está constituido por los siguientes elementos:
   - Una bomba de agua, la cual debe tener sensores de baja presión en los lados de succión y descarga.
   - Dos filtros, uno en el lado de descarga de la bomba de agua y el otro en el lado de succión de la bomba de agua para proteger que elementos extraños contaminen la bomba de agua, los aparatos de control y las tuberías de agua.
   - Una válvula solenoide de corte de ingreso de agua en caso de qúe se produzca un emergencia.

- Una válvula de control de agua o válvula moduladora, la cual regula el ingreso de agua al sistema.
- Un divisor de flujo de agua, el cual se encarga de repartir el flujo de agua entre los combustores y en parte iguales. El divisor tiene dos sensores magnéticos situados en los extremos, los cuales miden el flujo de agua en base a su velocidad de descarga.

El sistema básico de inyección de agua se presenta en la Fig. 1.26.

1.7.2. Diseño del control de inyección de agua

El diseño del control de inyección de agua comprende la condición de arranque y operación normal, y control de inyección de agua.

1. Condición de arranque y operación normal

El flujo de agua debe estar presente desde el encendido de la mezcla combustible-aire, debido a que en este momento se produce las mayores emisiones de óxidos de nitrógeno y se mantiene estas emisiones durante el calentamiento de la unidad debido a que el flujo de combustible no es aumentado.

Durante la aceleración de la unidad, el flujo de agua se incrementa porque las emisiones de óxidos de nitrógeno

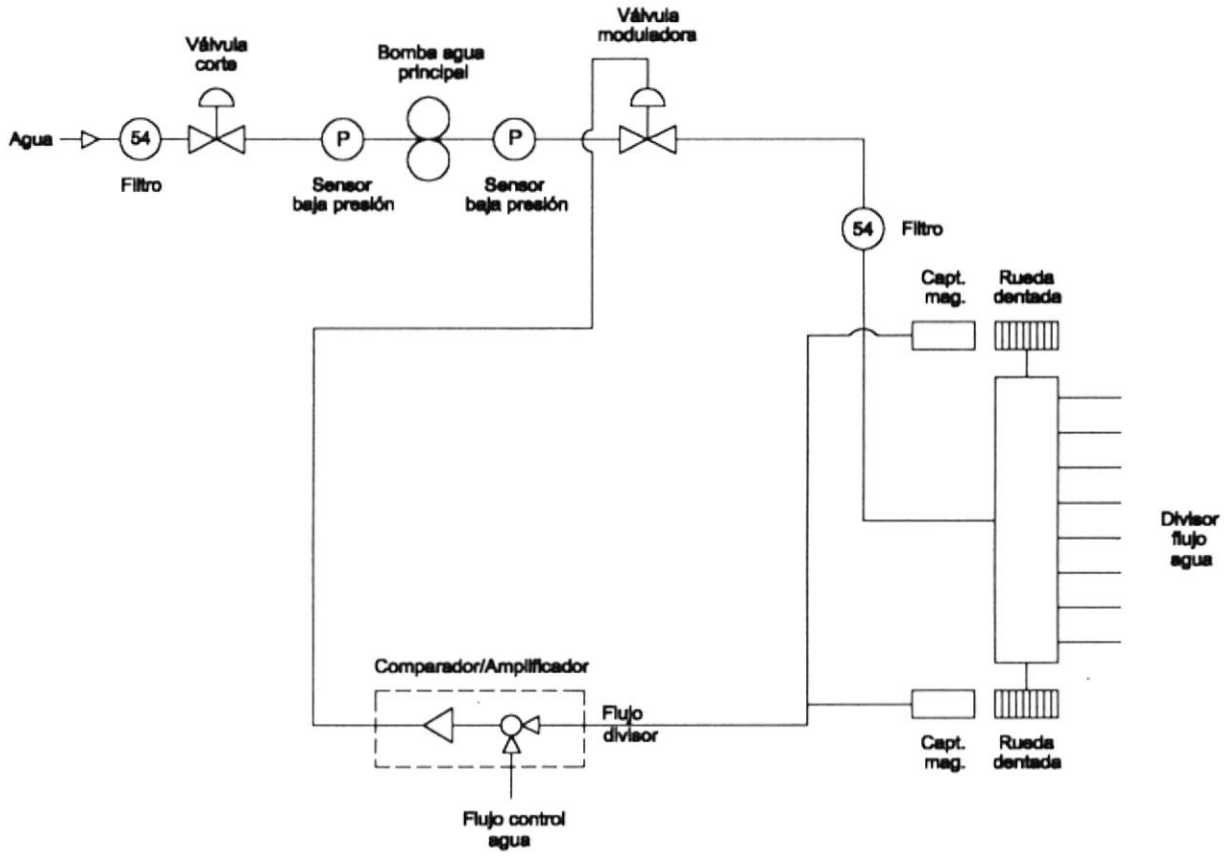


FIGURA 1.26. SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA

aumentan significativamente debido a la rapidez con la que se inyecta el combustible y al incremento brusco de combustible. Durante la operación normal no se aumenta la cantidad de agua que se inyecta a la cámara de combustión porque el flujo de combustible aunque varía en cantidad no es incrementado rápidamente.

2. Control de inyección de agua

La señal de velocidad de flujo del divisor de agua va a un elemento proporcional-amplificador K1, luego de pasar por un convertidor de pulsos, y de ahí va a un elemento sumador, en el cual se compensa esta señal por la temperatura ambiente. En los elementos amplificadores-proporcionales K3 y K4 son arregladas la señal compensada de flujo de agua y la señal de flujo de combustible, de tal manera que si se mantiene la relación para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno al mínimo, la comparación de las señales en el elemento diferencial Δ debe ser cero. El error del elemento diferencial Δ pasa a los controles proporcional e integral, de los cuales se obtiene la señal que regula la válvula moduladora.

Para inhibir la señal de error una vez que la unidad se encuentra a velocidad nominal sin carga, se usa un

interruptor lógico, el cual impide el paso de la señal de error si la cantidad de flujo de combustible es mayor que la necesaria para mantener esta velocidad.

El control de inyección de agua se presenta en la Fig. 1.27.

La señal de control que regula la válvula moduladora se la obtiene de la siguiente ecuación matemática:

$$EI = 1/S_9\,(K4\,F_r - K3\,F_{ac}) + r/S_{10}\,\sum_{0}^{t}(K4\,F_r - K3\,F_{ac}) \quad (22)$$

donde,

$$Fac = (\,K1\,Fa + K2\,Tam\,) \quad (23)$$

EI, señal de error

Fr, flujo de combustible en el divisor de flujo en unidades de medición

Fac, flujo de agua en el divisor de flujo compensado en unidades de medición

Fa, flujo de agua en el divisor de flujo en unidades de medición

Tam, temperatura ambiente en grados

S_9, banda proporcional en porcentaje

S_{10}, banda proporcional en porcentaje

r, velocidad de reajuste en minutos^{-1}

t, tiempo en minutos

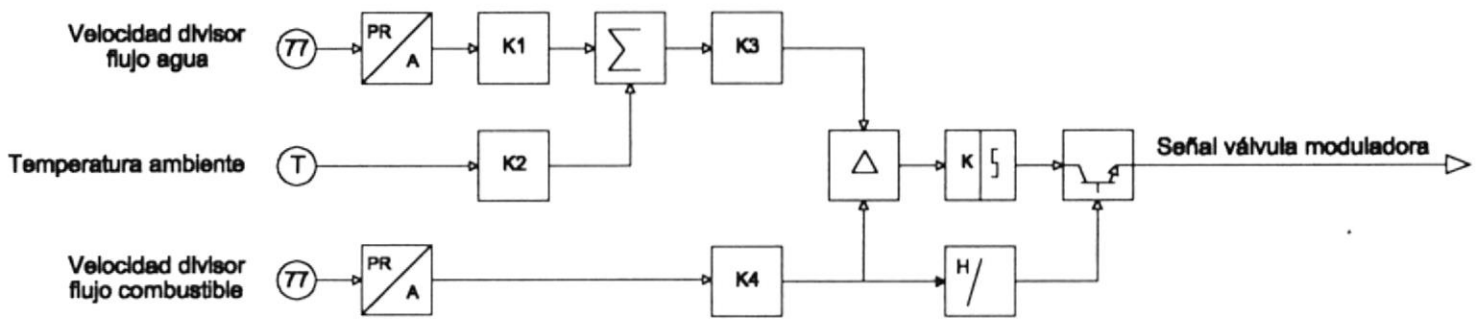


FIGURA 1.27. CONTROL DE INYECCIÓN DE AGUA

1.8. Control de lubricación

1.8.1. Criterios de diseño del control de lubricación

Los criterios de diseño del control de lubricación son los siguientes:

1. El control de lubricación mantiene constante la presión de aceite del sistema hidráulico, debido a que el sistema hidráulico controla la válvula de control de combustible, a las guías de aire del compresor y al embrague de arranque.
2. Si la presión disminuye, el sistema hidráulico no puede funcionar adecuadamente, y si la presión aumenta se pone en peligro las tuberías de aceite, ya que estas pudieran no resistir y se romperían, provocando una disminución de presión.
3. Un sistema hidráulico básico está constituido por los siguientes elementos:
   - Una bomba de aceite principal, la cual debe entregar el aceite en la presión y cantidad necesarias y es accionada por el eje de la turbina.
   - Una bomba de aceite auxiliar, la cual es accionada por un motor de corriente alterna y se la utiliza cuando la bomba principal se encuentra a baja velocidad en la secuencia de

arranque y sale de servicio cuando alcanza la presión de trabajo o cuando falla la bomba principal.

- Un filtro a la entrada del divisor de flujo de aceite para proteger que elementos extraños muy pequeños impidan la correcta distribución del flujo de aceite.
- Un filtro en la entrada de cada bomba para evitar que elementos extraños las dañen.
- Una válvula solenoide de corte de ingreso de aceite en caso de que se produzca una condición de emergencia.
- Un enfriador, el cual sirve para refrigerar el aceite y que no pierda sus características físicas y químicas.
- Una válvula de control o válvula moduladora, la cual regula el ingreso de aceite al enfriador en función de la temperatura y es controlada por un sensor de temperatura que se encuentra a la salida del enfriador.
- Un divisor de flujo de aceite, el cual reparte el flujo de aceite a los diferentes elementos de control.
- Un sensor de presión a la entrada del divisor de flujo de aceite, el cual pone en servicio la bomba auxiliar si la presión de trabajo disminuye.

El sistema hidráulico básico de presenta en la Fig. 1.28.

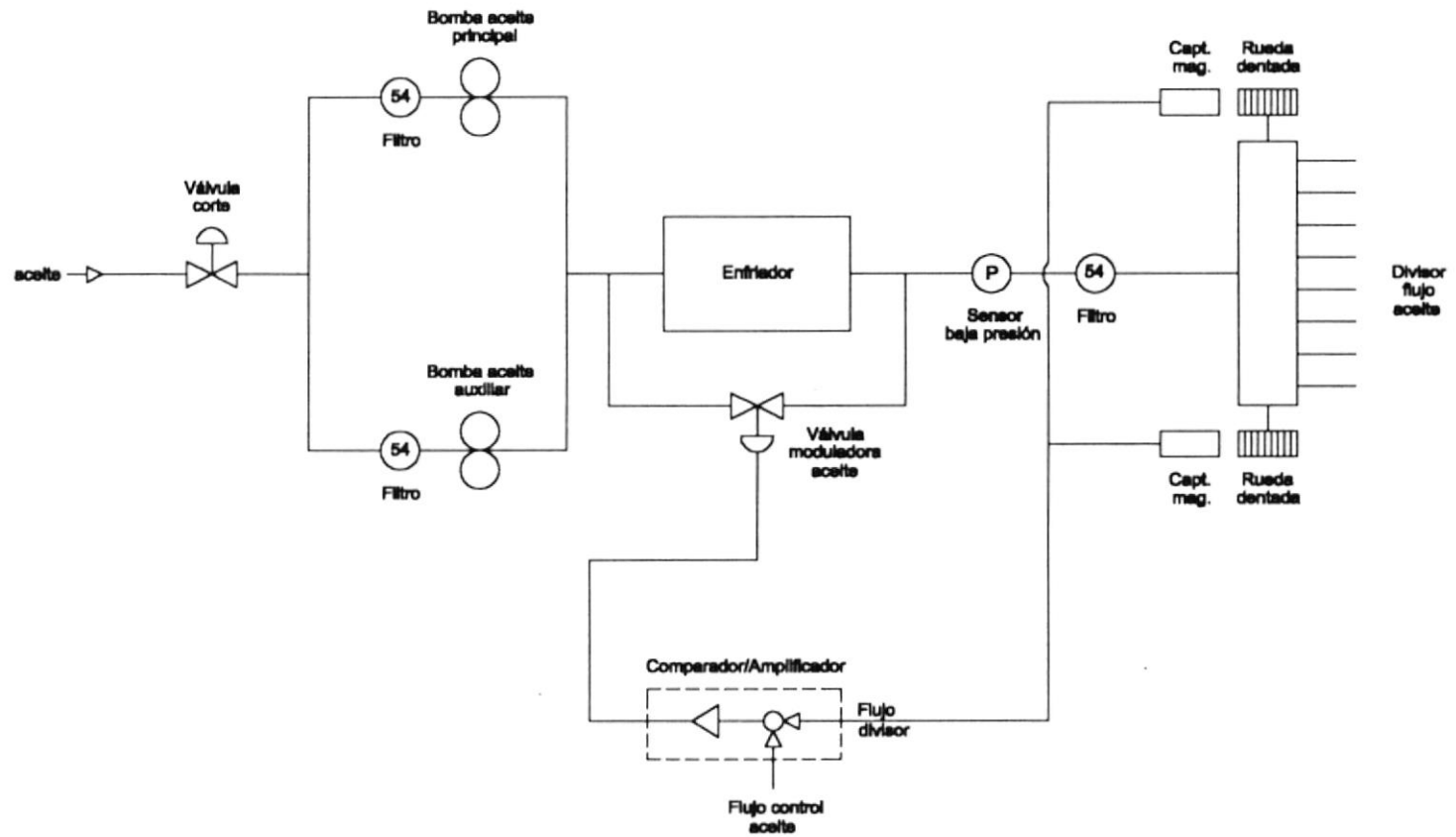


FIGURA 1.28. SISTEMA HIDRÁULICO

1.8.2. Diseño del control de lubricación

El diseño del control de lubricación comprende la condición de operación y el control de lubricación.

1. Condición de operación

La bomba principal, que funciona acoplada al eje de la unidad, comienza a trabajar en el momento que el motor de arranque empieza a girar el eje de la turbina. Como la velocidad del eje incrementa lentamente la bomba principal no puede proporcionar la presión requerida por el sistema hidráulico, por lo que se arranca la bomba auxiliar. La bomba auxiliar sale de servicio cuando se alcanza la presión de trabajo. Si por alguna razón se pierde presión se pone en servicio la bomba auxiliar y si las dos bombas no pueden mantener o alcanzar la presión de trabajo, se saca de servicio a la unidad.

2. Control de lubricación

La señal de presión entra a un elemento amplificador-proporcional K1 y de ahí va a un elemento comparador. Este elemento verifica que la señal de presión sensada sea mayor que el límite menor de presión, en el momento que es menor envía una señal de arranque a la bomba auxiliar.

La señal de temperatura sensada entra a un elemento amplificador-proporcional K3 y de ahí pasa a un elemento diferencial Δ, donde se establece el error con la señal de temperatura requerida, esta señal de error se suma en el elemento sumador con la señal de posición de la válvula, para establecer la nueva posición de la válvula y luego va a los controles proporcional e integral.

El control hidráulico se lo presenta en la Fig. 1.29.

La señal de control que regula la válvula moduladora se la puede obtener a partir de la siguiente ecuación matemática:

$$P_V = 1/S_{11}\, Pv + 1/S_{12}\,(K2\, T_s - K3\, T_r) + r/S_{12} \sum_{0}^{T} (K2\, T_s - K3\, T_r)dt \qquad (24)$$

P_V, señal de posición de válvula moduladora en unidades de medición

Ts, temperatura sensada en grados

Tr, temperatura requerida en grados

S_{11}, banda proporcional en porcentaje

S_{12}, banda proporcional en porcentaje

r, velocidad de reajuste en minutos^{-1}

t, tiempo en minutos

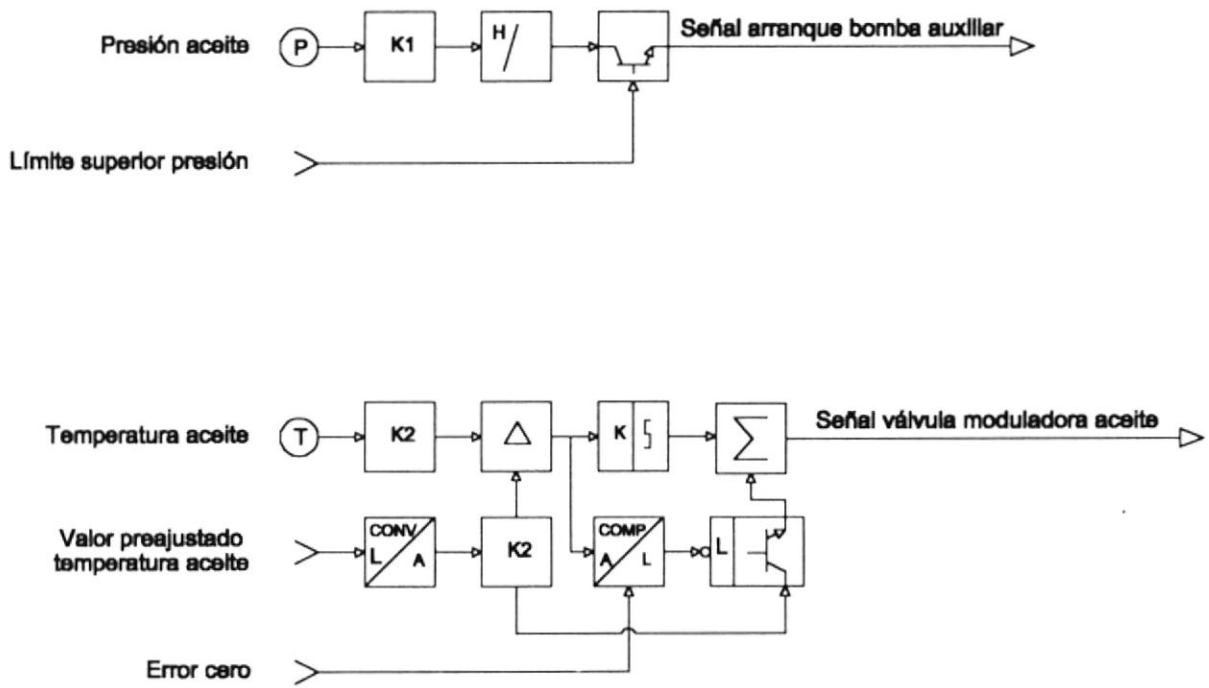


FIGURA 1.29. CONTROL HIDRÁULICO

Capítulo 2

2. DISEÑO DEL SISTEMA ESTÁTICO DE PROTECCIÓN

2.1. Filosofía del diseño de protección

El sistema de protección tiene por objetivo, ante un falla, sacar de servicio la parte fallada del proceso para evitar un daño grave.

El sistema de protección establece la protección para proteger a la unidad de fallas en el sistema de control o en alguno de los equipos principales.

Los criterios básicos del diseño del sistema de protección son los siguientes:

- Disponer de dos niveles de protección, un nivel de alarma que permita tomar una acción correctiva y otro nivel que saque de servicio la unidad.
- Evitar un rearranque de la turbina mientras no haya sido localizada y reparada la falla que causa la salida de servicio de la unidad.

- Para la confiabilidad en la determinación de la falla y tener la seguridad que la protección da una señal de alarma o disparo de una falla real, el sistema de protección tiene una triple redundancia.

En la unidad a gas, el sistema de protección debe estar compuesto por tres protecciones básicas principales que tienen triple redundancia y son las siguientes:

- Protección de sobrevelocidad
- Protección de sobretemperatura
- Protección de vibración

Para que el sistema de protección de una señal de alarma o disparo se debe cumplir por lo menos la doble redundancia y esto permite trabajar hasta con uno de los circuitos de protección dañado y la confiabilidad de la protección no es afectada significativamente.

En la protección de pérdida de llama no se utiliza triple redundancia, porque no se puede correr el riesgo de ignorar una señal de alarma o disparo de la protección de pérdida de llama. Si no hay llama se produciría una acumulación de combustible que podría producir una explosión no controlada en la cámara de combustión, poniendo en peligro la unidad.

También en la protección contra incendio no se utiliza la triple redundancia porque no se puede correr el riesgo de ignorar una señal de alarma o disparo de la protección contra incendio.

El sistema de protección se presenta en la Fig. 2.1.

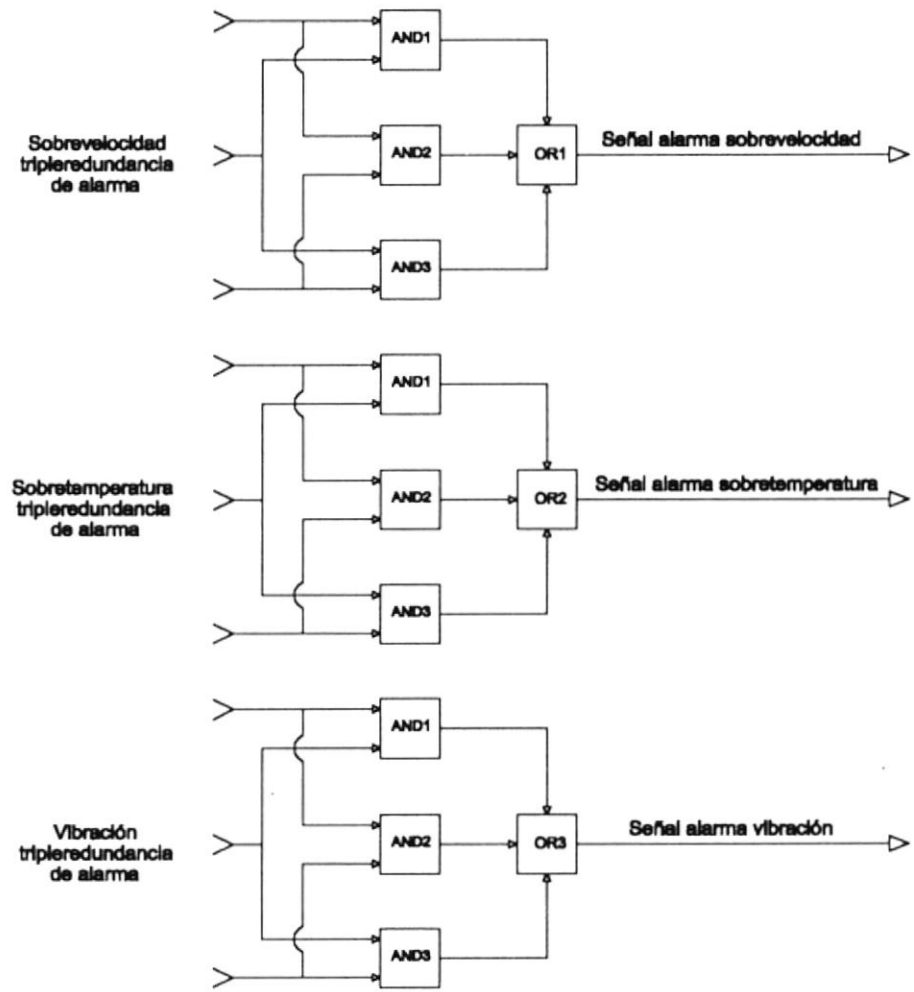


FIGURA 2.1.a SISTEMA DE PROTECCIÓN

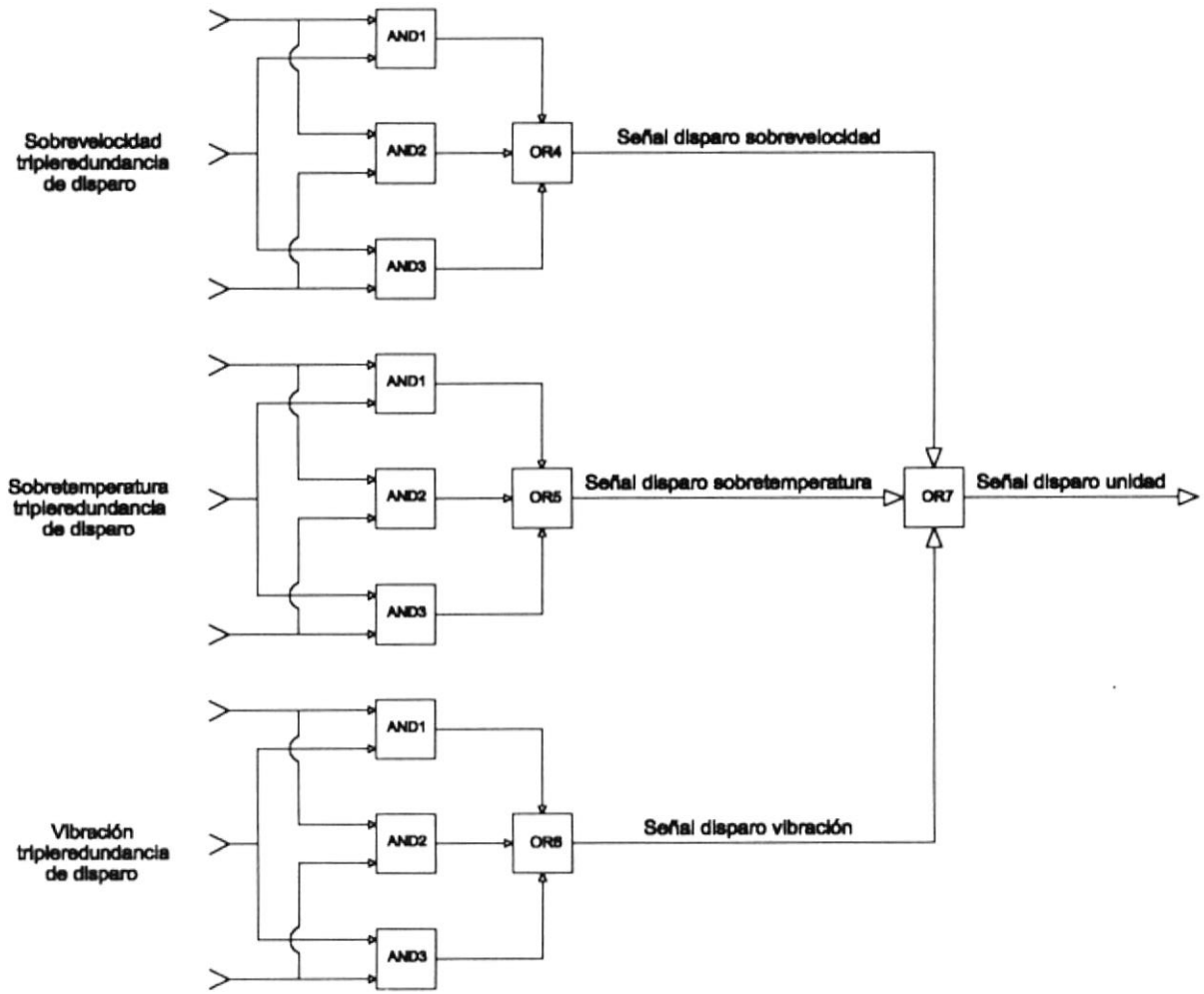


FIGURA 2.1.b SISTEMA DE PROTECCIÓN

La señal de alarma de cada protección es comparada con sus similares de los circuitos redundantes en las puertas lógicas "AND" y envía una señal lógica verdadera a la puerta "OR", cuando dos de los tres circuitos redundantes detecta la falla.

Las señales de disparo de las protecciones de sobrevelocidad, sobretemperatura y vibración son llevadas a las puertas lógicas "AND" y luego a una "OR" para que se cumpla con el criterio de confiabilidad. Las señales de disparo de las puertas "OR" van a otra puerta "OR", de donde se envía la señal de cierre a la válvula moduladora de combustible, y se produce de esta manera el disparo de la unidad.

2.2. Protección de sobrevelocidad

2.2.1. Criterios de diseño de la protección de sobrevelocidad

Los criterios de diseño de la protección de sobrevelocidad son los siguientes:

1. Cuando la unidad ha alcanzado la velocidad nominal y se encuentra trabajando normalmente, la velocidad es regulada por el control de velocidad y el control de temperatura, estos dos controles disminuye o aumenta la velocidad según se requiera.

   La unidad cuenta con un sistema de respaldo en caso de que lo controles, de velocidad y temperatura fallen en la regulación de la velocidad, en el caso de que exista pérdida

de velocidad, la unidad se puede motorizar y el relé de potencia inversa desconecta la unidad. En caso de un aumento de velocidad , las partes de la turbina que giran sufrirían serios daños, por lo que la unidad tiene la protección de sobrevelocidad.

2. La protección de sobrevelocidad de una turbina a gas está constituída por dos sistemas:

   - Sistema primario de protección electrónica
   - Sistema secundario de protección electrónica o mecánica

   El sistema primario detecta la velocidad de protección primaria, esta sobrevelocidad no es muy elevada con respecto a la velocidad nominal, y envía una señal de alerta al circuito de protección principal, este da la señal de parar la unidad y da la señal de alarma de sobrevelocidad.

   En caso de que la unidad aumente su velocidad hasta la velocidad de protección secundaria, la cual es mayor que la primaria, debido a que la protección secundaria se especifica de acuerdo a los límites de resistencia de las partes móviles de la unidad, el sistema secundario de protección cierra la válvula moduladora de combustible, para que la velocidad disminuya lo más rápido posible del límite mecánico y luego a velocidad cero.

   El sistema secundario de protección puede ser electrónico o

mecánico, pero en los últimos años se ha preferido que sea electrónico debido a que ofrece las siguientes ventajas:

- Mayor confiabilidad al detectar la falla de sobrevelocidad debido a la implementación de tres canales independientes para sensar la velocidad de la turbina.
- Mayor exactitud en la determinación de la velocidad de la turbina debido a sensores de velocidad de alta precisión.

3.2.2. Diseño de la protección de sobrevelocidad

El diseño de la protección de sobrevelocidad comprende el sistema primario y secundario de protección de sobrevelocidad. El sistema primario y secundario de protección debe tener las siguientes características:

- El sistema esta implementado con tres canales de sensores de velocidad que operan independientemente y dan señal de alarma en caso de deteccción de sobrevelocidad.
- El sistema da señal de protección cuando dos de los tres canales detecta sobrevelocidad.

El sistema de protección de sobrevelocidad se presenta en la Fig. 2.2.

Las señales de los tres sensores de velocidad son convertidas en voltaje analógico proporcional a la velocidad, por medio de los convertidores de pulso PR/A. Estas señales son alimentadas a los elementos proporcionales-amplificadores K1, K2 y K3

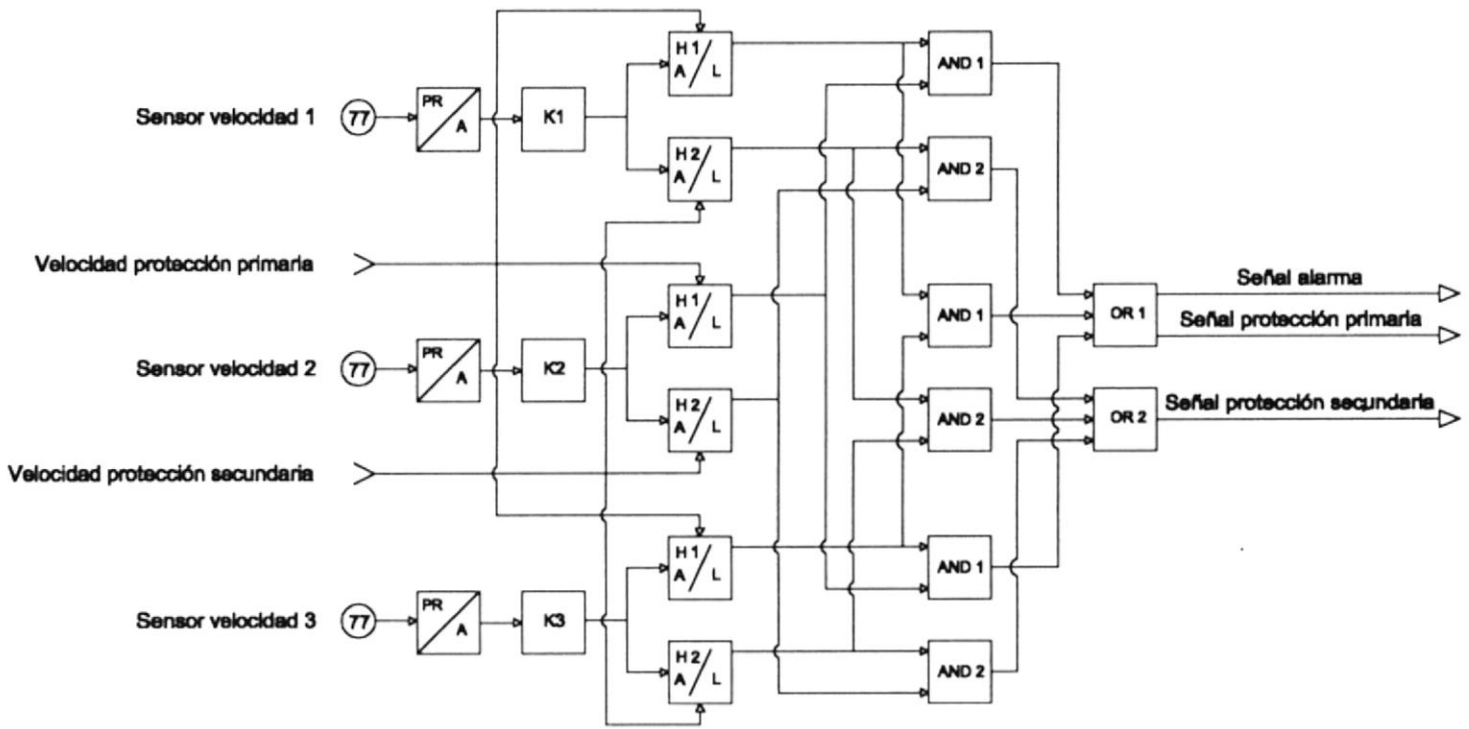


FIGURA 2.2. SISTEMA DE PROTECCIÓN DE SOBREVELOCIDAD

respectivamente, luego son llevadas a los elementos comparadores (H/). Existen dos grupos de comparadores, los cuales son:

- Comparadores (H1) dan una señal lógica de valor verdadero si la velocidad de la unidad es igual o mayor a la velocidad de protección primaria.
- Comparadores (H2) dan una señal lógica de valor verdadero si la velocidad de la unidad es igual a la velocidad de protección primaria.

Las señales de los comparadores H1 y H2 van a unas puertas lógicas "AND", con esto se asegura que por lo menos dos de los tres canales den señales de sobrevelocidad. Las puertas "AND1" controlan las señales de los comparadores H1 y las "AND2" a los comparadores H2.

Las puertas lógicas "OR", que se encuentran al final del control, reciben las señales de las puertas "AND" y envían las señales de protección. La puerta "OR1" da las señales de alarma y de protección primaria, y la puerta "OR2" da la señal de protección secundaria.

2.3. Protección de sobretemperatura

2.3.1. Criterios de diseño de la protección de temperatura

Los criterios de diseño de la protección de sobretemperatura

son los siguientes:

1. La protección de sobretemperatura es una protección de respaldo que actúa en caso de que se produzcan fallas en los controles de velocidad y temperatura, y estas fallas produzcan un aumento en la temperatura de escape.

   Cuando se sobrepasa la temperatura máxima permisible en condiciones normales de carga, el sistema de control de temperatura pasa a regular el flujo de combustible, para disminuir el combustible y la temperatura de escape regrese a su valor normal de operación.

2. En el caso de que el control de temperatura no pueda disminuir la temperatura por tener alguna falla, la temperatura aumenta hasta alcanzar la temperatura de alarma. El sistema de protección de sobretemperatura da una señal de alarma.

   El operador disminuye la carga de la unidad para reducir el flujo de combustible que entra a la cámara de combustión y con ello disminuya la temperatura de los gases a su valor normal.

   Si a pesar de la reducción de carga la temperatura sigue aumentando hasta la temperatura de disparo, el sistema de protección saca de servicio a la unidad.

3. Para incrementar la confiabilidad, el sistema de protección de sobretemperatura tiene dos canales de protección, independientes entre si, los canales tienen capacidad de dar señales de alarma y disparo de la unidad.

   Los valores de temperatura de alarma y disparo dependen de las características de cada unidad y son función directa de la resistencia térmica de los elementos que operan a alta temperatura. Sin embargo, es usual que el valor de alarma es de 20°F sobre el punto prefijado del control de temperatura y el valor de disparo es de 40°F sobre dicho punto.

   Las curvas características para la calibración de los niveles de alarma y disparo de sobretemperatura se presentan en la Fig. 2.3.

2.3.2. Diseño de la protección de sobretemperatura

El diseño de la protección de sobretemperatura comprende el sistema sensor y generador de señales de temperatura y el sistema de protección de sobretemperatura.

1. Sistema sensor y generador de señales

El sistema de protección de sobretemperatura debe tener sus propios e independientes sensores de temperatura para evitar que cuando se dañen los sensores del control de temperatura, la unidad no se quede sin protección. Los sensores son las termocuplas, debido a sus características

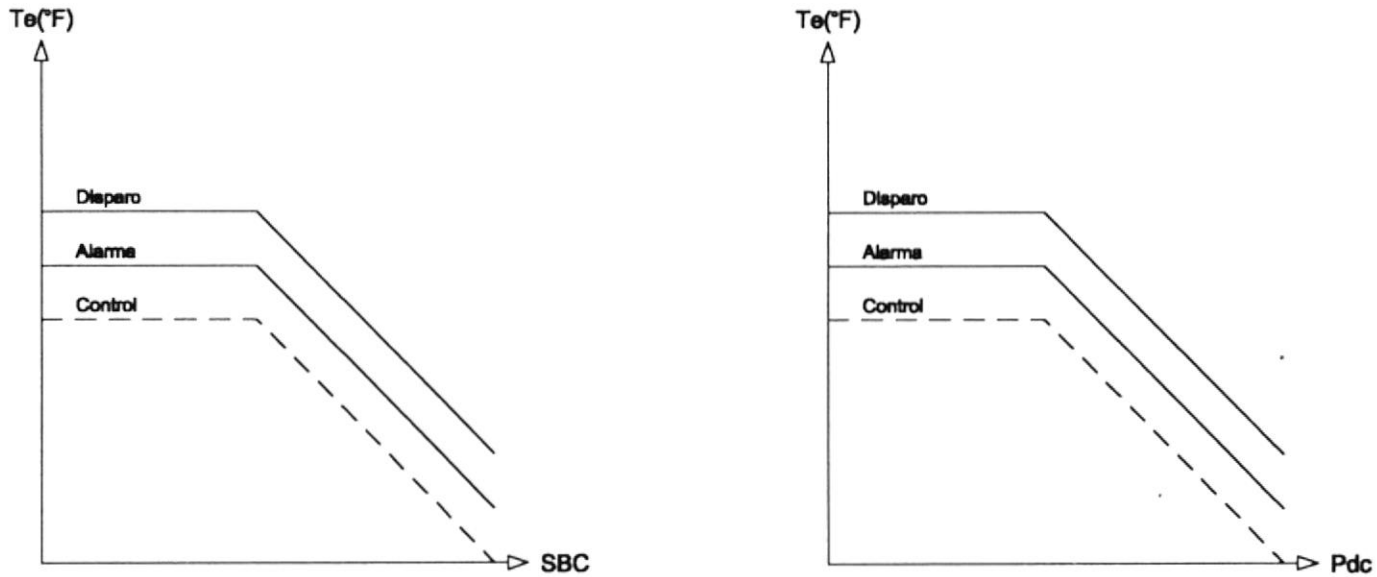


FIGURA 2.3. CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA LA CALIBRACIÓN DE ALARMA Y DISPARO

de acción rápida. Cada canal tiene tres sensores de temperatura, los cuales estan ubicados alrededor del ducto de escape de gases y montados en los elementos protectores de radiación, con el fin de minimizar el error en la medición. Los sensores de la protección estan intercalados con los sensores del control de temperatura.

Las señales de las termocuplas de cada canal de protección son alimentadas a un sistema que tiene las siguientes funciones:

- Promedia independientemente las señales de las tres termocuplas de cada canal.
- Compensa las señales de las termocuplas por unión fría y cortes.

El sistema sensor y generador de señales se presenta en la Fig. 2.4.

Las señales de termocuplas de cada canal son alimentadas a los elementos promediadores $(\Sigma/3)_1$ y $(\Sigma/3)_2$, en donde se genera la señal promedio que es llevada a los elementos sumadores $\Sigma 1$ y $\Sigma 2$. En estos elementos se suma la señal promedio y la señal de compensación por unión fría y cortes, de los elementos sumadores salen las señales promedio compensadas Ta y Tb, las cuales son utilizadas por el sistema de protección de sobretemperatura.

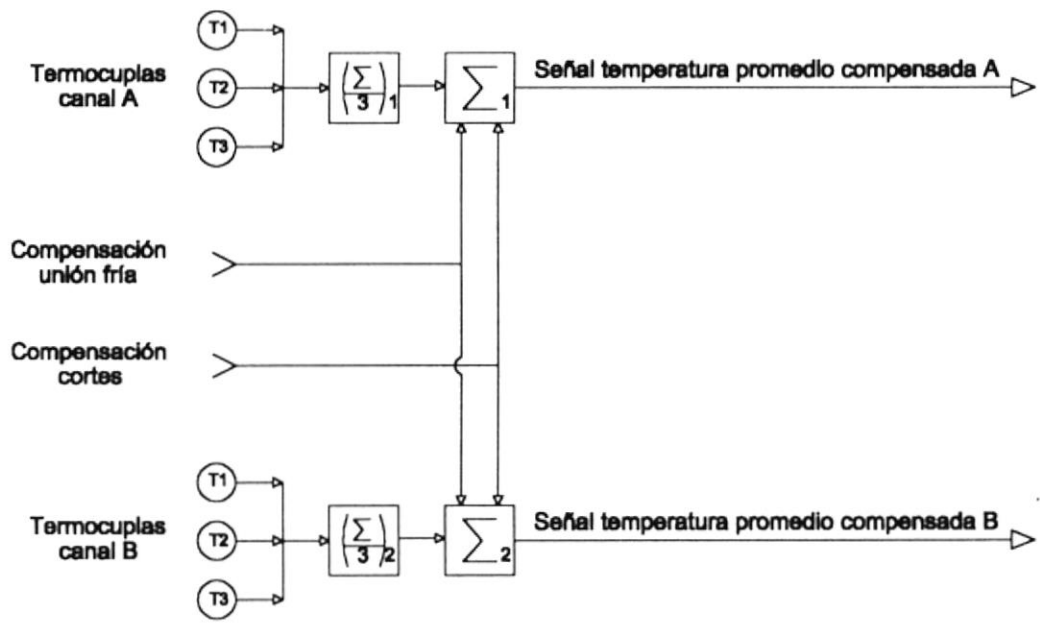


FIGURA 2.4. SISTEMA SENSOR Y GENERADOR DE SEÑALES

2. Sistema de protección de sobretemperatura

El sistema de protección de sobretemperatura debe tener las siguientes características:

- El sistema da las señales de alarma y disparo cuando uno de los dos canales de protección detecta sobretemperatura.
- El sistema envía una señal al control principal de protección, si en la secuencia de arranque, los dos canales detectan una señal de temperatura menor a 200°F. Esto se lo realiza con la finalidad de determinar una posible falla en los sensores de temperatura de los dos canales de protección.
- El sistema provee una alarma de alta diferencia de temperatura. Esta señal se da cuando la diferencia entre el valor promedio de las señales de los canales A y B de protección y la señal de temperatura del sistema de control y la mayor de las tres señales mencionada es mayor a un límite predeterminado.

  La importancia de esta alarma se debe a dos factores:

  Pérdida de una de las tres señales

  Mala distribución de la temperatura de los gases en el escape como consecuencia de un mal funcionamiento en el sistema de combustión, es decir una mala atomización

de combustible debido a toberas taponadas, falla en varios canales del divisor de flujo, etc.

- El sistema contempla además, la posibilidad de que la turbina sea utilizada en las horas de mayor comsumo con una temperatura de un valor mayor a los niveles de alarma y disparo de operación normal.

El sistema de protección de sobretemperatura se presenta en la Fig. 2.5.

Las señales promedio de temperatura compensada de los canales Ta y Tb son alimentadas a los elementos proporcional-amplificador K1 y K3. Las señales resultantes son alimentadas a los elementos comparadores por lo siguiente:

- A los elementos COMP1 para que entreguen una señal lógica de valor verdadero cuando la temperatura sensada sea igual al valor de la temperatura de disparo de la unidad.
- A los elementos COMP2 para que entreguen una señal lógica de valor verdadero cuando la temperatura sensada es menor a 200°F y la velocidad de la unidad es del 95% de la nominal.
- A los elementos COMP3 para que entreguen una señal lógica de valor verdadero cuando la temperatura sensada

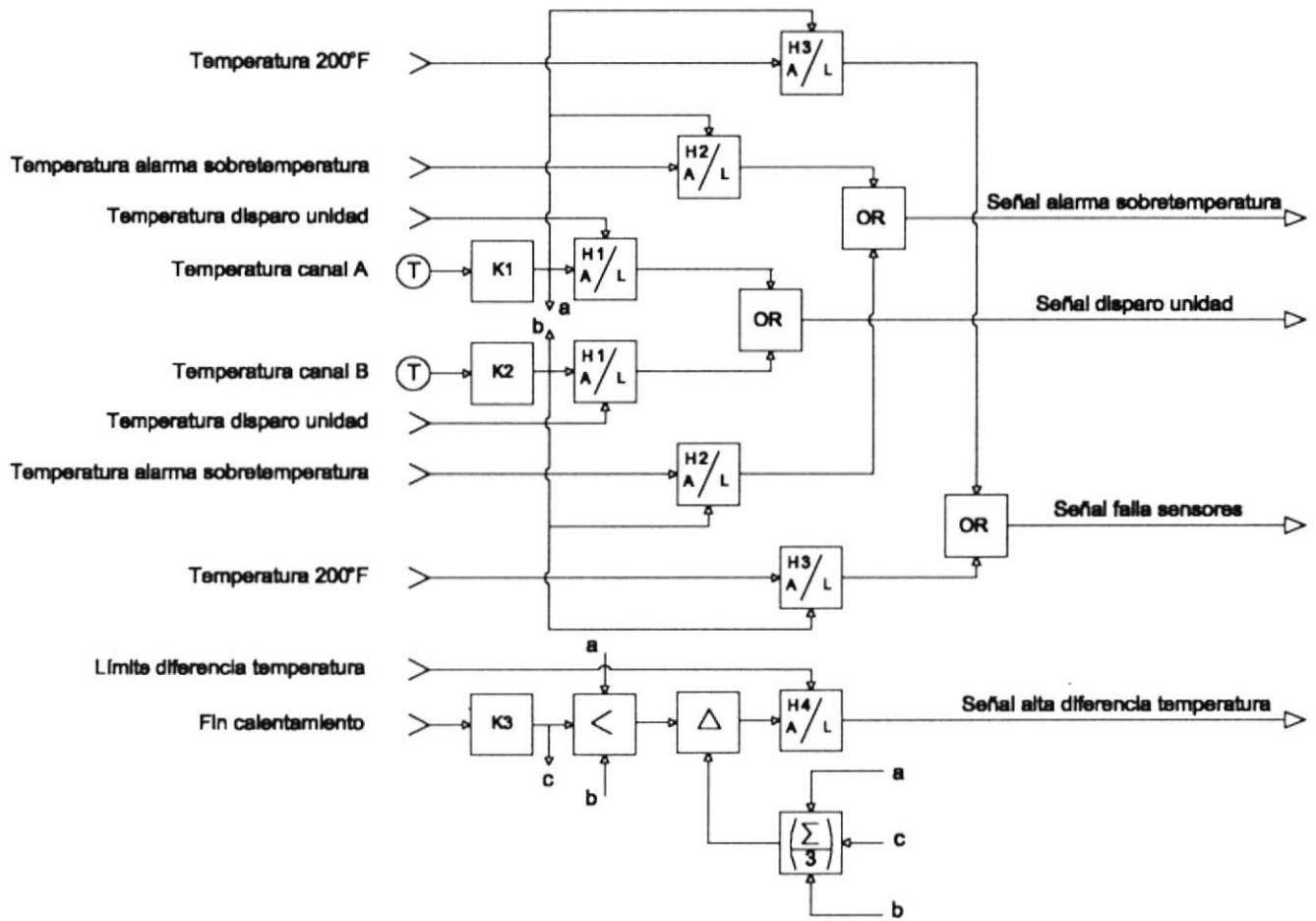


FIGURA 2.5. SISTEMA DE PROTECCIÓN DE SOBRETEMPERATURA

es igual a la temperatura de alarma.

Las señales de los comparadores van a las puertas lógicas "OR", las cuales entregan las señales cuando uno de los canales detecta la sobretemperatura.

Las señales de temperatura promedio del sistema de control Tc y las señales Ta y Tb van a un elemento de selección donde pasa la mayor de las señales y también van a un elemento $\Sigma/3$ donde se determina la temperatura promedio de las tres señales. Estas dos señales van a un elemento Δ y el error es alimentado a un elemento comparador COMP4. Este elemento genera una señal lógica de valor verdadero cuando se sobrepasa el valor preajustado en el comparador y se genera la señal de alarma de alta diferencia de temperatura.

2.4. Protección de vibración

2.4.1. Criterios de diseño de la protección de vibración

Los criterios de diseño de la protección de vibración son los siguientes:

1. La protección de vibración se utiliza en la turbina a gas para detectar y alertar sobre posibles daños físicos que pueden sufrir las partes mecánicas de la unidad, ya que estos daños

se ven reflejados en la vibración del eje donde se encuentran acoplados el compresor, la turbina y el generador eléctrico.

Los daños pueden estar localizados en las partes móviles como en las partes estáticas de la unidad. Las partes móviles principales son los rotores de la turbina y del compresor, los cuales generalmente sufren dos tipos de daños, estos son:

- Rotura de uno de los álabes, lo cual ocasiona un desbalanciamiento dinámico del rotor y produce una vibración excesiva.
- Estiramiento de los álabes debido al tiempo de operación excesivo o por esfuerzo térmico debido a elevadas temperaturas. Este estiramiento produce que los álabes rocen el sello de aire y se produzca vibración.

Las partes fijas principales son las chumaceras o cojinetes del eje principal de la unidad, los daños generalmente son por fallas del material, lo que ocasiona que la película de aceite sobre la que se desliza el eje de la turbina pierda su característica y origina movimientos verticales del eje que excede los límites de vibración permitidos.

2. El sistema de protección de vibración detecta una falla mecánica incipiente, por lo que se puede corregirla en un mantenimiento preventivo de la unidad, evitando que se

produzcan situaciones de peligro y se atente contra la vida útil de la unidad.

2.4.2. Diseño de la protección de vibración

El diseño de la protección de vibración comprende el sistema sensor de vibración y el sistema de protección de vibración.

1. Sistema sensor

El sistema sensor de vibración esta constituido por los sensores de vibración, los cuales son generalmente elementos que generan salidas de corrientes pequeñas al pasar un imán a través de una bobina fija, eliminando así la necesidad de la corriente de excitación.

2. Sistema de protección de vibración

El sistema de protección de vibración debe tener las siguientes características:

- El sistema esta implementado con tres canales de detección de vibración que son independientes, debido a esto cada canal tiene su propio sensor. Los canales supervisan la vibración en el compresor del generador de gas, la caja de engranajes de la turbina, y el extremo del eje donde se acopla el generador eléctrico.
- El sistema opera con dos niveles de vibración prefijados, de alarma y disparo de la unidad.

El sistema de protección de vibración se presenta en la Fig. 2.6.

Las señales de vibración de los tres canales son llevadas a los elementos amplificador-proporcional K1, K2 y K3 respectivamente y luego pasan las señales a los comparadores.

Cada canal tiene dos comparadores, los cuales tienen un valor de comparación diferente, los comparadores COMP1 dan una señal lógica de valor verdadero cuando la señal de entrada es mayor al límite normal de vibración y los comparadores COMP2 dan una señal lógica de valor verdadero cuando la señal de entrada es mayor al límite físico de vibración de las partes mecánicas de la unidad.

Las señales de los comparadores van a las puertas lógicas "OR1" y "OR2", las cuales tienen como fin enviar la señal de alarma o de disparo de la unidad, cuando cualquiera de los tres canales así lo indique.

2.5. Protección de pérdida de llama

2.5.1. Criterios de diseño de la protección de pérdida de llama

Los criterios de diseño de la protección de pérdida de llama son los siguientes:

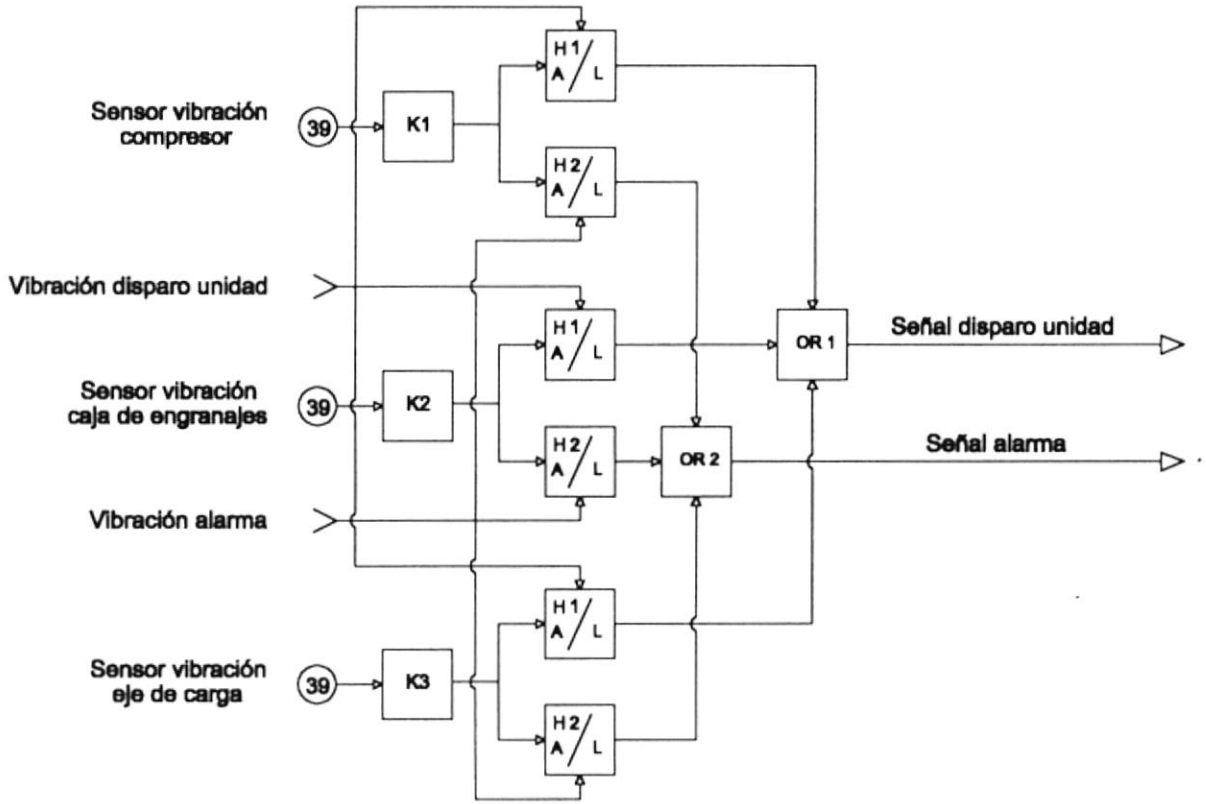


FIGURA 2.6. SISTEMA DE PROTECCIÓN DE VIBRACIÓN

1. El sistema de protección de pérdida de llama en los combustores es implementado en la turbina a gas para cortar el flujo de combustible que entra a la unidad cuando no existe la combustión de la mezcla combustible-aire.

   Se debe cortar el flujo de combustible para evitar una acumulación excesiva de combustible, la cual podría ocasionar en el próximo arranque de la unidad una explosión y temperaturas que sobrepasen los valores límites de temperatura de la unidad, sometiéndose a la unidad a un excesivo esfuerzo térmico.

2. El sistema de protección de pérdida de llama debe funcionar tanto en el arranque de la unidad como en operación normal de la misma. El sistema debe disparar la unida cuando en la secuencia de arranque la llama no se establece a la velocidad de encendido y cuando en operación normal la llama se extingue. La falta de llama puede ser debido a fallas en el sistema de alimentación al divisor de flujo de combustible o en el propio divisor, o en las bujías de encendido.

2.5.2. Diseño de la protección de pérdida de llama

El sistema de protección de pérdida de llama comprende el sistema sensor de llama y el sistema de protección de pérdida de llama.

1. **Sistema sensor de llama**

El sistema sensor de llama esta formado por los sensores de llama, los cuales determinan la presencia de llama en base a las radiaciones ultravioleta que son producidas por la combustión. El número de sensores en una turbina depende directamente del tipo de sistema de combustión y del tipo de combustible, así la cantidad puede variar de 2 hasta 8 sensores en sistemas de combustión muy complejos.

El sensor entrega una corriente eléctrica a medida que recibe la radiación ultravioleta de la llama.

2. **Sistema de protección de pérdida de llama**

El sistema de protección de pérdida de llama debe tener las siguientes características:

- El sistema tiene dos canales, los cuales deben ser independientes, de esta manera se aumenta la confiabilidad del sistema.
- El sistema da señal de alarma de pérdida de llama cuando uno de los dos canales detecta que la radiación ultravioleta es igual a la del medio ambiente.
- El sistema dispara la unidad cuando los dos canales detecta que la radiación ultravioleta es igual a la del medio ambiente.

- El sistema da señal de falla de sensores cuando detecta una radiación menor a la normal del medio ambiente.

El sistema de protección de pérdida de llama se presenta en la Fig. 2.7.

Las señales generadas por los sensores son llevadas a los elementos amplificadores-proporcionales K1 y K2, cuyas señales de salida son alimentadas a los elementos comparadores COMP1 y COMP2.

Los comparadores COMP1 dan una señal lógica de valor verdadero cuando la radiación ultravioleta sensada sea igual a la radiación del medio ambiente. Los comparadores COMP2 dan una señal lógica de valor verdadero cuando la radiación ultravioleta sensada es menor a la radiación del medio ambiente.

Las señales de salida de los comparadores COMP1 son llevadas a las puertas lógicas "AND" y "OR1". La puerta "AND" da la señal de disparo de la unidad si los dos canales detectan pérdida de llama y la puerta "OR4" da la señal de alarma de pérdida de llama si uno de los canales sensa la pérdida de llama.

Las señales de salida de los comparadores COMP2 son llevadas a la puerta lógica "OR2", la cual da la señal de falla de los sensores de llama cuando uno de los canales detecta

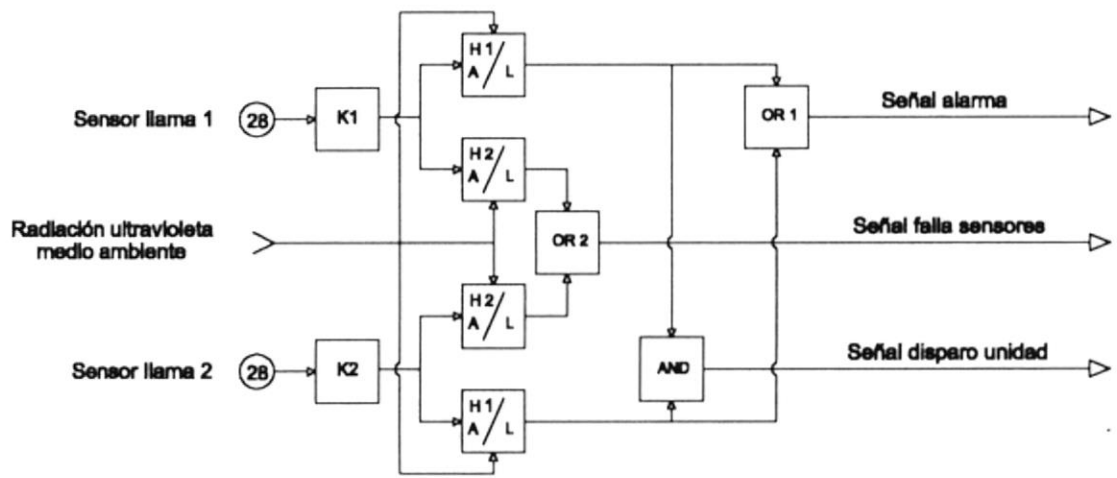


FIGURA 2.7. SISTEMA DE PROTECCIÓN DE PÉRDIDA DE LLAMA

que la radiación ultravioleta es menor que la del medio ambiente.

2.6. Protección contra incendio

2.6.1. Criterios de diseño de la protección contra incendio

Los criterios de diseño de la protección contra incendio son los siguientes:

1. El sistema de protección contra incendio es de suma importancia en una turbina a gas debido a la presencia del elemento explosivo que es el combustible.
2. El método más eficaz para detener un incendio en una turbina gas consiste en esparcir un elemento no inflamable sobre las llamas, el cual reduce el contenido de oxigeno del aire del medio ambiente en los compartimientos de la unidad desde su valor normal de 21% a un valor menor al 15%. Se utiliza generalmente el dióxido de carbono, debido a que tiene las siguientes características:
   - Es aislante térmico, y se reduce el riesgo de una reiniciación del fuego.
   - Es aislante eléctrico, y es utilizado en equipos de alta tensión.
   - Es efectivo para un amplio rango de materiales inflamables.

3. El sistema de protección suministra una descarga inicial de dióxido de carbono igual al 34% del volumen del compartimiento en un minuto para una rápida extinción del incendio y una descarga extendida durante 30 minutos para mantener constante la concentración de dióxido de carbono en los compartimientos de la unidad para evitar una reinflamación.

2.6.2. Diseño del sistema de protección contra incendio

El diseño del sistema de protección contra incendio comprende las características de operación y el sistema de protección contra incendio.

1. Características de operación

Las características de operación del sistema de protección contra incendio son las siguientes:

- Operar automáticamente en el momento en que uno de los sensores de fuego opere.
- Debe ser implementado para operar automáticamente o manualmente.
- Operar una alarma en el momento en que se detecte condición de fuego en la unidad o cuando se opere de modo manual.
- Proveer una descarga inicial y una descarga extendida.

- Operar una alarma cuando la presión en los cilindros de dióxido de carbono o de nitrógeno esta bajo de cierto valor preajustado.
- Tener un tiempo de retardo entre la alarma y la descarga de CO_2 en operación automática. Sin embargo en operación manual la descarga debe ser inmediata.
- Generar una señal de disparo para los equipos auxiliares y la unidad.
- El sistema esta implementado por lo menos con 9 detectores de llama distribuídos de la siguiente forma:

  2 detectores en el generador eléctrico

  5 detectores en el compartimiento de la turbina

  2 detectores en el compartimiento de accesorios

El arreglo físico del sistema de protección contra incendio se presenta en la Fig. 2.8.

2. Sistema de protección contra incendio

El sistema de protección contra incendio se presenta en la Fig. 2.9.

La señal de los sensores luego de haber detectado fuego va a un elemento amplificador-proporcional K1, cuya señal de salida es alimentada al temporizador de descarga inicial y a una puerta lógica "OR". El temporizador se lo emplea con el fin de que primero suene la alarma de incendio, cuya señal

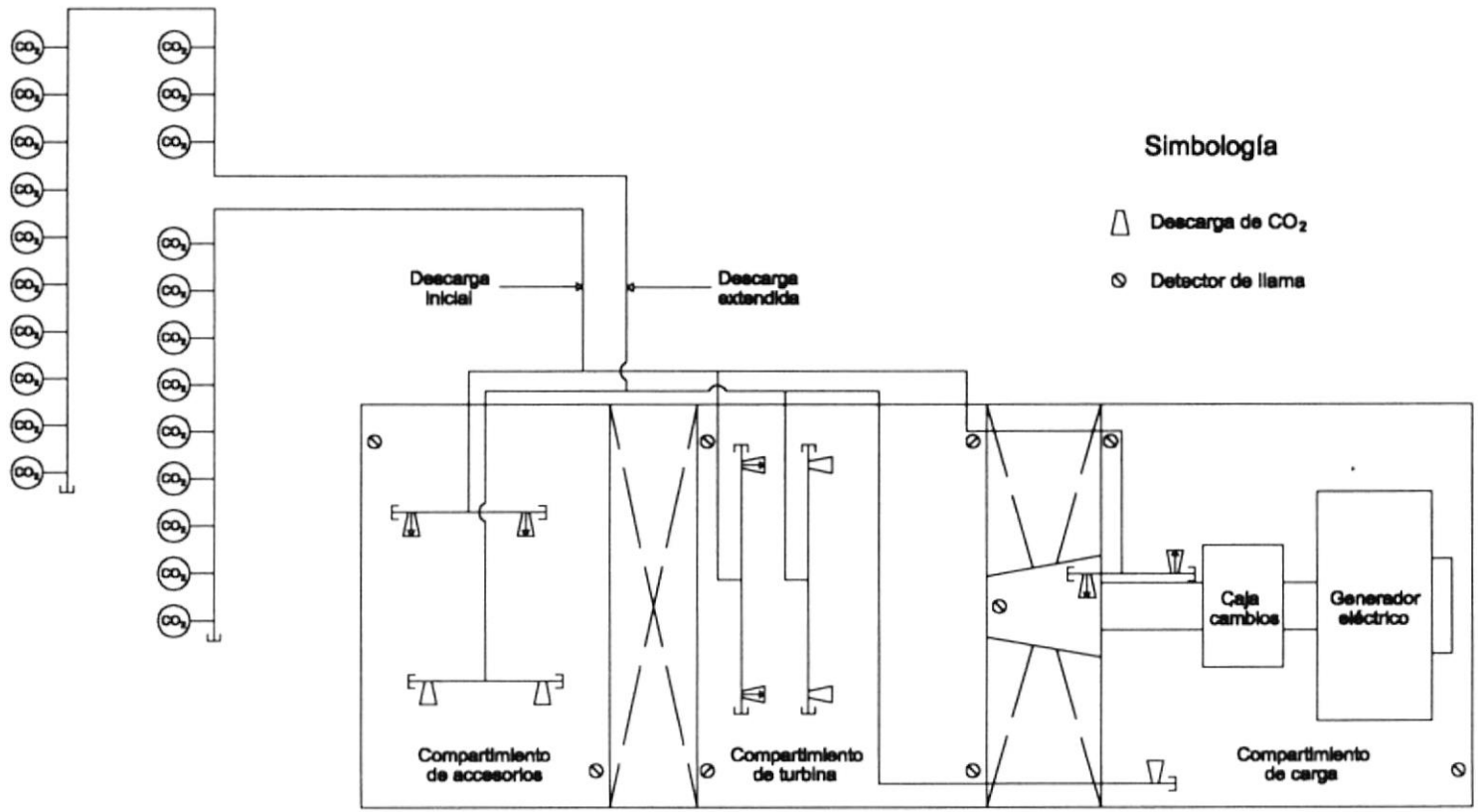


FIGURA 2.8. ARREGLO FÍSICO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIO

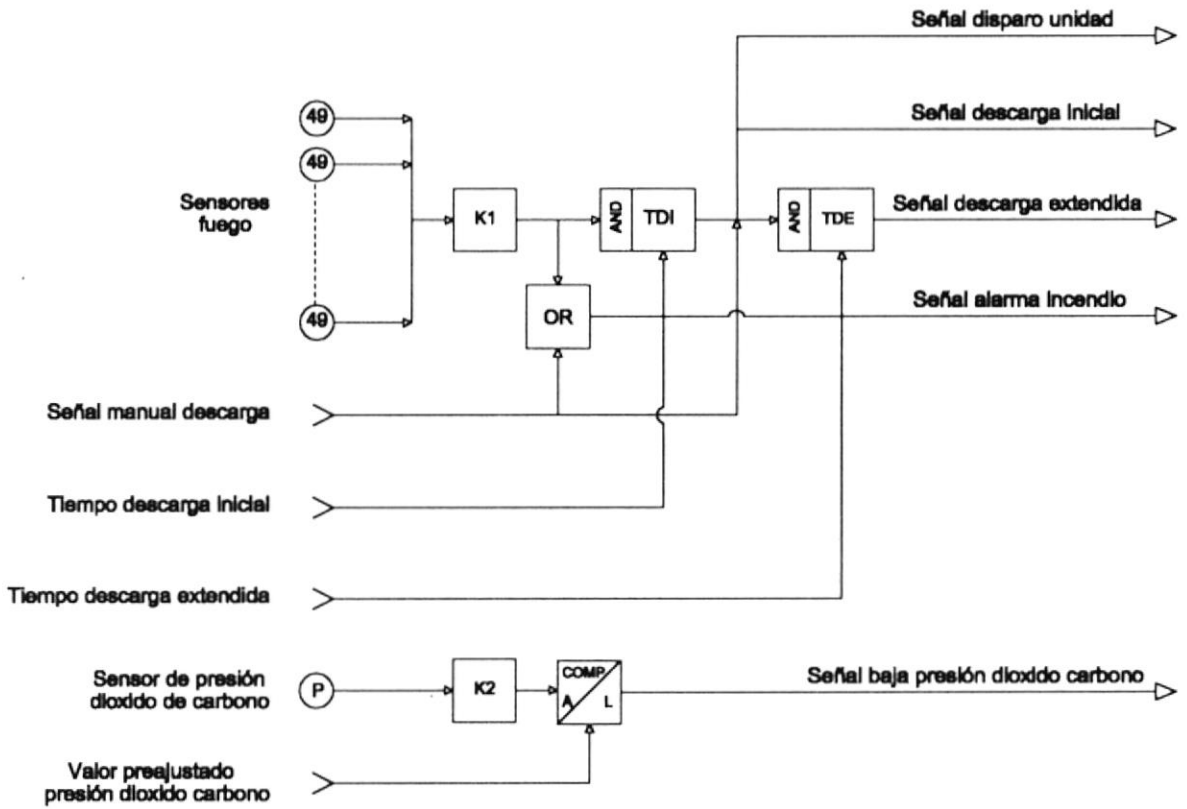


FIGURA 2.9. SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIO

se la obtiene de la puerta lógica "OR", y luego se produzca la descarga inicial. La señal de salida del temporizador de descarga inicial da la señal de disparo de la unidad, la señal de descarga inicial activa el temporizador de descarga extendida, el cual da la señal de descarga extendida luego de un minuto. En el caso de que se active el sistema de protección manualmente, la señal va a la puerta lógica "OR", que hace sonar la alarma de incendio y al mismo tiempo se procede a la descarga inicial y el disparo de la unidad, y activa el temporizador de descarga extendida, el cual da la señal de descarga extendida luego de un minuto.

La presión de dióxido de carbono dentro de los cilindros es constantemente controlada, por lo que se la compara en el elemento COMP con el valor preajustado de presión de dióxido de carbono, en el caso de que la presión sea menor a la preajustada se da la señal de baja presión de dióxido de carbono.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Las conclusiones del estudio del sistema estático de control y protección de una turbina a gas son las siguientes:

1. El sistema de control y protección utiliza elementos estáticos que tienen una respuesta rápida. una mayor confiabilidad, una mejor estabilidad y puede ser supervisada la operación de la unidad por una computadora personal.

2. El sistema de control utiliza elementos estáticos desde la señal de comando hasta entregar la señal de control al elemento de regulación final.

3. El sistema de control comprende todas las condiciones de operación de la unidad, es decir, la condición de arranque, el control de la velocidad, el control de la temperatura, la regulación del combustible y el aire de acuerdo a las condiciones de variación de la carga, y la condición de parada.

4. Para la protección del medio ambiente y teniendo en cuenta las regulaciones mundiales dé emisiones de gases, se implementa el diseño

de un sistema básico de inyección de agua, mediante el cual se reduce significativamente las emisiones de oxido de nitrógeno al medio ambiente, en las condiciones críticas como son en la inflamación de la mezcla aire-combustible y en la aceleración de la unidad.

5. El sistema de protección utiliza elementos estáticos desde la señal que entrega el sensor del parámetro de protección hasta las señales de alarma y disparo.

6. El sistema de protección comprende las principales fallas mecánicas, como son: sobrevelocidad, sobretemperatura, vibración, pérdida de llama e incendio.

7. Los sistemas de protección de sobrevelocidad, sobretemperatura y vibración son diseñados con triple redundancia, con lo cual se aumenta la confiabilidad de decisión de los sistemas de protección.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones del estudio del sistema estático de control y protección de una turbina a gas son las siguientes:

1. Es importante que el diseño del sistema de control sea simple para lograr economía en la implementación y evitar dificultades en la regulación de los

parámetros de control y la operación normal de la unidad a gas.

2. El sistema de protección debe ser efectivo para que pueda distinguir entre una falla falsa y una falla real y se tengan las señales correctas de alarma y disparo.

3. Es importante disminuir al máximo las emisiones de oxido de nitrógeno ya que estos contaminan el medio ambiente, por lo que hay que implementar métodos más efectivos y ajustarse a los límites permisibles de emisiones mundiales.

ANEXOS

ANEXO A

TIPOS DE CONTROL BÁSICOS

Los tipos de control básicos son: proporcional, integral, proporcional-integral, proporcional-derivativo y proporcional-integral-derivativo.

A continuación se definen brevemente cada una de las formas de control mencionadas:

- Proporcional, en el control proporcional el elemento final de control se posiciona en proporción a la magnitud de la variable controlada. Es decir en este control las correcciones son proporcionales a la desviación. Para este tipo de control, la relación entre la salida del controlador (P) y la señal de error actuante (θ-c) es:

$$P = 1/S\ (\theta - c) \qquad (1)$$

donde,

S, banda proporcional en porcentaje.

θ, variable controlada en unidades de medición.

c, punto de control en unidades de medición.

El valor (1/S) es la sensibilidad proporcional o ganancia (k) y es de suma importancia para la calidad de control, puesto que de él dependen las magnitudes de oscilación y desviación del sistema.

- Integral, la acción de control integral se basa en la integración del valor de la desviación en el tiempo en que ésta ocurre, o lo que es lo mismo, el elemento final de control se mueve a una velocidad que es función de la magnitud de la desviación. La característica principal del control integral es eliminar la desviación permanente en un proceso de demanda variable y que no puede ser suprimida por el control proporcional. Para este tipo de control la salida del controlador viene dada por la relación:

$$P = r/S \sum_{0}^{t} (\theta - c)dt \qquad (2)$$

donde,

S, banda proporcional en porcentaje.

θ, variable controlada en unidades de medición.

c, punto de control en unidades de medición.

r, velocidad de reajuste o frecuencia de reposición en unidades por minuto. El valor de r, es igual a (1/Ti), siendo Ti el tiempo integral.

- Proporcional-Integral, este control tiene las ventajas de cada una de ellos: el control proporcional con su estabilidad inherente y el control integral con su estabilización en el punto de control. Este tipo de control es el más utilizado de todos.

La ecuación del control proporcional-integral es la suma de las dos respuestas individuales:

$$P = 1/S (\theta - c) + r/S \sum_{0}^{t} (\theta - c)dt \qquad (3)$$

De la ecuación se observa que la velocidad de reajuste (r) regula la acción del control integral mientras la banda proporcional (S) afecta a ambas acciones de control.

- Proporcional-Derivativo, en este control se combinan la acción proporcional con el tipo de control derivativo. La acción del control derivativo es proporcional a la velocidad de cambio de la desviación y tiene por finalidad incrementar la velocidad de respuesta del sistema. Es decir, la acción derivativa es capaz de producir una corrección significativa antes de que la desviación se incremente en exceso. El control derivativo incrementa la característica de estabilidad del mismo.

  La ecuación característica de un control proporcional-derivativo es:

$$P = 1/S\ (\theta - c) + q/S\ d(\theta - c)/dt \qquad (4)$$

  Siendo "q" el único término no definido y que representa la tasa o tiempo derivativo y viene dado en unidades de tiempo (minutos). El valor de "q" es el intervalo de tiempo en el que la acción de velocidad se adelanta al efecto de acción del control proporcional.

- Proporcional-Integral-Derivativo, en esta forma de control se combinan las tres acciones de control básicas para obtener un sistema que reúna las ventajas de cada una de ellas. La ecuación del control proporcional-integral-derivativo es:

$$P = 1/S\ (\cdot\theta - c) + r/S \sum_{0}^{t} (\theta - c)dt + q/S\ d(\theta - c)/dt \qquad (5)$$

ANEXO B

ELEMENTOS DE CONTROL Y LÓGICOS

Los elementos de control se presentan en la Fig. B.1., cada uno de ellos tiene el número de identificación, la función, el símbolo, la ecuación y la representación gráfica.

Los elementos lógicos se presentan en la Fig. B.2., cada uno de ellos tiene el número de identificación, el nombre y el símbolo.

Nº	FUNCIÓN	SÍMBOLO	ECUACIÓN	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
1	Sumador	$\sum$	$m=x1+x2+...+xn$	
2	Promedio	$\sum/n$	$m=\frac{(x1+x2+...+xn)}{n}$	
3	Error	$\triangle$	$m=x1-x2$	
4	Proporcional	K	$m=(1/s)x$	
5	Integral	$\int$	$m=r\int x\,dt$	
6	Derivativo	$\frac{d}{dt}$	$m=q\frac{dx}{dt}$	
7	Multiplicador	X	$m=x1\ x2$	
8	Exponenciador	X^n	$m=x^n$	
9	Selector alto	>	$m=\begin{cases} x1 \text{ si } x1\geq x2 \\ x2 \text{ si } x1\leq x2 \end{cases}$	

FIGURA B.1.a ELEMENTOS DE CONTROL

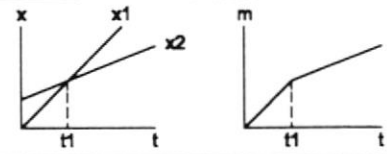
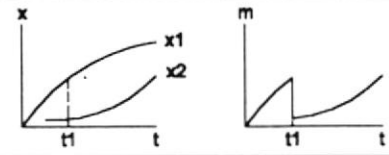
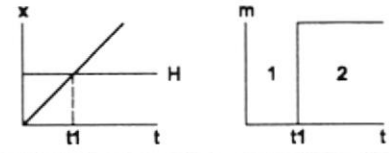
Nº	FUNCIÓN	SÍMBOLO	ECUACIÓN	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
10	Selector bajo	<	$m=\begin{cases} x1 \text{ si } x1 \leq x2 \\ x2 \text{ si } x1 \geq x2 \end{cases}$	
11	Selector transferencia automática	Estado 1 o 2 x1 T x2	$m=\begin{cases} x1 \text{ para estado 1} \\ x2 \text{ para estado 2} \end{cases}$	
12	Monitor de señales	H	Estado 1 $x \leq H$ Estado 2 $x > H$ (alarma)	

FIGURA B.1.b ELEMENTOS DE CONTROL

Nº	NOMBRE	SÍMBOLO
1	Inversor	2.a. A E 2.b. A E
2	Convertidor de pulsos a señal analógica	A PR A E
3	Convertidor de señal analógica a lógica	A CONV A L E Referencia F
4	Interruptor lógico	A L

FIGURA B.2. ELEMENTOS LÓGICOS

BIBLIOGRAFÍA

1. BUCHHOLD TH. Y HAPPOLDT H., Centrales y Redes Eléctricas, Cuarta Edición, Editorial Labor

2. FAIRES VIRGIL M., Termodinámica, Quinta Edición, Editorial Unión Tipográfica

3. GENERAL ELECTRIC, Gas Turbine Maintenace Manual, 1995

4. GENERAL ELECTRIC, Speedtronic Mark V, 1995

5. GENERAL ELECTRIC, Mark V Maintenance Course Papers, 1996

6. Hurtado Héctor E, Diseño del Control y la Protección de una Central a Vapor, 1980

7. POTEES E. SANTO, Centrales Eléctricas, Segunda Edición, Editorial Gustavo Gili

8. SCHMIDT FRITZ A., Máquinas de Combustión (motores y turbinas a gas), Tercera Edición, Editorial Labor

A.F. 142106