

ESCUELA SUPERIOR  
POLITECNICA DEL LITORAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

"ESTUDIO DEL CONTROL Y PROTECCION DE  
UNA TURBINA A GAS"

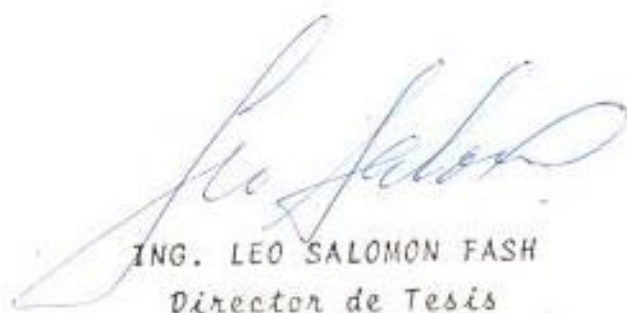
TESIS DE GRADO  
PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE:  
INGENIERO EN ELECTRICIDAD

PRESENTADA POR:  
WILFRIDO VEINTIMILLA TERREROS

GUAYAQUIL-ECUADOR  
1,981

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
Dpto. de Ingeniería Eléctrica  
BIBLIOTECA

Inv. No. POT-006



ING. LEO SALOMON FASH  
Director de Tesis

Debido a que en nuestro medio la generación a gas constituye un alto porcentaje de la generación total instalada y que la supervisión y calibración de los sistemas de control básico y sistemas de protección de una turbina a gas están a cargo de un Ingeniero Eléctrico, es necesario que el profesional en esta rama tenga vastos conocimientos sobre el modo de operación de estas unidades.

Los objetivos principales del presente estudio son:

1. Desarrollar los sistemas de control básicos que regulan la operación de una turbina a gas. Al respecto:
  - a) Se va a desarrollar lo que se conoce como "idea de control", entendiéndose con este nombre a la filosofía de controlar la salida de un sistema sin importar las características propias del medio de control.
  - b) Se aplicará en el diseño de los controles, el criterio conocido como "redundancia por asociación", el cual implica que cada sistema de control principal sea respaldado por otro.
2. Desarrollar los sistemas de protección mínima requerida por la unidad a fin de ser protegida ante contingencias tales como falla en algún sistema de control o en algún componente principal de la máquina.

Los sistemas de protección tendrán una "doble ruta de operación" que asegurará el disparo de la unidad por medio de dos canales independientes entre sí y además serán implementados en base a un criterio de "simple ó doble redundancia", entendiéndose por "redundancia" a la práctica de disponer de más de una forma de protección contra una misma falla.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
Dpto. de Ingeniería Eléctrica  
BIBLIOTECA

Inv. No. FOT-006



	Pág.
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VIII
I. INTRODUCCION	1
II. GENERALIDADES	6
2.1. Generalidades de una turbina a gas	6
2.2. Principios básicos de control automático.	13
III. FILOSOFIA Y DISEÑO BASICO DEL CONTROL DE UNA TURBINA A GAS	23
3.1. Control de la secuencia de arranque	33
3.1.1. Diseño del control	34
3.1.2. Análisis de la secuencia de arranque.	55
3.2. Control de velocidad de la turbina	64
3.2.1. Diseño del control	66
3.2.2. Modo de operación A estático	75
3.2.3. Modo de operación E estático	79
3.2.4. Sistema final de control de velocidad.	85
3.3. Control de temperatura de los gases de combustión.	93
3.3.1. Diseño del control	97
3.3.2. Sistema de control proporcional de temperatura.	101
3.3.3. Sistema de control de temperatura con compensación ambiental.	108
3.3.4. Sistema final de control de temperatura.	113

IV. DISEÑO BÁSICO DEL CONTROL DE COMBUSTIBLE DE UNA TURBINA A GAS	122
4.1. Sistema implementado con bomba de desplazamiento variable y transformador diferencial variable lineal.	131
4.2. Sistema implementado con bomba de desplazamiento fijo y sensores magnéticos de velocidad.	136
V. FILOSOFIA Y DISEÑO DE LA PROTECCIÓN MÍNIMA REQUERIDA POR UNA TURBINA A GAS	145
5.1. Protección de sobrevelocidad de la turbina.	149
5.1.1. Diseño de la protección.	150
5.2. Protección de sobretemperatura de los gases de combustión.	156
5.2.1. Diseño de la protección.	159
5.3. Protección de vibración de la turbina a gas y de la carga.	169
5.3.1. Diseño de la protección.	171
5.4. Protección de pérdida de llama en el sistema de combustión.	174
5.4.1. Diseño de la protección.	176
5.5. Circuito protector principal.	182
5.6. Protección contra incendio de la unidad.	188
5.6.1. Diseño de la protección.	190
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	197
VII. ANEXOS	201
VIII. BIBLIOGRAFIA	222

## I. INTRODUCCION

Las turbinas a gas de un solo ciclo son de amplia utilización por cuanto entre sus múltiples aplicaciones se pueden enumerar:

1. La conducción de un generador eléctrico;
2. La impulsión de naves marítimas;
3. La impulsión de naves aéreas;
4. La conducción de un compresor o una bomba, etc.

A esta gran capacidad de adaptación para diferentes aplicaciones, se suman una serie de factores de primordial importancia que deciden la utilización de las mencionadas unidades, entre las que sobresalen la facilidad de instalación, rapidez en entrar en servicio, bajo costo y la capacidad de poder ser operadas automáticamente desde un control remoto.

En nuestro medio, una de las mayores aplicaciones de las turbinas a gas, es el campo de la generación eléctrica a tal punto que de la potencia total de generación instalada en la ciudad de Guayaquil que alcanza a 345 MW, el 39.13% corresponde a generación a gas.

Algunas de las razones que han contribuido a la aceptación de las turbinas a gas en el campo de la generación eléctrica son enumeradas a continuación:

1. Rápida respuesta a los cambios de carga.
2. Facilidad de operación con una variedad de combustible.
3. Bajo costo inicial.
4. Seguridad en la operación
5. Capacidad de realizar arranques en negro.
6. Tiempo relativamente corto desde el momento en que se da la señal de arranque a la unidad hasta que entra en línea en el sistema.
7. Tiempo mucho menor que el requerido por una central a vapor, en caso de reparaciones o mantenimientos generales.

El alto porcentaje de generación a gas en nuestro medio, hace imprescindible que el profesional en Ingeniería Eléctrica tenga suficientes conocimientos sobre la operación de estas unidades.

Los objetivos principales del presente estudio son:

1. Desarrollar los sistemas de control básicos que regulan la operación normal de una turbina a gas; y
2. Desarrollar los sistemas de protección mínima que cumplen con la finalidad de salvaguardar a la unidad ante contingencias tales como falla en alguno de los sistemas de control o fallas en alguno de los principales componentes de la máquina.

Respecto al primero de los objetivos, es de señalar que la



finalidad del presente estudio es la de desarrollar lo que se conoce como "idea de control", entendiéndose por esto a la filosofía de controlar la salida de un sistema aparte de las características propias del mismo.

Los controles propios de las turbinas a gas serán desarrollados basándose en principios teóricos del funcionamiento de las mismas y en la experiencia de operación de dichas unidades.

Cabe recalcar que en los diseños de controles no se incluyen análisis matemáticos por cuanto esto significaría limitarse a una turbina a gas en particular al hacerse necesario la utilización de parámetros característicos de cada máquina, limitándose así el alcance y finalidad de este estudio.

Los controles serán desarrollados en base a tres condicio-  
nantes como son:

1. Operar satisfactoriamente ante cualquier cambio de carga de la unidad o ante cualquier cambio en los parámetros involucrados en el control.
2. Responder con rapidez pero sin llegar a la inestabilidad.
3. Utilizar los elementos de control estrictamente necesarios para la óptima operación del mismo.

En cuanto al segundo de los objetivos, los sistemas de protección van a ser desarrollados de tal forma de darle a la unidad un alto rango de seguridad en la operación para lo cual deberán ser capaces de:

1. Ofrecer dos niveles de protección, es decir un nivel de alarma que permita tomar alguna acción correctiva con miras a evitar daños en los equipos auxiliares o componentes de la máquina y otro nivel que dispare la unidad en caso de que la contingencia sea de gravedad.
2. Evitar un re-arranque de la turbina mientras no haya sido localizado y reparado el daño causante del disparo.

Para la representación gráfica de los diseños de control y de protección, se utilizarán los dos tipos de normas enunciadas a continuación:

1. "Functional Diagramming of Instrument and Control Systems", elaborada por "Scientific Apparatus Makers Association".
2. "Graphic Symbols for Logic Diagrams" que constituye el "ASA Document Y32.14".

La combinación de estos dos tipos de normas fue necesaria por cuanto la primera de ellas no incluye la simbología para sistemas digitales que también se utiliza en el presente estudio.



Las características y simbología de los dos tipos de norma son desarrollados en los Anexos N<sup>o</sup> 1 y 2.

Por último, hay que recalcar que no se va a realizar un estudio de la protección básica del generador eléctrico que podría ir acoplado al eje de carga de la turbina por cuanto esto ha sido objeto de estudios anteriores.

## II. GENERALIDADES

### 2.1. GENERALIDADES DE UNA TURBINA A GAS

Se va a proceder a enumerar y analizar brevemente las partes principales componentes de una turbina a gas de un solo eje y de ciclo sencillo.

Sin embargo, es procedente en primer término dejar sentado el fundamento de operación de la misma. Al respecto, una turbina es un motor de combustión interna que produce energía a través de un ciclo llamado de "Presión constante" o de Brayton en honor al Científico que lo desarrolló. Este ciclo está compuesto por cuatro etapas: compresión, combustión, expansión y escape de los gases.

El nombre de ciclo de "presión constante" obedece al hecho de que las etapas de la combustión y el escape se realizan a presión constante.

Puesto que las dos etapas restantes, esto es, compresión y expansión tienen lugar de manera continua, es posible tener potencia motriz disponible continuamente en el eje de la carga.

En la Fig. N° 1 se representa el ciclo de Brayton.

En la Fig. N° 2 se representa esquemáticamente las partes fundamentales que componen una turbina a gas.

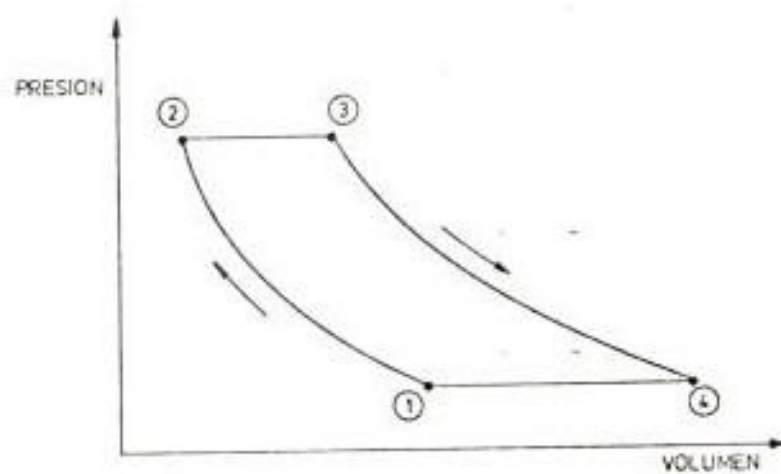


FIG.Nº1 CICLO DE PRESION CONSTANTE O BRAYTON

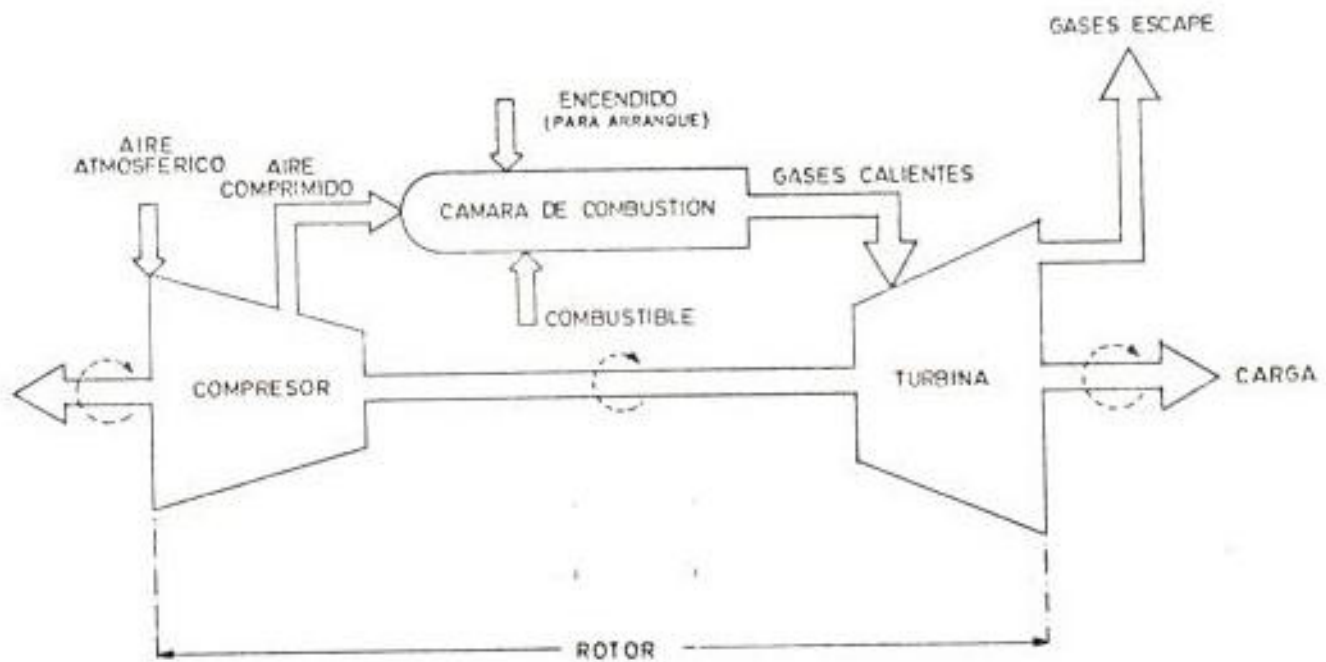


FIG. Nº 2 PARTES FUNDAMENTALES DE UNA TURBINA A GAS

### a) Compresor

A presión barométrica normal, como la del interior de una máquina parada, la combustión de la mezcla aire-combustible no produce una potencia considerable como para producir trabajo útil con un rango de eficiencia razonable.

Puesto que la energía que se libera en el proceso de combustión es proporcional a la masa de aire consumido, una mayor eficiencia del ciclo de combustión se obtiene sólo si se incrementa dicha masa. Con este fin, se implementan los compresores que al comprimir el aire hacen posible mover en un volumen dado la máxima cantidad de aire.

En definitiva, la función del compresor es suministrar aire de alta presión a las cámaras de combustión con el fin de producir gases calientes utilizados en la operación de la turbina. Además, el compresor cumple con otra función fundamental, cual es la de servir de medio de enfriamiento para los combustores y la turbina, con el fin de mantener la temperatura dentro del generador de gas dentro de los límites de operación. Es de señalar que sólo un 25% del aire que pasa por la sección de combustores es utilizado para la combustión; el 75% restante es el utilizado con el fin arriba mencionado.

## b) Sistema de Combustión

La función específica del sistema de combustión es suministrar la energía calorífica necesaria para cumplir con el ciclo de operación de una turbina a gas; es decir, acelerar la masa de gases que pasan por la máquina lo suficiente para producir la potencia deseada para la turbina.

Esto se consigue quemando combustible en el flujo de aire del compresor y liberando los gases de la combustión hacia la turbina.

El sistema de combustión está conformado de un número de cámaras de combustión o combustores que varían entre 8 y 10 y que son de características similares. El diseño del sistema es de manera que menos de un tercio del volumen total del aire entrando a la cámara se mezcla con el combustible. Al respecto, la relación aire total-combustible es variable siendo el valor promedio el de 60 partes de aire por una de combustible, de las cuales sólo alrededor de 15 partes en peso son utilizadas para la combustión.

Para que un combustor sea considerado idóneo para la operación deberá cumplirse que la pérdida de presión de los gases que lo atraviezan sea mínima, la efi-



ciencia sea máxima y no tenga tendencia a apagarse. Además, la combustión dentro del quemador deberá ser completa de manera que no haya combustión de los gases que salen de él, los que deberán tener una distribución homogénea de temperatura y de un valor máximo permitido, al entrar a la tubería.

### e) Turbina

La turbina cumple con el papel más importante en el ciclo de operación de una turbina a gas por cuanto es el lugar donde la energía cinética de los gases calientes se convierte por medio de los álabes de la turbina en energía mecánica y rotacional que produce la fuerza necesaria para mover el compresor y la carga acoplada al eje. Al respecto, es de anotar que cerca del 75% de toda la energía disponible en los productos de la combustión se utiliza para mover el compresor.

A continuación se relata en forma breve la operación de una turbina a gas: el aire necesario para la turbina fluye a través de un conducto antes de entrar al compresor. Este conducto cumple con dos finalidades, cuales son las de atenuar los sonidos de alta frecuencia creados por los álabes del compresor y prevenir el ingreso de objetos grandes dentro del mismo.

Luego de entrar al compresor, en los pasos progresivos del mismo, el aire aumenta su presión a los niveles adecuados para luego continuar a la cámara de combustión. En el extremo delantero de dicha cámara, un cabezal de combustible y sus correspondientes toberas distribuyen el combustible en forma de rocío muy fino hacia el frente de los combustores interconectados entre sí. En el interior de ellos, se combustiona el combustible con el aire que está entrando, produciéndose una gran cantidad de energía.

El encendido inicial de la mezcla aire-combustible, se lo realiza mediante la utilización de dos bujías ubicadas en dos de los combustores y que son energizadas por sus propios transformadores de voltaje. Luego de que se establece la combustión las dos bujías se desenergizan y el proceso continúa auto-sostenido mientras haya mezcla aire-combustible entrando a los quemadores.

De la sección de combustores los gases pasan a las turbinas que absorbiendo potencia de la expansión de los gases de alta velocidad generan la energía necesaria para mover el compresor y la carga acoplada. Posteriormente los gases se descargan en el ducto de escape en donde se dispersan y de donde se expulsan

*hacia la atmósfera.*

## 2.2. PRINCIPIOS BASICOS DE CONTROL AUTOMATICO

*El empleo del control automático trae consigo una serie de ventajas entre las cuales las más importantes son las siguientes:*

- 1. Reducción de los costos de operación al disminuir la necesidad de obra de mano al mínimo.*
- 2. Garantizar la uniformidad de los productos puesto que elimina los posibles errores que pueden existir en un proceso en el que interviene el elemento humano.*
- 3. Capacidad de ejecutar ciertos procesos que requieren un máximo de exactitud, imposible de conseguir con un medio de control manual.*

*En todo sistema de control automático se requiere de la participación de dos elementos componentes: 1) El proceso; y 2) El control automático. Al respecto, el proceso o sea el sistema controlado, comprende las funciones que se ejecutan por el equipo encargado de controlar una variable y el control automático en cambio es el elemento encargado de medir un parámetro variable y cuya finalidad es la de corregir o limitar la desviación de dicho parámetro con relación a un valor ajustado con anticipación.*



Los sistemas de control automático se fundamentan en la idea de "retroalimentación" y pueden ser representados esquemáticamente de acuerdo a la Fig. N° 3. De este diagrama se observa que las condiciones de salida del proceso quedan realimentadas a fin de controlar la entrada del mismo. La desviación que existe en la salida con respecto al valor del punto de control, es medida por los medios de medición los que transmiten una señal correspondiente a la diferencia existente, a los medios de control. Estos aplican una acción correctiva al elemento final de control, que se encarga de efectuar la acción necesaria a fin de variar la entrada del proceso de manera de restablecer el valor de salida al punto deseado o de ajuste de control.

En los párrafos anteriores se utilizan términos propios de los sistemas de control y que van a ser definidos a continuación, a fin de lograr una mejor interpretación de los mismos.

- a) Desviación: Es la diferencia existente entre el valor instantáneo de la variable controlada y el valor del punto de ajuste. También se la conoce como error.
- b) Medios de medición: Son los elementos de un controlador automático que se utilizan para determinar y transmitir a los elementos de control el valor de la varia

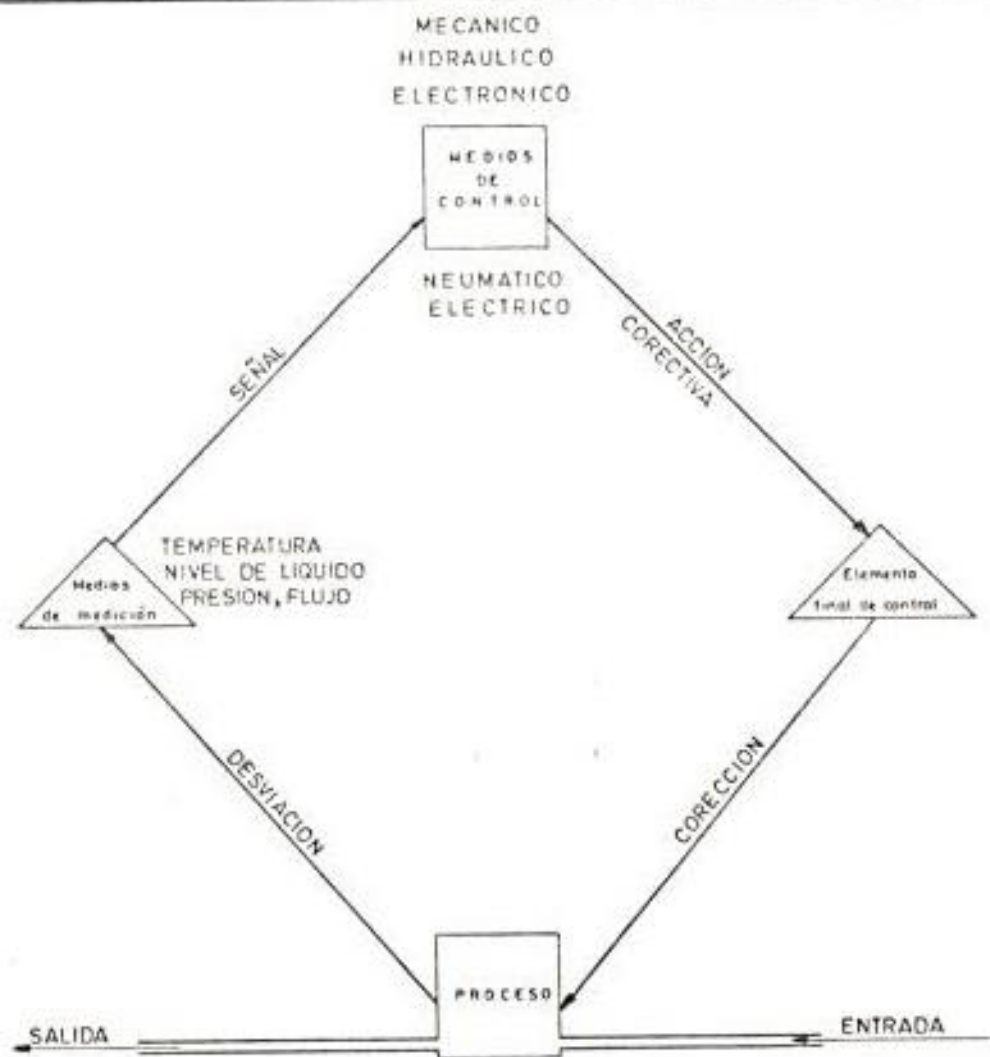


FIGURA 3 REPRESENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO

ble manipulada.

- e) Punto de ajuste: Es el valor con el que se desea man tener la variable controlada.
- f) Variable controlada: Es la cantidad o condición que es medida y controlada.
- g) Variable manipulada: Es la cantidad o condición que es variada por el control automático de tal forma que afecte el valor de la variable controlada.

Se ha expuesto que la función del controlador es la de interpretar los cambios en la variable y producir la acción correctiva necesaria para mantener el equilibrio en el proceso. La forma con la cual el controlador produce esta acción correctiva, se llama forma de control.

Al respecto, las principales formas de control son: dos posiciones, flotante de una sola velocidad, proporcional, integral, proporcional e integral, proporcional-derivativo y proporcional-integral-derivativo.

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

- a) Dos posiciones: en esta forma de control, el elemento final de control tiene dos posiciones extremas hacia donde se mueve cuando la variable controlada alcanza un valor predeterminado.



b) Flotante de una velocidad: El elemento final de control se mueve gradualmente de sus posiciones extremas dependientes si la variable controlada está arriba o abajo del punto de control. En esta forma de control no se reconoce la velocidad ni la magnitud de la desviación y reacciona en el tiempo en que dura la desviación.

c) Proporcional: El modo de control proporcional o modulante es aquel en que el elemento final de control se posiciona en proporción a la magnitud de la variable controlada. Es posible decir que 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 ( $\theta - c$ ) es:

$$P = \frac{1}{S} (\theta - c)$$

Siendo:

S = banda proporcional en porcentaje

$\theta$  = variable controlada en unidades de medición

c = punto de control en unidades de medición.

El valor  $[1/s]$  es conocido como 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.

d) Integral: La acción del control integral está basada 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. Tiene por característica principal 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:

$$P = \frac{\kappa}{s} \int_0^t (e - c) dt$$

donde:

$s, e$  y  $c$  fueron definidos anteriormente.

$\kappa$  = velocidad de reajuste o frecuencia de reposición en unidades por minuto.

El valor de  $\kappa$ , es igual a  $(1/T_i)$ , siendo  $T_i$  el tiempo integral.

e) Proporcional-Integral: Las dos formas de control analizadas, al último se combinan con el propósito de obtener un modo de control con las ventajas de cada una de ellas: 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 característica de un control proporcional con reposición es la suma de las dos respuestas individuales:

$$p = \frac{1}{s} (e - c) + \frac{r}{s} \int_0^t (e - c) dt$$

Los términos son conocidos. 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 del control.

- f) Proporcional-Derivativo: En esta forma de control se combinan la acción proporcional con un nuevo tipo de control llamado derivativo o componente de la velocidad. La acción del control derivativo puede ser definida como la respuesta del control con la cual el elemento final de control o variable de salida es proporcional a la velocidad de cambio de la desviación y tiene por finalidad incrementar la velocidad de respuesta del sistema. En otras palabras, la acción derivativa es capaz de producir una corrección significativa antes de que la desviación se incremente en exceso. Puesto que el control derivativo realiza una acción anticipatoria a la desviación e inicia la acción correctiva necesaria en el sistema, se incrementa la caracterís-

tica de estabilidad del mismo.

La ecuación característica de un control proporcional derivativo es:

$$P = \frac{1}{s} (\theta - c) + \frac{q}{s} \frac{d(\theta - c)}{dt}$$

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.

g) Proporcional-integral-derivativo: En esta forma de control se combinan las tres acciones de control básicas con el fin de obtener un sistema que reúna las ventajas de cada una de ellas. El valor de la salida del controlador con esta acción de control viene dada por la ecuación:

$$P = \frac{1}{s} (\theta - c) + \frac{1}{s} \int_0^t (\theta - c) dt + \frac{q}{s} \frac{d(\theta - c)}{dt}$$

donde los términos que intervienen ya han sido definidos.

Respecto de este tipo de control, es de decir que el uso de la acción derivativa requiere que el controla-



donde responda rápidamente puesto que un atraso considerable de este último puede anular las ventajas propias de dicha acción de control. En la práctica, el controlador deberá tener una velocidad de respuesta casi doble de cuando se usan sólo las acciones de control proporcional e integral puesto que la acción derivativa se utiliza para proveer un movimiento grande y repentino del elemento final de control.

En cuanto a la acción de control derivativa es de señalar que nunca se la puede tener por sí sola ya que este modo de control es funcional tan sólo en periodos transitorios.

En el análisis de las diferentes formas de control, se incluyeron las ecuaciones que representan el valor de la salida del controlador, observándose en estas ecuaciones la presencia de los términos banda proporcional ( $s$ ), velocidad de reajuste ( $n$ ) y tasa derivativa ( $q$ ). Los valores óptimos de estas tres variables son factibles de calcular mediante la aplicación de métodos técnicos-prácticos que se encuentran desarrollados en el anexo # 3. Es importante recalcar que las tres variables mencionadas son propias de cada sistema, dependiendo de las características de los medios de medición y de control y de la capacidad del proceso.

Entiéndose por capacidad del proceso a la facilidad del mismo para absorber cantidades variables del me  
di  
o de control sin afectarse su normal funcionamien  
to.

Como última observación de importancia, cabe señalar que los cálculos teóricos de diseño de las tres variables "s", "n" y "q" no son rígidos sino que mas bien en la práctica son reajustados en lo que podría llamarse la calibración final del control, en el momento en que se inicia el proceso por primera vez.



### III. FILOSOFIA Y DISEÑO BASICO DEL CONTROL DE UNA TURBINA A GAS

En el desarrollo del presente capítulo se va a analizar el sistema básico de control de la turbina, por lo que como punto de partida es necesario, antes de profundizar en los detalles de diseño, el revisar la filosofía empleada en el desarrollo del mismo.

#### FILOSOFIA

Es importante analizar qué puede ocurrir en el supuesto caso de falla de uno de los componentes del sistema, así como el comportamiento consecuente del mismo, comportamiento que será más o menos conveniente en función del diseño.

Lo ideal en un sistema de control, es que ésta sea del tipo de "proceso continuo", entendiéndose por esto el hecho de que ante el evento de una falla, el sistema que está siendo controlado pueda continuar en funcionamiento sin llegar a la necesidad de ser puesto fuera de servicio. Lo anteriormente expuesto se consigue aplicando en el diseño de control el criterio conocido como "redundancia por asociación", por medio del cual mientras el sistema de control gobernante es uno específico, los modos de control adicionales existentes están en capacidad de reemplazarlo tomando el mando del sistema controlado, en este caso el de la turbina a gas.

En otras palabras, el sistema de control debe ser diseñado de tal manera que cada sistema principal básico respalde a otro.

En párrafos anteriores se mencionó el criterio de "Redundancia por Asociación" y al hacerlo implícitamente se debe aceptar que los sensores constitutivos de cada modo principal - básico de control son también redundantes con lo que se consigue dar un buen grado de confiabilidad al sistema de control. Más adelante en el desarrollo mismo del diseño de cada uno de los sistemas de control básico se podrá constatar la veracidad de esta afirmación.

## DISEÑO

Una vez expuesta la filosofía a ser observada en el diseño del sistema de control, se va a proceder a analizar las características del mismo.

En primer término, a fin de obtener una operación confiable y segura de las turbinas a gas, el sistema de control deberá ser capaz de proveer:

- a. Confiabilidad máxima durante la secuencia de arranque y en el funcionamiento.
- b. Respuesta rápida, seguridad de funcionamiento y durabilidad considerable.
- c. Capacidad de adaptación para los diferentes tipos de tur

binas a gas y para las diferentes aplicaciones existentes, así como para las demandas de carga también diferentes que se le imponen a una unidad de este tipo.

Las tres características arriba expuestas pueden ser conseguidas recurriendo al criterio básico de buena selección de dispositivos y de parámetros a controlar.

Así, la característica del literal a; es factible de obtenerla si se consigue la incorporación de sensores de velocidad, presión, temperatura, llama, etc. de excelente calidad que intervengan en un plan bien trazado de secuencia de arranque.

Las características del literal b; son propias de un sistema de control constituido por elementos electrónicos de estado sólido que ofrecen las ventajas, comparados con los relés y dispositivos magnéticos, de alta velocidad de operación, requerimiento de espacio pequeño, poco peso y mayor confiabilidad. Sin embargo, es de importancia considerar el hecho de que mientras en los relés de tipo magnético la calidad de potencia de alimentación no tiene apreciable influencia en su operación, en los controles de estado sólido su importancia es crítica y constituye uno de los factores que más hay que considerar antes de la implementación de un sistema de control. Por último, respecto a lo expuesto en el literal c, la capacidad para manejar las diferentes demandas de carga, se



la consigue por medio de la utilización de elementos sensores que son encargados de detectar todo cambio en cualquiera de los parámetros principales de regulación y de realimentar los circuitos de control, consiguiéndose así un sistema de control de lazo cerrado que presenta como principal característica el ser de banda muerta no detectable.

Una vez analizadas las características fundamentales que deberá reunir el control a diseñar, se va a proceder a exponer la constitución básica del mismo.

El sistema de control a desarrollar es típico de una turbina a gas de un eje y está compuesto por tres sistemas básicos - principales que controlan, durante la operación de la unidad, los siguientes parámetros:

- a) Secuencia de arranque
- b) Velocidad de la turbina
- c) Temperatura de los gases de la combustión.

Cualquiera de los tres sistemas de control mencionados están en capacidad de controlar el flujo de combustible entrando a la turbina en un momento específico.

Las razones por las cuales estos parámetros constituyen los tres sistemas principales de control serán expuestas en el desarrollo posterior de cada uno de los respectivos diseños.

En este tipo de control, las condiciones de operación de la turbina son detectadas por sensores de velocidad, temperaturas y presión de descarga del compresor y son utilizadas como señales de realimentación del mismo.

Cuando por razones de cambio de carga o por condiciones ambientales deben variarse las condiciones de operación de la unidad es necesario, para conseguirlo, modular el flujo de combustible a la turbina.

Debido a que el flujo de combustible es el parámetro final de control en una turbina a gas, se va a partir de un criterio básico para la concepción del sistema general del control, cual es el de que "el sistema principal que demande la menor cantidad de combustible necesario para la operación normal de la turbina, será el que pasará a ser el sistema gobernante de la unidad".

Con el propósito de cumplir con el criterio arriba expuesto, las salidas de los tres sistemas básicos de control son alimentadas dentro de un circuito que bien puede tomar el nombre de "Compuerta de Valor Mínimo" y cuya función es la de seleccionar la menor de las señales que a él están llegando. Debe especificarse que existe 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 hacer la



selección mencionada, el flujo de combustible demandado será el menor.

La salida del circuito "Compuerta de Valor Mínimo", es la que alimenta finalmente al sistema de combustible que regula el caudal de combustible requerido por el sistema de control gobernanante de la unidad. A esta señal se la conoce con el nombre de "Señal Comando de Combustible".

El diagrama de control de este sistema básico es el que se muestra en la figura N° 4, donde:

1. Control de la secuencia de arranque [C.S.A.]
2. Control de velocidad de la turbina [C.V.]
3. Control de temperatura de los gases de combustión [C.T.]
4. Menor señal básica de combustible, resultante del proceso de baja selección. [M.S.B.C.]
5. Señal comando de combustible [S.C.C.]
6. Compuerta de valor mínimo.

Del diagrama de control de la figura N° 4 se puede deducir - que éste va a responder a la variación de tres parámetros - principales ya mencionados anteriormente, esto es, secuencia de arranque, velocidad y temperatura.

Estas tres señales son introducidas en elementos con características de operar como bajo seleccionadores con la finalidad

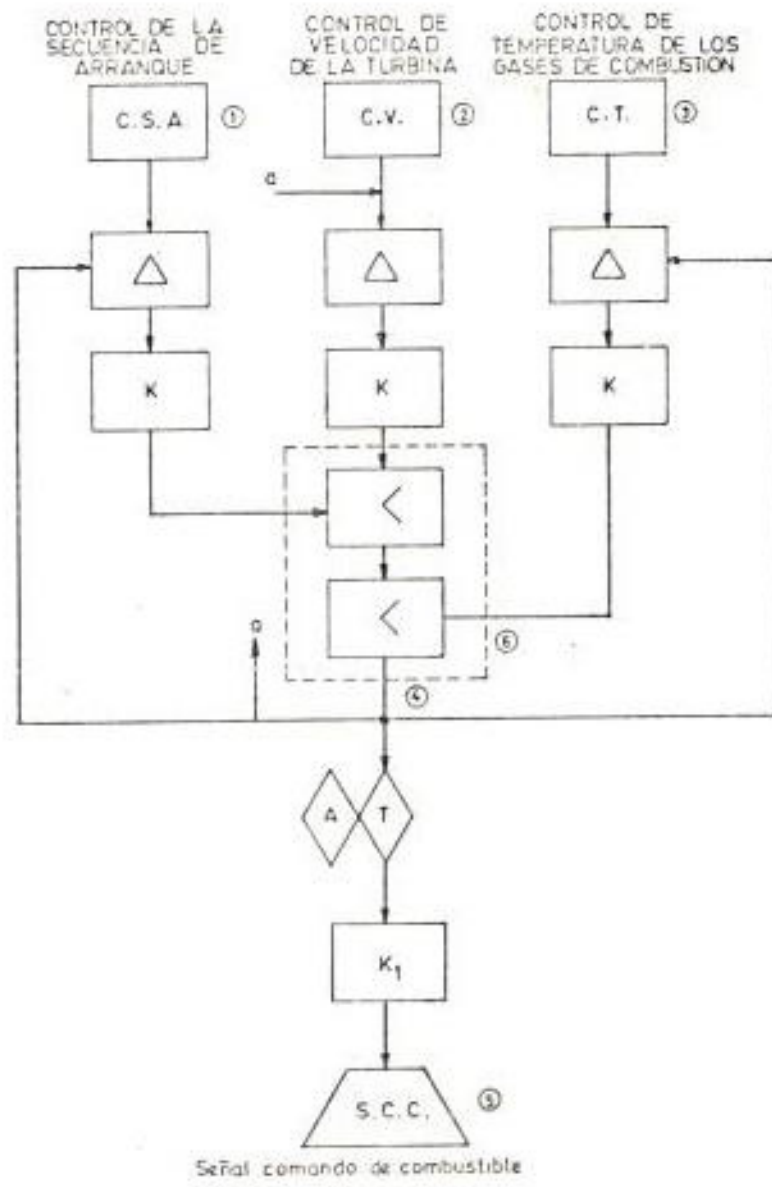


FIG.Nº4 CONTROL BASICO DE UNA TURBINA A GAS.

de escoger la menor de ellas y por consiguiente la de menor demanda de combustible. Estos elementos que en el esquema de la Figura N° 4 aparecen encerrados entre líneas entrecortadas constituyen la "Compuerta de Valor Mínimo".

Una vez seleccionada la menor de las señales, es llevada a un elemento proporcional amplificador KI cuya finalidad es la de elevarla a niveles capaces de conducir el sistema con trolador de flujo de combustible.

Es de notar que este diseño básico principal prevee una re-alimentación de la señal resultante del proceso de baja selección con la finalidad de implementar un sistema capaz de monitorearla alimentándola de vuelta, a cada uno de los tres sistemas de control básico, para conseguir equilibrarla con la señal original que hace que cambien de su condición previa.

Por último, se prevee también la posibilidad de controlar de modo manual el valor de la señal básica de combustible, mediante el selector de transferencia automático-manual A-T.

Una vez que ha sido desarrollado el sistema de control, es factible el representarlo mediante un esquema eléctrico básico cuyo comportamiento y operación concuerden con el criterio base del diseño. Fig. N° 5 donde los números de identificación de elementos son similares a los de la Fig. N° 4.

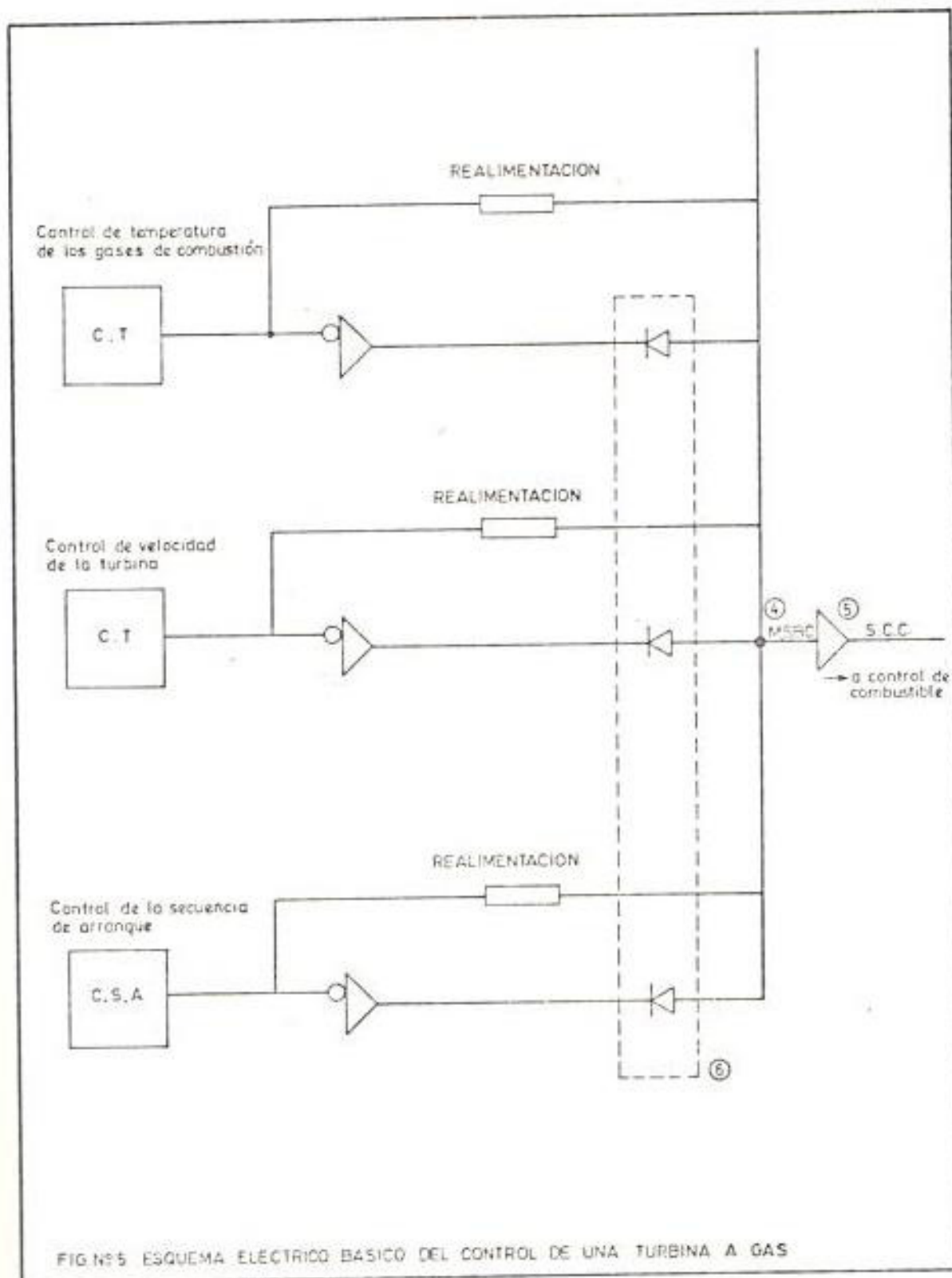


FIG Nº5 ESQUEMA ELECTRICO BASICO DEL CONTROL DE UNA TURBINA A GAS

Es posible realizar un análisis comparativo del sistema de control y esquema eléctrico básicos de las figuras N° 4 y 5, del que se puede deducir:

1. En el esquema eléctrico, la "Compuerta del Valor Mínimo", es la constituida por diodos conectados a las salidas de los amplificadores operacionales de los sistemas de control básicos. Es posible afirmar que este circuito se comporta como un selector de bajo voltaje.
2. El amplificador de potencia de donde se obtiene la señal comando de combustible, es el elemento encargado de cumplir con la función específica del elemento proporcional amplificador  $K_1$  del diagrama de control de la Fig. N° 4. Esto es, genera la señal analógica lo suficientemente amplificada para hacerla óptima para ser convertida, mediante la utilización de válvulas servo y cilindros hidráulicos, de señal eléctrica en señal de fuerza mecánica que hace que la bomba de combustible bombee suministrando a las cámaras de combustión, una cantidad de combustible proporcional a la señal eléctrica.
3. Así mismo, en el esquema eléctrico, se prevee las señales de realimentación cuya finalidad ya fue explicada.

Analizando el circuito eléctrico, se observa que cualquiera



de las tres señales principales que en un momento dado tengan un voltaje menor al de la barra donde se obtiene la señal básica de combustible, será la señal que monitoreará a esta última puesto que su amplificador operacional estará operando fuera de la zona de saturación positiva debido a que el diodo respectivo estará conduciendo y no se originará una corriente negativa en su unión de sumado.

Se concluye entonces que el circuito en estudio cumple con la premisa de que el sistema gobernante deberá ser aquel que demande menos flujo de combustible a la turbina.

Una vez analizado el control básico principal de una turbina a gas se va a proceder a desarrollar el estudio y diseño de cada uno de los controles de los tres parámetros principales ya mencionados y que en definitiva constituyen los tres modos de control básicos de la unidad.

### 3.1. CONTROL DE LA SECUENCIA DE ARRANQUE

Puesto que en el desarrollo de la presente sección del capítulo se va a realizar el diseño básico del control de la secuencia de arranque, es necesario empezar recalcando su importancia, además de la dependencia de parámetros y elementos involucrados con la misma.

La importancia es manifiesta si se parte del hecho de que la consecución de un arranque óptimo es la primera de las condiciones a ser satisfechas antes de alcanzar la turbina a ser controlada por cualquiera de los otros modos de control.

La dependencia del arranque de la unidad en cambio es fácilmente aceptable si se parte del hecho de que requiere una secuencia correcta de señales de comando a los accesorios, dispositivos de arranque y sistema de control de combustible.

### 3.1.1. Diseño del control

El sistema de control que se va a desarrollar es propio de turbinas a gas de un eje que pueden ser utilizadas en una amplia gama de aplicaciones tales como conductoras de generadores eléctricos, impulsadoras de naves marítimas o aéreas, conductoras de compresores, etc.

En cualquiera de estas aplicaciones el control de la secuencia de arranque o de puesta en marcha tiene por finalidad programar el flujo de combustible entrando a la turbina a gas desde el momento en que el rotor de la unidad comienza a girar hasta que la turbina pase a ser gobernada por el control de velocidad.

El programa de flujo de combustible a realizar el control en estudio está constituido por varios niveles fijos que cumplen con la tarea no solo de controlar el desarrollo de la secuencia de arranque sino también de proteger la turbina a gas, durante el período de tiempo que ésta dure.

Los niveles fijos de combustible son determinados por una serie de consideraciones, tendientes a obtener un mejor funcionamiento de la unidad, que serán analizadas a medida que se avance en el desarrollo del diseño.

Así pues, éstos niveles son:

1. Señal de combustible de nivel cero.
2. Señal de combustible de encendido.
3. Señal de combustible de calentamiento.
4. Señal de combustible de límite de aceleración.
5. Señal de combustible máximo.

Una vez conocidos los niveles fijos de flujo de combustible, se va a proceder a exponer el por qué de la razón de cada uno de ellos y a desarrollar el diseño de control respectivo.

## 1. Señal de combustible de nivel cero

Este nivel de combustible es el gobernante durante la etapa inicial de la secuencia de arranque. El flujo de combustible entrando a la turbina será nulo hasta que éste haya alcanzado una determinada velocidad llamada velocidad típica de encendido.

La finalidad de mantener el flujo de combustible en cero, es evitar que éste se acumule en los combustores hasta el momento mismo del encendido, puesto que de lo contrario al energizarse las bujías debido al exceso de combustible en la mezcla aire-combustible, ocurrirían explosiones y temperaturas superiores a los límites permitidos por los materiales de que están construidos los combustores atentando contra los mismos.

El diagrama de control que genera la señal de este primer nivel de flujo de combustible es el presentado en la Fig. N° 6.

## 2) Señal de combustible de encendido

La finalidad de este nuevo nivel de flujo de combustible es la de suministrar suficiente can

SENSOR DE VELOCIDAD

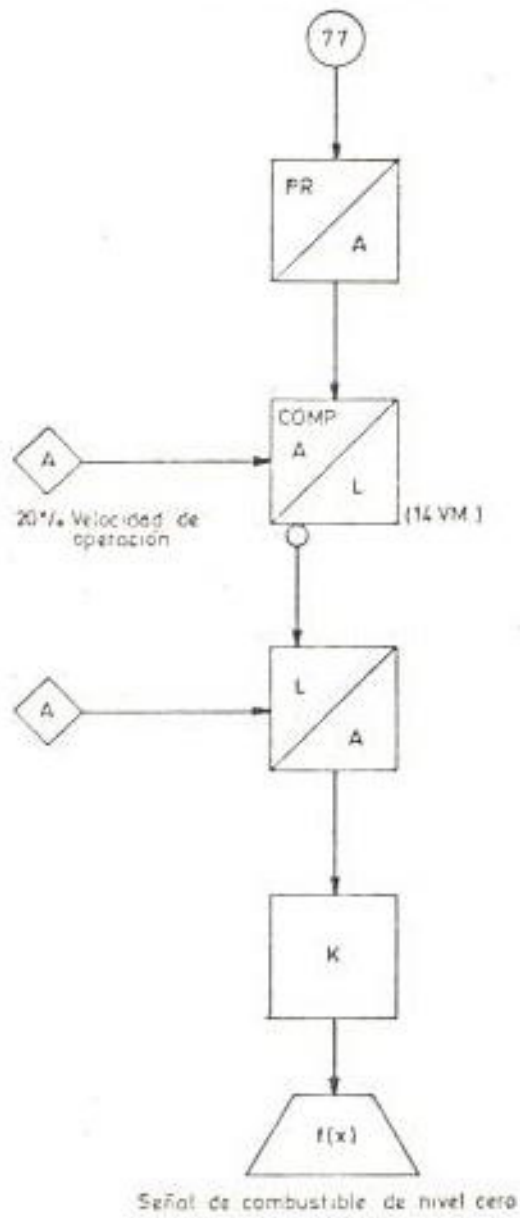


FIG. Nº 6 SEÑAL DE COMBUSTIBLE DE NIVEL CERO



tividad del mismo a los combustores con miras a proveer un buen encendido y una inflamación completa entre ellos.

Es de señalar que las características de buen encendido e inflamación se consiguen solo si se está suministrando al sistema de combustión una cantidad de aire suficiente para obtener la mezcla de combustible-aire.

Es factible visualizar, en una curva característica, el límite de combustible versus el porcentaje de velocidad de una turbina a gas (Fig. N° 7). Al respecto, ésta curva provee un perímetro de combustible como una función de velocidad o corriente de aire.

Mediante pruebas experimentales se ha conseguido determinar que al 20% de velocidad nominal de la turbina, la mezcla aire-combustible existente en ese momento, resulta en un incremento de temperatura de aproximadamente 1000°F en los combustores. Si se acepta que esta mezcla es suficiente para obtener un encendido satisfactorio sin causar ningún daño mecánico a la unidad debe también aceptarse al 20% de velocidad como el valor típico para el encendido de una turbi-

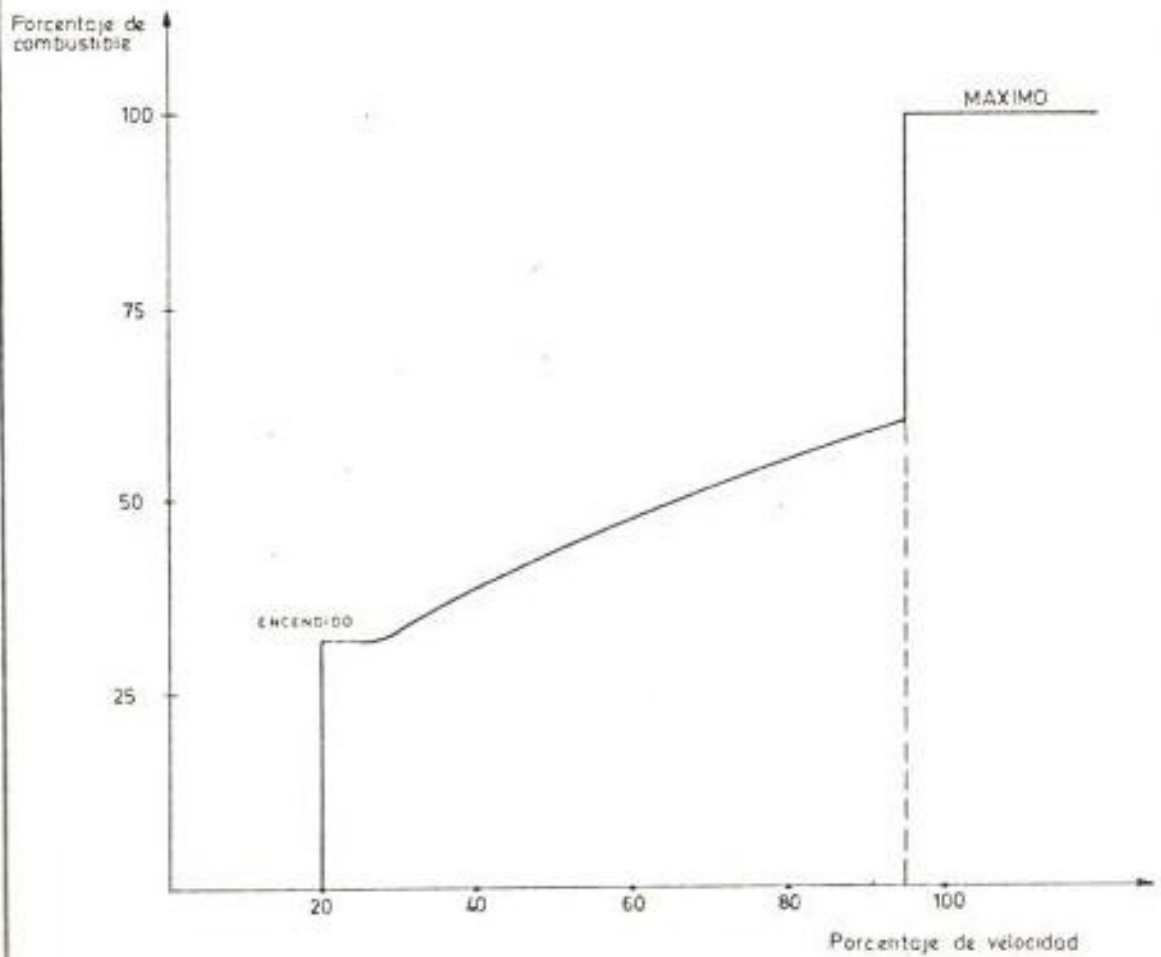


FIG. N.º 7 PERIMETRO DE COMBUSTIBLE COMO FUNCION DE VELOCIDAD O FLUJO DE AIRE

na a gas.

La explicación realizada en el párrafo anterior obedece al hecho de que al alcanzarse esa velocidad se inicia la secuencia de control que elevará la señal básica de combustible desde el valor cero al valor de encendido.

Se ha mencionado una secuencia de control debido a que luego de ser detectada la velocidad de encendido por medio de un elemento sensor, se realiza una purga para forzar varios cambios de aire del conducto de escape con el fin de eliminar la posibilidad de que en el haya alguna mezcla de combustible. Es de señalar que si el sistema de escape de la unidad tiene una configuración tal que no pueden quedar atrapadas dichas mezclas, no se necesita el tiempo de purga.

Una vez finalizado el ciclo temporizado de purga, se fija el flujo de combustible en el nivel prefijado de encendido.

Con miras a proteger la unidad de encendido no sostenidos y en general de fallas en el sistema de ignición o en el sistema de detección de llama, se provee un ciclo temporizado dentro del

cual deberá ocurrir la inflamación de la mezcla, caso contrario de lo cual se perderá la señal básica de combustible de encendido. En un capítulo posterior se desarrollará el sistema de protección contra esta falla.

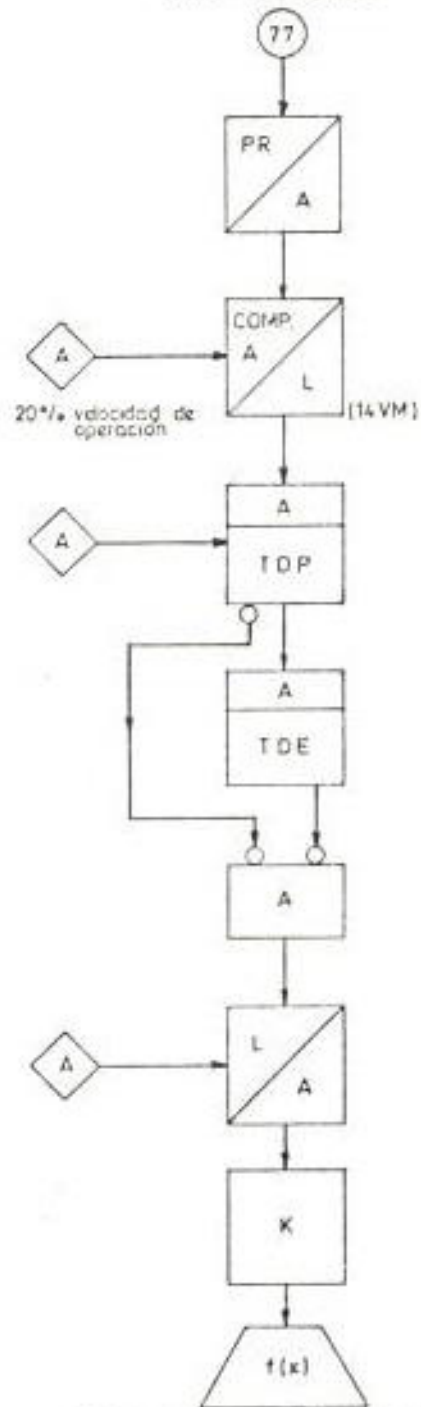
El control analizado corresponde al presentado en la Fig. N<sup>o</sup> 8.

### 3. Señal de combustible de calentamiento

El tercer nivel de flujo de combustible componente del sistema de control de la secuencia de arranque es el de calentamiento y tiene por principal característica el ser inferior al anterior, es decir de encendido, con el propósito fundamental de que una vez que ha sido detectada la llama en los combustores, reducir el combustible entrando a la turbina a fin de disminuir al mínimo el choque térmico en las piezas que se encuentran en la trayectoria del gas caliente.

Al respecto, se entiende por choque o tensión térmica al fenómeno consecuente de la exposición brusca de algún material metálico que se encuentra a baja temperatura a temperaturas -

Sensor de velocidad



Señal de combustible de encendido

FIG. Nº 8 SEÑAL DE COMBUSTIBLE DE ENCENDIDO



elevadas y cuyo efecto es el de desequilibrar la estructura molecular del material produciéndose la falla del mismo.

Además es de importancia señalar que en el límite de combustible analizado anteriormente la temperatura de encendido es muy cercana al límite plástico máximo por alta temperatura ( $1300^{\circ}\text{F}$ ) de los materiales más resistentes hoy en día utilizados en la construcción de las partes calientes de la turbina, por lo que es necesario bajar de dicha temperatura a las temperaturas de combustión y cuyos valores están dentro del rango de 800 a  $1000^{\circ}\text{F}$ .

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 subsecuente.

El temporizado del nivel de calentamiento arranca inmediatamente después de la detección de llama por medio de dos elementos sensibles a los rayos ultravioletas. La utilización de dos ele-

mentos obedece al criterio de "redundancia por asociación" mencionado al inicio del capítulo.

El diagrama de control correspondiente es el presentado en la figura N° 9.

#### 4) Señal de combustible de límite de aceleración

Una vez terminado el ciclo temporizado de calentamiento de la turbina, ésta comienza a acelerar aumentando su velocidad por lo que la relación de la mezcla aire-combustible también varía, ya que de no hacerlo la mezcla se transformaría en más pobre pudiendo ocasionar que haya un disparo de la unidad por pérdua de llama; por esto es necesario un mayor flujo de combustible para compensar el aumento de la masa de aire.

El mayor flujo de combustible se lo consigue - aumentando exponencialmente el valor de la señal básica de combustible hasta su límite de aceleración.

En un primer momento la aceleración de la turbina es condicionada por una razón de incremento de temperatura de más o menos  $3^{\circ}\text{C}$  que es

DETECTORES DE LLAMA

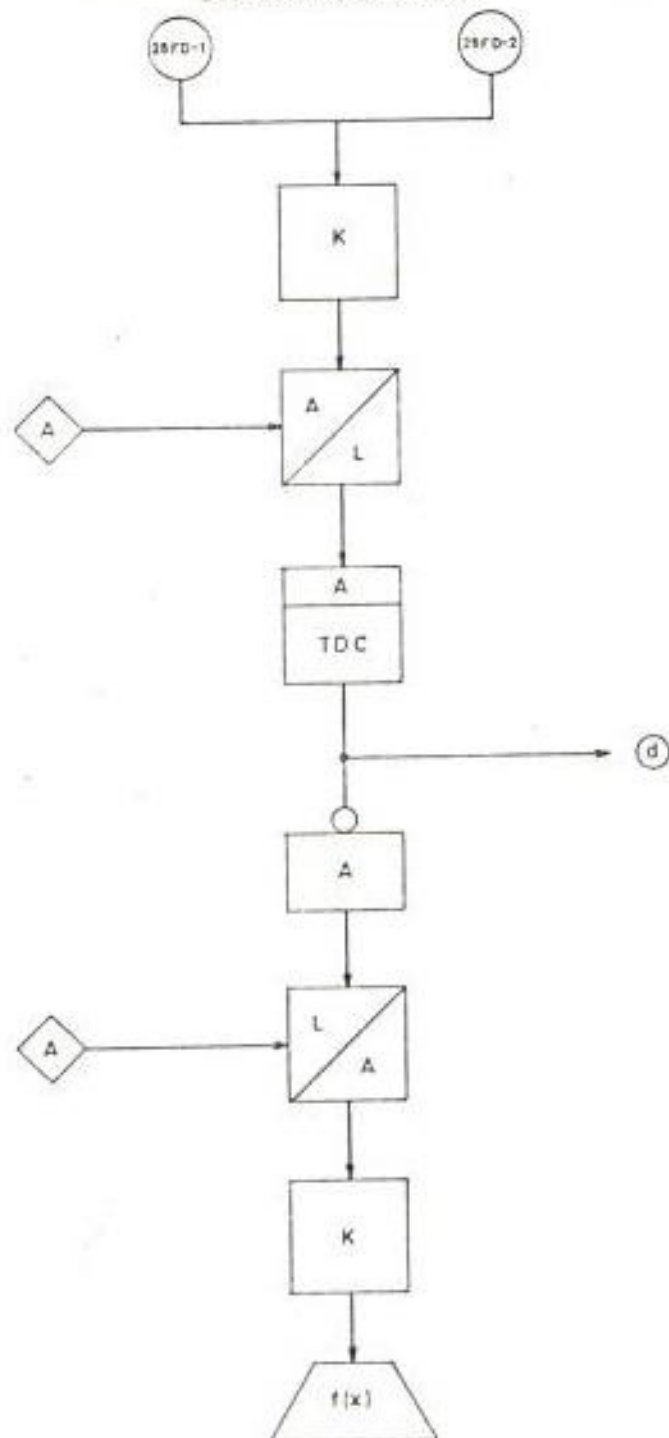


FIG. Nº 9 SEÑAL DE COMBUSTIBLE DE CALENTAMIENTO

el valor apropiado para elevar la unidad desde el nivel de temperatura de calentamiento hasta el nivel de temperatura de aceleración. Luego de ocurrido esto, la turbina acelerará más debido a que su eficiencia ha mejorado, por lo que la temperatura del ducto de escape disminuirá a una razón más o menos igual a la de incremento, hasta alcanzar la velocidad de operación (100% de velocidad nominal) y estar lista para pasar a control de regulador de velocidad. El diagrama de control correspondiente es el de la Fig. N° 10.

#### 5) Señal de combustible máximo

Una vez que la turbina ha alcanzado su velocidad nominal de operación, el sistema básico de control llamado a gobernar la unidad es el de velocidad. Puesto que este sistema va a requerir un mayor flujo de combustible entrando a la turbina que el equivalente a los niveles prefijados anteriormente analizados, es necesario proveer a la unidad de otro nivel fijo de combustible que limite los requerimientos de la unidad cuando se encuentre en control de regulador de velocidad y ya no en control de



Viene de la figura N° 9

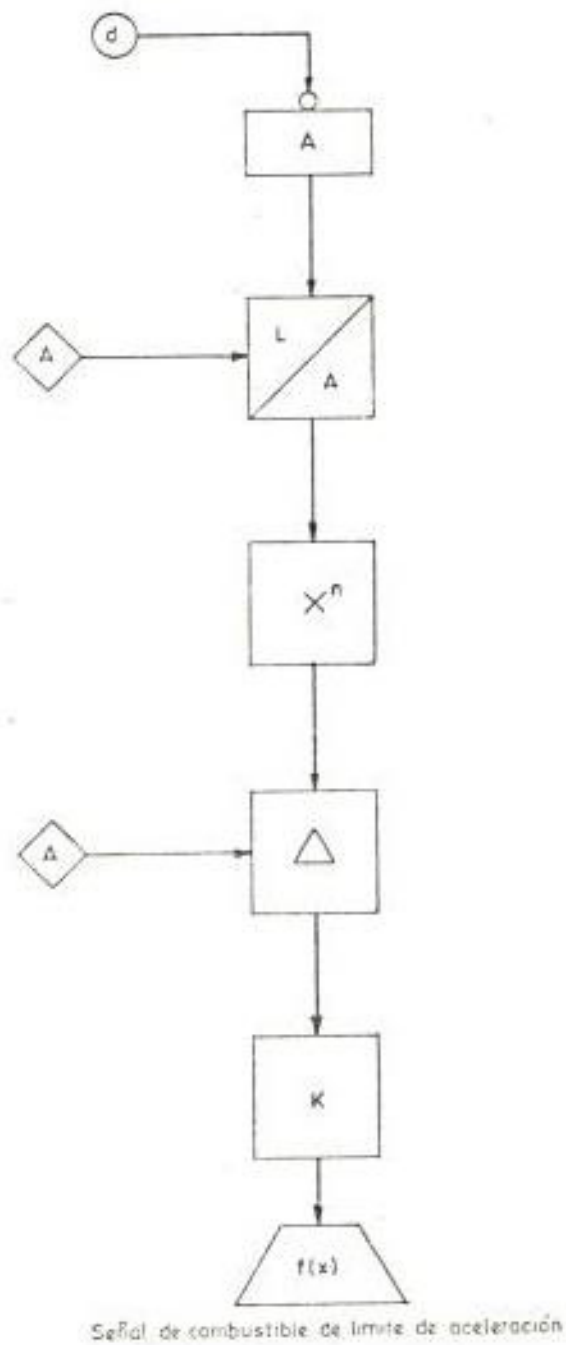


FIG. N°10 SEÑAL DE COMBUSTIBLE DE LIMITE DE ACELERACION

la secuencia de arranque.

La señal que da la orden de elevar la señal básica de combustible a este nuevo nivel máximo, es la que se obtiene por medio de un elemento sensor de velocidad que indica que se ha alcanzado el 95% de la velocidad de operación.

El diagrama de control equivalente es el desarrollado en la Fig. N° 11.

#### 3.1.1.1. Sistema final de control de la secuencia de arranque.

Una vez desarrollados los diagrama básicos de control de cada uno de los niveles prefijados de flujo de combustible, es necesario proceder a obtener la integración de cada uno de dichos controles en uno final que constituya el control total de la secuencia de arranque.

Para conseguir este objetivo, es necesario tan solo bloquear por medio de una señal - que salga del control de un nivel específico de combustible, los otros niveles prefijados a fin de que actúe solo uno a la vez en un momento dado.

SENSOR DE VELOCIDAD

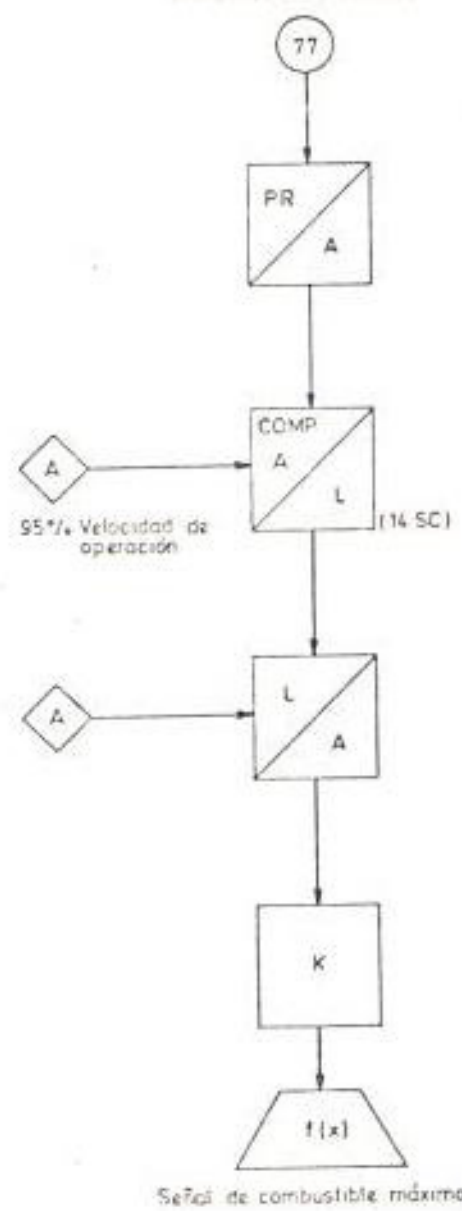


FIG. Nº 11 SEÑAL DE COMBUSTIBLE MAXIMO

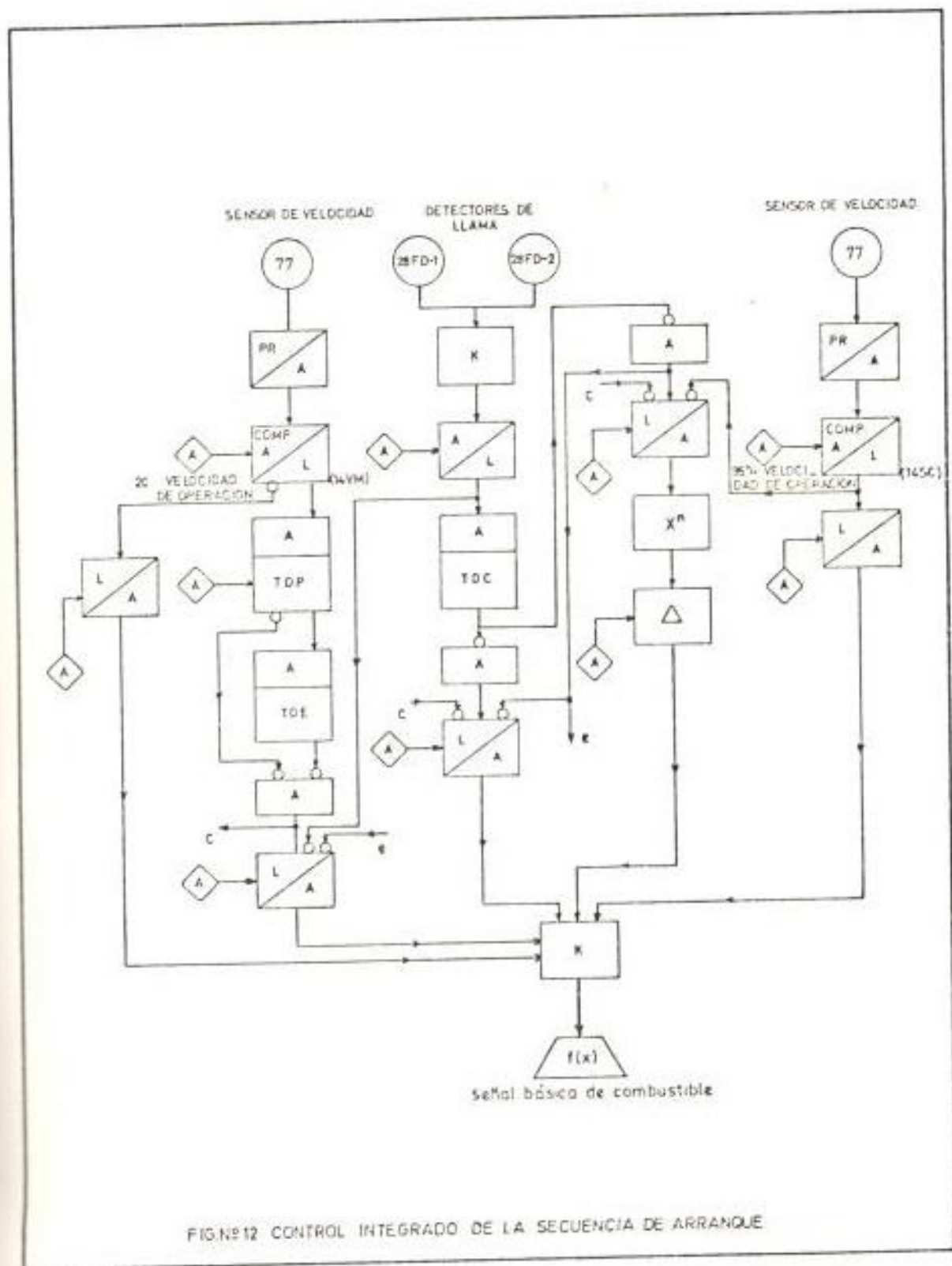
El control total de la secuencia de arranque se muestra en la Fig. N° 12. En el diagrama en mención se ha obtenido la señal de combustible de nivel cero como una derivación del sistema de control que fija la señal de combustible de encendido.

Del análisis del diagrama integrado del control de la secuencia de arranque se puede concluir que éste opera como un sistema de control de lazo abierto en el que la salida del mismo no afecta directamente la acción de control puesto que no se realimenta a fin de comparársela con la señal de entrada de referencia.

Así, se observa que para cada entrada de referencia, es decir para cada nivel pre-seleccionado de señal básica de combustible, corresponde un determinado flujo de combustible entrando a la turbina fijado por las consideraciones expuestas en los párrafos anteriores.

Por tratarse de un sistema de control de lazo abierto, la exactitud y confiabilidad





en la operación del mismo es función directa de la calibración de los elementos que en él participan, por lo que es necesario la revisión continua de los puntos de calibración de cada parámetro sensado.

En el caso que se está tratando, los parámetros sensados son fundamentalmente velocidad y tiempo. Al respecto cabe recordar que cualquier sistema que funciona sobre una base de tiempos es de lazo abierto.

La razón por la que es factible utilizar un sistema de control de lazo abierto es que las entradas de referencia son conocidas de antemano además de que se puede asegurar que las perturbaciones de orden externo son mínimas o nulas.

Siendo este sistema de control de lazo abierto, tiene las características propias de todo control de su tipo, esto es, rapidez en la respuesta de control, estabilidad y simplicidad.

A continuación se presenta un diagrama -

eléctrico básico del sistema de control de la secuencia de arranque, cuyo funcionamiento es equivalente al criterio del diseño: Fig. N° 13.

Para mayor simplicidad, en el esquema se presenta toda la lógica de control en forma de contactos.

Es de señalar que debido a las características de operación de los amplificadores operacionales es necesario, para que el circuito cumpla con su función específica, considerar la señal de realimentación que resulta luego del proceso de baja selección expuesto al inicio del capítulo.

En el circuito en análisis, ante una entrada adecuada se encienden las fuentes de voltaje representadas por un rectángulo señalado con L/A. Este elemento es del tipo lógico-analógico que cuando se enciende consume o produce corriente en la unión de sumado del amplificador operacional (punto US). El amplificador operacional trata de mantener el flujo de corriente en la unión de sumado en un valor nulo

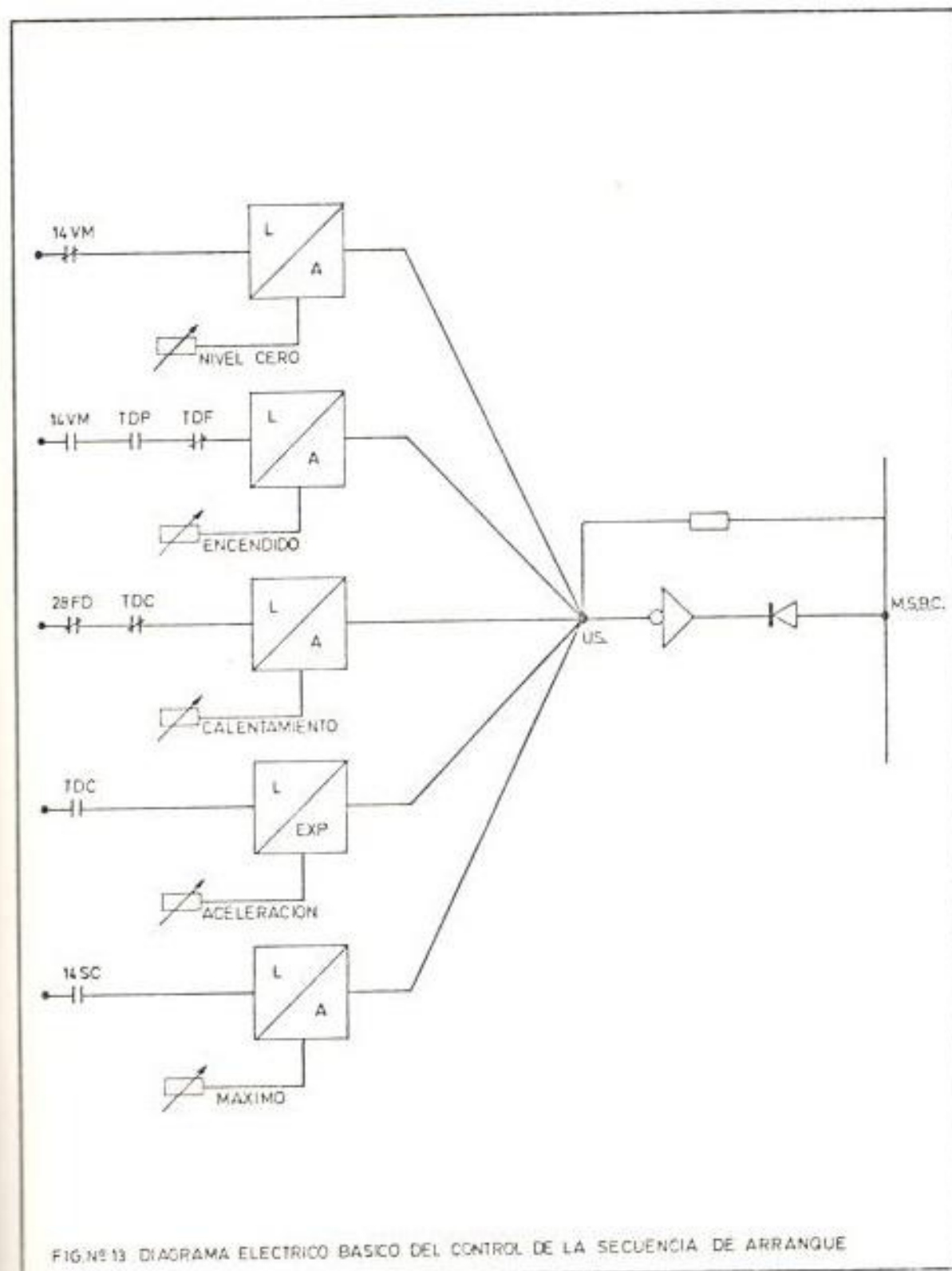


FIG. Nº 13 DIAGRAMA ELECTRICO BASICO DEL CONTROL DE LA SECUENCIA DE ARRANQUE



controlando el voltaje en la barra donde se tiene la Menor Señal Básica de Combustible MSBC a un nivel tal que la corriente a través de la resistencia de realimentación mantendrá la corriente de la unión de sumado en cero.

### 3.1.2. Análisis de la secuencia de arranque

En el desarrollo del control básico de la secuencia de arranque quedó establecido que es de suma importancia, el asegurar una medición de registro correcto de la velocidad que va desarrollando la unidad; esto se cumple tanto en la secuencia lógica del arranque como en la secuencia de parada de la turbina como se va a analizar a continuación.

La secuencia lógica de las diferentes etapas y operaciones que se van sucediendo en una típica secuencia de arranque desde el momento antes de que se introduzca la señal de arranque al sistema de control de la turbina hasta que ésta alcanza su velocidad de operación puede ser resumida de la siguiente forma:

1) Mientras la turbina está detenida se efectúan

verificaciones de orden general tales como: existencia de voltaje DC, alimentación de voltaje AC al centro de control de motores para auxiliares, servo-válvulas en posición adecuada, con el fin de verificar la operatividad de dichos sistemas.

- 2) Por medio del selector correspondiente (maestro) se escoge un modo de operación y automáticamente se comprueba si los circuitos de protección de la unidad están en perfecto estado. Si ésto ocurre, la turbina está lista para aceptar una señal de arranque.
- 3) Se dá la señal de arranque por medio del interruptor principal, energizándose el control y los circuitos de protección, al mismo tiempo que arrancarán los equipos auxiliares necesarios. El circuito maestro (4) permite que se presurice el sistema de aceite de control y el embrague de arranque. En este momento comenzará a girar la unidad.
- 4) Cuando la turbina ha alcanzado el 20% de velocidad el sensor 14 VM genera la señal que arranca el temporizado de purga TDP cuya finalidad ya fue expuesta, al mismo tiempo que desenergiza el solenoide de embrague de arranque 2DEA. Desde este mo

- mento el embrague utiliza el torque del dispositivo de arranque para mantenerse enganchado.
- 5) Una vez finalizado el ciclo de purga, se introduce combustible a las cámaras de combustión, se energizan las bujías de encendido y se arranca el ciclo temporizado de encendido TDF que sirve para proteger la unidad por pérdida de llama.
  - 6) Luego de establecida la llama, la señal producida por uno de los detectores 28 FD arranca el ciclo temporizado de calentamiento TDC.
  - 7) En el momento en que termina el período de calentamiento, se comienza a incrementar el flujo de combustible entrando a la turbina, la que comienza a acelerar. Cuando la turbina alcanza una velocidad superior a la del dispositivo de arranque (60%) el embrague se desengancha y la unidad auto mantiene su velocidad. Además se desenergizan las bujías.
  - 8) El sensor de velocidad 14 SC detecta que se ha completado la secuencia y la turbina está lista para ser sincronizada y en control de velocidad. En caso de no alcanzarse la velocidad de operación dentro del ciclo temporizado de arranque,

se inicia la secuencia de parada de la unidad debido a que se la protege de falla por secuencia incompleta.

Puesto que la secuencia de parada de la unidad es un evento que ocurre ya sea ordenado manualmente o por operación automática de los sistemas de protección, es necesario analizarla brevemente.

Al respecto, cabe señalar que la acción de parar - una turbina a gas que está corriendo en secuencia de arranque o en operación normal, requiere tan solo de cortar el suministro de combustible a la misma a la vez que de desenergizar ciertos elementos que al momento de la orden de parada pudieran estar trabajando tales como las bujías de encendido y el dispositivo de arranque y energizar otros como las bombas de lubricación necesarios para la conservación de la unidad.

De igual forma, como en el caso de la secuencia de arranque, a continuación se enumeran los pasos típicos de una secuencia de parada:

- 1) La secuencia de parada de la unidad es iniciada por medio del interruptor principal manualmente o automáticamente por operación de algún circuí



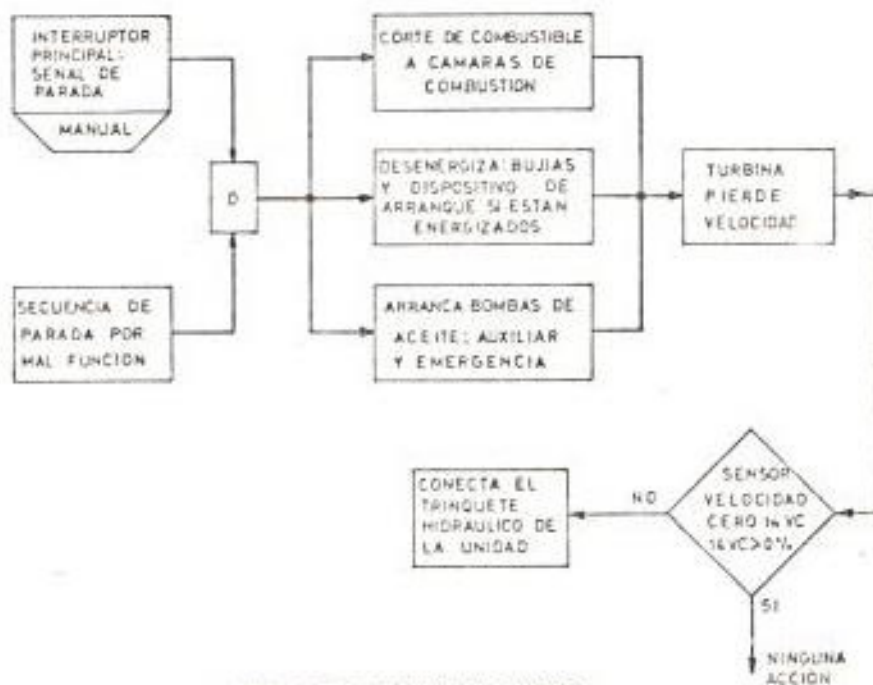
to de protección para mal funcionamiento.

- 2) Inmediatamente después del evento anterior, se corta el combustible a las cámaras de combustión, se desenergizan las bujías y el dispositivo de arranque en caso de haber estado trabajando y se arrancan las bombas de aceite de lubricación.
- 3) La turbina comienza a perder velocidad y en el momento en que el sensor de velocidad cero 14VC detecta que la unidad ha parado, se genera la señal para conectar el trinquete hidráulico cuya finalidad es la de mantener girando el eje de la turbina para evitar que éste se deforme al sufrir un cambio brusco de temperatura.

Una vez expuestas las secuencias de arranque y parada de la unidad, es factible realizar un diagrama de secuencia lógica y un esquema eléctrico elemental que permita una mejor comprensión de las mismas: figuras 14, 15 y 16 a-b. Cabe recalcar que el sistema total de protección de una turbina a gas será analizado detalladamente en otro capítulo.

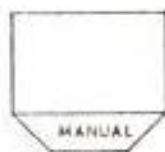
Por último, es factible presentar una curva carac-





a.- SECUENCIA LOGICA DE PARADA

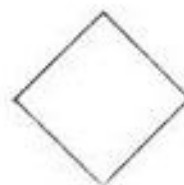
b.- SIMBOLOGIA



+ OPERACION MANUAL



+ OPERACION AUTOMATICA



+ VERIFICACION AUTOMATICA DE PARAMETROS POR MEDIO DE SENSORES, RELES DE TIEMPO, ETC.

FIG. Nº 15 a) DIAGRAMA DE LA SECUENCIA LOGICA DE PARADA  
b) SIMBOLOGIA UTILIZADA EN LAS FIG. Nº 14 y 15a

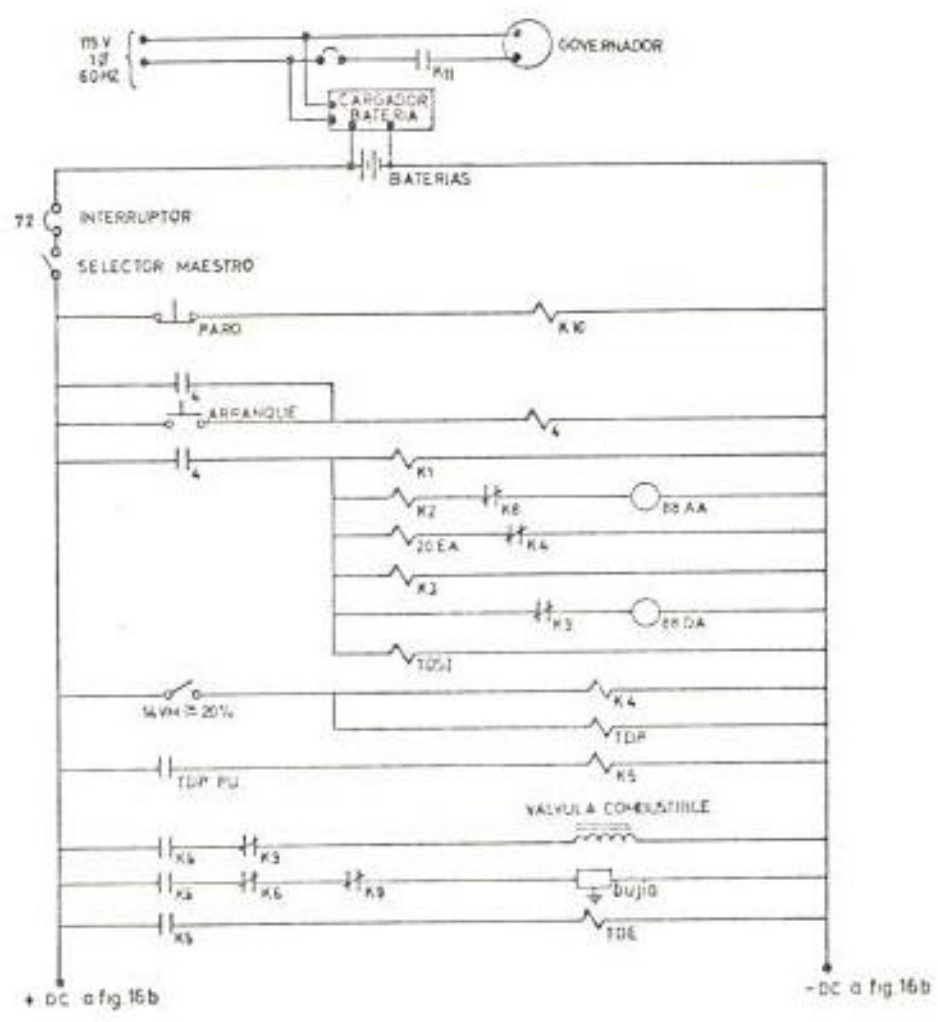
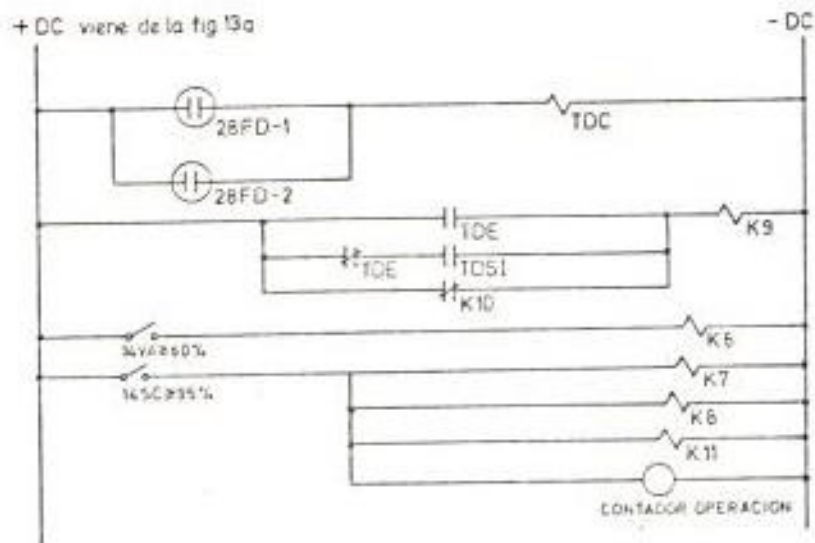
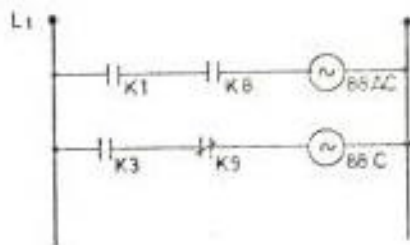


FIG. N° 16a ESQUEMA ELECTRICO ELEMENTAL DE UNA SECUENCIA TIPICA DE ARRANQUE  
(continua en fig. N° 16b)



AUXILIARES 480 VAC:



SIMBOLOGIA

- 68AA: BOMBA ACEITE EMERGENCIA
- 68DA: MOTOR ARRANQUE
- 68AC: BOMBA ACEITE AUXILIAR
- 68C : BOMBA COMBUSTIBLE
- 20EA: SOLENOIDE EMERGENCIA ARRANQUE
- TDS1 : TEMPORIZADO ARRANQUE
- TDP : TEMPORIZADO PURGA
- TDE : TEMPORIZADO ENCENDIDO
- TDC : TEMPORIZADO CALENTAMIENTO
- 28FD-1-2: DETECTORES DE LLAMA
- 14VM : SENSOR VELOCIDAD MINIMA
- 14VA : " " ACCELERACION
- 14SC : " " SECUENCIA COMPLETA

FIG. Nº 16b ESQUEMA ELECTRICO ELEMENTAL DE UNA SECUENCIA TIPICA DE ARRANQUE

terística de la secuencia de arranque de una turbina a gas de un solo eje, en donde es posible visualizar la variación de los diferentes parámetros involucrados con respecto al tiempo: Fig. N° 17.

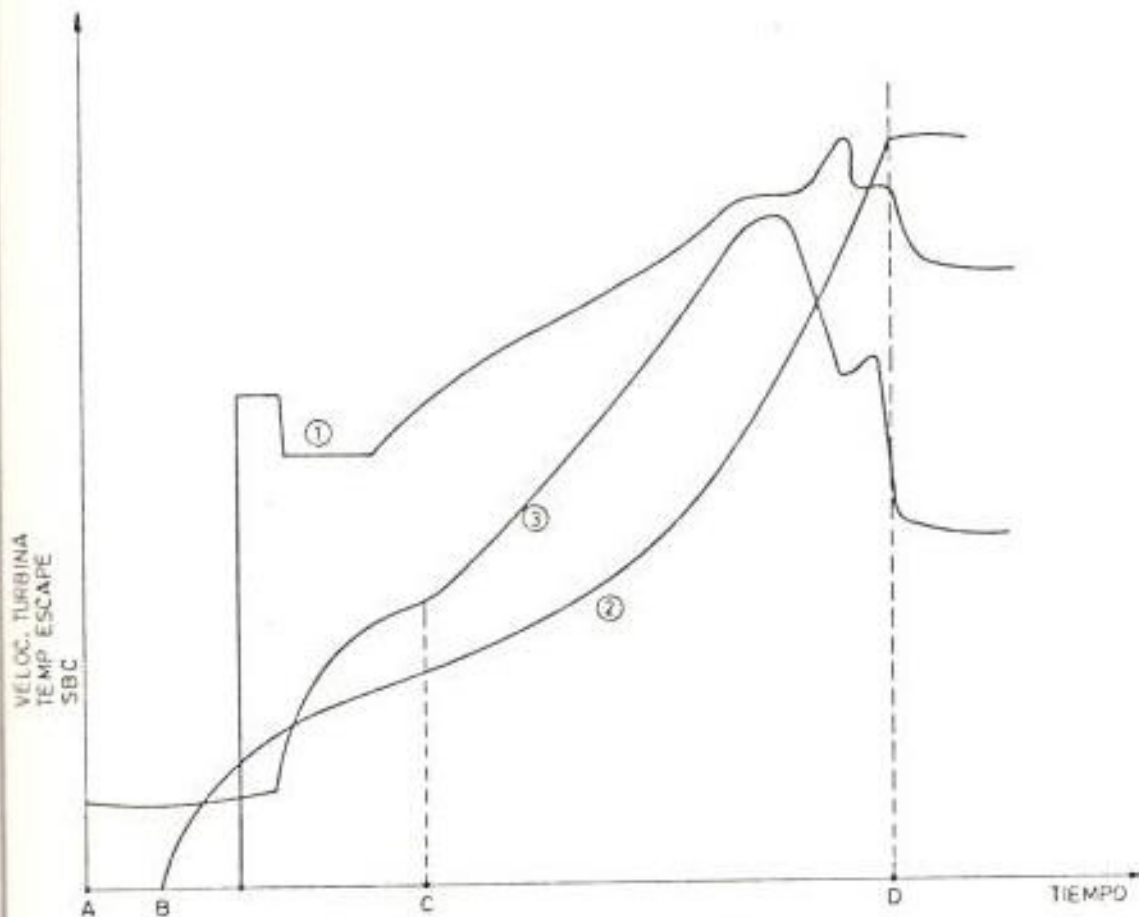
En dicha gráfica los puntos A, C, C y D del eje de tiempo representan los tiempos en los cuales - la turbina está parada, comienza a rotar, comienza a acelerar y alcanza su velocidad de operación, respectivamente.

### 3.2. CONTROL DE VELOCIDAD DE LA TURBINA

En esta sección del capítulo se va a estudiar las características del control más importante de una turbina a gas, así como a desarrollar el diseño básico del mismo.

Al respecto, el control de velocidad es indispensable - cuando la turbina conduce un generador eléctrico y tiene por finalidad conseguir características tales como:

- a) Proveer máxima estabilidad al sistema de control de velocidad, es decir mantener la velocidad en un valor constante sin variaciones demasiado considerables arriba o abajo de este valor.
- b) Poder retornar el parámetro velocidad al valor prefija



- CURVAS: ① MENOR SEÑAL BASICA DE COMBUSTIBLE  
 ② VELOCIDAD DE LA TURBINA  
 ③ TEMPERATURA DE ESCAPE DE LOS GASES

FIG. Nº 17 CURVA CARACTERISTICA DE LA SECUENCIA DE ARRANQUE DE UNA TURBINA A GAS DE UN EJE



do de velocidad luego de ocurrido un cambio en la carga, con un mínimo de oscilación y en el menor tiempo posible.

- c) Seguridad del generador al que conduce contra posibles aumentos descontrolados de velocidad.
- d) Facilitar la sincronización de la unidad al sistema eléctrico al que está incorporada.
- e) Regular de la mejor manera posible la carga de la turbina como una función de la frecuencia para asegurar una repartición estable de carga cuando la unidad opera en paralelo con otras.

### 3.2.1. Diseño del control

El sistema de control de velocidad a diseñar deberá controlar la velocidad y la carga de la turbina, operando en respuesta a la señal resultante de la comparación entre la velocidad real de la turbina con el valor de velocidad requerida dado por el punto de ajuste de regulación. El control mencionado se lo consigue variando la señal básica de combustible hasta el valor necesario para mantener la velocidad de operación de la unidad igual a la requerida.

El sistema de control de velocidad está básicamente constituido por dos sub-sistemas principales:

- a) Sistema generador de las señales de velocidad.
- b) Punto de ajuste de regulación.

Cada uno de estos dos subsistemas serán analizados a continuación para una mejor comprensión de los mismos.

#### 3.2.1.1. Sistema generador de las señales de velocidad.

La importancia de este subsistema es comprensible si se parte del hecho de que las distintas funciones en el sistema de control de una turbina a gas están programadas en función dependiente de la velocidad del rotor de la misma. Basta recordar que en el control básico de la secuencia de arranque, tres de los niveles prefijados (señales de combustible de nivel cero, de encendido y máximo) tienen como elemento permisivo a dos valores diferentes de velocidad del rotor. Además, en el análisis de la secuencia lógica de arranque quedó establecido que a diferentes valores de ve-

locidad sucedían operaciones específicas con miras a la consecución de una óptima secuencia de puesta en marcha de la unidad.

En realidad, en la obtención de los niveles prefijados de combustible del control de arranque se mencionaron los sensores de velocidad e incluso en los diagramas se representó la obtención de las dos señales de velocidad requeridas, sin embargo se considera justificado desarrollar el diagrama de control total para la obtención de los diferentes niveles de velocidad necesarios por cuanto es parte intrínseca del control en análisis.

La velocidad del rotor es detectada por dos sensores de tipo magnético que están montados en la cercanía de una rueda de sesenta dientes que reposa directamente sobre el rotor de la turbina. A medida que gira el rotor, los sensores de velocidad generan impulsos de voltaje cuya frecuencia en Hz es igual a la velocidad de la turbina en revoluciones por minuto.

Esta frecuencia de los impulsos es convertida a un voltaje analógico proporcional a la velocidad por medio de un convertidor de pulsos a señal analógica (PR/A). Esta señal es alimentada a un elemento proporcional-amplificador (K<sub>1</sub>) a fin de que se eleve a niveles adecuados para conducir otros sistemas, siendo este elemento de ganancia ajustable.

La señal de salida del elemento proporcional-amplificador (K<sub>1</sub>) es llevada a elementos comparadores (COMP) que la transforman en señales lógicas una vez que sobrepasan ciertos ajustes de referencia equivalentes a determinados valores de velocidad necesarios para fines de control.

La curva de la Fig. N° 18 es típica para la calibración de la señal de voltaje resultante de la conversión de impulsos a analógico. Normalmente la señal de voltaje varía de 0 a 10 voltios según la velocidad nominal varíe de 0 a 100%.

El diagrama de la Fig. N° 19, representa el control para la obtención de los diferentes

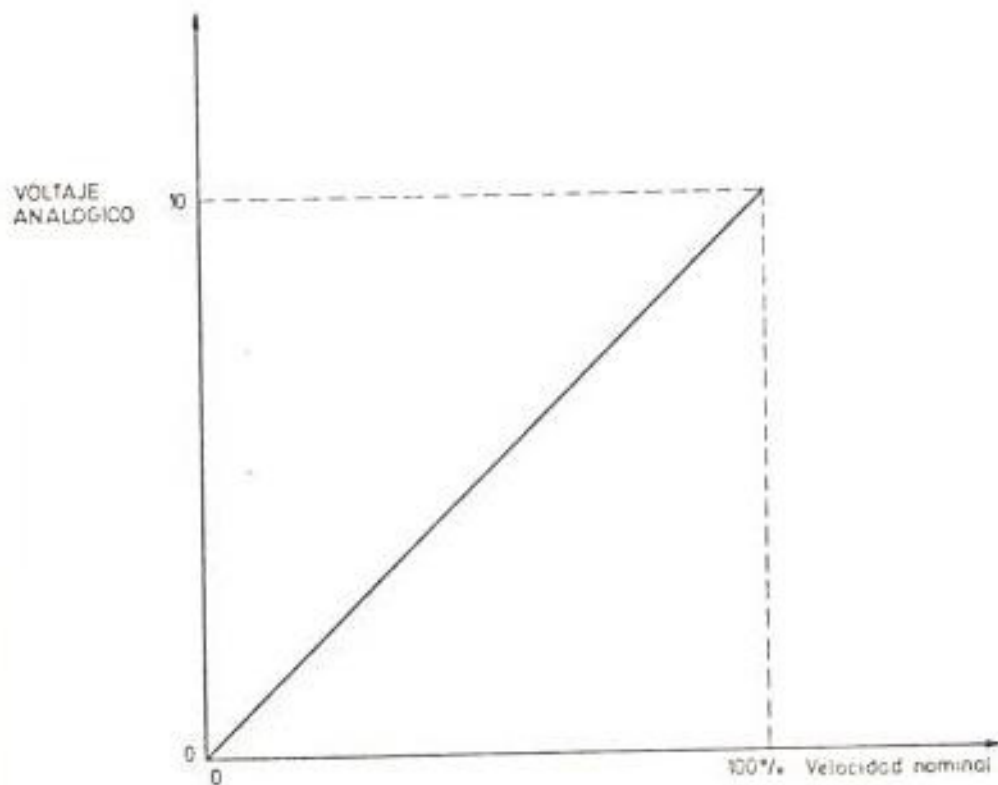
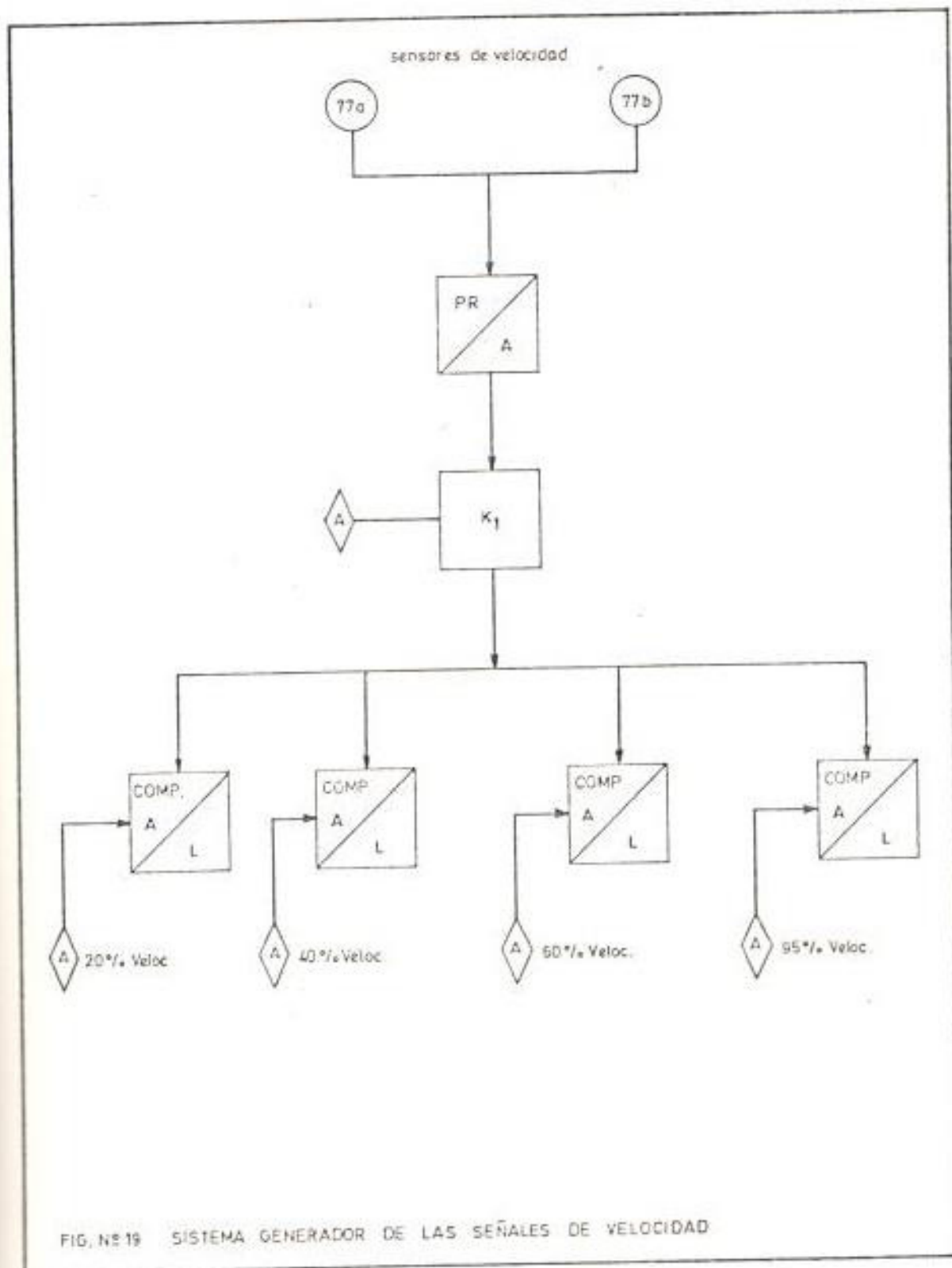


FIG. Nº 18 CALIBRACION DE SEÑAL DE VOLTAJE RESULTANTE DE CONVERSION DE DE IMPULSOS A ANALOGICO





valores de velocidad.

### 3.2.1.2. Punto de ajuste de regulación

La importancia de este subsistema radica en que provee la referencia de velocidad-carga para el sistema de control de velocidad. El punto de ajuste de regulación en conjunto con una señal de referencia de velocidad de 100%, representan la señal de velocidad requerida con la cual se compara la velocidad real de la turbina a fin de controlar la señal básica de combustible. En otras palabras, variando el punto de ajuste de regulación es posible tener control de la referencia de velocidad en cualquier valor cercano al de régimen (100%).

El punto de ajuste de regulación tiene un rango de valores con topes de alta y baja velocidad con el fin de que la turbina se mantenga dentro de los límites de diseño y su secuencia de sincronización y carga sea compatible con el sistema que integra.

En la Fig. N° 20 se representa una curva típica para calibración del punto de ajuste de regulación o velocidad.

Una vez analizados los dos subsistemas componentes del control de velocidad, se procede a analizar el control propiamente dicho, esto es el gobernador o regulador de velocidad.

Al respecto, es de señalar que normalmente el gobernador es de tipo hidro-mecánico o electrónico. En los generadores conducidos por turbinas a gas, el último de los mencionados es el más utilizado puesto que con la implementación de los dispositivos semiconductores se alcanzó el grado de seguridad que no se obtenía en el sistema servo-electrónico particularmente por el comportamiento de las válvulas de tubos de vacío bajo condiciones de vibración.

Entre las ventajas más notorias del sistema de control electrónico se pueden mencionar:

1. Alto grado de seguridad de operación
2. Precisión en la regulación de velocidad
3. Mejor temperatura de estabilización.
4. Obtención más simple de una optimización del

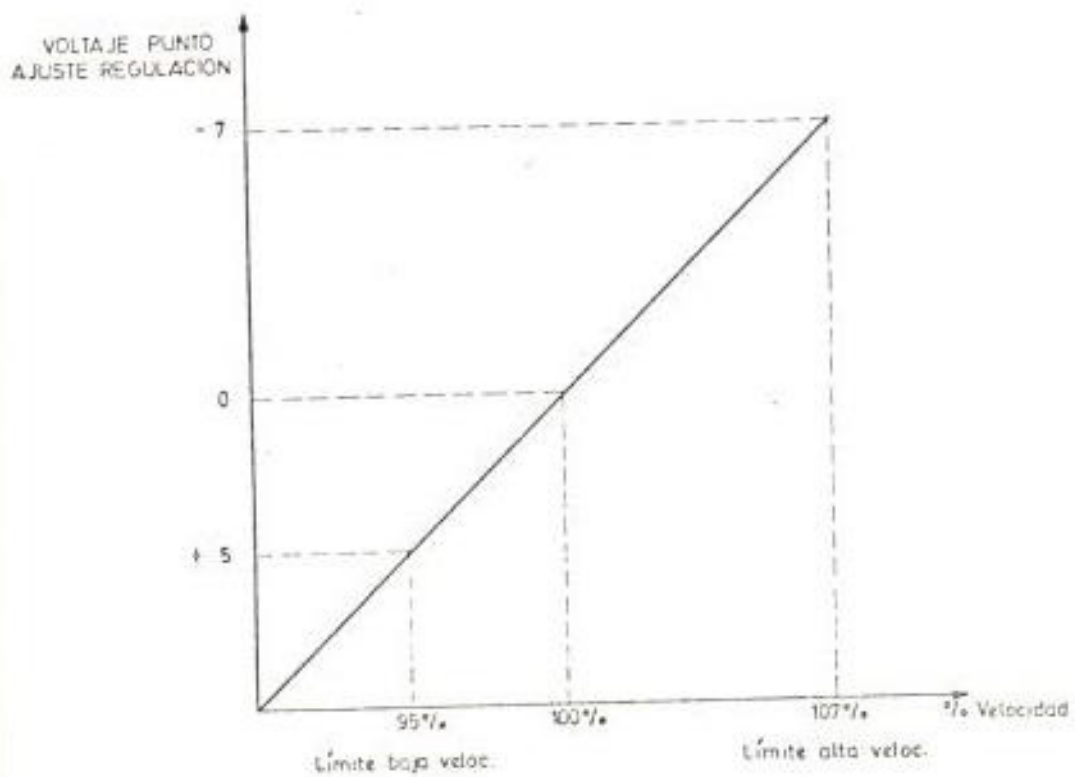


FIG. Nº 20 CURVA DE CALIBRACION DE PUNTO DE AJUSTE DE REGULACION

control.

5. Mayor rango de temperaturas de operación.
6. Sistema de protección fácilmente incorporable al gobernador básico.

Luego de enumeradas las ventajas de un gobernador de velocidad electrónico, se debe anotar a manera de información que existen cuatro tipos de control dentro del sistema electrónico, cada uno con características y ventajas propias respecto de los otros:

1. Voltaje análogo DC
2. Voltaje análogo AC
3. Pulso con modulación
4. Digital y frecuencia analógica

Sin embargo, de la variedad existente de reguladores de velocidad, es factible resumir las características de operación en dos modos básicos:

- a. Modo de operación Isócrono o Astático
- b. Modo de operación Estático.

### 3.2.2. Modo de operación Astático

Como operación astática se entiende al comportamiento del gobernador de velocidad por el cual



La turbina a gas funcionará a una velocidad determinada independiente de la carga, para cualquier valor del punto de ajuste de regulación. Es decir, la velocidad permanecerá constante ante cualquier variación de la carga de la unidad.

Normalmente, las turbinas a gas de impulsión mecánica utilizan esta característica de operación del gobernador de velocidad.

La Fig. N° 21a representa un diagrama elemental de bloque de un regulador estático, mientras la curva de la figura N° 21b representa la característica de velocidad versus carga de la unidad.

Una vez analizado el significado del modo de operación estático, se va a implementar el sistema de control respectivo que provea una rápida respuesta a los cambios de carga y mantenga bloqueado al gobernador hasta que la turbina haya alcanzado su velocidad de operación. La Fig. N° 22 representa el control en mención.

Del diagrama en estudio se observa que la señal de velocidad real de la turbina es generada según se determinó, en el sistema generador de señales de velocidad. Esta señal es bloqueada por medio de



FIG. Nº 21-a. DIAGRAMA ELEMENTAL DEL GOBERNADOR ASTATICO

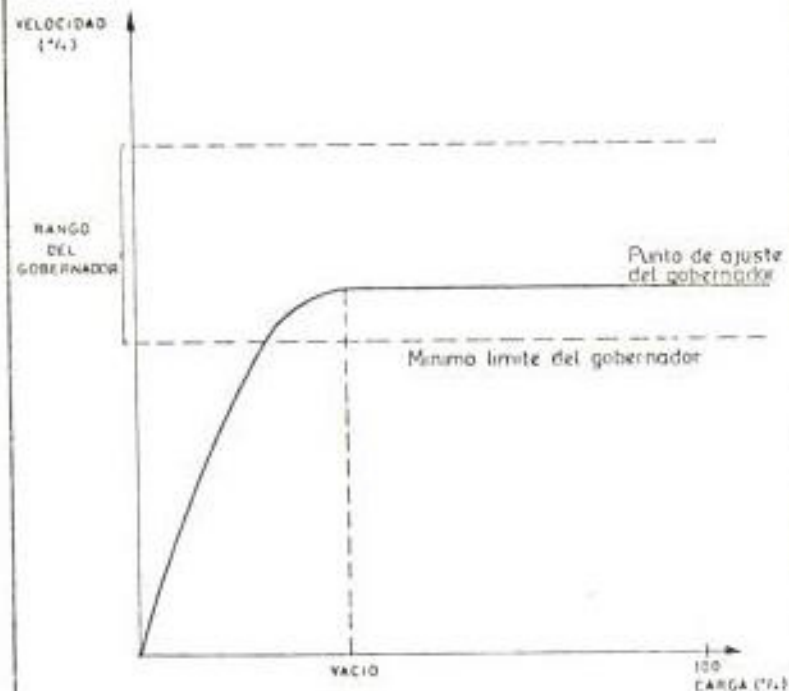


FIG. Nº 21-b. CARACTERISTICA VELOCIDAD vs CARGA DE UN GOBERNADOR ASTATICO

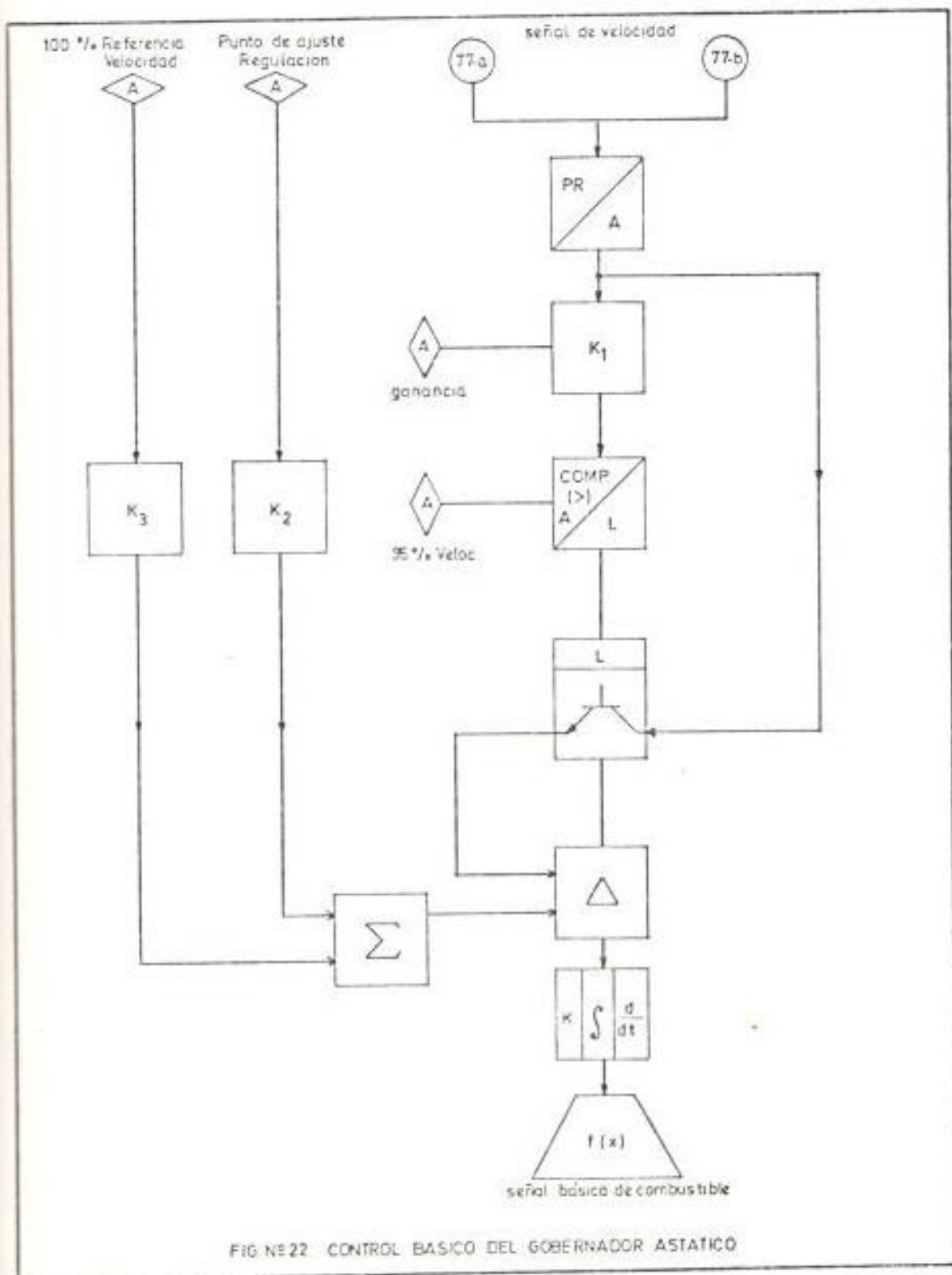


FIG Nº22 CONTROL BASICO DEL GOBERNADOR ASTATICO

un interruptor que permite que pase al elemento diferencial donde es comparada con la señal de referencia de velocidad, una vez que la turbina ha alcanzado el 95% de su velocidad. La señal de referencia de velocidad es el resultado de la suma de las señales de 100% de referencia y punto de ajuste de velocidad multiplicadas por las constantes de amplificación  $K_3$  y  $K_2$  respectivamente.

La señal que sale del elemento diferencial es la señal de error que hará actuar al elemento de control proporcional-integral-derivativo para modificar la señal básica de combustible (SBC) hasta que la señal de error sea cero. Se cumple entonces que la velocidad de la turbina permanecerá constante ante cualquier variación de carga puesto que ésta es función del flujo de combustible entrando a la turbina.

### 3.2.3. Modo de operación estático

Antes de definir el modo de operación estático, se va a tratar de justificar la necesidad e implementación del mismo.

Con este fin se puede analizar el caso típico de una planta generadora de potencia eléctrica cons

titulada por varias unidades. Las variaciones de carga diaria hacen deseable, desde el punto de vista de la eficiencia, que las unidades generadoras necesarias trabajen en un régimen cercano a plena carga, por lo que las de reserva serán arrancadas e incorporadas al sistema cuando la carga del mismo así lo demande.

En este tipo de operación, el sistema de regulación estático no es el idóneo por cuanto la velocidad de una unidad particular no es controlada por su gobernador sino mantenida constante por el sistema por lo que al mínimo cambio en el punto de ajuste del gobernador, ya sea intencionalmente o por causas externas, la señal básica de combustible variará grandemente haciendo que la unidad acepte o rechace carga en exceso. Esto va a ocasionar un gran desbalance de carga del sistema por lo que se corre el riesgo de que cualquiera otra unidad se dispare por acción de su protección por sobrecarga o por operación de sus relevadores de potencia inversa en el caso de motorización.

En este caso, lo ideal es implementar a los reguladores de velocidad el modo de operación estático, cuya característica fundamental es la de permitir una disminución en la velocidad real a medida que aumenta la carga del sistema y el punto de



ajuste de regulación permanece sin cambiar.

Este tipo de gobernador permite el funcionamiento en paralelo de varias unidades de un sistema con cierta carga así como la repartición de las varia  
ciones de carga del mismo.

El porcentaje de cambio de velocidad para el cambio de carga nominal se conoce como regulación del gobernador o estatismo.

En la Fig. N° 23a se representa un diagrama de blo  
que elemental del gobernador tipo estático.

Es de señalar que en este tipo de regulador, cada punto de ajuste de regulación representa un nuevo punto operacional con idéntica característica de pendiente. La curva de la Fig. N° 23b es la carac  
terística típica de velocidad versus carga de un regulador estático. El control diseñado para modo de operación estático de un gobernador de velo  
cidad es el representado en la Fig. N° 24.

Del control en análisis se deduce que el regulador estático es similar al astatico en cuanto a la generación de la señal de velocidad y al blo  
queo de su operación hasta que la turbina alcance el 95% de su velocidad nominal. Sin embargo,

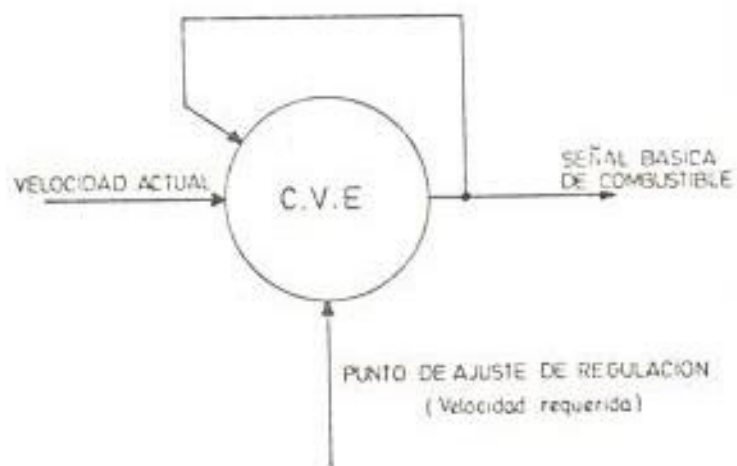


FIG. Nº 23a DIAGRAMA ELEMENTAL DEL GOBERNADOR ESTATICO

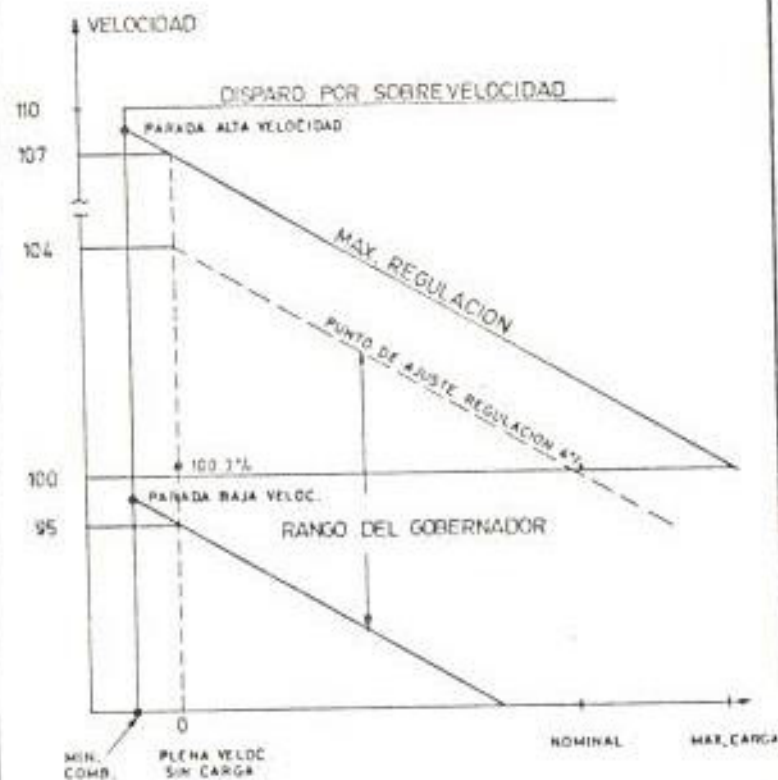


FIG. Nº 23b CARACTERISTICA VELOCIDAD vs. CARGA DE UN GOBERNADOR ESTATICO

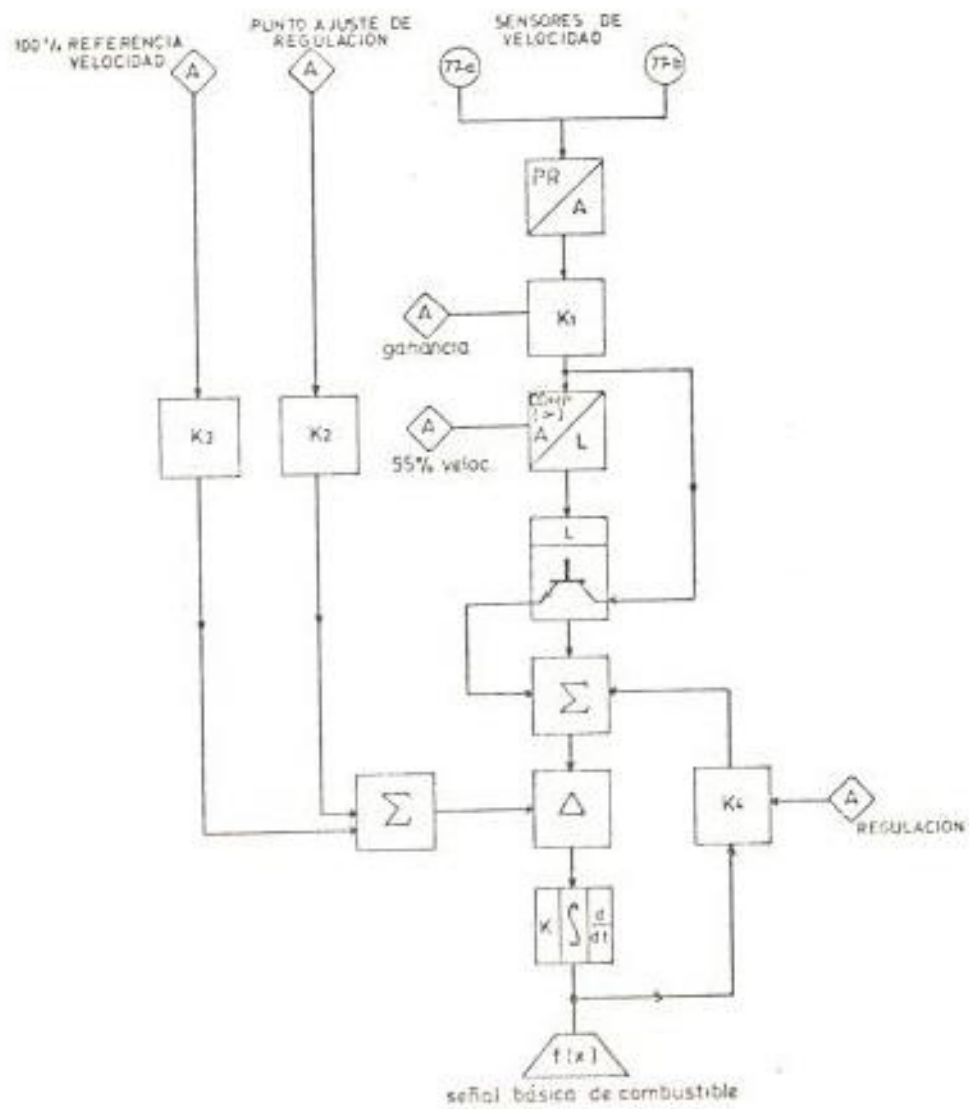


FIG. Nº 24 CONTROL BASICO DE UN GOBERNADOR ESTATICO

en este caso la señal de error es resultante de la comparación que se realiza en el elemento diferencial  $\Delta$  entre la señal de referencia de velocidad y la señal resultante de la suma de las señales de velocidad real de la turbina y estatismo del gobernador. La señal de estatismo del gobernador es igual a la señal básica de combustible modificada por un elemento proporcional de valor ajustable ( $K_4$ ).

La señal que sale del elemento diferencial es alimentada al elemento de control proporcional-integral-derivativo que cumple similar función al utilizado en el gobernador estático.

Si se asume que el gobernador está trabajando a cierta velocidad con determinada carga y señal de error cero y ocurre un aumento de carga repentino, la velocidad de la unidad disminuirá produciéndose una señal de error que hará que aumente la señal básica de combustible y en consecuencia la señal de estatismo. Puesto que esta última se suma a la señal de velocidad real, la señal de error volverá a ser cero pero a una velocidad de la turbina menor que la original.

En el caso contrario, ante una disminución de carga la velocidad de la turbina será mayor. Se cumple de esta manera la característica propia del gobernador estático.

#### 3.2.4. Sistema final de control de velocidad

Luego de analizados los dos tipos de gobernadores de velocidad se va a considerar la implementación total del sistema de control de velocidad, el que deberá tener las siguientes características:

- a) Capacidad de trabajar en cualquiera de los dos modos de operación: gobernador estático o gobernador estático. Para esto deberá poseer un selector de transferencia manual que seleccionará el modo de operación requerido [T]. Cuando el sistema opere como gobernador estático su regulación podrá ser modificada por medio del control.
- b) Capacidad de reducir la señal básica de combustible si el porcentaje de aceleración de la unidad llega a sobrepasar el valor de 1% por segundo que es el ideal con fines de protección contra aumento excesivo de la temperatura en las partes móviles de la turbina. Este control



de aceleración generalmente actúa durante la secuencia de arranque pero puede actuar en cualquier momento en que la razón de cambio de velocidad sea excedida.

Para conseguir esto, la señal de velocidad real es alimentada en un elemento derivativo que la transforma en señal de aceleración la que es comparada con un ajuste prefijado, en un elemento diferencial  $\Sigma_2$  de donde sale la señal de error que es llevada a un elemento amplificador  $K_5$  que la eleva a un nivel capaz de ser comparada con la señal que sale del elemento sumador  $\Sigma_3$ . La comparación se efectúa en un elemento de baja selección y la señal resultante es la señal básica de combustible.

- c) Deberá ser capaz de llevar el punto de ajuste de regulación a su valor normal de velocidad nominal sin carga y de sincronización (100,3%) cada vez que se abre el disyuntor principal de la unidad. El propósito es reducir al mínimo un posible aumento de velocidad de la turbina si se abre el disyuntor bajo condiciones de carga.

Al respecto, una señal lógica proveniente del disyuntor principal bloqueará el ajuste de regula-

ción real en el momento en que se abra, alimentando en su lugar el valor prefijado de 100,3% de velocidad nominal al elemento amplificador  $K_2$ . En condiciones de operación normales este punto prefijado estará bloqueado, trabajando el punto de ajuste de regulación real.

- d) Se implementa la señal de demanda anticipatoria con la finalidad de aumentar la rapidez de respuesta del control. Esta señal es el producto de la señal de referencia de velocidad por una amplificación  $K_7$  y es alimentada al elemento - sumador  $\Sigma_3$ .

El diseño de control de velocidad que cumple con los requisitos expuestos es el de la Fig. N° 25.

Del análisis del diagrama del control integrado de velocidad se puede concluir que opera como un sistema combinado de lazo abierto-cerrado. La característica de lazo abierto viene dada por la alimentación de la señal de demanda anticipatoria directamente al elemento sumador donde entra la señal resultante del proceso correctivo y en donde se genera la señal final del control.

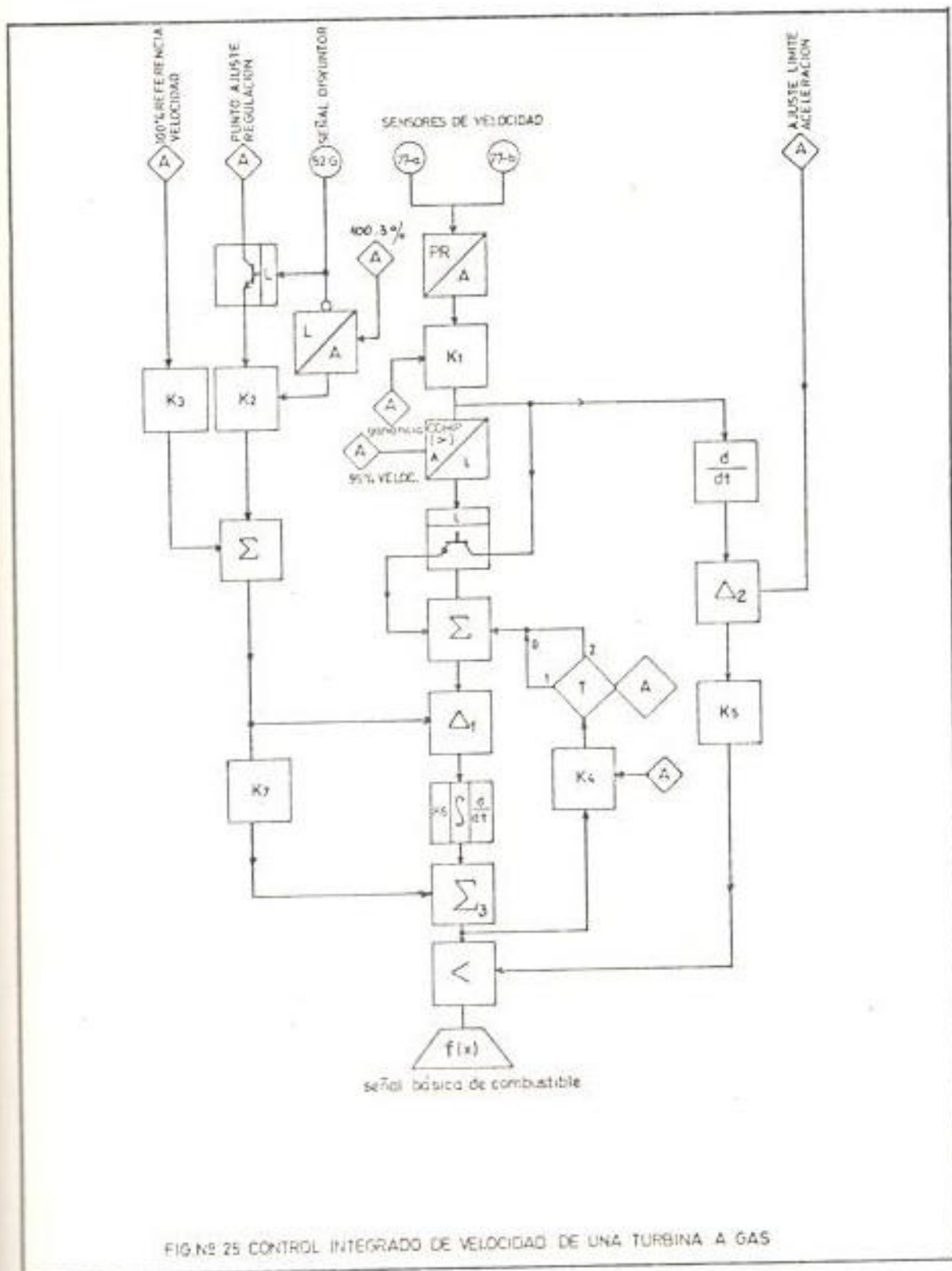


FIG. Nº 25 CONTROL INTEGRADO DE VELOCIDAD DE UNA TURBINA A GAS

La característica de lazo cerrado viene dada por la realimentación de la señal final de control al elemento diferencial  $\Delta$ ; donde es comparada con las señales de velocidad real y de referencia, afectando directamente la acción de control. La señal resultante de la comparación es la señal de error actuante que entra al elemento de control - que actúa a fin de anular el error y llevar la señal básica de combustible al valor requerido por el sistema.

En consecuencia el control en estudio es un sistema que ante los cambios de carga responderá muy rápidamente produciendo una desviación sostenida de pequeña magnitud puesto que la alimentación directa de la señal de demanda lleva a la señal final de control a un valor muy cercano al de estado estable.

El proceso de control utilizado es del tipo proporcional-integral derivativo por las siguientes razones:

- a) El control proporcional debe amplificar la respuesta a niveles suficientes para manipular otros sistemas como el de control de combustible.
- b) El control integral se utiliza para compensar -

las variaciones de la carga del sistema.

c) El control derivativo es utilizado para incrementar la velocidad de respuesta del sistema ante cambios bruscos de carga.

Las ecuaciones que permiten calcular el valor de la señal final del control diseñado son:

$$SBC = \frac{1}{S_7} V_R + \frac{1}{S_6} \Delta + \frac{k}{S_6} \int_0^t \Delta dt + \frac{q}{S_6} \frac{d\Delta}{dt} \quad (1)$$

donde:

$$\Delta = V_R - V_{Rt} \quad \text{para el gobernador astático} \quad (2)$$

$$\Delta = V_R - V_{Rt} - SE \quad \text{para el gobernador estático} \quad (3)$$

En estas dos últimas ecuaciones:

$$V_R = K_3 V_{100\%R} + K_2 VP.A. \quad (4)$$

$$SE = K_4 SBC \quad (5)$$

Los términos utilizados son:

SBC Señal Básica de Combustible en unidades de medición.

$V_R$  Señal de referencia en unidades de medición.

$V_{100\%R}$  Señal de referencia de velocidad 100% en unidades de medición.



$V_{P.A.}$	Punto de ajuste de regulación o velocidad en unidades de medición.
$V_{R.T.}$	Señal de velocidad real de la turbina en unidades de medición.
$S_6, S_7$	Bandas proporcionales en porcentaje.
$\tau$	Velocidad de reajuste (en minutos) <sup>-1</sup> .
$q$	Tasa derivativa en minutos
$t$	Tiempo en minutos.
$\Delta$	Error de velocidad en unidades de medición.
$SE$	Señal de estatismo.

Luego de definidos los términos que intervienen en la ecuación general (1), es posible desarrollar las ecuaciones propias de cada tipo de gobernador.

#### a. Gobernador estático

$$\begin{aligned}
 SBC = & \frac{1}{S_7} (K_3 V_{100\% \tau} + K_2 V_{P.A.}) + \frac{1}{S_6} (K_3 V_{100\% \tau} + K_2 V_{P.A.} - V_{RT}) \\
 & + \frac{\tau}{S_6} \int_0^t (K_3 V_{100\% \tau} + K_2 V_{P.A.} - V_{RT}) dt \\
 & + \frac{q}{S_6} \frac{d}{dt} (K_3 V_{100\% \tau} + K_2 V_{P.A.} - V_{RT}) \quad (6)
 \end{aligned}$$

De esta ecuación se deduce claramente que el término  $(K_3 V_{100\% \tau} + K_2 V_{P.A.})/S_7$  representa la señal anticipatoria de demanda que hará 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 por lo tanto solo son representativos cuando las variaciones se prolonguen en el tiempo.

Las constantes de velocidad de reajuste ( $\pi$ ) y banda proporcional ( $s$ ) deben ser ajustadas adecuadamente a fin de evitar la inestabilidad y oscilaciones del sistema.

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

#### b. Gobernador estático

$$\begin{aligned}
 SBC = & \frac{1}{S_7} (K_3 V_{100\%r} + K_2 V_{P.A.}) + \frac{1}{S_6} (K_3 V_{100\%r} + K_2 V_{P.A.} - V_{rT} - K_4 SBC) \\
 & + \frac{\pi}{S_6} \int_0^t (K_3 V_{100\%r} + K_2 V_{P.A.} - V_{rT} - K_4 SBC) dt \\
 & + \frac{q}{S_6} \frac{d}{dt} (K_3 V_{100\%r} + K_2 V_{P.A.} - V_{rT} - K_4 SBC) \quad (7)
 \end{aligned}$$

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

El primer término de la ecuación como en el caso anterior, es el gobernante mientras los demás - constituyen la acción de control correctivo del sistema en caso de existir la señal de error actuante. En la Fig. N° 26 se representan las curvas aproximadas de respuesta del control diseñado para los dos modos de operación, ya sea astático como estático.

### 3.3. CONTROL DE TEMPERATURA DE LOS GASES DE COMBUSTION

El control de la temperatura de los gases de la combustión constituye el tercero y último de los controles - principales de una turbina a gas.

La finalidad de este sistema de control es la de regular el flujo de combustible entrando a la turbina de manera que la temperatura de los gases de la combustión - no sobrepasen los límites de temperatura máximas permisibles impuestos con el propósito de proteger a la unídad de daños por tensiones térmicas excesivas.

En una turbina a gas, las temperaturas más elevadas están localizadas en la cámara de combustión y en la entrada a la turbina propiamente dicha, por lo que esta temperatura constituye la limitadora de las condiciones de operación. Sin embargo, es muy difícil la medición de tem

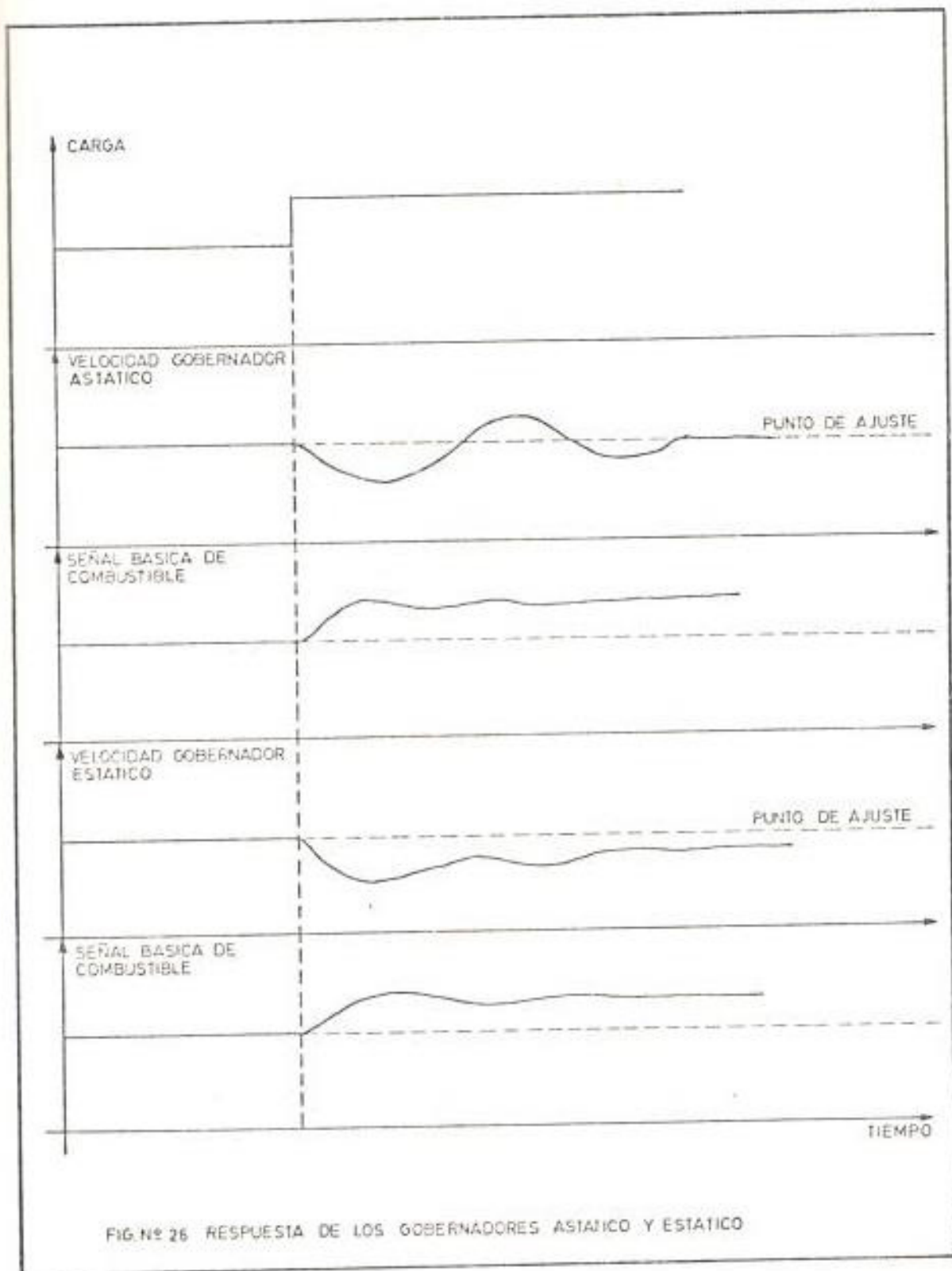


FIG. Nº 26 RESPUESTA DE LOS GOBERNADORES ASTATICO Y ESTATICO

peratura de encendido ya que por su elevado valor, los instrumentos utilizados para ello sufren daños en un tiempo de operación relativamente corto. A esto se suma la dificultad de obtener un buen valor promedio de las temperaturas debido a la disposición disforme de los gases calientes al salir de la cámara de combustión.

Por estas razones, es que se utilizan las temperaturas existentes en el ducto de escape de los gases de combustión, los que aparte de tener un nivel más bajo en sus valores constituyen una mezcla lo suficientemente uniforme como para obtener un valor promedio representativo.

El control indirecto de la temperatura de encendido es factible realizarlo puesto que se conocen las relaciones necesarias para determinarla a partir de la temperatura de escape. Así, el valor de la temperatura de encendido o de entrada a la turbina ( $T_f$ ) es:

$$T_f = T_e \left( \frac{P_{dc}}{P_b} \right)^K \quad (8)$$

donde:

$T_f$  = Temperatura de encendido o de entrada a la turbina.

$T_e$  = Temperatura de escape de los gases de combustión.



- $P_{dc}$  Presión de descarga del compresor
- $P_b$  Presión barométrica
- $K$  Constante que es función de las características del gas caliente y de la eficiencia de la máquina.

En la relación en análisis, el término  $P_{dc}/P_b$  representa la relación de expansión del gas.

La importancia del parámetro Presión de Descarga del Compresor es notoria si se comprueba que para una misma temperatura de encendido una turbina a gas es capaz de generar más potencia en un día frío que en uno caluroso. Esto se debe a que con aire frío la turbina comprime una mayor masa de aire produciendo una mayor relación de presión.

También es de recalcar que este parámetro cambia significativamente a medida que cambia la velocidad del compresor axial de la turbina. Por el contrario, existen cambios poco 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 los cambios en la temperatura o en la presión barométrica.

### 3.3.1. Diseño del Control

El sistema de control de temperatura a desarrollar, va a comparar la temperatura de operación de la turbina con un valor límite prefijado de temperatura y en base a esto va a controlar el valor de la señal básica de combustible (SBC) con el propósito de impedir que se exceda de dicho límite de temperatura. En este caso, la temperatura de operación de la turbina es la temperatura de los gases de la combustión en el ducto de escape de la misma.

En la Fig. N° 27 se representa en un diagrama elemental, el principio de operación del sistema de control de temperatura.

El control de temperatura puede considerarse constituido por dos subsistemas principales que lo complementan:

- a) Sistema de medición de temperatura.
- b) Sistema generador de la señal promedio de temperatura.

A continuación se detallan cada uno de estos dos subsistemas:

### 3.3.1.1. Sistema de medición de temperatura

Existen varios tipos de elementos sensores de temperatura entre los cuales es posible citar: bulbos de gas, termostatos bi-metálicos y termocuplas.

Debido a problemas de mantenimiento tales como pérdida de la carga de gas en los sensores de bulbo y periodo de operación relativamente corto de los termostatos bi-metálicos, las termocuplas son los elementos idóneos para medir la temperatura de escape de los gases de combustión de una turbina a gas.

Estos elementos constituidos por la unión de dos metales tienen la propiedad de generar una señal de milivoltios que es función de la temperatura que están sensando.

Un modo típico de medición de la temperatura de escape de gases es el que utiliza un número de termocuplas que oscila entre seis y doce, ubicadas alrededor del difusor de escape de la turbina. Es de anotar

que cada termocupla es un sensor de temperatura de acción rápida montado en un escudo de radiación para minimizar el error en la medición. En la Fig. N° 28 se representa un sistema típico de medición de temperatura por medio de termocuplas.

### 3.3.1.2. Sistema generador de la señal promedio de temperatura

Las señales individuales de cada una de las termocuplas son alimentadas a un sistema cuya finalidad es realizar dos funciones principales relacionadas directamente con el control de temperatura.

1. Realizar el promedio de las señales de entrada.
2. Compensar el voltaje que se genera en la unión en frío cuando dos cables de termocuplas se conectan a alambres de cobre. Este voltaje es función de la temperatura en el sistema y es opuesto a la señal de milivoltios generada por la termocupla.

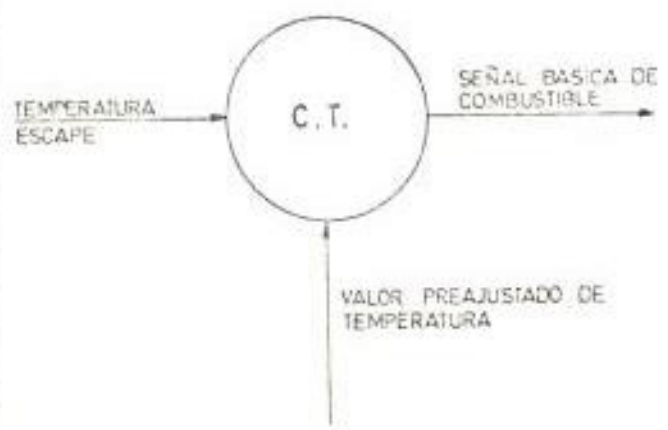


FIG. Nº 27 DIAGRAMA ELEMENTAL DEL CONTROL DE TEMPERATURA.

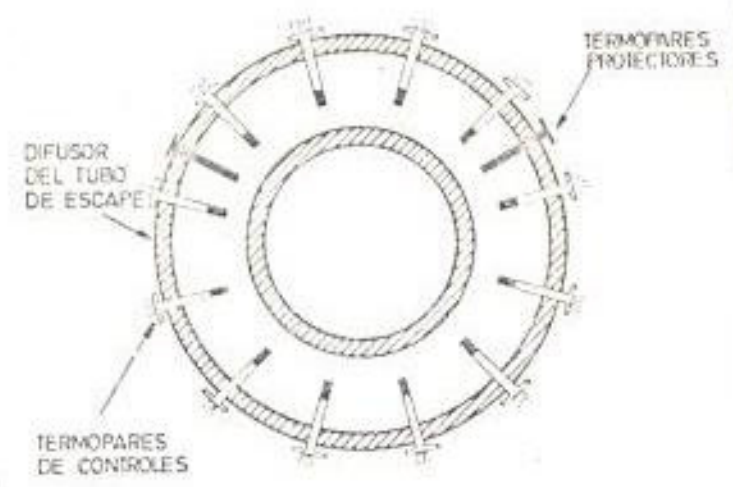


FIG. Nº 28 DISPOSICION TIPICA DE TERMOCUPLAS



El sistema de control que cumple con los requerimientos arriba mencionados es el mostrado en la Fig. N° 29.

Las señales generadas por las termocuplas son alimentadas a un elemento que obtiene la señal promedio que es enviada a un sumador en donde también es alimentada la compensación por el voltaje de la junta en frío. Del elemento sumador sale la señal promedio de temperatura compensada que va a alimentar el sistema de control de temperatura a analizar posteriormente.

Estudiados los dos subsistemas componentes del control, se van a desarrollar dos sistemas de control de temperatura propios del tipo de máquina al que son implementados.

### 3.3.2. Sistema de control proporcional de temperatura

Este sistema de control de temperatura es propio de turbinas a gas que trabajan a velocidad constante. El control en estudio deberá proveer una referencia de temperatura que varíe con los pequeños cambios que se producen en la relación de expansión a medida que el aire que entra al compresor cambia de caliente a

Compensación voltaje  
junto en frío



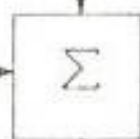
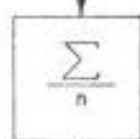
TERMOCUPLAS

$T_1$

$T_2$

$T_n$

$\rightarrow 6 \leq n \leq 12$



Señal promedio temperatura escape compensado

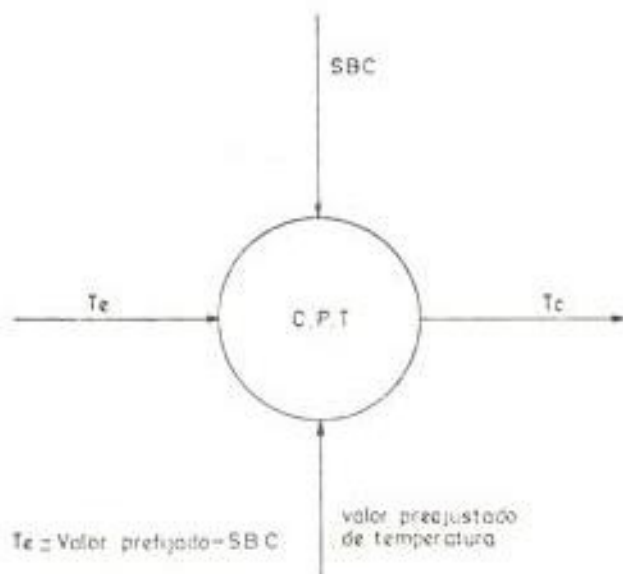
FIG Nº 29 SISTEMA GENERADOR DE LA SEÑAL PROMEDIO-COMPENSADO DE TEMPERATURA

frío. Para este efecto, la referencia de temperatura varía en función de la variación de la señal básica de combustible que es el parámetro final - del control.

En el diagrama elemental de la Fig. N° 30 a, b se representa la filosofía del control.  $T_c$  es la temperatura de control.

Si se considera que una turbina es cargada en un día caluroso ( $100^{\circ}\text{F}$ ), la temperatura de encendido límite  $T_f$  es alcanzada a un valor alto de la temperatura de escape  $T_e$  y a un valor bajo de consumo de combustible. De igual forma, en un día frío ( $0^{\circ}\text{F}$ ), la misma temperatura de encendido  $T_f$  es alcanzada pero a un valor bajo de la temperatura de escape  $T_e$  y a un valor alto de consumo de combustible. Lo anteriormente expuesto se visualiza en la curva de rendimiento de una turbina a gas presentada en la Fig. N° 31a.

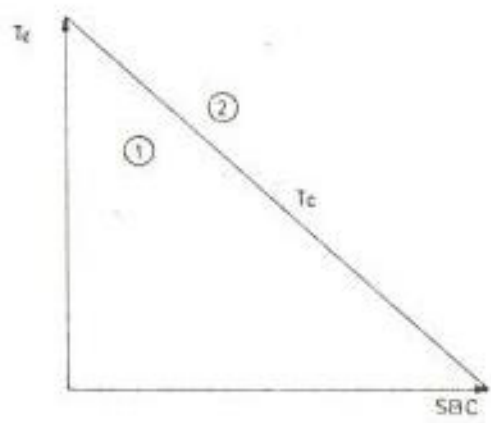
Debido a esta relación y al hecho de que el flujo de combustible entrando a la turbina es función directa de la señal básica de combustible, es necesario implementar al control de temperatura una polarización por dicha señal (SBC), según se muestra en la Fig. N° 31b. Al respecto, la curva de



$T_e = \text{Valor prefijado} - \text{SBC}$

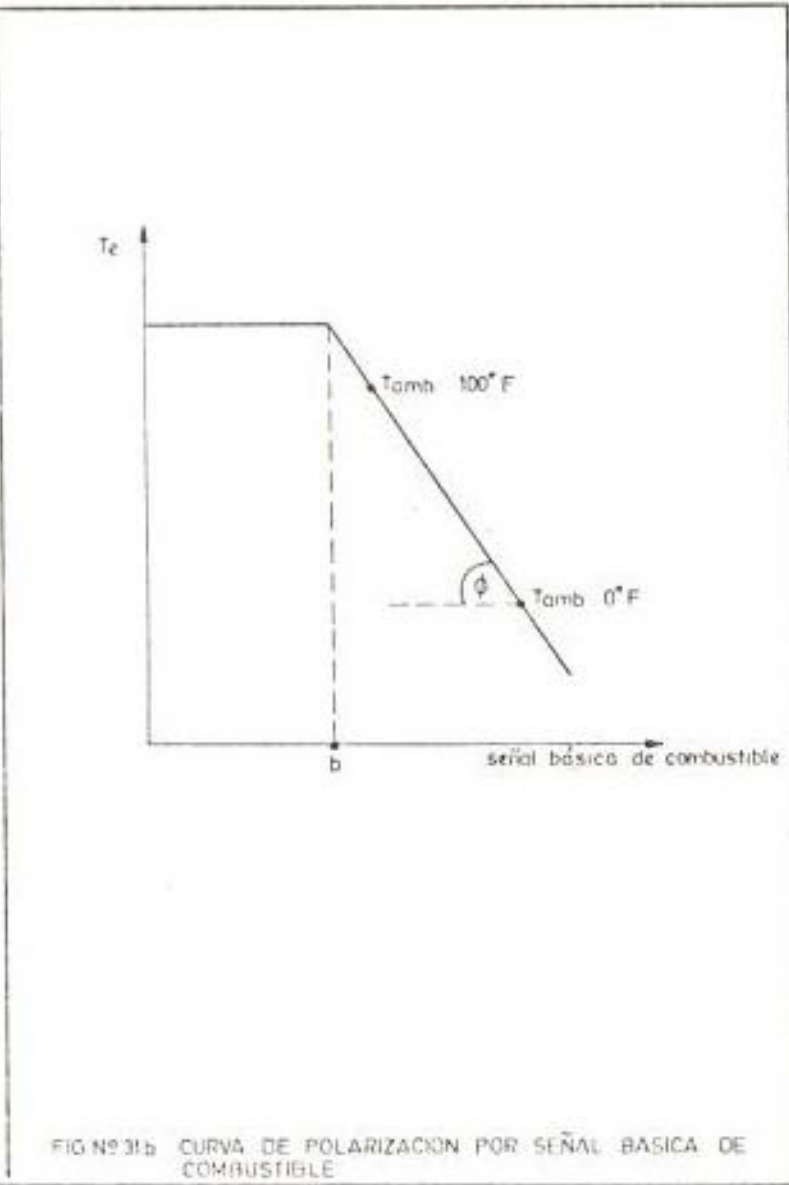
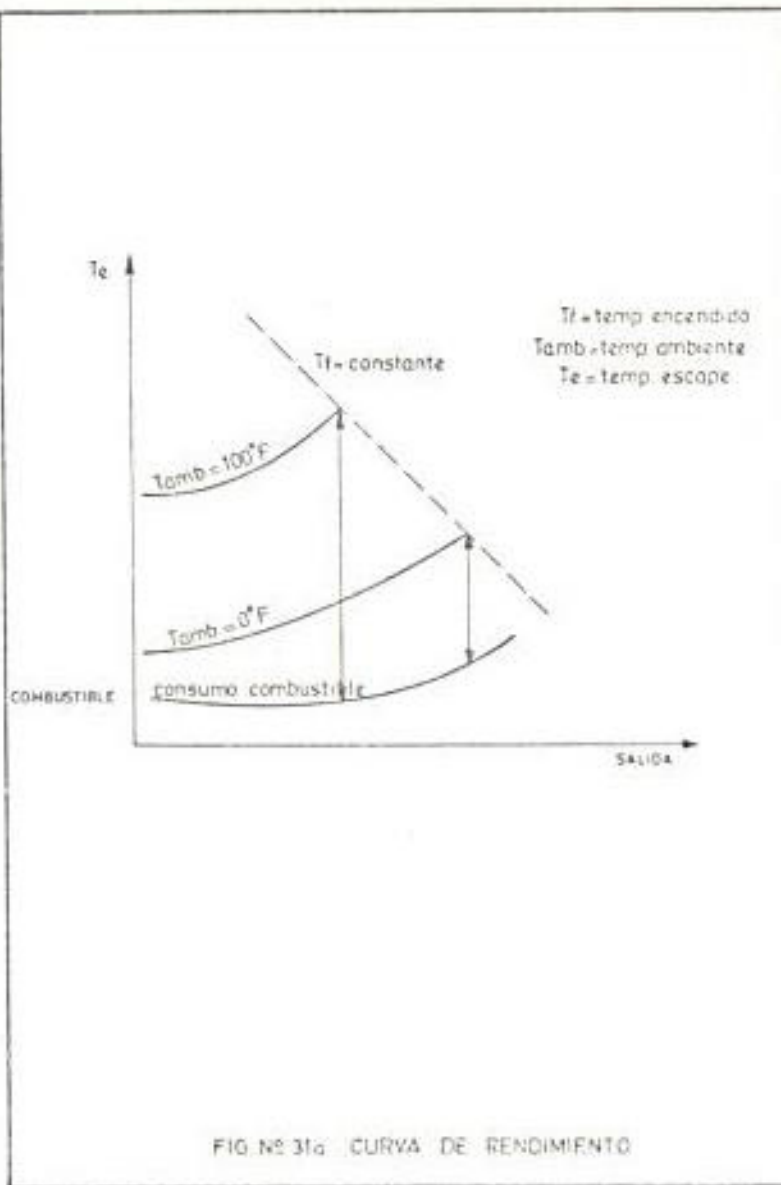
- T<sub>c</sub> temperatura de control
- T<sub>e</sub> temperatura de escape
- SBC señal básica de combustible
- C.P.T control proporcional de temperatura

FIG. Nº 30a DIAGRAMA ELEMENTAL DEL CONTROL PROPORCIONAL DE TEMPERATURA



- Zona ① : Señal básica de combustible regulada por los controles de arranque o velocidad
- Zona ② : Zona de operación no permitida

FIG Nº 30b CARACTERISTICA TEMP ESCAPE vs. SEÑAL BASICA DE COMBUSTIBLE





polarización es propia de las características de cada máquina.

Luego de expuesto el principio de operación del sistema de control, se procede a la implementación del mismo según se representa en la Fig. N° 32.

La señal promedio de temperatura es amplificada por medio del elemento  $K_1$  de ganancia ajustable, del nivel de milivoltios a un voltaje DC proporcional a la temperatura de escape de los gases. Esta señal es llevada a un elemento sumador en donde es alimentada también la señal que cumple la función de polarizar el control en función del valor de la señal básica de combustible SBC. Al respecto, la señal básica de combustible que se obtiene como parámetro final del control es alimentada a un elemento de transferencia automático (T) que cumple con dos funciones específicas:

- 1) Cuando el valor de SBC es menor al valor "b" de la curva de polarización por SBC de la Fig. N° 31b, alimenta una señal cero al elemento sumador.
- 2) Cuando el valor de SBC es mayor que el valor "b" de la mencionada curva, bloquea la señal cero y deja paso a la señal SBC que será polarizada por un valor (-b) y luego multiplicada en un elemento multiplicador (X) por un valor ajustable ( $\text{tg } \phi$ ) que depende de las características de la máquina.

PUNTO DE AJUSTE DE TEMPERATURA

SEÑAL PROMEDIO DE TEMPERATURA

AJUSTE CURVA DE POLARIZACION POR SBC.  $\lg \phi$

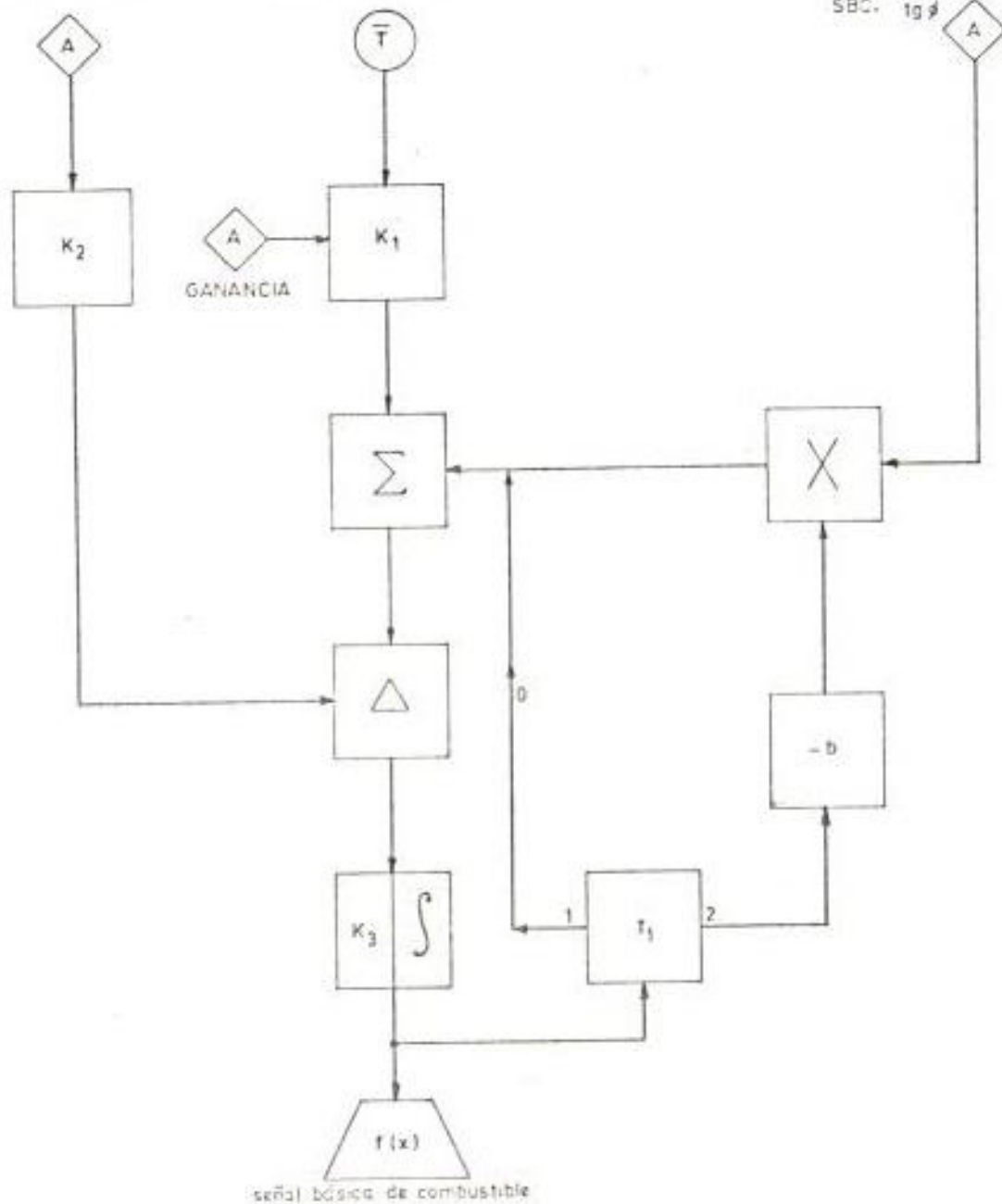


FIG Nº 32 CONTROL PROPORCIONAL DE TEMPERATURA

La señal resultante que sale del elemento sumador  $\Sigma$  es alimentada a un elemento diferencial  $\Delta$  en donde es comparada con el punto de ajuste de temperatura y donde se genera la señal de error que es llevada al elemento de control proporcional-integral encargado de producir la señal final de control SBC.

### 3.3.3. Sistema de control de temperatura con compensación ambiental

El sistema de control de temperatura con compensación ambiental es propio de turbinas a gas cuya velocidad de operación del compresor de flujo axial es variable. El objetivo del control es proveer a la unidad de un límite de temperatura de valor prefijado que sea una función de la relación de presión o expansión a través de la turbina, puesto que esta relación ( $P_{dc}/P_b$ ) varía considerablemente con las variaciones de velocidad produciendo en consecuencia variaciones significativas en el valor de referencia de temperatura. Esto es comprensible si se asume que el sistema modifica su valor prefijado de temperatura a medida que cambia la relación de expansión con el fin de mantener el límite de temperatura de encendido de la turbina en un valor

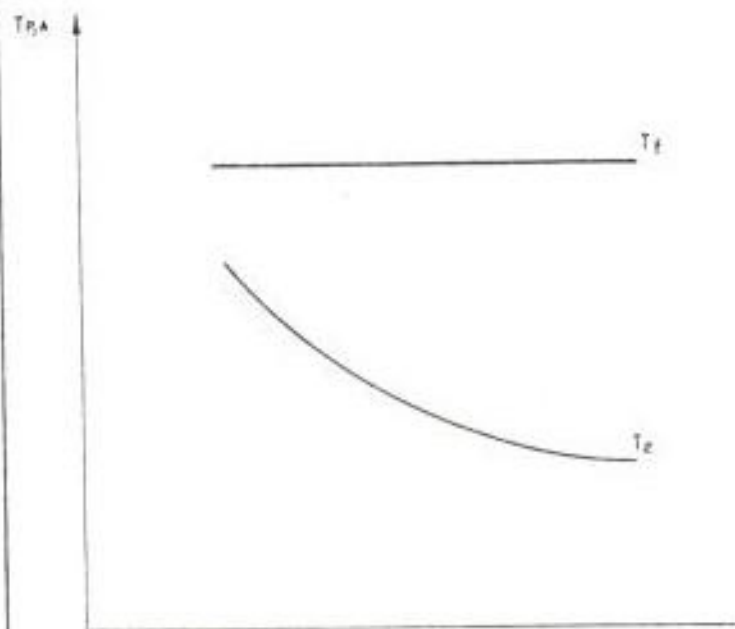
fijo según se ve en la curva de la Fig. N° 33.

En este tipo de control se requiere una polarización función de la presión de descarga del compresor, según se concluye del análisis de la curva de la Fig. N° 34, que es típica del control de temperatura para una máquina de velocidad variable. En esta curva, la porción horizontal representa la temperatura de escape máxima permitida según los límites de temperatura de la estructura de escape. La porción inclinada representa el límite de temperatura de escape a medida que aumenta la relación de presión.

La curva en mención es propia de cada turbina y es función de la presión barométrica del sitio y de la contrapresión del tubo de escape de los gases.

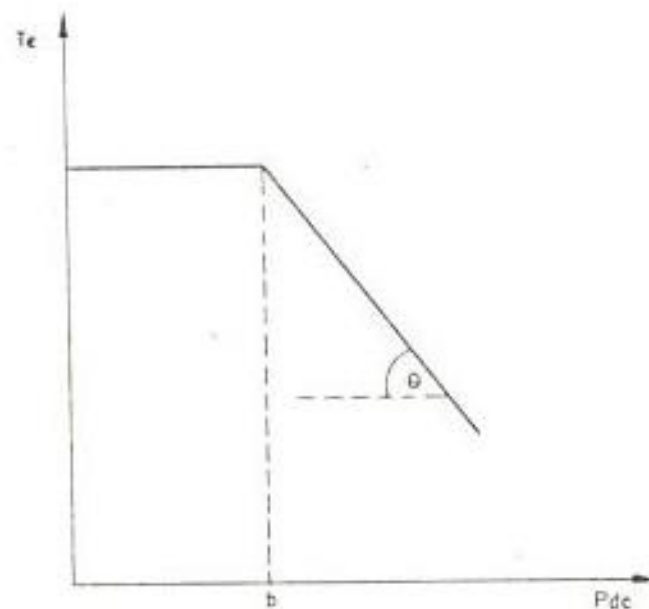
Expuesto el principio de operación, se procede a implementar el control respectivo por lo que se debe considerar el diagrama de la fig. N° 35.

La señal promedio de temperatura es amplificada mediante el elemento K1 de ganancia ajustable de igual forma que en el caso anterior. Esta señal es llevada a un elemento diferencial  $\delta$  en donde es comparada con la señal de referencia de tempe



$T_f$  = Temperatura de encendido  
 $T_{SA}$  = Valor prefijado de temperatura  
 $T_e$  = Temperatura de escape  
 $\left[ \frac{P_{dc}}{P_b} \right]$  = Relación de presión

FIG. N° 33 VALOR PREFIJADO DE TEMPERATURA vs. RELACION DE PRESIONES



$T_e$  = Temp. de escape  
 $P_{dc}$  = Presión de descarga del compresor

FIG. N° 34 CURVA DE POLARIZACION POR PRESION DE DESCARGA DE COMPRESOR



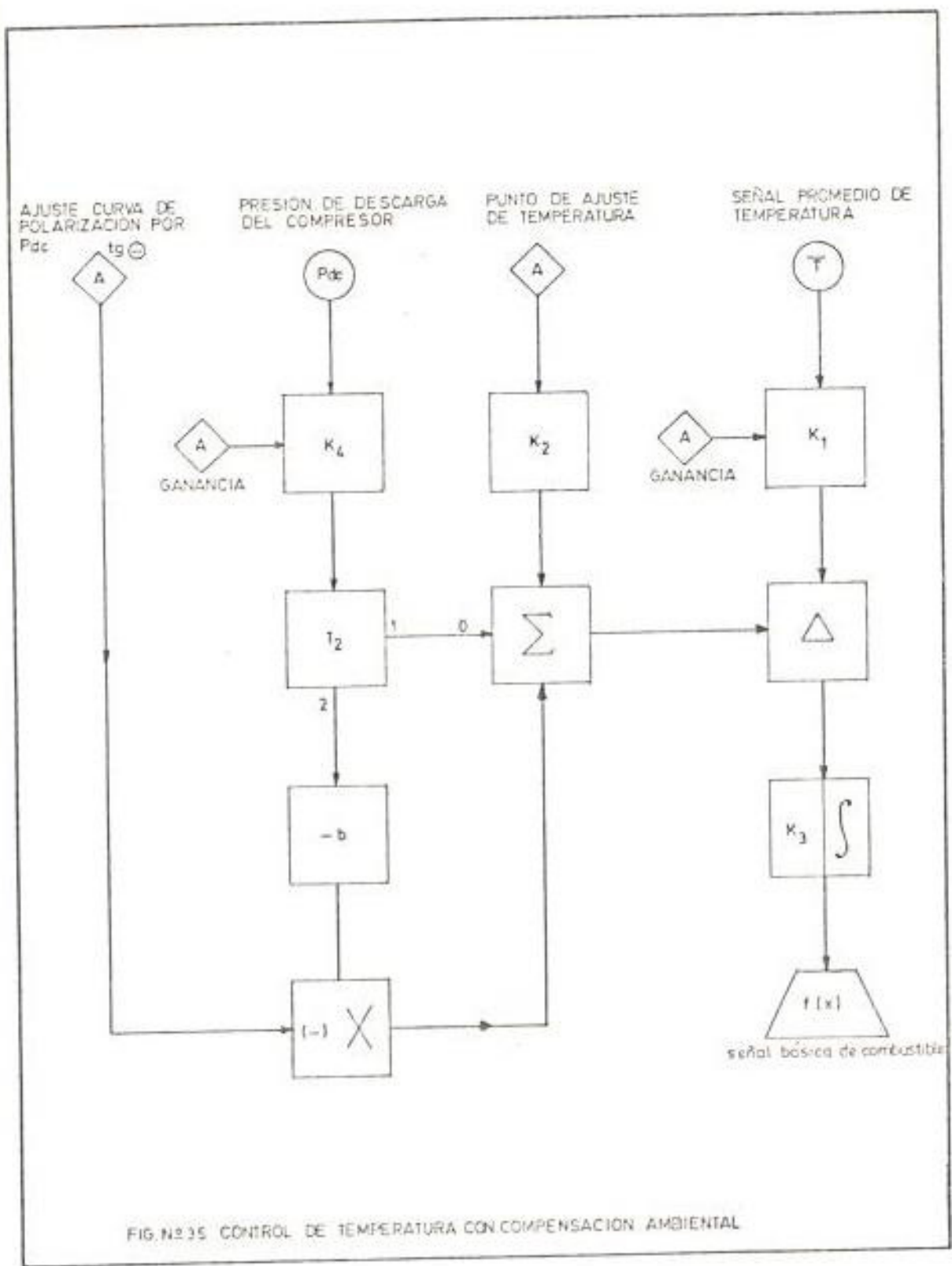


FIG. N.º 35 CONTROL DE TEMPERATURA CON COMPENSACION AMBIENTAL

ratura para generar la señal de error que es alimentada al elemento de control proporcional-integral que produce la señal final de control SBC.

La señal de referencia de temperatura es generada en un elemento sumador  $\Sigma$  donde son alimentadas las señales de punto de ajuste de temperatura y la señal polarizadora de presión de descarga del compresor  $P_{dc}$  que limitará la temperatura de escape según la curva de la Fig. N° 34.

Al respecto, la señal del transductor de presión de descarga del compresor es amplificada mediante el elemento  $K_4$  de ganancia ajustable y alimentada a un elemento de transferencia automático que cumple dos funciones:

1. Cuando el valor de  $P_{dc}$  es menor al valor "b" de la curva de la Fig. N° 34, alimenta una señal de valor cero al sumador.
2. Cuando el valor de  $P_{dc}$  es mayor al valor "b" de la curva, bloquea la señal cero y deja paso a la señal  $P_{dc}$  que será polarizada por un valor  $(-b)$  y luego multiplicada negativamente en el elemento multiplicador  $(-X)$  por un valor ajustable  $(tg \theta)$  obtenido también de la curva propia de cada máquina.

### 3.3.4. Sistema final de control de temperatura

Una vez analizados los dos modos de control de temperatura existentes, se va a proceder a implementar un sistema de control final que a más de operar en cualquiera de las dos formas, reúna otras características indispensables para el control óptimo de una turbina a gas que conduce un generador eléctrico.

Las características básicas que debe reunir dicho control son:

- a) Capacidad de operar en cualquiera de las dos formas analizadas.

Para esto se deberá implementar un elemento de transferencia manual (T1) que seleccione indistintamente el modo de operación.

- b) Capacidad de operar dentro de un rango de temperaturas superiores a las normales durante las horas de mayor consumo. Para esto es necesario recalibrar el punto prefijado de ajuste de temperatura a un valor más alto. El control deberá tener un elemento de transferencia manual (T2) que bloquee el punto de ajuste normal y deje pasar la señal de demanda-pico cuando esté en la posición ? y viceversa cuando -

esté en la posición 1.

- c. Deberá controlar el ciclo de arranque de la turbina desde el momento en que termina el período de calentamiento hasta que se entra en control de velocidad. Este control de flujo de combustible en el período de aceleración se impone con el fin de limitar el régimen de elevación de temperatura minimizando así las tensiones térmicas transitorias. Al respecto, el régimen máximo de incremento de temperatura es de  $5^{\circ}\text{F}$  por segundo; en el momento en que se sobrepase este límite el control insertará una polarización con el fin de disminuir el flujo de combustible entrando a la turbina.

Con este propósito la señal de temperatura promedio de escape es llevada a un elemento derivativo que la transforma en señal de incremento de temperatura en el tiempo y que es alimentada a un elemento monitor de señales (H/1) que la compara con el valor límite de  $5^{\circ}\text{F}/\text{seg}$ . Mientras no exceda este límite la salida será una señal cero, en caso contrario la salida será una señal de un valor ajustado manualmente. La señal que sale del elemento monitor es alimen-

tada a un elemento de transferencia automática T3 a través de un interruptor lógico que la bloquea hasta que termine el período de calentamiento y luego de que la turbina ha alcanzado el 95% de su velocidad de operación, en la secuencia de arranque.

El elemento de transferencia automática T3 opera de la siguiente manera:

- 1) Cuando la señal del monitor es cero, deje pasar la señal que viene del elemento sumador S3.
- 2) En caso contrario bloqueará dicha señal y dejará pasar la que viene del elemento monitor (H/).

d. Con el fin de conseguir mayor rapidez en la respuesta del sistema, se implementa una señal de demanda anticipatoria que es alimentada al elemento sumador S3 donde también llega la señal resultante del control correctivo.

La señal de demanda anticipatoria la constituye la señal de referencia de temperatura amplificada por un elemento K5.



e. Capacidad de reducir la referencia de temperatura en un valor prefijado en el caso de pérdida de la señal de presión de descarga del compresor. Para esto, dicha señal es alimentada en un elemento monitor de señales (H1/1) que genera una señal cero si la señal de presión es mayor que cero y una señal ajustada manualmente si la señal de presión es cero. La señal que sale del elemento monitor es alimentada dentro de un amplificador K6 y llevada luego al elemento comparador  $\Delta$  bajando la referencia de temperatura.

El control que reúne las características enumeradas es el diagrama en la Fig. N° 36.

Del análisis del control se concluye que opera como un sistema combinado de alimentación adelante-atrás.

La alimentación directa o adelante la constituye la señal de demanda anticipatoria y tiene por finalidad darle al control una mayor rapidez de respuesta ante los cambios que ocurran en el sistema. La rapidez de respuesta se debe a que la señal final de control es llevada directamente a un calor cercano al de estado estable, reduciéndose al mí-

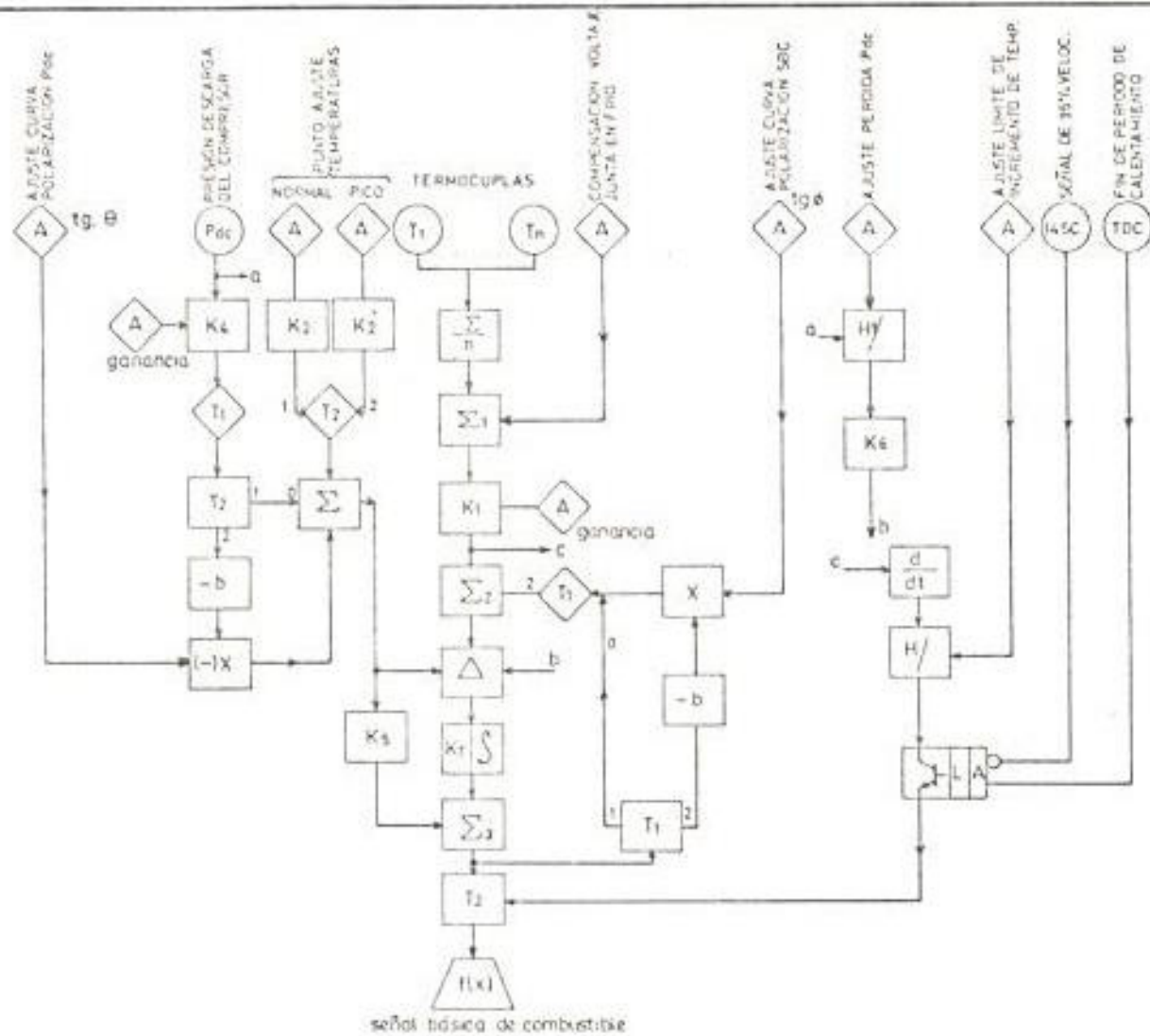


FIG. Nº 36 CONTROL INTEGRADO DE TEMPERATURA DE UNA TURBINA A GAS

nimo la señal de error actuante.

La alimentación atrás o realimentación para el caso de operar como control de una turbina a gas de velocidad constante está dada por la propia señal final de control que pasa a constituir parte del control de tipo correctivo.

Por último, el control es de tipo proporcional-integral, siendo la acción proporcional con ganancia ajustable a fin de obtener estabilidad en el sistema y la acción integral con el fin de compensar las variaciones de carga.

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

$$SCB = \frac{1}{S_5} T_d + \frac{1}{S_7} \Delta + \frac{k}{S_7} \int_0^t \Delta dt \quad (9)$$

donde:

$$\Delta = T_d - TRG - TP \quad (10)$$

para control proporcional de temperatura.

$$\Delta = T_d - TRG \quad (11)$$

para control de temperatura con compensación ambiental.

En la Ec. (10):

$$T_d = K_2 TP.A. \quad (12)$$

$$TP = (SCB - b) t_g \dagger \quad (13)$$

Si  $SBC < b \rightarrow T_p = 0$  debido a la acción del control.

En la Ec. (11):  $T_d = K_2 T_{pA} - T_p$  (14)

donde:  $T_p = (PdcK_4 - G)tg e$  (15)

Si  $Pdc < b \rightarrow T_p = 0$  debido a la acción del control.

Los términos utilizados representan:

- SBC Señal básica de combustible en unidades de medición.
- $T_d$  Señal de demanda de temperatura en unidades de medición.
- $\Delta$  Error de temperatura en unidades de medición.
- $T_{tg}$  Señal de temperatura real de gases en unidades de medición.
- $T_p$  Señal polarizadora de SBC y Pdc en unidades de medición.
- $T_{pa}$  Punto de ajuste de temperatura en unidades de medición.
- $b$  Valor constante de las curvas de polarización por SBC y Pdc.
- $tg \phi, tg e$  Valor de las curvas de polarización de SBC y Pdc respectivamente.

$S_5, S_7$  Bandas proporcionales en porcentaje.

$n$  Velocidad de reajuste en  $(\text{minutos})^{-1}$

$t$  Tiempo en minutos.

Una vez definida la terminología empleada es posible desarrollar las ecuaciones básicas del control de temperatura para los dos modos de operación analizados.

a. Control proporcional de temperatura

$$\begin{aligned} \text{SCB} = & \frac{1}{S_5} K_2 T_{P.A.} + \frac{1}{S_7} \left[ K_2 T_{P.A.} - T_{R.G.} - (\text{SCB} - b) \text{tg } \phi \right] \\ & + \frac{n}{S_7} \int_0^t \left[ K_2 T_{P.A.} - T_{R.G.} - (\text{SCG} - b) \text{tg } \phi \right] dt \quad (16) \end{aligned}$$

De esta ecuación se deduce que el término  $K_2 T_{P.A.}/S_5$  que representa la señal de demanda anticipatoria es el más representativo del sistema de control por cuanto es el encargado de incrementar la rapidez de respuesta del mismo, llevándolo a tomar una acción correctiva antes de que comience a cambiar la temperatura de los gases de combustión.

La particularidad de este tipo de control es que la señal final depende de su propio valor SBC, lo que le da característica de mayor rapidez de estabilización puesto que la señal de



error actuante es minimizada y por lo tanto el error cero es encontrado fácilmente.

b. Control de temperatura con compensación ambiental.

$$\begin{aligned}
 SCB = & \frac{1}{S^5} \left[ K_2 T_{PA} - (K_4 P_{DC} - b) t g \theta \right] \\
 & + \frac{1}{S^7} \left\{ \left[ K_2 T_{PA} - (K_4 P_{DC} - b) t g \theta \right] - T_{RG} \right\} \\
 & + \frac{\kappa}{S^7} \int_0^t \left\{ \left[ K_2 T_{PA} - (K_4 P_{DC} - b) t g \theta \right] - T_{RG} \right\} dt \quad (9)
 \end{aligned}$$

De igual forma que en el caso anterior, el primer término de la ecuación es el más representativo por constituir la señal anticipatoria de demanda. Los otros dos términos son influyentes solo cuando se presente una señal de error actuante.

Los términos  $S$  y  $\kappa$  deben ser determinados y ajustados con sumo cuidado a fin de evitar un exceso de oscilaciones e inestabilidad en el sistema.

#### IV. DISEÑO BÁSICO DEL CONTROL DE COMBUSTIBLE DE UNA TURBINA A GAS

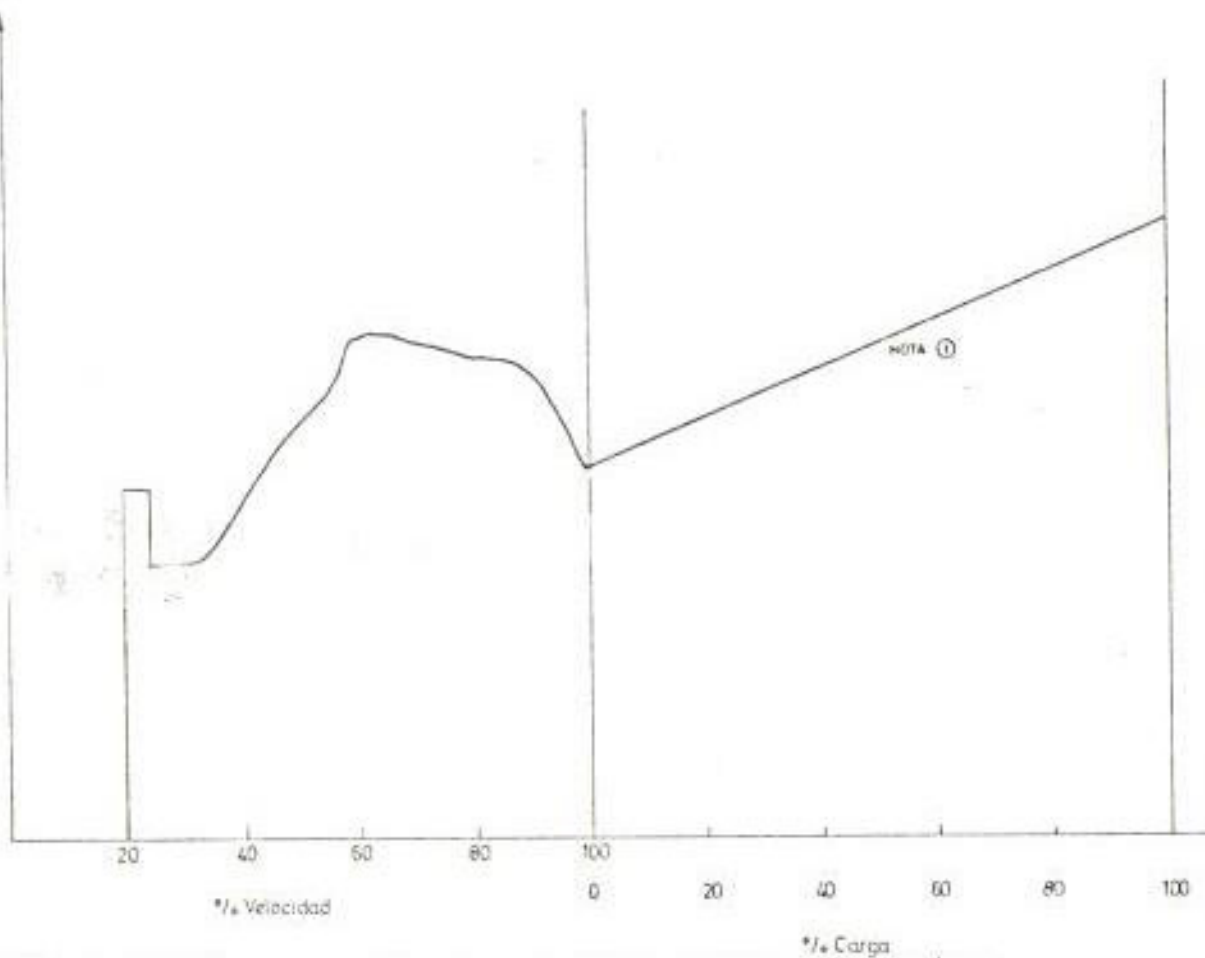
Como punto de partida del presente capítulo en que se va a diseñar el control básico de combustible de una turbina a gas, se debe anotar que el sistema en mención es una parte integral del sistema de control de una unidad a gas, a la vez que de por sí representa la única fuente de entrada de energía a la turbina.

La importancia del sistema en análisis es por demás clara toda vez que según se analizó en el capítulo anterior, el modo de control que en un momento dado pasaba a comandar el comportamiento de la turbina, ya sea en su secuencia de arranque como en el proceso de carga posterior, lo que hacía en definitiva era regular la señal básica de combustible a la turbina o dicho en otras palabras el flujo de combustible - hacia los quemadores.

Se ha mencionado la ingerencia del sistema de control de combustible tanto en la secuencia de arranque como en el proceso de carga de la turbina, lo que resulta plenamente justificado si se analiza el gráfico característico de arranque y operación de una unidad a gas, que confronta el flujo de combustible contra el porcentaje de velocidad y de carga.

Fig. N° 37.

Menor señal básica  
de combustible  
MSBC



NOTA: La relación lineal no es estricta, debido a los cambios en la eficiencia de la máquina.

FIG. NS 37 CURVA CARACTERÍSTICA DE LA SECUENCIA DE ARRANQUE Y OPERACION DE UNA TURBINA A GAS.

La parte de la curva correspondiente a la confrontación de la "Señal Básica de Combustible" (SBC) versus "Porcentaje de Velocidad" fue analizada en el diseño del Control de la Secuencia de arranque, mientras la parte correspondiente a "Señal Básica de Combustible" (SBC) versus Porcentaje de Carga demuestra que a un incremento en el flujo de entrada de combustible corresponde un incremento en la carga de la unidad, lo que significa que la potencia de salida de una turbina a gas es controlada casi completamente por el control de flujo de combustible a los quemadores de la misma.

Una vez resumida la importancia del sistema de combustible en la operación de una Turbina a Gas, se va a describir a continuación uno de los sistemas universales de combustible, en cuanto a los elementos que lo componen como al modo de operación de los mismos. La Fig. N° 38 muestra la disposición de los elementos del mencionado sistema.

El combustible del sistema de entrega exterior de 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 solo cuando se cumplen las condiciones necesarias de presión de aceite de control indicadoras de que se desea dejar pasar combustible a la turbina.

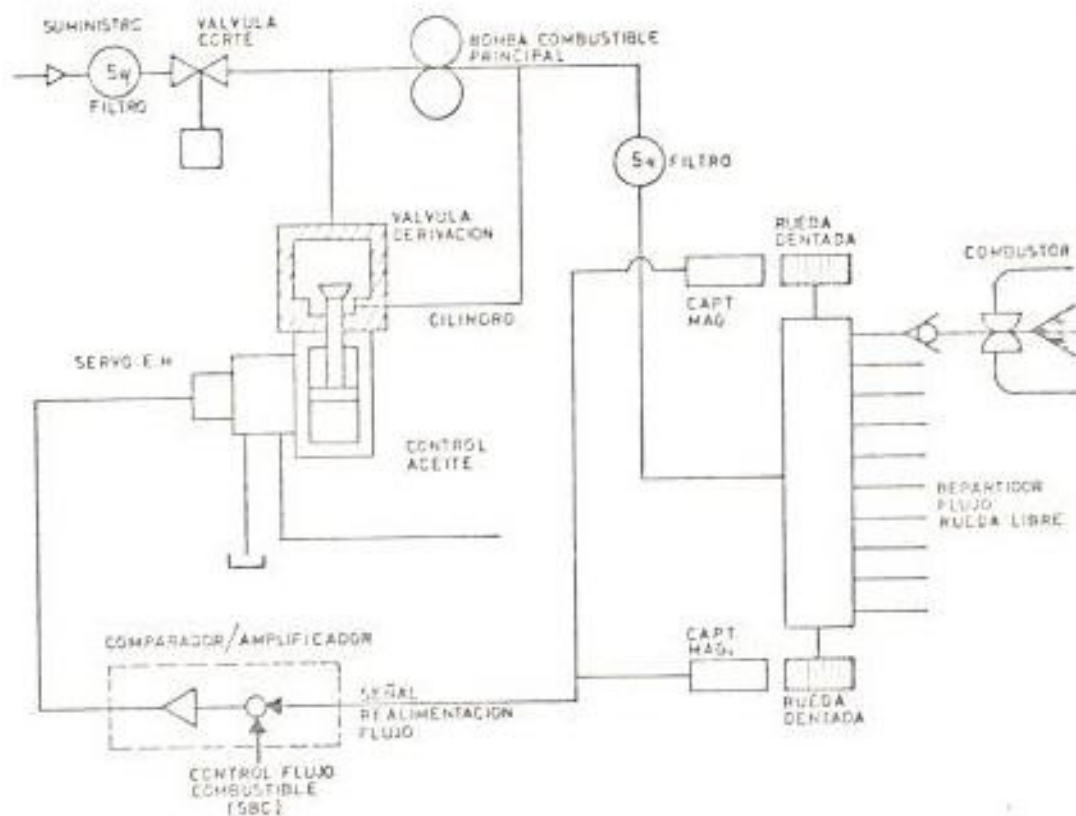


FIG. Nº 38 SISTEMA TÍPICO DE COMBUSTIBLE DE UNA TURBINA A GAS



La descarga desde la bomba de combustible principal es divi  
dida a su vez entre la válvula de derivación cuya función  
específica es la de quitar el exceso de combustible impulsa  
do por la bomba, dejando solo la cantidad necesaria para la  
condición de operación existente y enviando dicho excedente  
a la entrada de la bomba.

La válvula de derivación es actuada por un cilindro hidráu-  
lico que a su vez es comandado por una servo-válvula elec-  
tro-hidráulica montada directamente sobre el cilindro.

La cantidad de combustible exigido por las condiciones de  
operación luego de pasar a través de un filtro de alta pre  
sión es dirigido hacia un divisor de flujo de combustible -  
cuya función es la de repartir equitativamente dicho flujo  
entre las cámaras de combustión.

Dos sensores magnéticos situados en los extremos del divi-  
sor de flujo monitorean el flujo de combustible y proveen  
las señales de realimentación de flujo real de combustible.  
Los sensores en mención dan una señal de pulso a una frecuen  
cia proporcional a la velocidad de flujo, la que a su vez es  
proporcional a la cantidad de combustible entregada a las  
cámaras de combustión.

Un sistema de combustible como el descrito garantiza una bue  
na operación de una turbina a gas, puesto que cumple con re-  
querimientos básicos necesarios, como son:

- a) Proveer el flujo de combustible apropiado.
- b) Proveer el flujo a la presión necesaria para inyección continua dentro de las cámaras de combustión.
- c) Dividir equitativamente el flujo de combustible en cada una de las respectivas toberas de las cámaras de combustión.

Al iniciar el capítulo se recalcó la importancia del sistema de combustible en el proceso de carga de la turbina a gas, sin embargo ahora, profundizando en el análisis, supóngase que estando la unidad trabajando en condiciones de estado estable el flujo de combustible no es sostenido de acuerdo a los reales requerimientos y por el contrario es incrementado, la consecuencia inmediata sería una elevación en la temperatura del aire que está circulando a través de los quemadores, además de un pequeño incremento en la presión, que actuará tanto sobre la turbina como sobre el compresor. Al respecto, la turbina recibe energía calórica y de presión adicional, mientras que en el compresor el efecto es una pequeña presión en contra, lo que ocasiona que el rotor del compresor acelere con miras a contrarrestar la mencionada disminución de presión. El incremento consecuente de la velocidad fuerza aire adicional a través de la turbina lo que acarrea una excesiva generación de gases, aumento de velocidad en la turbina y en consecuen

cia un aumento en la frecuencia del sistema.

De igual forma, en caso de ocurrir el evento contrario al expuesto anteriormente, es decir una reducción del flujo de combustible, se producirían efectos tales como disminución en la temperatura de los gases de combustión y pérdida en la potencia de entrega.

Es posible analizar también el comportamiento de la turbina a gas en condiciones de estado no estable, esto es ante aumento o disminuciones de carga. Ante un aumento de carga la turbina deberá acelerar o lo que en términos de energía significaría producir un aumento de la misma a fin de mantener la frecuencia del sistema en un valor constante. Sin embargo, si el flujo de combustible es incrementado demasiado rápido, una mezcla aire-combustible demasiado rica podría ser producida lo que provocará temperaturas de entrada a la turbina demasiado altas que de sobrepasar los límites permisibles producirían daños en los álabes de la misma o en el compresor.

En el otro caso, una reducción demasiado violenta del flujo de combustible durante una desaceleración o disminución de potencia de entrega puede resultar en una pérdida de llama puesto que es posible el reducir el flujo de combustible a una razón de cambio más rápida que la razón a la cual el compresor reducirá el flujo de aire a los quemadores.



En consecuencia, el control de combustible deberá mantener la operación de la turbina dentro de los límites de la relación combustible-aire, a fin de disminuir la posibilidad de un efecto de pérdida de llama ya sea durante una aceleración o desaceleración.

De lo expuesto en los párrafos anteriores se concluye la necesidad de implementar un control automático de suministro de combustible que asegure el flujo del mismo de acuerdo a la demanda de gases de generación.

#### DISEÑO DEL CONTROL DE COMBUSTIBLE

A pesar de que muchos factores deciden la forma del control del sistema de combustible, tales como: tipo de combustible, velocidad de la turbina, relación de presión de combustión, tipo de quemadores, tamaño de la unidad, etc. el diseño del control del mencionado sistema deberá ser realizado basándose en la consideración básica detallada a continuación:

El sistema deberá proveer la cantidad de combustible apropiada para cualquier condición de operación, en respuesta a los requerimientos ya sea de velocidad, carga o temperatura.

Parámetros involucrados en el control:

- a) Menor señal básica de combustible: MSBC
- b) Velocidad de alta presión de la turbina: N

c) Flujo real de Combustible:  $F_r$

d) Posición real de la válvula servo electro-hidráulica:  
LVDT.

#### Características del Control:

Puesto que una rápida respuesta a los cambios de carga en el sistema es uno de los principales requerimientos de una turbina a gas, junto con un elevado grado de estabilidad y velocidad en la respuesta, el control del sistema de combustible a fin de minimizar los transientes en el cambio de velocidad, deberá ser capaz de cambiar el flujo de combustible - entre los rangos de carga mínima y plena carga en un tiempo del orden de doscientos milisegundos o menos.

Sin embargo, adicional a su característica de respuesta rápida, el control deberá ser del tipo estable, es decir con un mínimo de oscilaciones en la respuesta a fin de evitar las consecuentes oscilaciones en el sistema de potencia.

A continuación se va a proceder a desarrollar dos diseños de control de combustible diferentes, correspondientes a dos ca racterísticos sistemas de combustibles utilizados:

- a) Sistema de combustible implementado con bomba principal - de desplazamiento variable.
- b) Sistema de combustible implementado con bomba principal de desplazamiento fijo.



#### 4.1. SISTEMA IMPLEMENTADO CON BOMBA DE DESPLAZAMIENTO VARIABLE Y TRANSFORMADOR DIFERENCIAL VARIABLE LINEAL.

Este tipo de sistema de combustible regula el flujo de combustible que está siendo enviado hacia los combustores, de acuerdo a la velocidad de la turbina.

En este sistema, el elemento final de control es la válvula servo electro-hidráulica, puesto que no hay necesidad de una válvula de derivación para regular el flujo de combustible.

Además, se va a considerar el sistema implementado con un elemento cuya finalidad es la de determinar la posición real de la válvula servo electro-hidráulica.

El control del mencionado sistema resulta el más elemental por cuanto responde únicamente a la menor señal básica de combustible (MSBC) generada por uno de los tres modos de control principales diseñados en el capítulo anterior.

En consecuencia en este control elemental, la operación de la servo válvula electro-hidráulica que permite el aumento o decremento del flujo de combustible entrando a la turbina será una función directa de la señal básica de combustible. Por lo tanto, a un aumento en la señal mencionada corresponderá una determinada apertura

mayor de la servo válvula o válvula moduladora y vice versa.

El diagrama de control, que cumple con lo anteriormente expuesto, es el desarrollado en la Fig. N° 39.

En el control desarrollado hasta el momento, la señal básica de combustible producto del proceso de baja selección diseñado en el capítulo anterior y mostrado - en la Fig. N° 4, es llevada a un elemento amplificador KI de donde sale la señal comando de combustible (SCC) que es comparada con la señal indicadora de la posición de la válvula moduladora de combustible en un elemento diferencial  $\Delta$ . La señal indicadora de la posición física o real de la servo válvula es generada por un transformador diferencial variable lineal (LVDT).

La señal resultante que sale del elemento diferencial  $\Delta$  representa la señal de error y es enviada a un elemento de control de características proporcional e integral que es el encargado de generar la señal  $f(X)$  que controla la posición del elemento final de control. Las características de proporcional e integral del control mencionado se justifican si se define que la proporcionalidad es con el fin de regular la mayor o menor amplitud de la respuesta, siendo en este caso la mayor o me

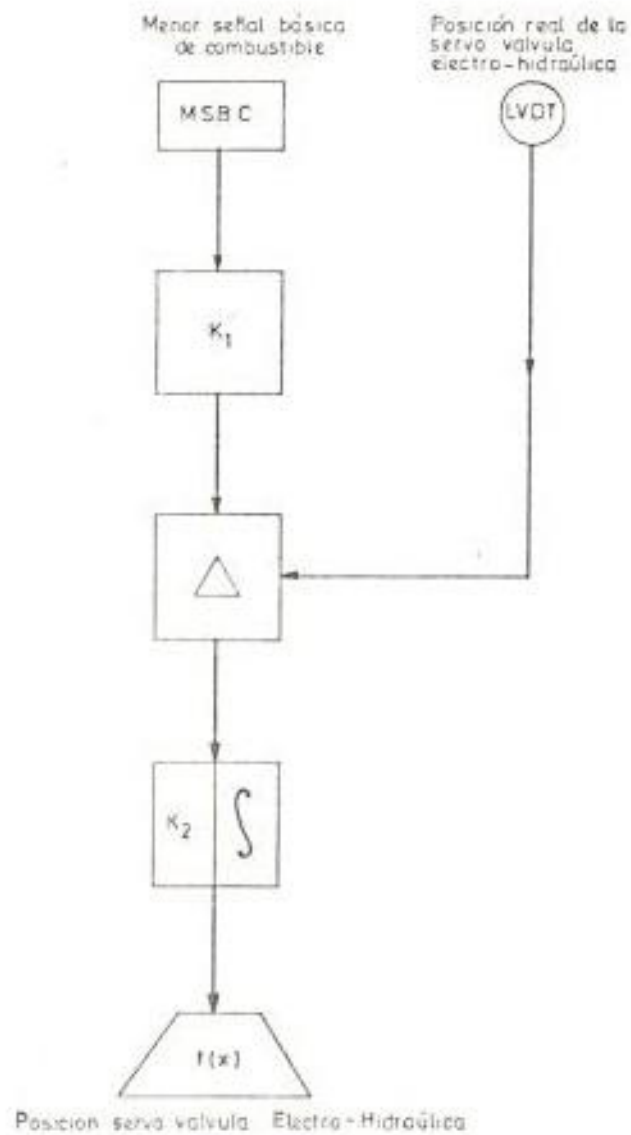


FIG. Nº 39 CONTROL DE COMBUSTIBLE EN FUNCION DE LA POSICION DE LA SERVO VALVULA

nor apertura de la servo válvula, y la característica de integral para regular la respuesta en condiciones de variación de la demanda de combustible que es función directa del estado en que se encuentre la turbina, es decir, secuencia de arranque o proceso de carga.

Si se acepta que al control en estudio le corresponde una escala lineal, es factible determinar la posición de la válvula por medio de la siguiente relación matemática:

$$P = \frac{1}{S_2} (K_1 SBC - LVDT) + \frac{n}{S_2} \int_0^t (K_1 SBC - LVDT) dt \quad (17)$$

donde:

- P posición de la válvula servo electro-hidráulica en unidades de medición.
- SBC Señal Básica de Combustible de medición.
- LVDT Señal indicadora de la posición real de la servo válvula en unidades de medición.
- S Banda proporcional en porcentaje.
- n Velocidad de reajuste en (minutos)<sup>-1</sup>.
- t Tiempo en minutos.

Las curvas características de respuesta del control - presentado a un incremento en la carga son las representadas en la Fig. N° 40.

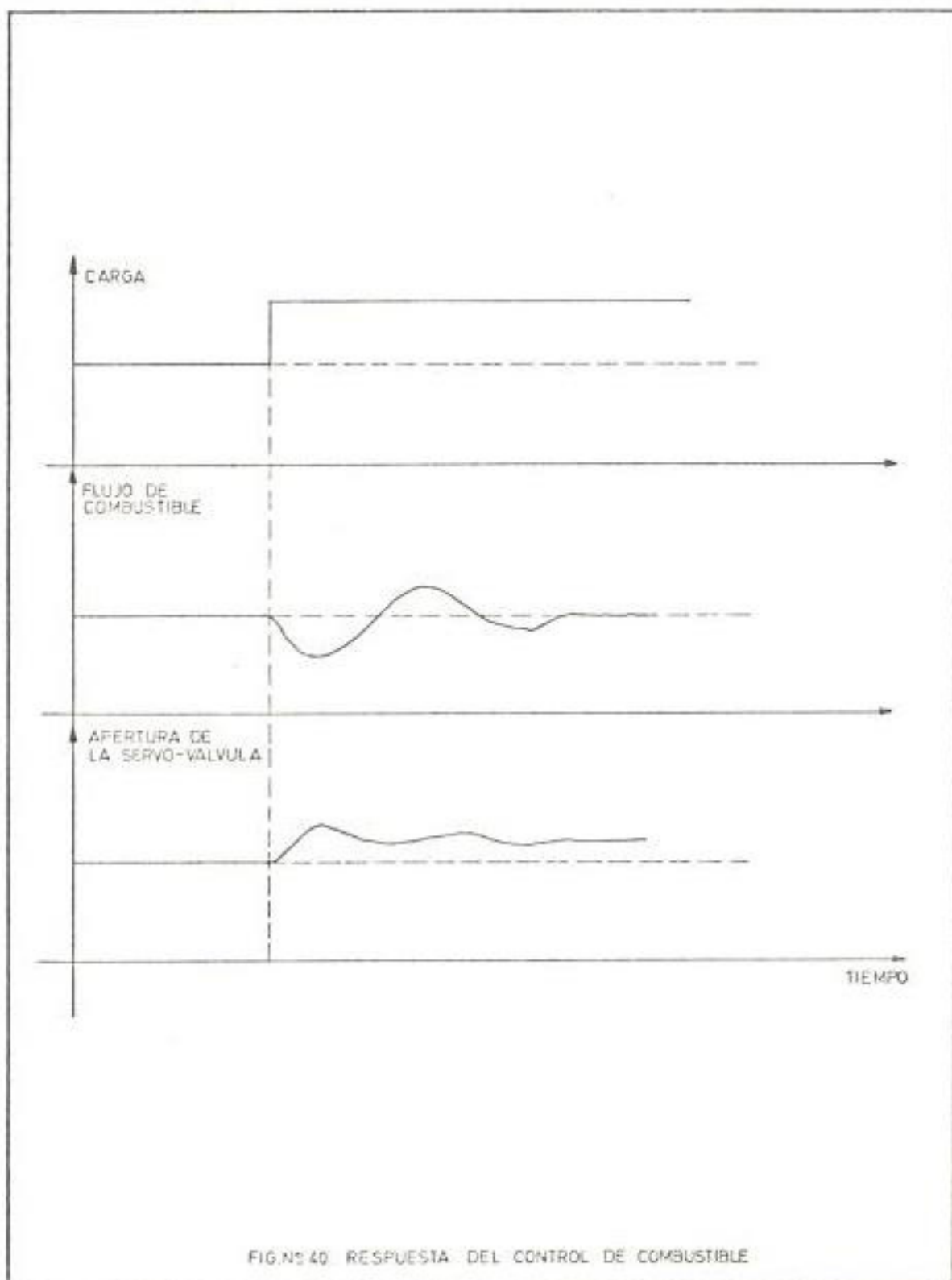


FIG.Nº 40 RESPUESTA DEL CONTROL DE COMBUSTIBLE



#### 4.2. SISTEMA IMPLEMENTADO CON BOMBA DE DESPLAZAMIENTO FIJO Y SENSORES MAGNETICOS DE VELOCIDAD

El sistema en análisis corresponde al sistema que se describió al inicio del capítulo [Fig. N° 38], por lo que el elemento final de control será la válvula de derivación. Sin embargo, es de señalar que si asumimos que la operación de dicha válvula es siempre exacta y en función directa de la posición de la servo válvula electrohidráulica es factible considerar a esta última como el elemento final del control a desarrollar.

Puesto que la bomba de combustible principal es de flujo constante a velocidad de operación normal, esto es 5100 rpm en la turbina o 3600 rpm en el eje de la carga, se deduce que durante la secuencia de arranque hasta no alcanzar dicha velocidad, el flujo de combustible enviado hacia la turbina será impreciso de determinar por lo impreciso del comportamiento de la bomba a velocidades diferentes de la de operación normal, pudiendo provocarse graves disturbios en la mencionada secuencia y el consecuente arranque fallido.

Por lo expuesto anteriormente se hace necesario el implementar un control más complejo que asegure el flujo correcto de combustible de entrada a la turbina du

rante la secuencia de arranque.

Además el control deberá ser capaz de generar una señal de alarma en el momento en que la diferencia entre las señales que provienen de los sensores magnéticos de velocidad del divisor de flujo sea mayor a un cierto valor preajustado.

Esta alarma cumple con el propósito de alertar sobre una posible falla en uno de los sensores del sistema o en el divisor de flujo. Esto último podría ocasionar una mala repartición del flujo de combustible hacia los combustores.

Por último, con el fin de darle mayor rapidez de respuesta al sistema de combustible se implementará al control una señal de demanda anticipatoria.

El control que cumple con las características mencionadas es el implementado de acuerdo a la Fig. N° 41.

Del diagrama de control se concluye que éste va a responder a dos variables principales: Menor Señal Básica de Combustible (MSBC) y Velocidad de Alta Presión de la Turbina (N). Esta última señal es generada según se analizó en el sistema de control de velocidad y representa la velocidad real de la turbina.

Menor señal  
BÁSICA de combustible

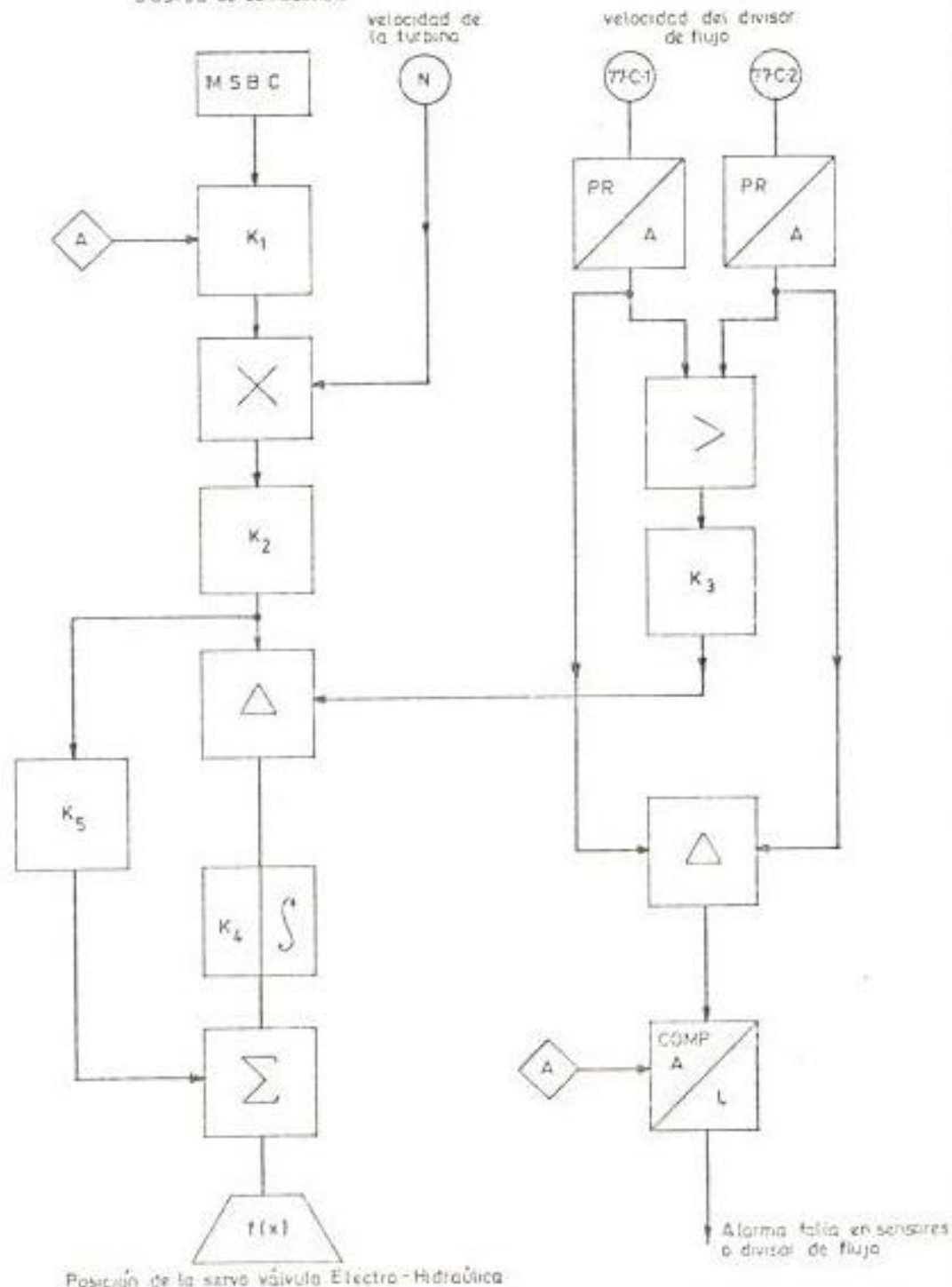


FIG. Nº 41 CONTROL DE COMBUSTIBLE EN FUNCIÓN DEL FLUJO REAL DE COMBUSTIBLE

En el control en estudio, las señales básicas de combustible (MSBC) multiplicada por  $K_1$  en un elemento proporcional y de velocidad de alta presión de la turbina  $N$  son llevadas a un elemento multiplicador  $(X)$  cuya señal de salida es luego amplificada en otro elemento proporcional  $K_2$ .

La señal de salida de este último elemento constituye la señal comando de combustible (SCC) y es alimentada a un elemento diferencial  $\Delta$  a donde llega también la señal que representa el flujo real de combustible ( $F_r$ ) entrando a la turbina. Esta señal  $F_r$  es el resultado del proceso de alta selección entre las dos señales - generadas por los sensores magnéticos de velocidad - (77c-1,2) y la amplificación por medio de un elemento proporcional  $K_3$ .

La señal de error que sale del elemento  $\Delta$  es procesada por un elemento de control proporcional-integral que genera la señal propia del control correctivo y que es llevada a un elemento sumador  $\Sigma$  que también recibe la señal de demanda anticipatoria, siendo esta señal igual a la señal comando de combustible (SCC) - amplificada en un elemento  $K_5$ .

La señal que sale del sumador  $\Sigma$  constituye la señal  $\{X\}$  que controla la posición de la servo válvula elec

tro-hidráulica.

Del análisis del diseño de control, se pueden concluir las siguientes características:

1. El elemento multiplicador (X) al que llegan las señales de comando de combustible (SCC) y de velocidad de alta presión de la turbina (N) tiene por única finalidad, condicionar la señal comando de combustible - para que sea una función de la velocidad real de la turbina.

Esto se justifica por cuanto la adición de combustible debe ser una función de velocidad y como ya se dijo anteriormente la bomba de combustible del sistema en análisis es de desplazamiento fijo o flujo constante.

Con esta implementación al control, queda salvado el problema enunciado en los párrafos anteriores al diseño respecto del comportamiento de la bomba a velocidades diferentes de la de operación normal.

El elemento multiplicador debería ser calibrado para producir una familia de curvas dependiente de la velocidad de la turbina, como las presentadas en la Figura N° 42.



SEÑAL COMANDO DE COMBUSTIBLE (SCC)

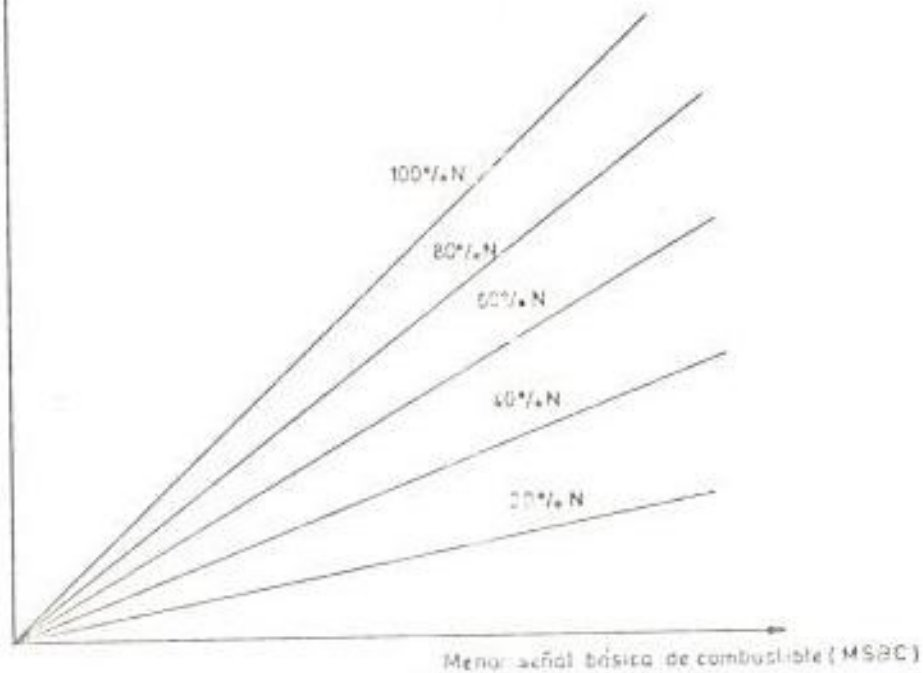


FIG. Nº 42 SEÑAL COMANDO DE COMBUSTIBLE (SCC) vs MENOR SEÑAL BÁSICA DE COMBUSTIBLE (MSBC)

De las curvas características se puede ver que a velocidad de arranque el combustible es reducido para el encendido mientras que durante la aceleración el combustible aumenta con la velocidad de acuerdo a lo requerido para acelerar la unidad a la velocidad de operación.

2. El elemento proporcional-integral deberá tener características tales que en lo posible no ocurran oscilaciones en el sistema de potencia y la velocidad de reajuste sea capaz de minimizar las variaciones de frecuencia como consecuencia de variaciones repentinas de carga.

Además la ganancia deberá ser ajustada de manera que permita un control estable de combustible con los pequeños flujos de arranque de la turbina.

Puesto que un cambio en la banda proporcional afecta proporcional e inversamente la velocidad de "reset", es conveniente en el sistema de control de combustible que se ha diseñado, utilizar una banda de característica mediana a fin de evitar un ciclaje excesivo que hace que se necesite mucho tiempo para que la variable se estabilice.

3. El control tiene una mayor rapidez de respuesta ante

Los cambios de carga debido a que la señal de demanda anticipatoria lleva a la señal  $f(X)$  que controla la posición de la servoválvula a un valor muy cercano al correspondiente de estado estable, minimizando en consecuencia la señal de error actuante.

De igual forma que en el primer diseño de control realizado, la posición de la servo válvula electro-hidráulica puede ser determinada a partir de la relación:

$$P_s = \frac{1}{S_5} SCC + \frac{1}{S_4} (SCC - Fr) + \frac{h}{S_4} \int_0^t (SCC - Fr) dt \quad (18)$$

donde:

$$SCC = (K_1 SBC) NK_2$$

$$Fr = (Vdf) K_3$$

Los términos utilizados representan:

SCC Señal comando de combustible en unidades de medición.

Fr Flujo real de combustible en unidades de medición.

SBC Señal básica de combustible, en unidades de medición.

Vdf Velocidad del divisor de flujo en unidades de medición.

S<sub>4</sub>, S<sub>5</sub> Bandas proporcionales en porcentaje.

- $r$  Velocidad de reajuste en  $(\text{minutos})^{-1}$ .
- $t$  Tiempo en minutos.
- $N$  Velocidad de alta presión de la turbina en unidades de medición.

De la ecuación principal se deduce que el término  $(SCC/SS)$  representa la señal anticipatoria de demanda que hará que la respuesta del sistema sea lo suficientemente rápida para tomar la acción correctiva necesaria para mantener el flujo de combustible hacia la turbina en el valor adecuado, inmediatamente después de ocurrido el cambio en la carga del sistema.

Los otros dos términos representan la acción del control correctivo cuando las variaciones en el sistema se prolonguen en el tiempo.

## V. FILOSOFIA Y DISEÑO DE LA PROTECCION MINIMA REQUERIDA POR UNA TURBINA A GAS

En los capítulos anteriores se han diseñado y analizado los sistemas básicos de control de una turbina a gas cuya finalidad es la de regular el funcionamiento de la unidad dentro de las especificaciones de diseño.

Sin embargo, no hay que descartar la posibilidad de falla en cualquiera de los sistemas de control por lo que con miras a evitar los daños consecuentes en las diferentes partes constitutivas de la turbina, es necesario dotar a la unidad de un sistema de protección que cumpla con la función de respaldar dichos sistemas.

### FILOSOFIA

En el diseño del sistema de protección se va a utilizar una filosofía de "doble ruta" de operación. Así, en el caso de falla de uno de los sistemas de protección, la turbina saldrá de servicio y por lo menos dos caminos de disparo van a estar disponibles.

Con el fin de elevar el rango de seguridad de funcionamiento, el sistema de protección será diseñado en base a un criterio de "simple redundancia" y aún de "doble redundancia" en algunos casos, como es el de protección por sobrevelocidad. Entendiéndose por "redundancia" a la práctica de disponer de más de una forma de protección de la turbina contra una misma falla.

En los casos posibles, se implementará dos niveles de protección



larma cuya finalidad es la de poner alerta al operador encargado de supervisar el funcionamiento de la turbina y el segundo nivel el de disparo que sacará de servicio la unidad cuando la operación de la misma se está cumpliendo bajo los límites mínimos de seguridad.

## DISEÑO

El sistema general de protección de una turbina a gas debe ser capaz de responder con señales de alarma y disparo ante dos tipos de eventos que pueden ser clasificados en secundarios y primarios.

Los eventos secundarios son aquellos que hacen que el sistema de protección genere señales de alarma y disparo de la unidad en respuesta a la operación de elementos simples como son interruptores de nivel, de presión, de temperatura que cumplen la función de supervisar ciertos sistemas como el de lubricación de aceite.

Los eventos primarios son aquellos que también hacen que el sistema de protección genere señales de alarma y disparo de la turbina pero en respuesta de la operación de sistemas más complejos que sensan parámetros críticos de operación como son velocidad de la turbina, temperatura de los gases de combustión, vibración de las partes constitutivas de la turbina y existencia de llama en los combustores.

Los sistemas protectores que supervisan estos parámetros van a ser desarrollados en el transcurso del capítulo.

El diagrama de la Fig. N<sup>o</sup> 43 representa el sistema de protección integrado de una turbina a gas.

En él se observa que los sistemas de protección por sobrevlocidad, sobretemperatura, vibración y pérdida de llama, alimentan independientemente a dos canales de disparo A y B, cumpliendo así con el criterio base de "doble ruta" de operación.

Estos canales a su vez, alimentan al circuito Protector - Principal o maestro [4] de la turbina con la finalidad de generar la señal de desconexión de la válvula de descarga electro-hidráulica 20 FL que hace que se desacerque el aceite de control de baja presión, cerrándose entonces la válvula de corte de combustible por acción del resorte, cortando el flujo de combustible hacia la turbina, ocasionando el disparo de la misma. Al mismo tiempo, se produce la desconexión del motor de la bomba principal combustible.

En el párrafo anterior se mencionó el cierre de la válvula de corte de combustible por la descarga del aceite de control de baja presión. Al respecto es de anotar que el sistema de aceite de control o sistema de disparo hidráulico constituye la interfase entre el sistema de control y protección de la turbina y los dispositivos de la misma que admiten o cortan el flujo de combustible. Además de esta función de disparo de la unidad, el sistema de aceite de control ge-

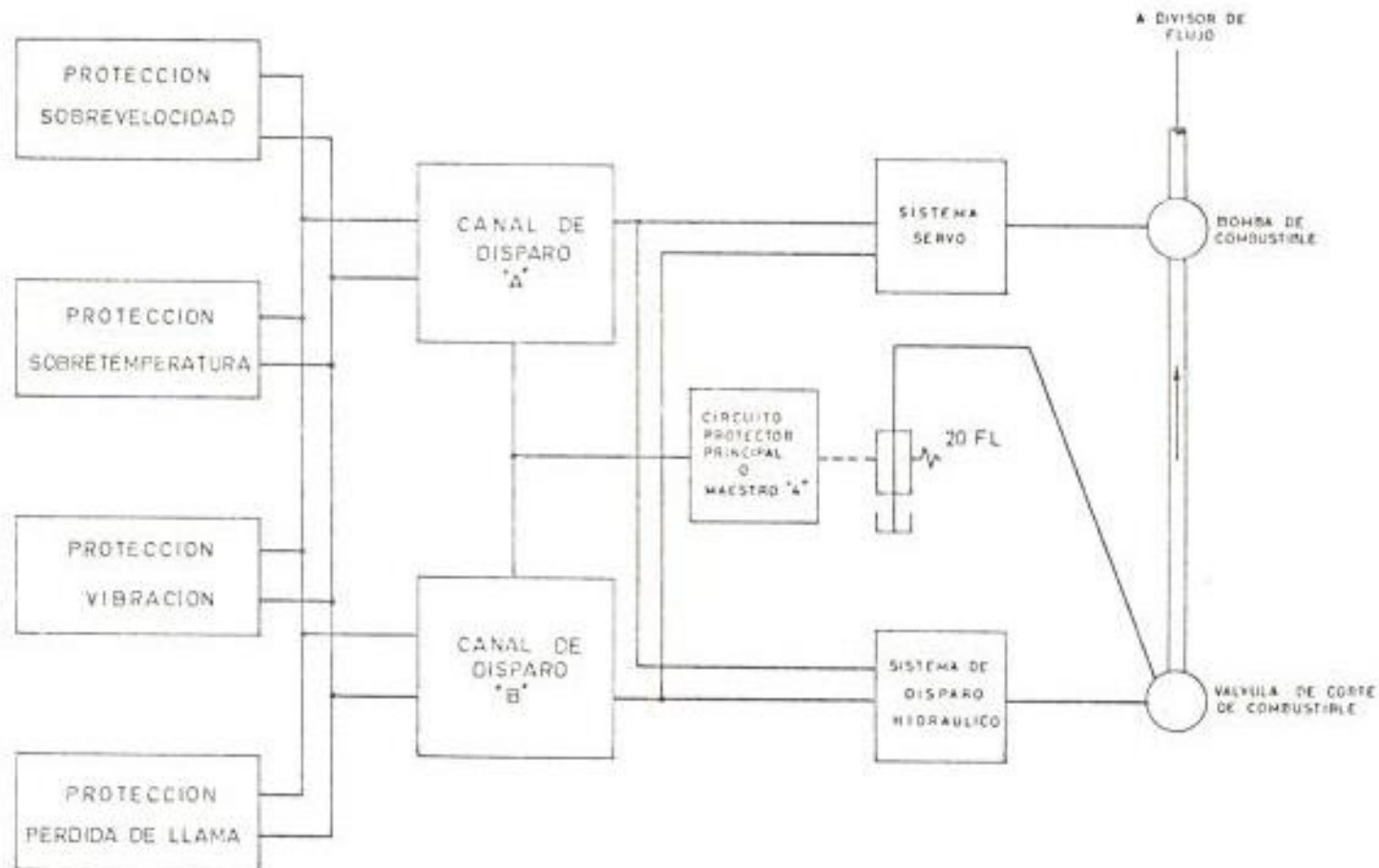


FIG. Nº43 SISTEMA DE PROTECCION INTEGRADO DE UNA TURBINA A GAS

nera la señal hidráulica para abrir o cerrar la válvula de corte de combustible en las secuencias de arranque y parada.

Luego de analizado el sistema de protección integrado, se va a proceder a desarrollar los diseños básicos de cada uno de los sistemas componentes del mismo.

### 5.1. PROTECCIÓN DE SOBREVELOCIDAD DE LA TURBINA

En condiciones normales de operación, la velocidad de una turbina a gas es regulada por el control de velocidad y por el control de temperatura de escape de los gases de combustión cuando se ha alcanzado el límite de temperatura de encendido. Sin embargo, es necesario proveer a la turbina de un sistema de respaldo en caso de falla de dichos controles, para protegerla contra sobrevelocidad de sus partes móviles, lo que podrá ocasionarles grandes daños debido a las tensiones excesivas que se originarían como efecto de la gran fuerza centrífuga producto de la velocidad elevada y de la masa misma de la turbina.

Normalmente, la protección por sobrevelocidad de una turbina a gas está constituida por dos sistemas:

- a. Sistema primario o sistema de protección electrónico.
- b. Sistema secundario o sistema de protección mecánico.



De los dos sistemas mencionados, el sistema primario o ofrece una serie de ventajas en comparación con el sistema secundario, entre las cuales es posible mencionar:

- a) Mayor confiabilidad debido a la posible implementación de varios canales independientes para sensar la velocidad de la turbina.
- b) Mayor exactitud en la determinación de la velocidad real.

La función primordial del sistema de protección mecánico es la de dar respaldo al sistema primario por lo que su punto de ajuste de operación es un valor algo más alto.

El sistema que se va a desarrollar a continuación es el sistema de protección primario.

#### 5.1.1. Diseño de la protección

El sistema de protección por sobrevelocidad está constituido fundamentalmente por los elementos - sensores de la velocidad y por el sistema que va a generar las señales de alarma y disparo en el caso de rebasarse el límite preajustado de velocidad.



## Sensores de velocidad

Los elementos sensores de velocidad son similares a los que sirven al sistema de control de velocidad, es decir dispositivos de alta salida compuestos por un imán permanente rodeado de una bobina y cuya finalidad es la de generar una señal AC cuya frecuencia es proporcional a la velocidad del rotor del compresor.

En realidad, se encuentran ubicados en una base - cercana a las ruedas dentadas de 60 dientes montadas en el eje del compresor las que al pasar debajo del sensor generan impulsos de voltaje. El número de dientes de la rueda, hace que la frecuencia de salida del voltaje sea igual a la velocidad de la turbina en rpm. El voltaje generado es función de la velocidad de la turbina.

Una vez analizados los elementos sensores de velocidad se procede a enumerar las características - que deberá tener el sistema de protección a fin de conseguir un alto grado de seguridad y funcionalidad.

- a. El sistema debe ser implementado con tres canales sensores de velocidad que operen indepen-

dientemente y den una señal de alarma en caso de existir falla o detección de sobrevelocidad.

b) Deberá dar disparo de la turbina en el momento en que por lo menos dos de los tres canales fallen o detecten sobrevelocidad.

c) Deberá funcionar dentro de una banda de frecuencia. En valores abajo o arriba de la mencionada banda, el sistema generará una señal para desconexión de la turbina. La Fig. N° 44 indica los dos estados del sistema y los rangos de operación.

d) Puesto que en el momento de arranque la turbina esté en velocidad cero, a fin de no bloquear dicha secuencia, se provee al sistema por sobrevelocidad de dos condicionantes que deben ser cumplidos a fin de que entre a operar, a saber:

1. Existencia de la señal de arranque, generada a través del circuito maestro de protección "4".
2. Puesto que el sistema pasa a estado de operación alrededor del 10% de velocidad, una señal de que se ha alcanzado el 20% de velocidad pone en funcionamiento al sistema. En caso de que el sistema no haya cambiado de estado de

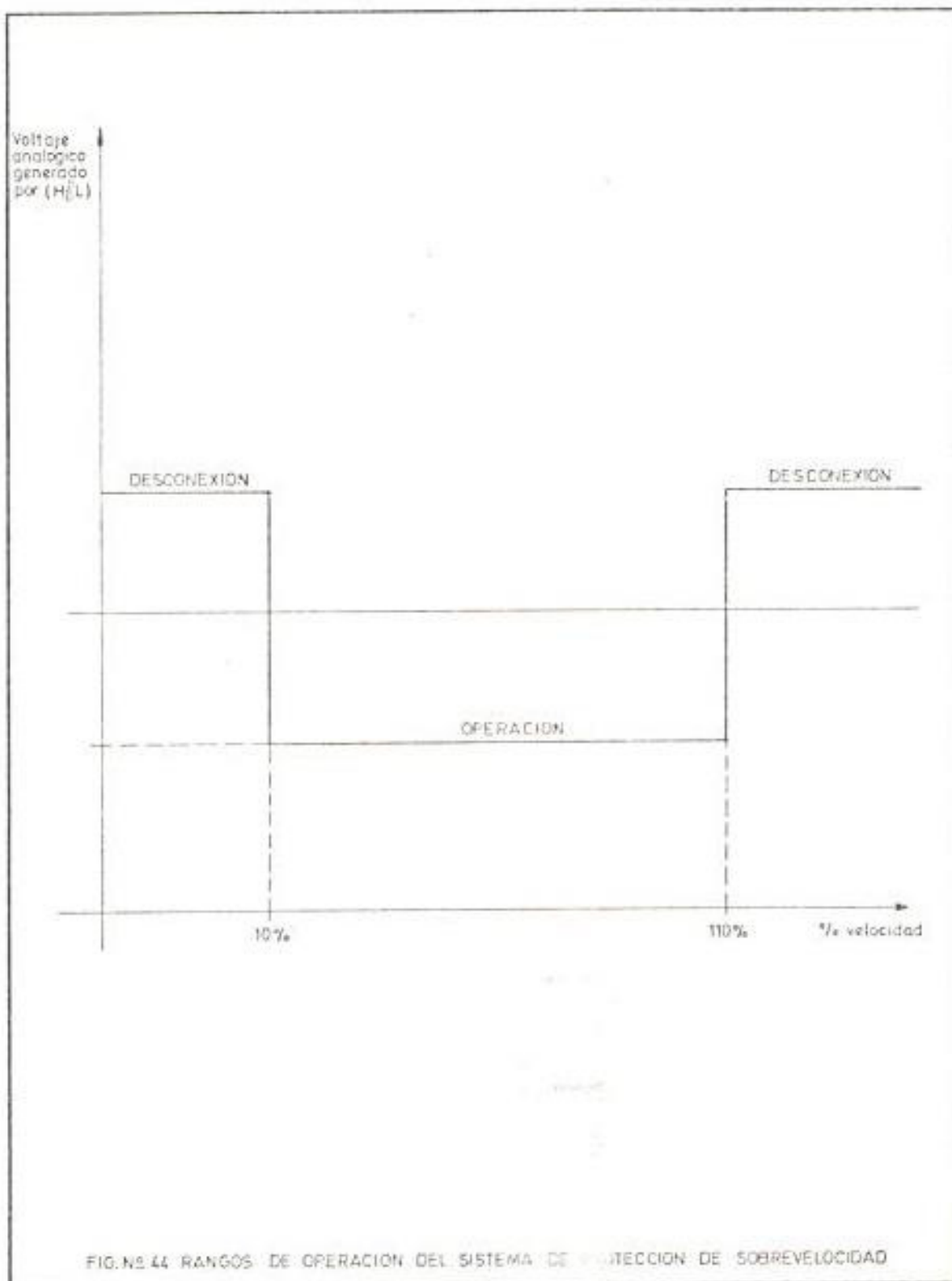


FIG. N.º 44 RANGOS DE OPERACION DEL SISTEMA DE PROTECCION DE SOBREVOLUCIDAD

desconexión a operación al alcanzarse el 20% de velocidad, se producirá el disparo de la turbina.

La implementación del sistema de protección que cumple los requisitos expuestos es el diagramado en la Fig. N° 45.

Las señales generadas por los sensores de velocidad son alimentadas a elementos monitores de señales (H/L) cuya función es la de generar una señal de un cierto valor analógico cuando la frecuencia que detecta es menor al límite inferior de la banda de operación (10%) o mayor al límite superior de dicha banda (110%). Cuando la frecuencia que recibe está entre dichos límites, es decir en el rango de operación, la señal que genera es de valor cero.

La señal que sale del elemento monitor de señales es llevada a un elemento multiplicador K, cuya salida es alimentada a un elemento comparador cuya función es la de generar una señal de lógica "1" cuando la señal que recibe es de un valor díferente de cero, en caso contrario la señal que genera es de lógica "0".

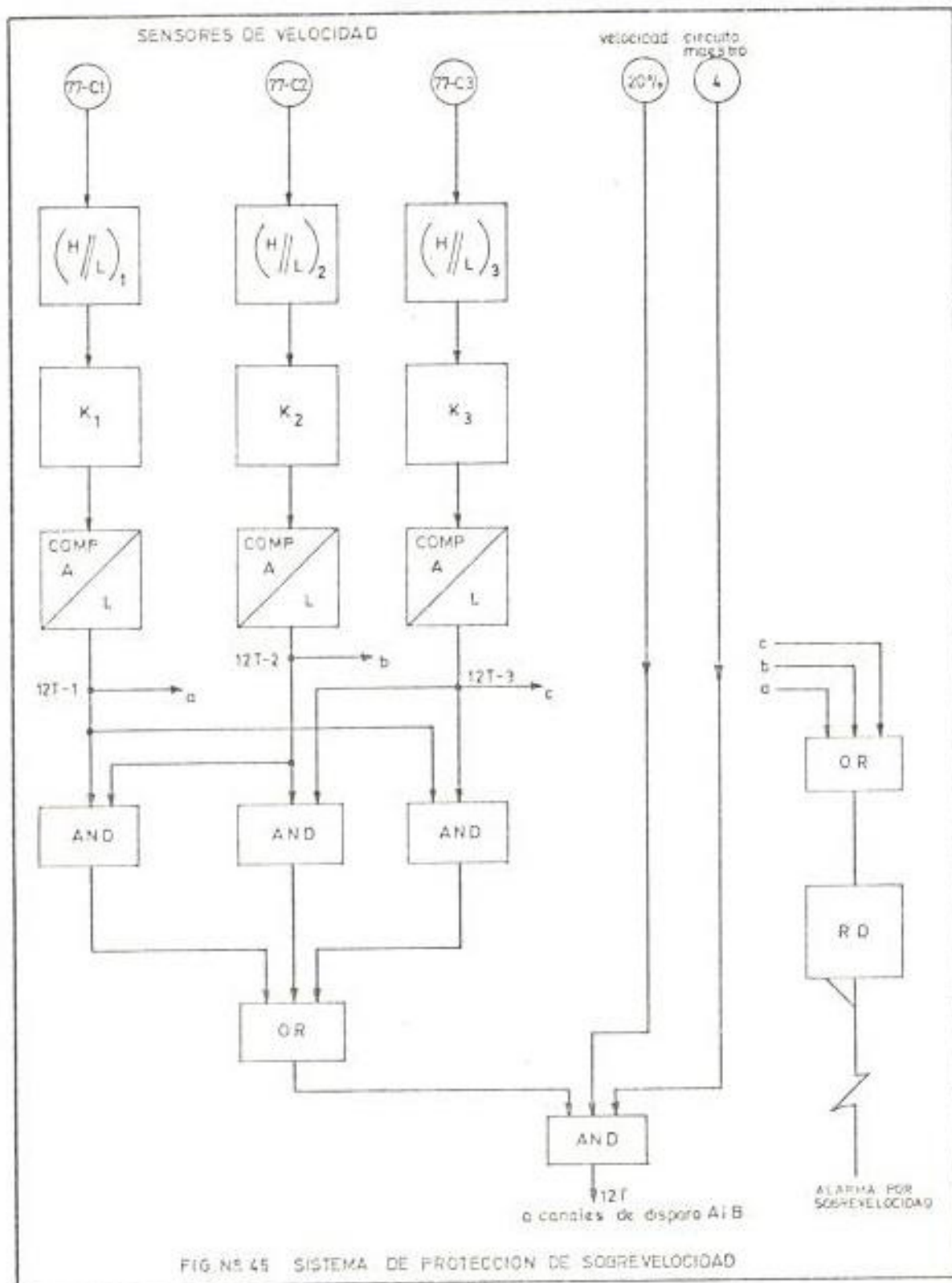


FIG. N.º 45 SISTEMA DE PROTECCION DE SOBREVELOCIDAD



Las señales de salida de los elementos comparadores de los tres canales son combinadas en tres elementos "and" de tal manera que cuando dos de ellos generen señales de desconexión, se alimente un elemento "OR" con una señal de lógica "1". Esta señal es llevada a una puerta "and" en donde se alimentan las señales lógicas de 20% de velocidad y del circuito maestro "4", luego de darse la señal de arranque. La salida de esta última compuerta es llevada a los canales de disparo A y B.

## 5.2. PROTECCION DE SOBRETENPERATURA DE LOS GASES DE COMBUSTION

El sistema de protección de la turbina a gas contra sobretemperatura tiene por finalidad proteger a las partes de la misma, por donde se realiza la trayectoria del gas caliente, contra los daños que pueda ocasionar el exceso de temperatura de encendido.

Este sistema constituye un respaldo a los sistemas principales de control de velocidad y temperatura, razón por la que opera sólo en circunstancias de falla de los mismos.

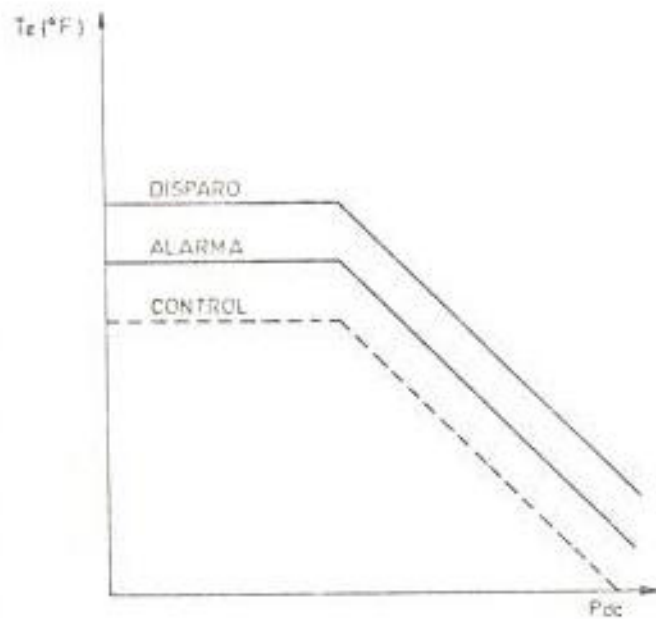
Una turbina a gas, operando normalmente, regula el flujo de combustible que le está entrando por medio de su con-

trool de velocidad hasta que se alcance el límite de temperatura de encendido, momento en el que pasa a control de temperatura.

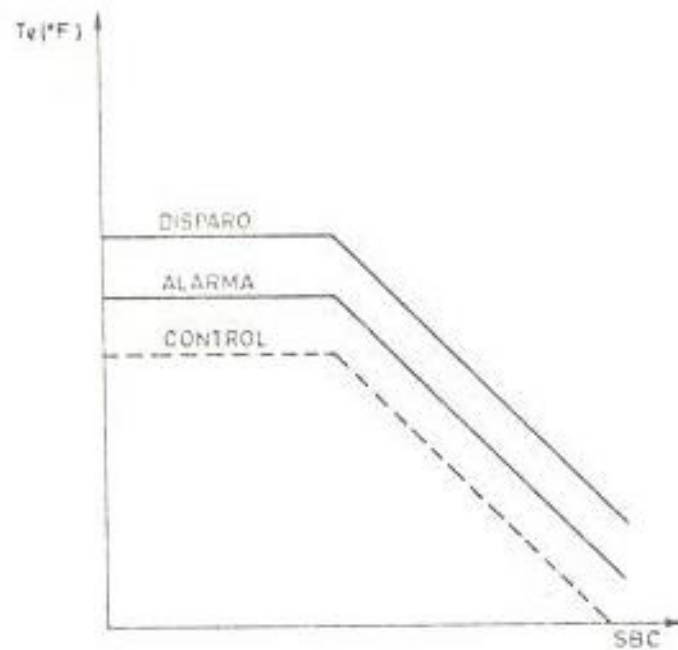
Si por alguna falla en el sistema, se llega a exceder dicho límite de temperatura, el sistema de protección en análisis es el encargado de generar una señal de alarma de sobret temperatura que está ajustada para operar en un valor fijo de temperatura menor al nivel de disparo de la unidad. Con esta acción se consigue cierto tiempo de operación para maniobras en el sistema tales como bajar la carga en la turbina afectada y dar arranque a otras unidades.

Los valores de temperatura de alarma y disparo son propios de las características de cada unidad y son función directa de la resistencia térmica de las partes que la constituyen. Sin embargo, es usual que el valor de alarma sea ejecutado a  $20^{\circ}\text{F}$  sobre el punto de ajuste del control de temperatura, mientras el valor de disparo lo es a  $40^{\circ}\text{F}$  sobre dicho punto.

La Fig. N<sup>o</sup> 46a,b son curvas características para calibración de los niveles de alarma y disparo por sobret temperatura en una turbina a gas, para los casos de polarización por SBC y por Pdc respectivamente, según sea el modo de operación del control ~~adecuado~~ de temperatura.



a) Polarización por presión de descarga del compresor



b) Polarización por señal básica de combustible

FIG. N.º 46 a,b. CURVAS PARA CALIBRACIÓN DE NIVELES DE ALARMA Y DISPARO POR SOBRETENPERATURA.

### 5.2.1. Diseño de la protección

El sistema de protección por sobretemperatura tiene por características principales:

1. Operar independientemente del sistema de control de temperatura de la unidad con el fin de eliminar la posibilidad de que ésta se quede sin protección por sobretemperatura en el caso de ocurrir una falla en el mencionado control.
2. Operar con dos canales de protección independientes entre sí y con capacidad de dar las señales de alarma y disparo de la unidad, indistintamente. Con la implementación de estos canales A y B se aumenta la confiabilidad del sistema de protección.

Los canales de protección están constituidos:

- a) Por sus respectivos elementos sensores de temperatura; y
- b) Por sus sistemas generadores de las señales que van a alimentar el sistema de protección.

#### a) Medición de temperatura

Como en el caso de control de temperatura, los elementos sensores a utilizar son termocuplas con características de acción rápida.

Estos sensores en número de 3 por cada canal, están ubicados alrededor del ducto de escape de gases, intercalados entre los sensores utilizados para el control y montados en los elementos protectores contra radiación con el mismo fin de minimizar el error en la medición.

b) Sistema generador de señales promedio de temperatura.

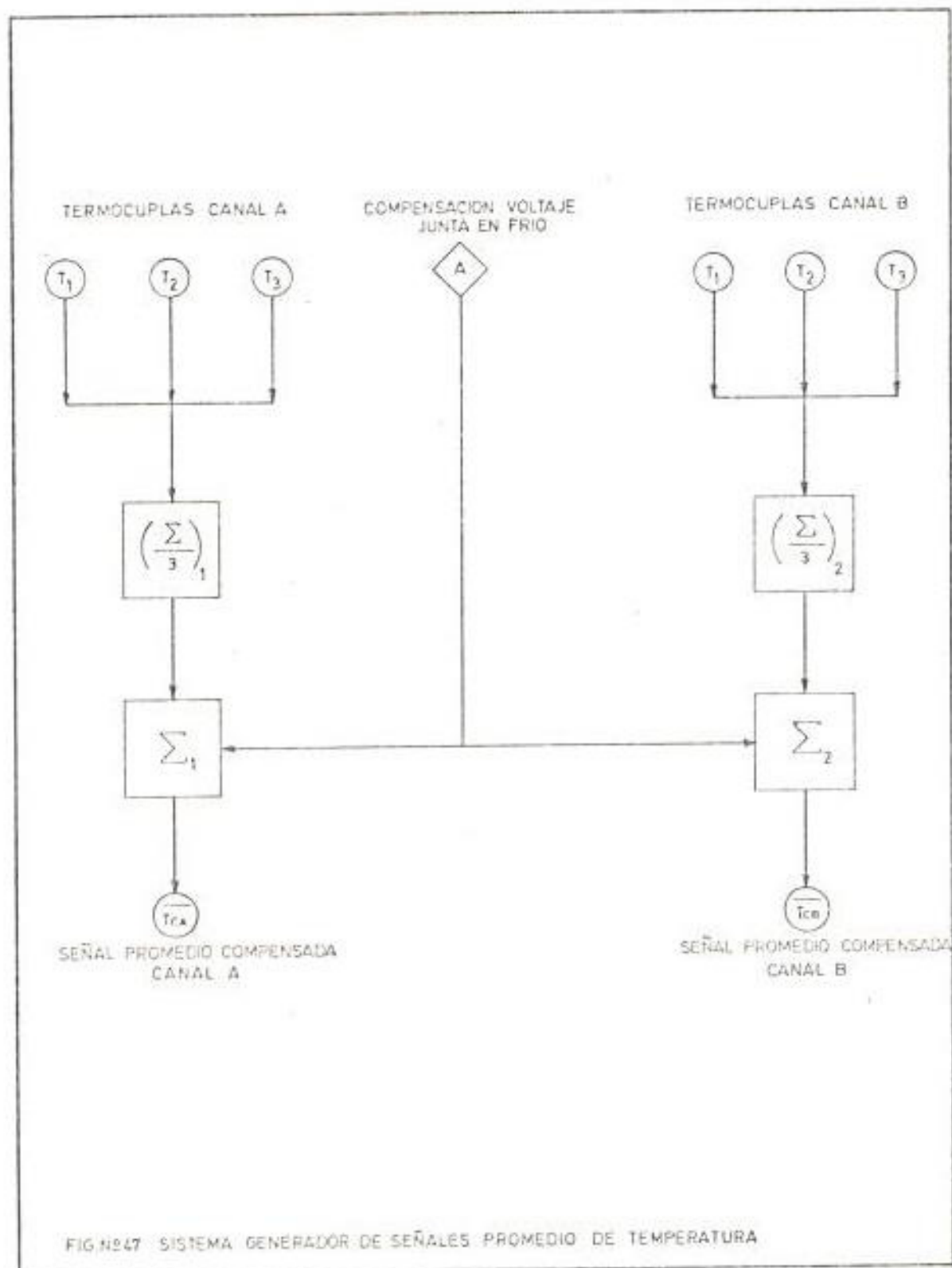
Las señales generadas por las termocuplas de cada canal de protección son alimentadas a un sistema generador que cumple con dos funciones específicas similares al sistema generador de la señal promedio de temperatura para el control, esto es:

1. Promedia independientemente las señales de las tres termocuplas de cada canal.
2. Compensar el voltaje opuesto a la señal de milivoltios de las termocuplas, que se genera en la unión en frío.

El sistema que cumple con los dos requerimientos es el diagramado en la Fig. N° 47.

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 al elemento sumador  $\Sigma 1$  y  $\Sigma 2$  donde se suma con la señal de compensación por voltaje de la junta en frío. De los elementos sumadores salen las señales promedio compensadas  $\bar{T}_{ca}$  y  $\bar{T}_{cb}$  de cada canal y que van a ser utilizadas por el sistema de protección.

Una vez analizados los componentes constitutivos de cada canal independiente de protección, se va a detallar la filosofía del sistema de protección. Al respecto:

- a) El sistema deberá ser capaz de dar las señales de alarma y disparo por intermedio de cualquiera de sus dos canales independientes.
- b) Deberá contemplarse las polarizaciones por la señal básica de combustible (SBC) y por presión de descarga del compresor (Pdc) según sea el modo de operación escogido del sistema de control de temperatura según se analizó anteriormente. Para esto se implementa un elemento de transferencia manual  $T_1$ .
- c) Deberá dar disparo a la turbina, si luego de completada la secuencia de arranque, los dos

canales detectan una señal de temperatura menor a unos 200°F. La finalidad de este requisito es determinar una posible falla en ambos canales de detección de temperatura, lo que dejaría a la unidad sin protección por sobretemperatura.

- d) Deberá proveer una alarma de alto diferencial de temperatura. Esta alarma se dará en el momento en que 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 mencionadas sea mayor a un límite predeterminado.

La importancia de la alarma radica en que puede deberse a dos factores:

1. Pérdida de una de las tres señales
2. Mala distribución de la temperatura de los gases en el escape como consecuencia de un mal funcionamiento en el sistema de combustión esto es, mala atomización de combustible debido a toberas taponadas, falla en varios canales del divisor de flujo, etc.

e) Deberá proveer una alarma diferencial por compensación ambiental, Esta alarma se dará cuando la diferencia entre las señales de polarización por compensación ambiental utilizadas en el sistema de control y en el sistema de protección, sobrepasa un límite prefijado.

La finalidad de esta alarma es dar aviso sobre una posible pérdida de una de las señales de polarización o mala calibración de los elementos amplificadores de las señales generadas por el transductor de presión Pdc. Ambos eventos pueden ocasionar una desviación de la curva de operación normal (control) con respecto a las curvas de alarma y protección (Fig. N° 46 a, b).

f) El sistema deberá contemplar además, la posibilidad de que la turbina sea utilizada con una temperatura de referencia del sistema de control de un valor mayor en las horas de consumo por lo que los niveles de alarma y disparo serán diferentes a los de operación normal. Para esto se implementan los elementos de transferencia  $T_2$  y  $T_3$ , respectiva-

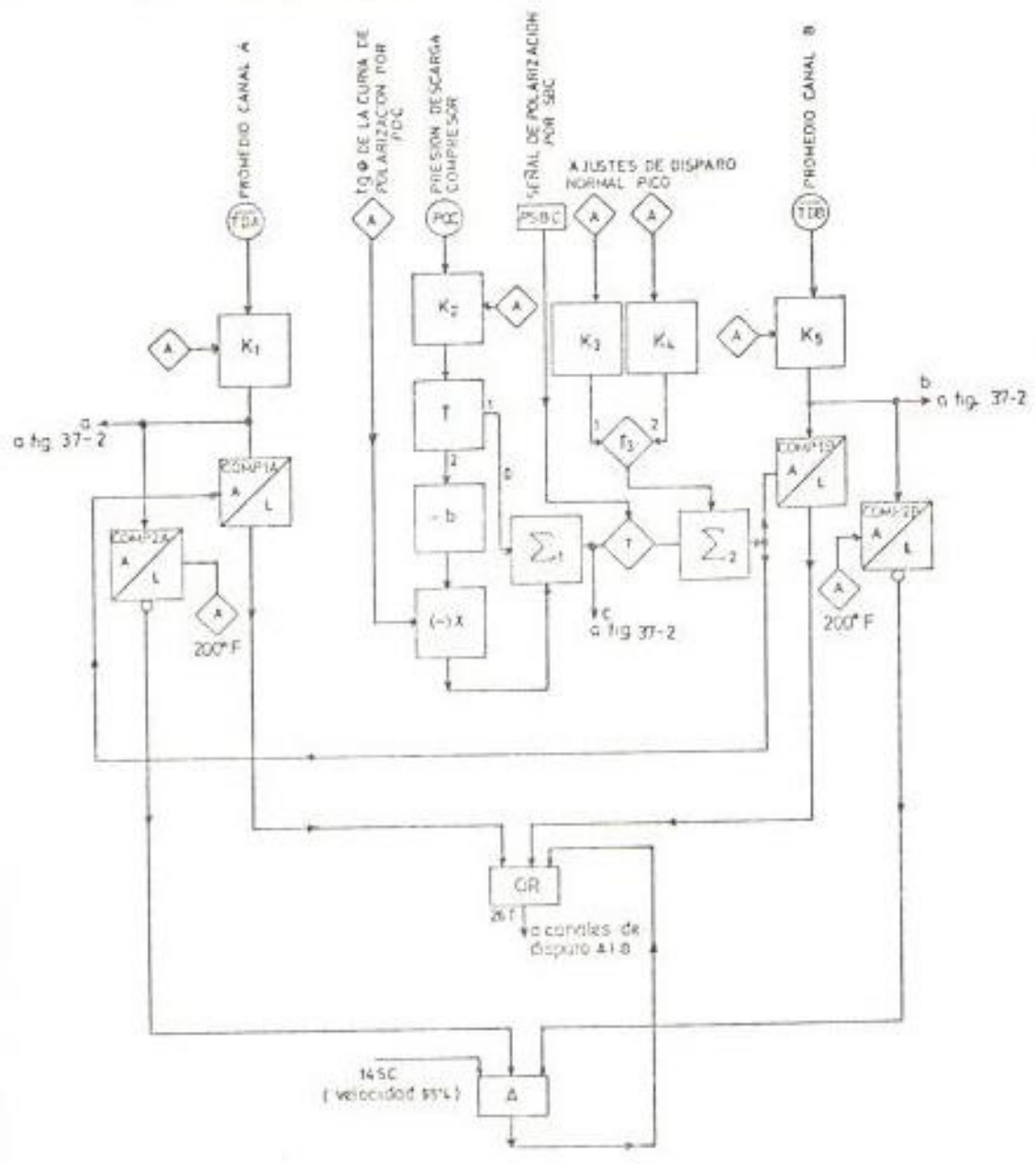
mente,

Expuesta la filosofía de operación del sistema, se procede a la implementación del mismo, según el diagrama de la Fig. N° 48-1, 2.

Las señales promedio de temperatura compensada de los dos canales (Tca) y (Tcb) son alimentadas a los elementos de amplificación K<sub>1</sub> y K<sub>5</sub> de ganancia ajustable respectivamente. Las señales resultantes son alimentadas a elementos comparadores con fines diferentes, así:

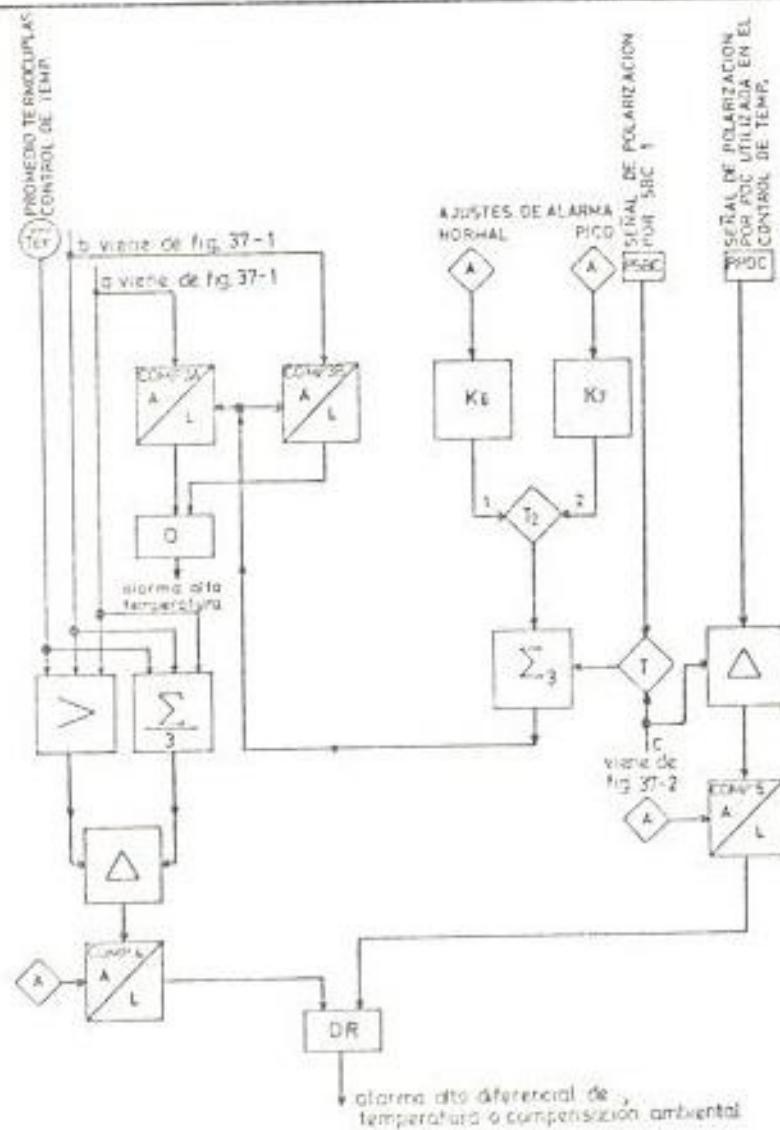
1. A los elementos COMP1A, COMP1B con el fin de generar las señales de disparo de la turbina en el momento en que uno de los dos canales detecte un valor de temperatura mayor al de referencia en dichos elementos. De así ocurrir, una señal de lógica 1 es llevada a un elemento "OR" que a su vez lleva la señal a los canales de disparo de la unidad.
2. A los elementos COMP 2A, COMP2B a fin de generar las señales de disparo en el momento en que los dos canales detecten una temperatura menor a 200°F y se haya completado la secuencia de arranque. Al respecto las señales que





NOTAS : 1 LA SEÑAL DE POLARIZACION POR SBC VIENE DEL CONTROL DE TEMPERATURA

FIG. Nº 48-1 SISTEMA DE PROTECCION DE SOBRETENPERATURA (1 de 2)



NOTA: 1 LA SEÑAL DE POLARIZACIÓN POR SBC VIENE DEL CONTROL DE TEMPERATURA

FIG. Nº 48-2 SISTEMA DE PROYECCIÓN DE SOBRETENPERATURA

salen de los comparadores son llevadas a una puerta "and" que a su vez recibe la señal de que se ha alcanzado el 95% de velocidad nominal. Si la lógica de las tres señales de alimentación de este elemento es "1", se genera la señal que va al circuito maestro "4" para disparar la unidad.

- 3) A los elementos COMP3A, COMP3B, con el fin de generar las señales de alarma de sobretemperatura si alguno de los canales sobrepasa el valor de referencia de dichos elementos. El valor de referencia está dado por la señal que sale del elemento sumador  $\Sigma_3$  y que es el resultado de la suma algebraica de los valores de ajuste de alarma y las señales de polarización por SBC o Pdc generadas como en el control, según sea el caso.

La señal para polarización por SBC viene dírectamente del sistema de control de temperatura.

Además, las dos señales  $\bar{T}_{ca}$  y  $\bar{T}_{cb}$  junto con la señal de temperatura promedio del siste-

ma de control  $\bar{T}_c$  van a un elemento de alta selección [ > ] que escoge la mayor de ellas y a un elemento (  $\tau/3$  ) que las promedia. Las dos señales resultantes son alimentadas a un elemento diferenciador  $\delta$  que genera la señal que alimenta un elemento COMP 4. La finalidad de este elemento es generar una señal de lógica "1" en el momento en que sobrepasa el valor preajustado en el comparador y enviarla al elemento "OR" que dispara la alarma de alto diferencial de temperatura.

Este último elemento "OR" dispara también la alarma de alto diferencial de compensación ambiental en el caso de que la diferencia entre las señales de polarización por Pdc utilizadas para este sistema y para el de control sea mayor que un valor preajustado en el elemento - COMP 5.

### 5.3. PROTECCION DE VIBRACION DE LA TURBINA A GAS Y DE LA CARGA

La protección de vibración constituye uno de los sistemas de mayor importancia de una turbina a gas, puesto que cumple con la finalidad de detectar y alertar sobre un posible daño en las partes mecánicas de la unidad.

Los daños pueden estar localizados en las partes estáticas de la turbina como ser los cojinetes o chumaceras o en las partes móviles de la misma como lo serían los álabes de la turbina o el compresor.

Respecto de las partes móviles puede anotarse que normalmente los daños que sufren son de dos tipos:

- a) Rotura de uno de los álabes, lo que trae como consecuencia un desbalanceamiento dinámico que producirá vibración excesiva.
- b) Estiramiento o elongación a consecuencia del desgaste por tiempo de operación excesivo o por esfuerzo térmico debido a elevadas temperaturas. Este estiramiento que sufren los álabes hace que se topen con el sello de aire respectivo produciéndose roce y la consecuente vibración.

En cuanto a las partes fijas de la turbina a gas, es de señalar que los daños obedecen a fallas del material constitutivo de los cojinetes, lo que ocasiona que la película de aceite sobre la que se desliza el rotor de la turbina pierda su característica y origine movimientos verticales del mismo que exceden los límites de vibración permitidos.



La importancia de la protección en estudio, radica en el hecho de que al producirse cualquiera de los eventos mencionados y no ser detectado, el problema podría agrandarse al sufrir daños otras partes de la máquina no afectadas inicialmente.

### 5.3.1. Diseño de la protección

El sistema de protección contra vibración está constituido fundamentalmente por los elementos sensores de vibración y por el sistema que va a generar las señales que ordenan la acción a tomar por el control principal de la turbina en el caso de que los niveles de vibración sobrepasen los límites impuestos para buena operación de la unidad.

Los sensores de vibración utilizados, son generalmente elementos que generan salidas de corriente pequeñas al pasar un imán a través de una bobina fija, eliminando así la necesidad de la corriente de excitación.

El sensor de vibración que es del tipo velocidad convierte la velocidad del elemento al que está sensando, en una señal proporcional que va a ser utilizada por el sistema de protección. Al res-

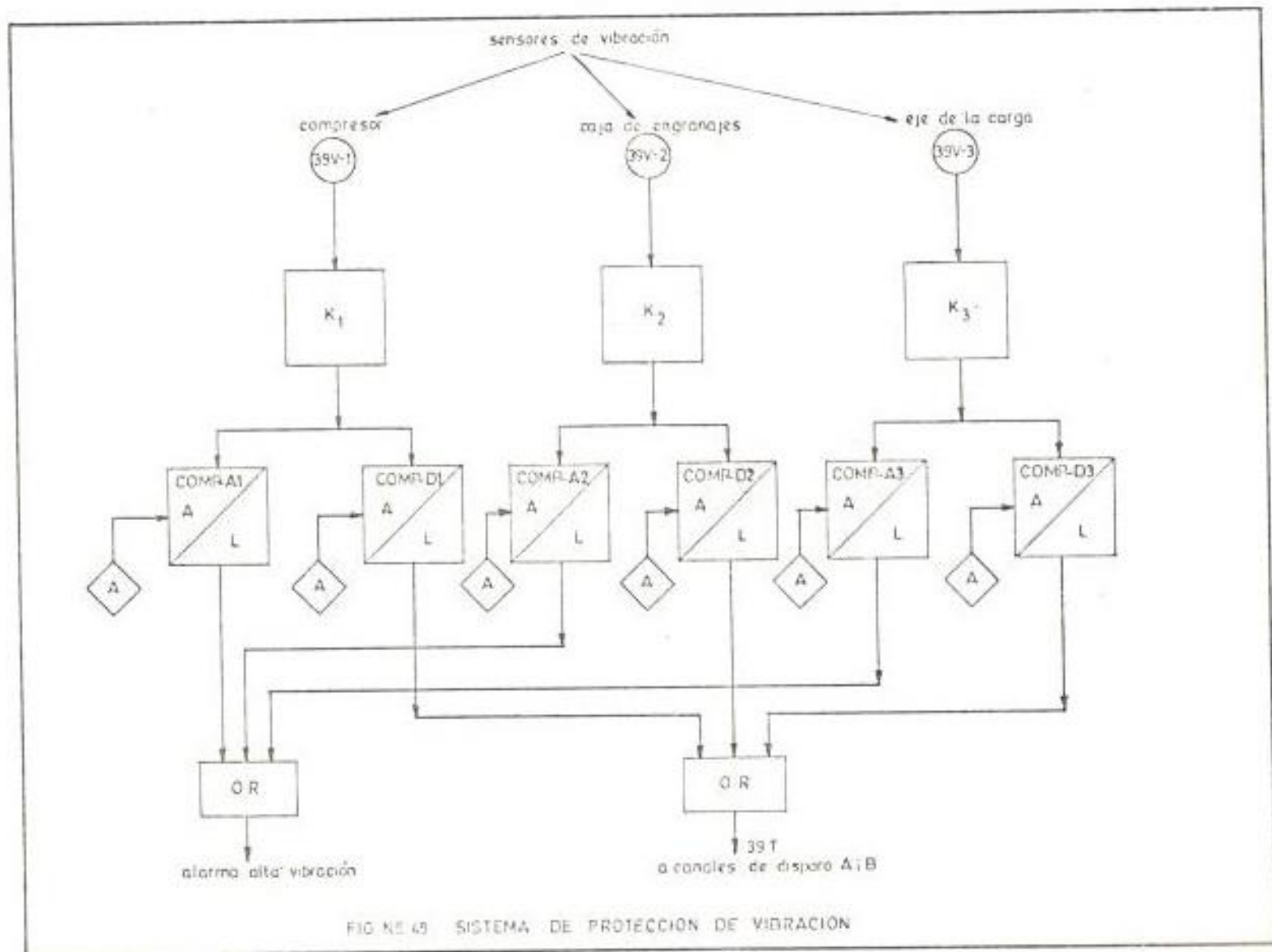
pecto, las características que deberá reunir -  
son:

- a) Deberá estar implementado con 3 canales de detección de vibración que operarán independientemente entre sí. Cada canal constará con su propio detector y su sistema generador de señales. Los canales supervisarán el compresor del generador de gas, la caja de engranajes de la turbina, y el extremo de rotor donde va acoplada la carga.
- b) Deberá operar con dos niveles de vibración, esto es, de alarma y disparo de la unidad - según se sobrepasen los límites preajustados respectivos.

El sistema de protección que cumple con los requisitos enunciados es el presentado en la Fig. N° 49.

Las señales generadas por los elementos detectores de vibración (39V-1), (39V-2) y (39V-3), son alimentadas a elementos amplificadores K1, K2 y K3, respectivamente.

Las señales de salida de cada uno de estos elementos son llevadas a dos comparadores con ajustes diferentes correspondientes a los límites



de vibración para estado de alarma y disparo de la unidad.

Así los comparadores COMP-A1, COMP-A2 y COMP-A3, generarán las señales de alarma de cualquiera de los tres canales en el momento en que la señal de entrada sea mayor al valor preajustado.

Las señales de los tres elementos en mención, son llevadas a una puerta "OR" de donde sale la señal que traducirá la alarma por alta vibración. En cambio, los elementos COMP-D1, COMP-D2 y COMP-D3 generarán las señales de disparo de lógica "1" en el momento en que cualquiera de los tres canales sense un valor de vibración mayor al preajustado.

Las señales de salida de estos tres elementos son alimentadas a un elemento "OR" que envía su señal de salida a los canales de disparo A y B.

#### 5.4. PROTECCION DE PERDIDA DE LLAMA EN EL SISTEMA DE COMBUSTION.

El sistema de protección contra pérdida de llama en la cámara de combustión es implementado en una turbina a gas con el fin de sacarla de servicio en el caso de que se detecte un mal funcionamiento en el sistema de combustión que hace que la llama, en los combustores donde es-

tá supervisando el sistema, disminuya en intensidad o se pierda completamente.

En realidad, el sistema cumple con dos funciones principales:

1. Proteger a la turbina durante la secuencia de arranque. Al respecto, según se vio en el sistema de control de arranque, al alcanzar la velocidad de encendido había un tiempo de mas o menos un minuto, durante el cual debía de producirse la combustión, caso contrario de lo cual, los sensores no generaban la señal necesaria para proseguir con la mencionada secuencia produciéndose el disparo de la unidad. Con esto, se consigue detectar una posible falla en elementos principales como el divisor de flujo, las bujías de encendido o su sistema de alimentación, la bomba de combustible y aún los propios elementos sensores de llama.
2. Proteger a la turbina contra una pérdida de llama estando ya en operación normal. En el momento en que los sensores dejan de detectar llama, se genera la señal de disparo de la unidad con el consecuente corte de combustible hacia la misma. Con esto, se evita la probable acumulación de combustible hacia la mis-



ma. Con esto, se evita la probable acumulación de combustible en los combustores lo que podría ocasionar que en el próximo arranque de la unidad, ocurran explosiones debido al exceso de materia volátil evaporada o se sobrepasen los valores límites de temperatura de encendido de la unidad, sometiéndose a las partes de la misma a excesivos esfuerzos térmicos.

#### 5.4.1. Diseño de la protección

El sistema de protección en estudio, está constituido al igual que los otros sistemas de protección, por dos partes fundamentales: a) Los elementos sensores; y b) el sistema encargado de generar las señales de operación.

##### a. Sensores de llama

Respecto de los elementos sensores de llama, debe anotarse que la mayoría de los existentes fundamentan su principio de operación - en la detección de las radiaciones ultravioletas que son producidas por la combustión de hidrocarburos y que son invisibles al ojo humano y que presentan como característica, ser más estables que la luz visible en cuanto a color e intensidad.

A continuación se van a detallar dos tipos diferentes de sensores de llama muy comúnmente utilizados en turbinas a gas:

1. Sensores que están constituidos por dos electrodos de tungsteno.

Estos electrodos están encerrados en un tubo de vidrio de cuarzo que contiene hidrógeno en su interior. Los electrodos están conectados a un transformador cuya función es alimentar los al voltaje adecuado.

Al producirse la radiación ultravioleta, el gas del interior del tubo se ioniza permitiendo que una corriente eléctrica circule entre los electrodos. A medida que la intensidad de la radiación ultravioleta aumenta, el microamperaje también lo hace hasta un punto en que la corriente se hace estable. Esta señal es amplificada y usada luego en el circuito de control. La Fig. N<sup>o</sup> 50 representa este tipo de sensor.

2. Sensor ultravioleta catódico de cobre

El sensor está constituido por un tubo de vidrio lleno de gas hidrógeno y donde se encuentra el elemento catódico que es de cobre puro.

Al emitirse las radiaciones ultravioletas de la llama, ocurre la ionización del gas, descargando electrones desde el cátodo de cobre y produciendo un efecto de cascada; se produce entonces el paso de corriente entre los electrodos. Como en el caso anterior, la señal es utilizada en el circuito de control. La Fig. N° 51 representa el diagrama esquemático eléctrico del detector catódico de cobre.

b) Una vez analizado dos de los tipos de sensores de llama, se va a proceder a enumerar las características que deberá reunir el sistema generador de las señales de operación del sistema en estudio. Al respecto:

1. Deberá estar constituido por dos canales que operen independientemente y que generarán una señal de alarma en el momento en que alguno detecte la condición de "pérdida de llama" o falle en su operación.
2. Deberá generarse una señal de disparo de la unidad en el momento en que ambos canales sensen la condición "pérdida de llama".

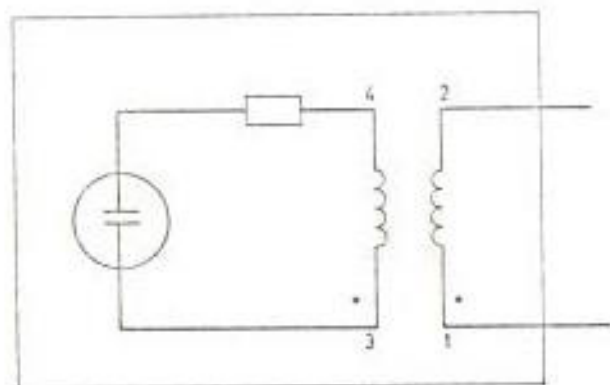


FIG. Nº 50 DIAGRAMA DEL SENSOR DE ELECTRODOS DE TUNGSTENO

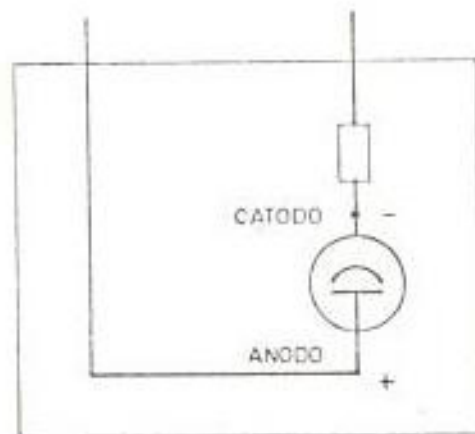


FIG. Nº 51 DIAGRAMA ESQUEMATICO ELECTRICO DEL DETECTOR CATODICO DE COBRE

El sistema de protección que opera con las características enumeradas es el representado - en la Fig. N° 52.

Las señales generadas por los sensores de detección de llama (28FD-1) y (28FD-2), son elevadas a un elemento amplificador K1 y K2 respectivamente, cuyas señales de salidas son alimentadas independientemente cada una a dos elementos comparadores que tienen por finalidad detectar las condiciones de circuito o sensor abierto y de pérdida de llama.

Los elementos COMP-CA1 y COMP-CA2 generan las señales que dan las alarmas de sensores abiertos luego de ser enviadas invertidas a una compuerta "OR"-3.

Los elementos COMP-P1 y COMP-P2 generan las señales que dan las alarmas de pérdida de llama detectada por alguno de ellos, y que se producen a través de una compuerta "OR"-4.

Además, las señales de los COMP-CA1 y COMP-P1 son alimentadas luego de ser invertidas a una compuerta "OR"-1 cuya señal de salida va a una puerta "AND" a donde también llega la señal - que sale del elemento "OR"-2 y cuyas entradas



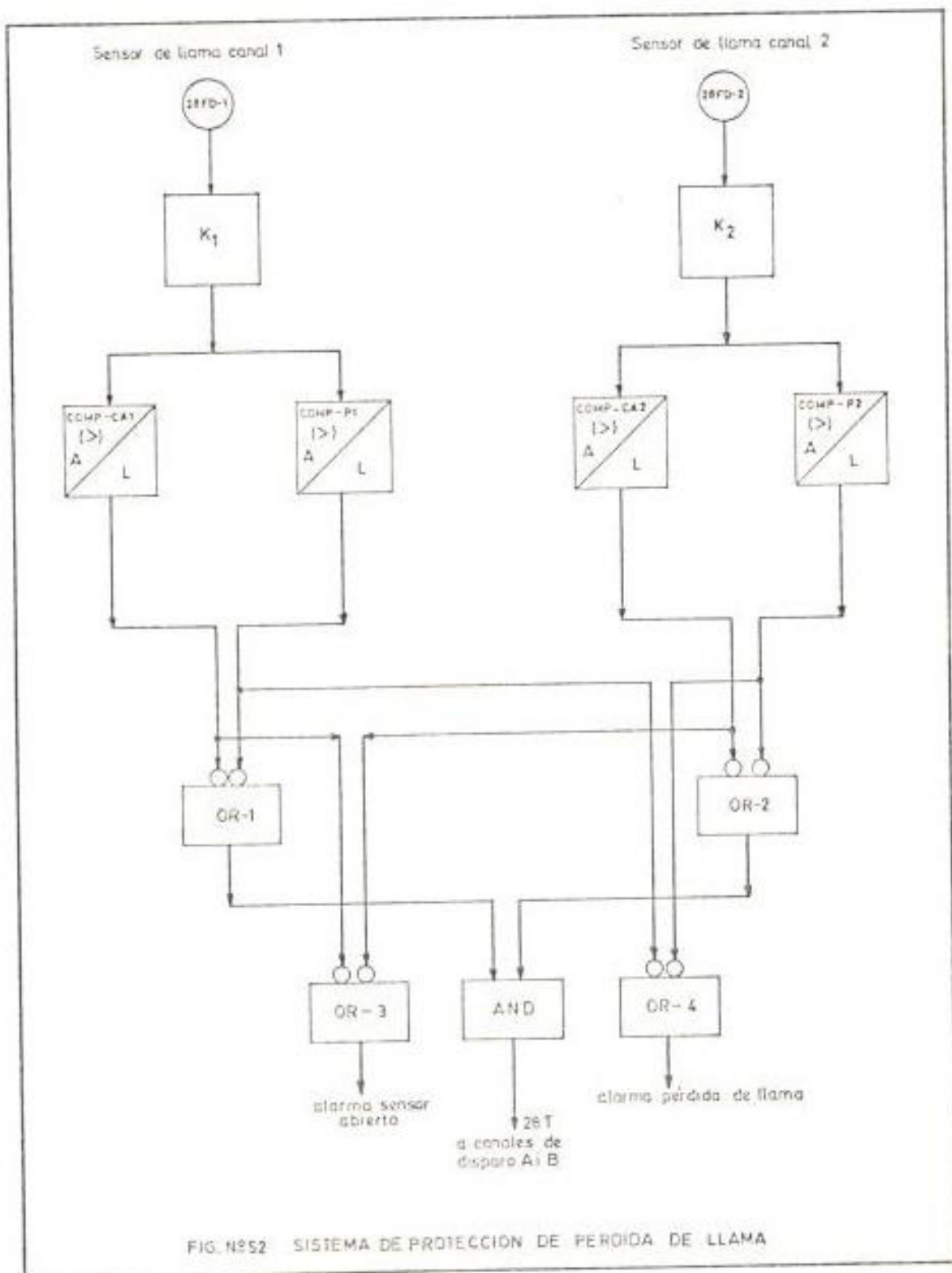


FIG. Nº52 SISTEMA DE PROTECCION DE PERDIDA DE LLAMA

son las señales invertidas provenientes de los elementos COMP-CA2 y COMP-P1.

La salida de la puerta "AND" va a los canales de disparo A y B, con esto se consigue el requisito de sacar de servicio la unidad sólo en el caso en que fallen o sensen la condición de pérdida de llama, los dos canales al mismo tiempo.

#### 5.5. CIRCUITO PROTECTOR PRINCIPAL

Durante el análisis de cada uno de los sistemas de protección principales, las señales generadas en el caso de alguna contingencia con el fin de ordenar el disparo de la unidad han sido alimentadas teóricamente a dos canales de disparo A y B. Al respecto, estos canales de disparo, independientes entre sí según se visualizó en la Fig. N° 43, forman parte de un circuito que puede tomar el nombre de circuito de protección principal y cuya finalidad es la de cumplir con dos funciones específicas tendientes a proteger a la unidad, a saber:

- a) Supervisión de ciertas condiciones en el momento de arranque a fin de permitirlo o no.
- b) Protección de la turbina en operación.

A continuación se analizan cada una de estas dos funciones:

a) Las condiciones a ser cumplidas en el momento del arranque con el fin de que éste ocurra normalmente son:

1. La turbina deberá estar en velocidad cero, por lo que la señal correspondiente deberá estar en el estado lógico adecuado.
2. La turbina no está a velocidad de operación; es decir a 95% de su velocidad nominal. De igual forma la señal respectiva deberá tener la lógica adecuada.
3. Los circuitos del sistema de protección por sobre velocidad deberán estar en condición de desconexión por encontrarse bajo el límite inferior de la banda de frecuencia de operación según se vió en el estudio de dicho diseño
4. Deberá generarse la señal de arranque a la unidad.
5. No deberá darse una señal de parada de emergencia.

b) La protección de la unidad en operación la realiza por intermedio de los sistemas estudiados, generando la señal de disparo de la turbina cuando así lo ordene alguno de ellos.

Con el objeto de cumplir óptimamente con los dos requerimientos anteriores es necesario implementar los circuitos de protección principal con tres elementos principales:

1. Una puerta "AND"
2. Una puerta "NAND"
3. Un circuito basculador FF.

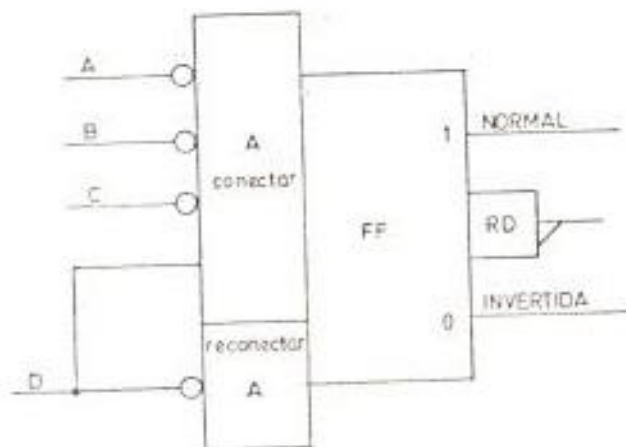
Este último constituye el elemento principal del circuito por lo que es necesario hacer una breve descripción de la operación del último. Al respecto, es un elemento de lógica de memoria que tiene dos entradas "conectar" ("set") y "reconectar" ("reset") y tres salidas: lógica "1", lógica "0" y una que conecta con un excitador de relé RD y que lo enciende cuando se cumplen las entradas a la entrada "conectar".

En el momento en que el basculador es ajustado a través de su primera entrada "conectar", no cambia su salida a menos que la entrada a "reconectar" sea una lógica "1".

En la Fig. N° 53 se muestra la representación del elemento basculador y su tabla de verdad.

Luego de detallada la operación del elemento FF, se procede a la implementación de los circuitos de protección principal, según se representa en la Fig. N° 54.

Del diagrama se observa que la primera de las entradas a la entrada "conectar" del basculador se satisface siempre y cuando las señales que alimentan la puerta "And" son todas de lógica "1".



ENTRADAS				SALIDAS		
A	B	C	D	NORMAL	RD	INVERTIDA
0	0	0	1	1	PRENDIDO	0
CUALQUIERA			0	0	APAGADO	1

FIG. N.º 53 REPRESENTACION DEL ELEMENTO BASCULADOR Y SU TABLA DE VERACIDAD



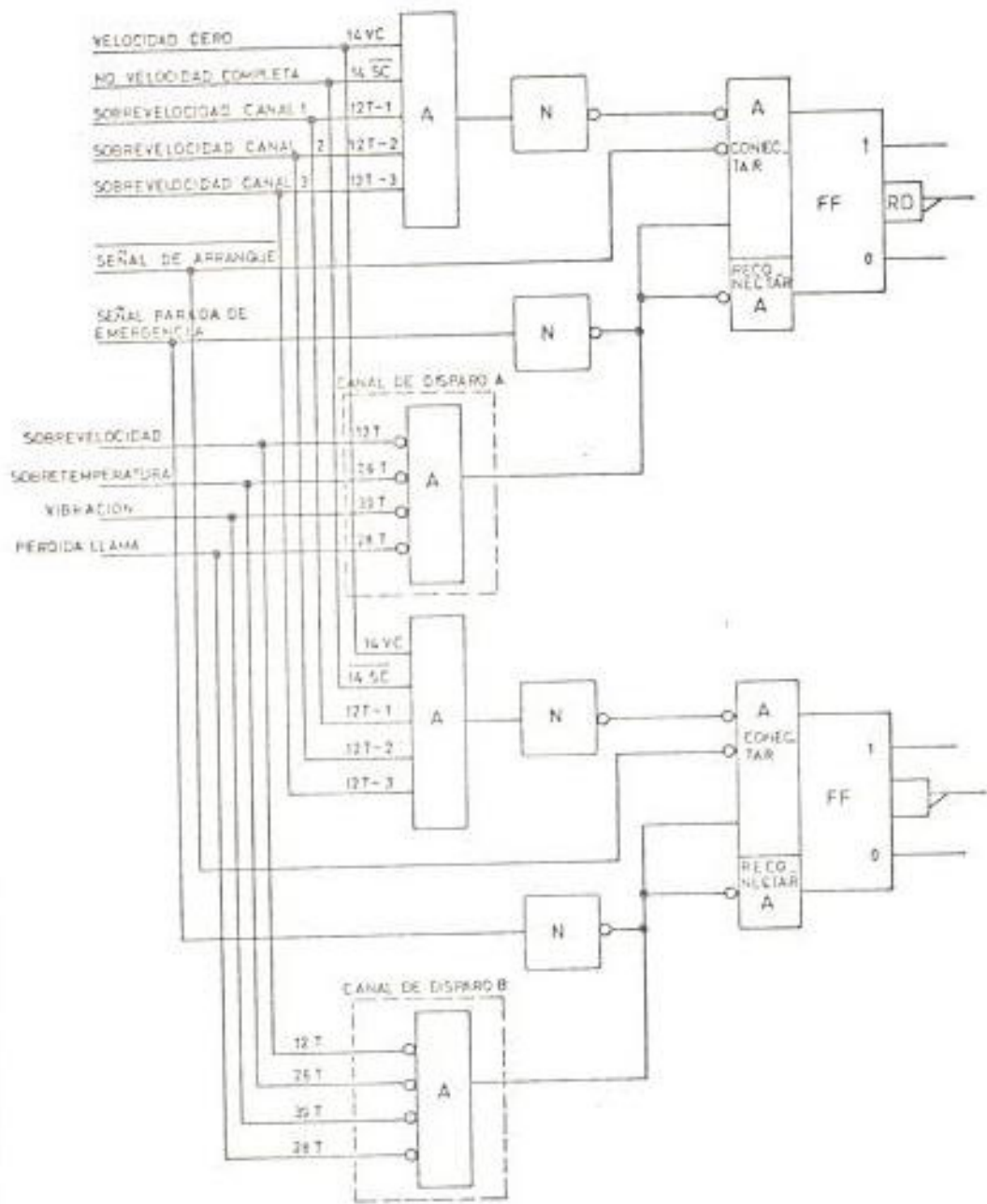


FIG. Nº 54 CIRCUITO PROTECTOR PRINCIPAL

La señal que sale de la puerta "And" es llevada a una puerta de negación "N" la que la convierte en lógica "0".

La segunda entrada a la entrada "conectar" se satisface el momento en que se da la señal de arranque a la unidad por lo que señal de arranque pasa de lógica "1" a "0".

La tercera entrada se satisface siempre y cuando no se dé una señal de parada de emergencia por lo que la lógica de esta es "0", pasando a lógica "1" en el elemento inversor.

El circuito analizado hasta el momento es el encargado de realizar la primera de las dos funciones enunciadas al principio.

La otra función, esto es la de proteger a la turbina - durante la operación, es realizada por el circuito restante constituido por una puerta "NAND" a la que le llegan las señales de disparo por sobrevelocidad (12T), disparo por sobretemperatura (25T), disparo por vibración (39T) y disparo por pérdida de llama (28T). En condiciones normales de operación todas esas señales estarán en estado de lógica "0" por lo que la puerta "NAND" genera una señal de salida de lógica "1" la que entra como tal en la cuarta entrada de la entrada "conectar" del basculador e invertida en la puerta "reconectar" -

del mismo. En el momento en que alguna de dichas señales de protección pasa a lógica "1" o estado de desconexión para la turbina, el circuito basculador recibirá en su entrada "reconectar" una lógica "0" que hará cambiar de estado sus salidas.

Al respecto, las salidas del elemento basculador FF alimentan sistemas fundamentales para la operación de la unidad tales como sistema de combustible, sistemas de lubricación, sistemas de arranque, de tal manera de que si no están en el estado de lógica correcta, la turbina no arranca o es sacada de operación.

#### 5.6. PROTECCIÓN CONTRA INCENDIO DE LA UNIDAD

El sistema de protección contra incendio es de suma importancia toda vez que la fuente de entrada de energía a la turbina a gas, la constituye el combustible sea este líquido o gaseoso y que las temperaturas de operación normal son de orden de 500° a 700°C. es decir lo suficientemente altas como para que a consecuencia de algún daño en cualquier tubería del sistema de combustible o lubricación que provoque la presencia de materiales inflamables, éstos se enciendan provocando el encendido de la unidad.

Además, no hay que descartar la posibilidad de un incendio a consecuencia de problemas de índole eléctrico

como cortocircuitos, falla en algún motor de servicio auxiliar, etc.

Es de práctica generalizada, utilizar el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) como elemento idóneo para la protección contra incendio, por presentar grandes ventajas entre las que se podrían mencionar:

- a. Rapidez de acción.
- b. Eficiencia, por cuanto reduce la temperatura lo suficiente como para impedir una reiniciación del fuego.
- c. No es conductor, por lo que puede ser utilizado aún en presencia de equipos que operen a elevados voltajes.
- d. Gran adaptabilidad por cuanto es efectivo en un gran rango de materiales inflamables.

El principio en que se fundamenta la operación del sistema de protección contra incendio, es el de extinguir el fuego reduciendo el contenido de oxígeno en el aire desde su valor normal de 21% hasta un valor menor al 15%.

Al respecto, el sistema ideal de protección deberá ser capaz de suministrar inicialmente dióxido de carbono - en una cantidad tal que consiga lo anteriormente expues



to en un lapso aproximado de 3 minutos y luego mantener el flujo de  $CO_2$  con el fin de que la concentración de oxígeno en el aire no sobrepase el 15% en un tiempo de por lo menos 20 minutos a fin de minimizar la posibilidad de reinicio del fuego.

#### 5.6.1. Diseño del sistema de protección

El sistema de protección contra incendio, a ser diseñado está constituido por una serie de elementos que van a ser enunciados a continuación:

a. Elementos sensores [45F]. Los detectores de llama que pueden ser utilizados son de varios tipos, siendo los más comunes los termostatos eléctricos y los detectores de humo.

Al respecto, los termostatos eléctricos son elementos constituidos por dos contactos de plata que están normalmente separados pero que ante un aumento de temperatura comienzan a unirse hasta hacerlo completamente si la temperatura que están sensando llega al valor preajustado como límite.

b. Cilindros de dióxido de carbono.- Estos cilindros están implementados con unos dispositivos de descarga bajo presión que dejan paso al  $CO_2$  contenido en su interior en el momento en que



la presión sobre ellos es superior a un cierto valor,

- c) Cilindro de control.- Este cilindro normalmente lleno de nitrógeno ( $N_2$ ) es el encargado de ejercer la presión necesaria sobre las cabezas de descarga de los cilindros  $CO_2$ .
- d) Válvula solenoide (45D).- Esta es una válvula que opera normalmente desenergizada y es normalmente cerrada. Se encuentra ubicada en la descarga del cilindro de control por lo que tiene entrampada la presión de  $N_2$  mientras no sea energizada.
- e) Presiostatos.- Se considera la implementación de dos medidores-interruptores de presión que supervisan la carga de los cilindros de dióxido de carbono y de nitrógeno (63 $CO_2$  y 63 $N_2$ ). El punto de operación de los contactos es regulable.
- f) Relé de retardo de tiempo (28TD).- Produce un retardo de tiempo entre el momento en que se energiza la alarma y la descarga de las botellas de  $CO_2$  hacia la máquina.
- g) Relés electromagnéticos (45FX-1, 2, 3; 45DX; 28F; 28G).- Estos relés al accionar sus contactos continúan la secuencia de operación de control del sistema.

luego de enumerados los elementos constitutivos del sistema, se van a anotar las características de operación del mismo.

- a. Deberá ser capaz de operar automáticamente en el momento en que uno de los sensores de fuego opere.
- b. Deberá ser implementado de manera que opere - manualmente por medio de una botonera eléctrica.

Al respecto, el sistema de protección debería tener un disparo manual mecánico que opere el sistema ante la pérdida de voltaje. Con esto se aumenta la confiabilidad de operación.

- c. Debe operar una alarma en el momento en que se detecte condición de fuego en la unidad por medio de los sensores o cuando se opere el sistema de modo manual.
- d. Debe operar una alarma de "baja presión en los cilindros de dióxido de carbono o de nitrógeno" cuando ésta baja de cierto valor preajustado - en los respectivos presiostatos.
- e. Deberá tener un tiempo de retardo en la operación automática. Sin embargo en operación manual, la descarga de los cilindros de CO<sub>2</sub> es

inmediata.

- f. Deberá generar una señal de disparo de la unidad. Esta señal es alimentada directamente a los circuitos maestros "4" del sistema de control.
- g. Deberá provocar el disparo de equipos auxiliares como ventiladores de enfriamiento.
- h. El sistema estará implementado por 9 detectores de llama distribuidos de la siguiente forma:
  - 2 detectores en el generador eléctrico
  - 5 detectores en el compartimento de la turbina.
  - 2 detectores en el compartimento de accesorios.

El diagrama de la Fig. N<sup>o</sup> 55 representa el arreglo físico del sistema de protección en estudio.

El circuito de control de la Fig. N<sup>o</sup> 56, es el que cumple con las características requeridas de operación del sistema.

Del análisis del control, cuando opera uno de los detectores de fuego, se energizan los relés 45FX.

El relé 45FX-1 es utilizado para la secuencia propia de control, puesto que energiza el relé 28F, el que a su vez energiza la alarma del sistema y

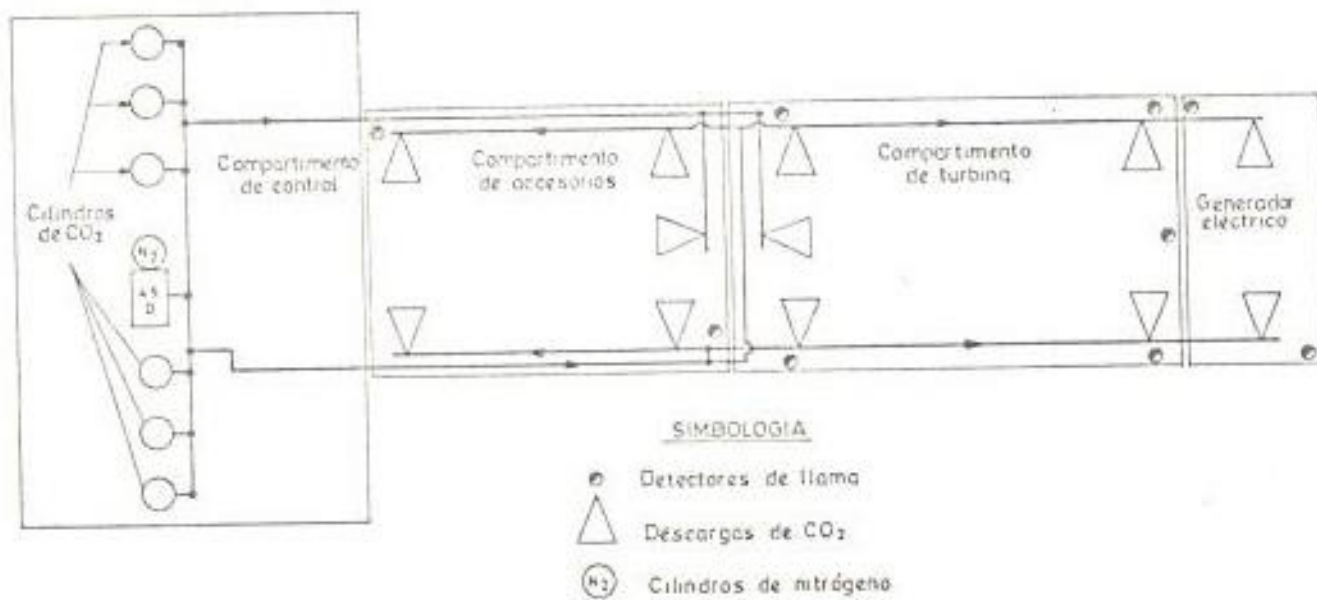
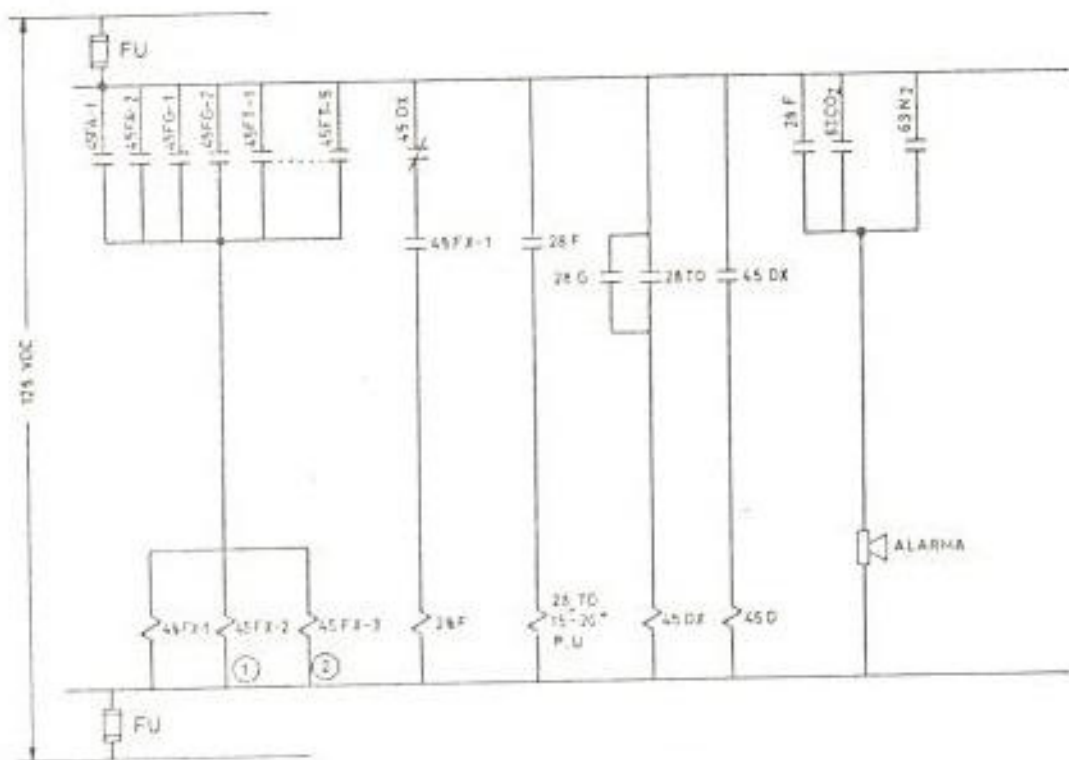


FIG. N.º 55 ARREGLO FISICO DEL SISTEMA DE PROTECCION CONTRA INCENDIO



**NOTAS**

- ① CONTACTO NORMALMENTE ABIERTO A CIRCUITOS MAESTROS "A" PARA DISPARO DE TURBINA.
- CONTACTO NORMALMENTE ABIERTO A ALARMA DE FUEGO.
- ② CONTACTO NORMALMENTE ABIERTO A CIRCUITO DE CONTROL DE VENTILADORES PARA ENFRÍAMIENTO DE LA TURBINA, LOS DISPARA EN CASO DE DETECCIÓN DE FUEGO.

FIG. Nº 56 SISTEMA DE PROTECCION CONTRA INCENDIO



el relé de retardo de tiempo 28 TD. El ajuste de retardo de tiempo a la energización varía entre los 15" y 120" .

Luego del retardo de tiempo se cierra el contacto 28 TD que energiza el relé 45 DX cuya finalidad - es la de desconectar la alarma desenergizando 28F y fundamentalmente energizar la válvula solenoide 45D que descarga el cilindro de nitrógeno sobre las cabezas de descarga de presión de los cilindros de CO<sub>2</sub> produciéndose así la descarga final de este elemento hacia el interior de la máquina a través de las toberas respectivas.

El relé 45 FX-2 es el encargado de dar la señal de disparo de la unidad y la alarma de "fuego".

El relé 45 FX-3 produce el disparo de los ventiladores de enfriamiento de la turbina.

Los interruptores 63CO<sub>2</sub> y 63 N<sub>2</sub> generan la señal de alarma ya mencionada. En cuanto a la operación manual, esta es iniciada por medio de la bobonera PB que energiza el relé 28G que a su vez energiza el 45 DX y en consecuencia la válvula solenoide 45D.

## VI, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones correspondientes al presente estudio son - las enumeradas a continuación:

1. Las tres acciones básicas de control, esto es, proporcional, integral y derivativa, son las utilizadas en el desarrollo de los diferentes sistemas de control analizados por cuanto son las que mejor regulan el funcionamiento de un sistema con características de demanda variable. Al respecto:

- a) La acción proporcional de ganancia ajustable cumple con la función de aumentar la estabilidad del sistema.
- b) La acción de reposición o integral tiene por finalidad compensar al sistema para las variaciones de carga que ocurran; y
- c) La acción derivativa es implementada con el fin de incrementar la velocidad de respuesta del sistema cuando ocurran cambios bruscos en la carga.

2. En el estudio de los controles básicos de velocidad de la turbina, temperatura de los gases de combustión y de combustible, se desarrollaron las ecuaciones a partir de las cuales se podía obtener el valor de la salida del controlador. En estas ecuaciones participan tres términos pro-

pios de cada acción de control como son: banda proporcional ( $s$ ), frecuencia de reposición ( $r$ ) y tiempo derivativo ( $t$ ). Cada uno de estos términos deben ser calculados de una manera óptima.

Si se desea obtener la respuesta de los sistemas de control de una turbina a gas en particular, deberán utilizarse las ecuaciones desarrolladas teóricamente además de las características propias de los medios de control que serán implementados en la unidad.

Según ya se mencionó en el capítulo de generalidades, en el anexo # 3, se desarrolla un método práctico para el cálculo de los valores óptimos de  $s$ ,  $r$  y  $q$ .

3. En la mayoría de los controles se ha aplicado el criterio de combinar el sistema de lazo abierto o "alimentación directa" con el sistema de lazo cerrado o "alimentación atrás", con el objeto de obtener un sistema con mayor rapidez de respuesta y que es capaz de compensar los cambios en la curva de calibración propia del control de lazo abierto. En realidad este último aporta a la rapidez de respuesta puesto que genera una acción correctiva antes de que la variable empiece a cambiar.
4. Se observa en el presente estudio, que los sistemas de control de una turbina a gas están íntimamente relacionados con los sistemas de protección, de tal forma que estos ope

nan supervisando los parámetros que son regulados por los controles. Tal es el caso de los sistemas de protección de sobrevelocidad, temperatura y pérdida de llama.

5. Los sistemas de protección diseñados cumplen con los fines enunciados en el capítulo de introducción, esto es o freer los niveles de alarma y disparo de la unidad. El primero con el fin de tomar las medidas correctivas necesarias a fin de evitar el probable rechazo brusco de car ga al producirse el disparo de la unidad y que podría ocasionar trastornos en el sistema de generación al que está incorporada y el segundo para generar la señal de disparo si la falla en alguno de los controles o partes componentes de la turbina así lo exigen debido a su gravedad.
6. Se consideró necesario el incluir en esta tesis, el dise ño típico del sistema de protección contra incendio por cuanto, si bien es cierto no la protege contra falla de alguno de los controles en cambio lo hace contra fallas tales como cortocircuitos o rotura de tuberías de combus tible que pudieran ocasionar un incendio. En la práctica ya ocurrió la segunda de las contingencias mencionadas.
7. Tanto los sistemas de control como los sistemas de pro tección han sido desarrollados con el criterio básico de que sean funcionales al máximo ante cualquier contín



gencia y evitando la implementación de elementos de control que a más de volverlos complicados no incrementen la eficacia de operación.

En cuanto a las recomendaciones, cabe resaltar:

1. Cuando se ponga en servicio por primera vez un proceso de control, es necesario que el ajuste de los parámetros  $s$ ,  $r$  y  $q$  sean revisados cuidadosamente por cuanto estos fueron obtenidos de cálculo realizados a partir de las características de los medios de control, dadas por los fabricantes de los mismos, las que pueden no estar de acuerdo a la realidad de operación. En este caso, el ajuste final del sistema de control se realiza cuando este entra en servicio.
2. Si en un sistema de control o protección es factible implementar dos o más caminos de operación, es conveniente hacerlo porque así se disminuye la posibilidad de una falla en el sistema total. En otras palabras, ante una falla en uno de los canales de operación, el otro sirve de respaldo evitando el disparo de la turbina en el caso de que no exista ninguna anormalidad en el funcionamiento o generando la señal de disparo de la unidad en el caso contrario.



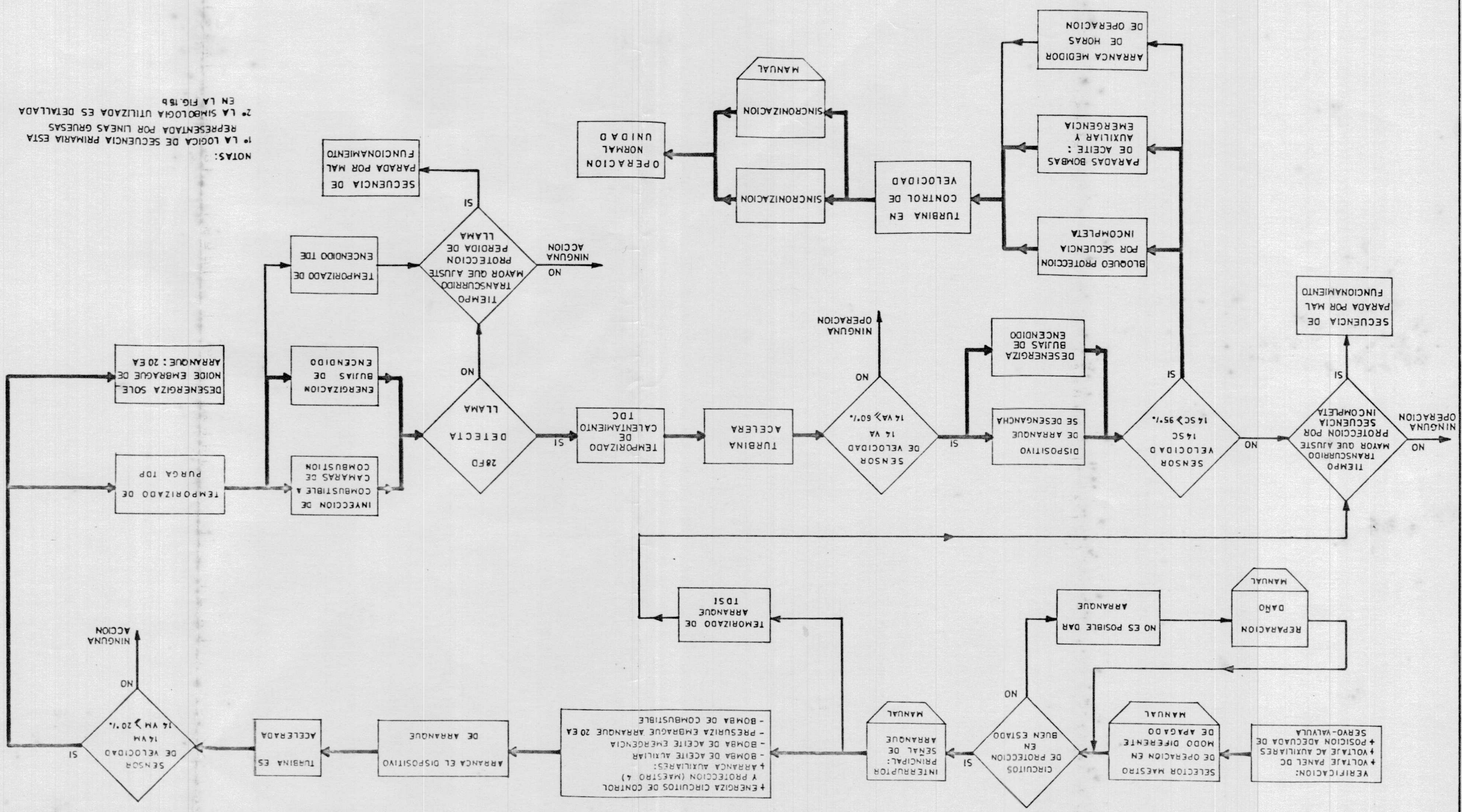
## VIII. BIBLIOGRAFIA

1. ABRAHAM G.A., "The Advancement of Controls with Modern Gas Turbines", USA, 1969, 14 p.
2. BLACKABY B.E. "Electrical control for gas turbines", A. S.M.E., publicación 804A, USA, 1964.
3. "CONTROL", Centro de entrenamiento Honeywell, Seminario de Abril de 1978, Ecuador.
4. "DIRECTO-MATIC II", Control, Publicación GET-3205A de General Electric Co., Drive Systems Product Department, SALEM, USA, 45 p.
5. DORF R.C., "Sistemas automáticos de control", Fondo Educativo Interamericano, S.A., 1977.
6. "Gas Turbine Controls. Mark II Speedtronic 1 & 2 Shaft", General Electric Publication M-423, Schenectady, N.Y., Abril 1976, 146 p.
7. LOFT A. "Speedtronic control system", General Electric Publication GER-2461D, Schenectady, N.Y., 20 p.
8. Mc ARTHUR M.J. and CHARLES P.W., "Recent Developments in the control of Industrial Gas Turbines", The Institution of Mechanical Engineers, Publicación 13, 1969, 12 p.

9. OGATA K. "Ingeniería de Control Moderna", Editorial Prentice Hall International, Madrid, 1973.
10. "Principles of Automatic Process Control" publicado por Instrument Society of America, 1968.
11. SAWYER J.W. "Sawyer's Gas Turbine Handbook", 2<sup>o</sup> Edition, Volume I, Gas Turbine Publications, Inc., Connecticut, 1972, 194-250 p.
12. SAWYER J.W. "Sawyer's Gas Turbine Handbook", 2<sup>o</sup> Edition, Volume II, Gas Turbine Publications, Inc., Connecticut, 1972, 95-101 p.
13. "The Aircraft Gas Turbine Engine and its operation", Pratt & Whitney Aircraft, Connecticut, 1974.



FIG. Nº 17. DIAGRAMA DE LA SECUENCIA LOGICA DE ARRANQUE



NOTAS:  
 1º LA LOGICA DE SECUENCIA PRIMARIA ESTA REPRESENTADA POR LINEAS GRUESAS  
 2º LA SIMBOLOGIA UTILIZADA ES DETALLADA EN LA FIG. 15B