



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores
"CUAUTITLÁN"

"ANÁLISIS DE LA TURBINA DE GAS"

T E S I S

Que para obtener el Título de:

Ingeniero Mecánico Electricista

P R E S E N T A N:

Andrés Roberto Aragón Olvera

Jorge Galindo Contreras

Jaime Ernesto Jiménez Uribe

Director de Tesis: José Luis Davila Camargo



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

INTRODUCCION

1.-GENERALIDADES.

1.1.-) Definición - - - - - 1

1.2.-) Antecedentes - - - - - 1

2.- ANALISIS TERMODINAMICO.

2.1.-) Funcionamiento - - - - - 4

2.2.-) Ciclo sencillo - - - - - 6

2.3.-) Ciclo con refinamientos - - - - - 13

2.3.1.-) Ciclo con regeneración - - - - - 13

2.3.2.-) Ciclo con enfriamiento intermedio - - - - - 13

2.3.3.-) Ciclo con recalentamiento - - - - - 13

2.4.-) Potencia nominal patrón - - - - - 16

2.5.-) Potencia nominal instalada - - - - - 16

2.6.-) Potencia nominal normal - - - - - 17

3.- TIPOS DE TURBINAS DE GAS.

3.1.-) De acuerdo al recorrido de gas - - - - - 19

3.1.1.-) Tipo abierto - - - - - -19

3.1.2.-) Tipo cerrado - - - - - -20

3.2.-) De acuerdo al montaje - - - - - 21

3.2.1.-) Una sola flecha - - - - - 21

3.2.2.-) Flechas múltiples - - - - - 22

4.- ANALISIS DE LOS COMPONENTES DE OPERACION.

4.1.-) Elementos fundamentales - - - - - 26

4.1.1.-) El compresor - - - - - 26

4.1.2.-) Cámara de combustión - - - - - 27

4.1.3.-) La turbina - - - - -	33
4.1.4.-) El regenerador - - - - -	34
5.- ACCESORIOS AUXILIARES.	
5.1.-) Sistemas de combustible - - - - -	36
5.1.1.-) Sistema de gas combustible - - - - -	37
5.1.2.-) Sistemas de combustibles líquidos - - - - -	39
5.1.3.-) Sistema de combustible dual - - - - -	40
5.2.-) Controles de arranque - - - - -	41
5.3.-) Controles de aceleración y parada - - - - -	41
5.4.-) Gobernador - - - - -	42
5.5.-) Controles de protección - - - - -	45
5.5.1.-) Sobrevelocidad de la máquina - - - - -	46
5.5.2.-) Temperatura - - - - -	46
5.5.3.-) Baja presión de aceite de lubricación - - - - -	46
5.5.4.-) Alta temperatura del aceite de lubricación - - - - -	46
5.5.5.-) Indicador de flama - - - - -	46
5.5.6.-) Vibración - - - - -	46
5.5.7.-) Baja presión de combustible - - - - -	47
5.6.-) Instrumentación - - - - -	47
5.6.1.-) Velocidad - - - - -	47
5.6.2.-) Temperatura de entrada - - - - -	47
5.6.3.-) Registro de sucesos y contador de horas - - - - -	47
5.7.-) Sistemas de lubricación - - - - -	48
6.- COMBUSTIBLES	
6.1.-) Gas natural - - - - -	49
6.2.-) Gas licuado del petróleo - - - - -	51

6.3.-) Combustibles líquidos - - - - -	53
6.4.-) Combustibles sólidos - - - - -	54
7.- COMPONENTES DEL SISTEMA.	
7.1.-) Sistema de entrada de aire - - - - -	56
7.2.-) Filtros de aire de entrada - - - - -	57
7.3.-) Enfriamiento del aire de entrada - - - - -	59
7.4.-) Equipo anticongelante - - - - -	60
7.5.-) Lumberas atmosféricas - - - - -	60
8.- APLICACIONES EN LA INDUSTRIA.	
8.1.-) Aplicaciones generales - - - - -	62
8.1.1.-) Principios de aplicación - - - - -	64
8.1.2.-) Aplicaciones típicas - - - - -	65
8.1.3.-) Aplicaciones adicionales - - - - -	67
9.- REQUERIMIENTOS DE INSTALACION.	
9.1.-) Montaje de la máquina - - - - -	71
9.2.-) Cimentaciones - - - - -	72
9.3.-) Conductos de entrada y salida - - - - -	72
9.4.-) Sistemas de combustible - - - - -	76
9.5.-) Compresor de combustible - - - - -	77
9.6.-) Sistema exterior de lubricación - - - - -	78
9.7.-) Caja de engranes de salida de potencia - - - - -	79
9.8.-) Equipo para recuperar calor de escape - - - - -	80
9.9.-) Línea de desvío de salida y reguladores de tiro - - - - -	80
9.10.-) Sistema de agua - - - - -	81
9.11.-) Atenuación de sonido de entrada - - - - -	81
9.12.-) Aislamiento térmico - - - - -	83

9.13.-) Ventilación	84
9.14.-) Accesibilidad	84
9.15.-) Servicios eléctricos	85
10.- CONDICIONES Y CARACTERISTICAS DE OPERACION.	
10.1.-) Requerimientos de equipo	87
10.2.-) Costos y cargos de inversión	88
11.- MANTENIMIENTO FUNDAMENTAL.	
11.1.-) Introducción	90
11.2.-) Mantenimiento teórico	90
11.3.-) Requisitos de mantenimiento	92
11.4.-) Tipos de inspección	94
11.4.1.-) Mantenimiento preventivo	95
11.4.2.-) Inspección de la turbina en marcha	96
11.4.3.-) Inspección por desmonte	100
11.4.3.1.-) Inspección de combustión	100
11.4.3.2.-) Inspección de la zona caliente	104
11.4.3.3.-) Inspección mayor	108
11.5.-) Factores de operación que afectan el mantenimiento	111
11.5.1.-) Tipo de combustible	111
11.5.2.-) Frecuencia de arranque	112
11.5.3.-) Cargas de ciclos	113
11.5.4.-) Medio ambiente	113
11.5.5.-) Prácticas de mantenimiento	113
11.6.-) Intervalos de inspección	118

C O N C L U S I O N E S

B I B L I O G R A F I A

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

El siguiente trabajo desarrollado, pretende dar una información básica para las personas quienes hacen uso de las diferentes aplicaciones de la turbina de gas en la Industria.

Este trabajo se ha realizado pensando en que empresas grandes, medianas y pequeñas puedan hacer uso del mismo para obtener un sistema de información general sobre los aspectos de funcionamiento y mantenimiento de la turbina de gas. Es una orientación, la cual da un panorama sobre los conceptos de principio de operación y mantenimiento en general de los principales elementos y componentes de la turbina de gas.

Una de las razones más importantes que impulsaron al desarrollo del presente trabajo es la forma de producir energía, ya que actualmente el aprovechamiento o el uso de la energía es imprescindible para el desarrollo del País. Asimismo el auge que se ha tenido de la utilización de la turbina de gas a finales de la Segunda Guerra Mundial, ha tenido gran repercusión en el desarrollo de Países Industrializados. A mediados de 1962, cincuenta y un diferentes fabricantes de turbinas de gas, habían proporcionado datos de especificaciones al Gas Turbina Magazine, cubriendo 319 modelos. Dos años después a mediados de 1964, estos habían aumentado a ochenta y cuatro fabricantes que proporcionaron datos de especificaciones a la misma revista, para 538 modelos de turbi-

nas de gas.

La turbina de gas ha alcanzado una importancia tal como la de la turbina de vapor y la de los motores de combustión interna, ya que se han obtenido ventajas debido a su reducido espacio en que operan, siendo su potencia a desarrollar muy considerable.

En el País la utilización de la turbina de gas no ha tenido mucha aplicación y sobre todo no hay información abundante al tema, debido a que la existente está en otro idioma o es restringido el acceso a ella, siendo ésta limitada por los fabricantes de turbinas de gas.

Una turbina de gas, de tipo simple, consta de un compresor de aire, una cámara de combustión, una turbina y de varios dispositivos auxiliares que dependen de las características de velocidad y de la relación peso-potencia.

Los dispositivos auxiliares son los de la lubricación, regulación de la velocidad, alimentación de combustible y puesta en marcha. Aún cuando la turbina de gas en sí compite en costos inicial y de operación con la muy apreciada turbina de vapor y sus auxiliares, es posible mejorar las características de funcionamiento de las turbinas de gas agregando dispositivos para el aprovechamiento y recuperación del calor. Para lograr este fin, los capítulos siguientes tratarán de los distintos medios por los que el ciclo básico sencillo de la turbina puede inte -

(III)

grarse con otros dispositivos para obtener un ciclo eficiente de planta motriz.

Uno de los capítulos trata sobre problemas que comúnmente encuentran las personas encargadas del funcionamiento y mantenimiento, dando a conocer un programa a seguir, facilitando la recopilación de información que nos permita conocer cualquier error en la operación o en su caso analizar la conveniencia de aplicar medidas correctivas.

La disponibilidad de una gran variedad de máquinas con turbina de gas que se producen actualmente o en etapa avanzada de perfeccionamiento, unida a la creciente confianza en la turbina de gas debido a la amplia experiencia que se está acumulando, preveen un brillante futuro para la turbina de gas.

Asimismo se pretende que la presente recopilación de datos tanto de folletos, libros, como de manuales de fabricantes puedan ser de utilidad para los estudiantes de ingeniería mecánica a nivel licenciatura y de investigación.

1.- GENERALIDADES .

1.1.-) Definición.

Turbina de Gas: Es una máquina destinada a transformar la fuerza viva o la presión de un fluido en movimiento giratorio de una rueda provista de paletas de forma diversa, sobre las cuales el fluido ejerce su energía por presión, haciéndola girar al salir despedida en dirección tangente a la circunferencia. Es un equipo que produce trabajo útil por la expansión de gases calientes provenientes de la combustión de aire comprimido y combustible.

1.2.-) Antecedentes.

Los comienzos del desarrollo de las turbinas de gas se remontan hasta el año 1791, no puede hablarse de un trabajo metódico hasta principios del siglo actual. Ha sido en los últimos quince años cuando su progreso ha adquirido el mayor impulso.

En principio, las turbinas tienen la ventaja de poder manejar grandes cantidades de gas dentro de una construcción relativamente sencilla por eso son especialmente adecuadas cuando se trata de generar potencia con espacio reducido.

Como paralelo histórico, puede citarse que en las instalacio

nes de vapor, la máquina alternativa ha sido desplazada por la turbina para potencias mayores de 10,000 Kw. Análoga tendencia puede observarse en el progreso de los motores de combustión interna y de las turbinas de gas.

El mayor impulso para el enorme desarrollo actual de las turbinas de gas ha sido dado por la posibilidad de construir sin dificultad grupos propulsores de menor tamaño por unidad de potencia y mucho más ligeros que los motores de émbolo de gran potencia y perfeccionados.

En el caso de la propulsión de aviones tiene importancia fundamental el empuje que se obtiene por medio del chorro de gases a la salida de la turbina.

En general, puede obtenerse trabajo mecánico de una turbina siempre que exista un gas capaz de dilatarse desde una presión determinada hasta otra inferior. El gas para el funcionamiento de la turbina se obtiene generalmente quemando un combustible en aire previamente comprimido.

Prescindiremos primeramente de la forma de obtención de los gases que han de trabajar en la turbina y consideremos sólo la parte del ciclo de trabajo en la misma, en que pueda admitirse la hipótesis

simplificada de que las presiones del gas a la entrada y a la salida, esta última generalmente igual a la presión ambiente, permanecen constantes. En este caso, y según el primer principio de la termodinámica se obtiene el trabajo producido en la turbina durante la parte considerada del ciclo.

En el funcionamiento de las turbinas de gas se presentan varias limitaciones de índole práctico, las cuales determinan en gran parte la actuación de esta clase de máquinas motrices. Entre estas limitaciones merecen mencionarse la temperatura y velocidad de los álabes, rendimiento del compresor, rendimiento de la turbina y la transmisión de calor (en ciclos con regeneración).

Durante el funcionamiento de una turbina de gas de tipo simple se envía aire comprimido a la cámara de combustión en donde el combustible entra con un caudal constante y se mantiene una llama continua. La ignición inicial se obtiene generalmente por medio de una chispa. El aire calentado en la cámara de combustión se expansiona a través de toberas y adquiere una elevada velocidad. Parte de la energía cinética de la corriente de aire es cedida a los álabes de la turbina. Una fracción de esta energía se emplea para accionar el compresor y el resto para producir trabajo.

Los gases que atraviesan la turbina trabajan en circuito ce

rrado y sucesivamente se comprimen, calientan, expansionan y enfrían.

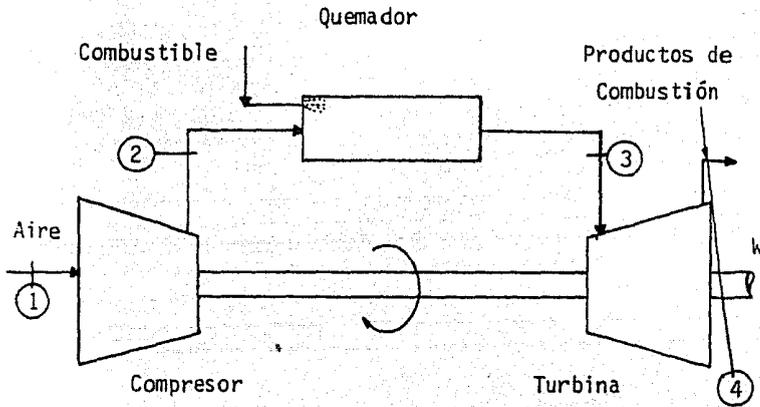
Las instalaciones cerradas permiten quemar cualquier tipo de combustible en la cámara de combustión, necesitándose, sin embargo, un intercambiador de calor. Este tipo de instalaciones están limitadas a que son estacionarias.

2.- ANALISIS TERMODINAMICO.

2.1.-) Funcionamiento.

La turbina de gas de ciclo sencillo es una de las máquinas menos complicadas descubierta hasta ahora para la producción de fuerza neumática y axial. La máquina opera por medio de un ciclo continuo que normalmente consiste en una serie de sucesos que son: Compresión de aire tomado de la atmósfera, aumento de la temperatura del aire por la combustión a presión constante de combustible, expansión de los gases calientes a través de una turbina y, finalmente, descarga de los gases a la atmósfera, siendo el todo un proceso de flujo continuo. Este proceso se muestra esquemáticamente en la fig. 1. Este ciclo se llama ciclo sencillo en contraste con los que usan interenfriamiento, recalentamiento, recuperación del calor de escape y otras modificaciones.

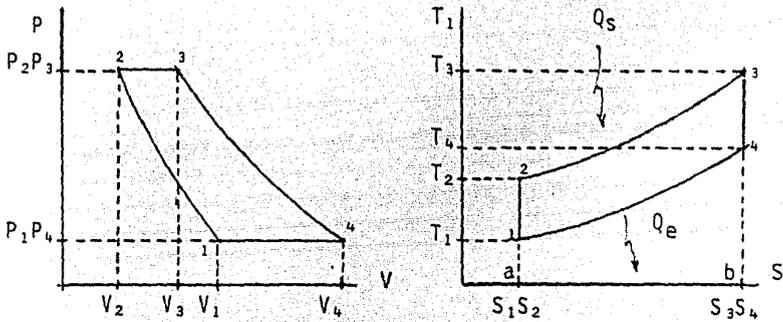
En la fig. 1 se muestra esquemáticamente la distribución y los elementos fundamentales que componen un sistema de turbina de gas de ciclo sencillo.



F I G U R A No. 1

En la fig. 2 se muestra una gráfica de temperatura-entropía de un ciclo sencillo.

El ciclo está formado por compresión isoentrópica (1 a 2), adición de calor a presión constante (2 a 3), expansión isoentrópica (3 a 4) y cede calor a presión constante (4 a 1).



F I G U R A No. 2

Diagramas presión-volumen y temperatura-entropía.

2.2.-) Ciclo Sencillo.

Suponiendo que el calor específico (c_p) del aire permanece constante, el calor suministrado es:

$$Q_s = {}_2Q_3 = mc_p (T_3 - T_2)$$

y el calor cedido vale:

$$Q_c = {}_4Q_1 = mc_p (T_1 - T_4)$$

y entonces la eficiencia vale:

$$n = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \quad \text{----- ec. 1}$$

definiendo $r_p = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$ como la relación de presiones y, como el proceso entre 1 y 2 es adiabático

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = (r_p)^{\frac{(k-1)}{k}}$$

y como de 3 a 4, también es adiabático

$$r_p = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = (r_p)^{\frac{(k-1)}{k}}$$

de donde obtenemos que $\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$, y reordenando

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad \text{ó} \quad \frac{T_4}{T_1} - 1 = \frac{T_3}{T_2} - 1 ; \quad \frac{T_4 - T_1}{T_1} = \frac{T_3 - T_2}{T_2}$$

$$\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

y entonces podemos escribir

$$n = 1 - \left(\frac{T_1}{T_2} \right) = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = \frac{T_3 - T_4}{T_3}$$

finalmente

$$n = \frac{T_3 - T_4}{T_3} \quad \text{----- ec. 2}$$

Podemos dar otras formas a la eficiencia utilizando la relación de compresión y la relación de presiones

$$\eta = \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = r^{k-1}$$

con lo cual la ecuación 1 se puede escribir:

$$n = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad \text{----- ec. 3}$$

o con la relación de presiones: donde $\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$

$$n = 1 - \frac{1}{r_p \frac{k-1}{k}}$$

donde $\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$

k = relación de capacidad calorífica a presión constante = 1.4 para el aire.

c_p = calor específico = $24 \frac{\text{k cal}}{\text{kgm}^\circ\text{K}}$ para el aire.

En la gráfica P - V se muestra que el trabajo resultante del ciclo ideal, es la suma algebraica de los trabajos del compresor y la turbina. Para el compresor los valores obtenidos son negativos y positivos para la turbina.

Aquí interviene también el efecto secundario de la variabilidad de los calores específicos que pueden tenerse en cuenta modificando adecuadamente el coeficiente k.

La potencia alcanzable, depende además como se indica, de la caída de presión. Si se compara el trabajo necesario para la compresión adiabática en un compresor sin pérdidas con el que se puede obtener en una turbina sin pérdidas resulta que éste último ya desde una temperatura del gas de unos 600°C , es más del doble del requerido por el compresor.

En la fig. No. 3 se han representado las caídas de entalpia en el compresor y en la turbina para diferentes relaciones de presión y para temperaturas del gas de 650°C , teniendo en cuenta las pérdidas. Observando la gráfica se ve inmediatamente que ya desde temperaturas del gas relativamente reducidas, se obtienen en la turbina potencias notablemente mayores.

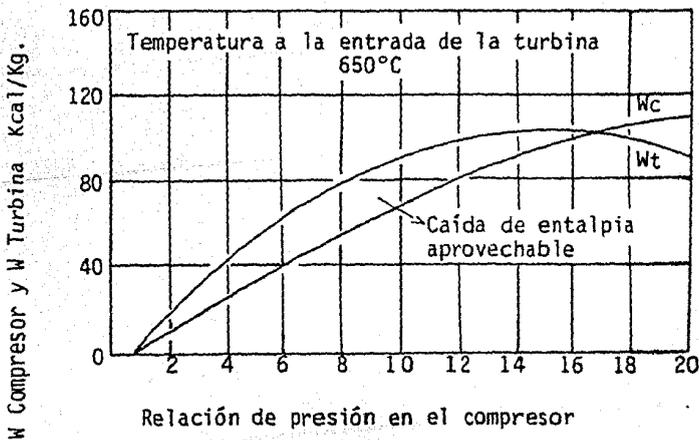


FIGURA No. 3

Agregando un regenerador para recuperar el calor procedente del escape de la turbina se mejora el rendimiento. Fig. 4

Si se añade regeneración ideal a la turbina la eficiencia es:

$$e_r = 1 - \left(\frac{T_1}{T_3} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \text{----- ec. 5}$$

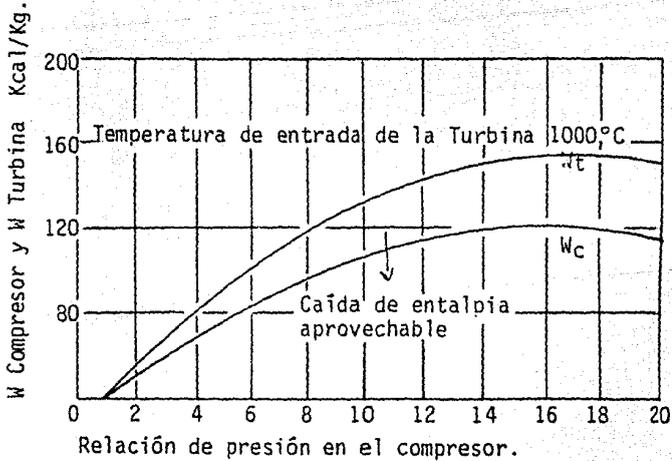


FIGURA No. 4

Las adiciones de interenfriamiento en el compresor y de recalentamiento intermedio del fluido de trabajo durante la expansión, aumenta la producción de una determinada turbina de gas y con la adición de un regenerador se consigue una mejora complementaria del rendimiento.

Como puede verse, de la ecuación (5) la eficiencia se hace dependiente de la temperatura al agregarse regeneración ideal y el efecto de la relación de presión se invierte comparado con la turbina no regenerativa la eficiencia de la ecuación (4 y 5) se muestran gráficamente en la fig. 5 para una temperatura de 26°C.

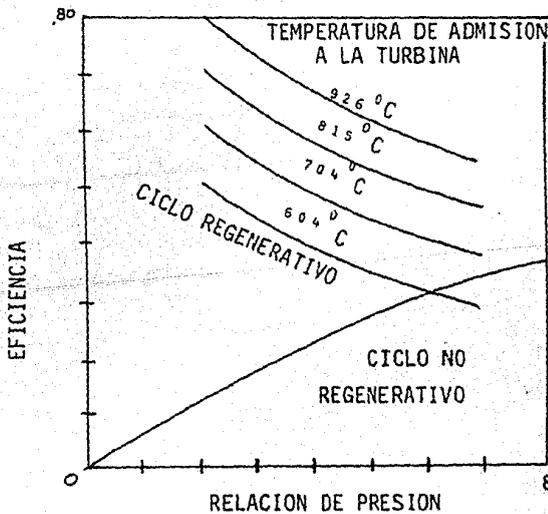


FIGURA No. 5

La figura No. 5 muestra que sin regeneración, la turbina está limitada a eficiencia menor de 50%, aun con altas relaciones de presión y sin pérdidas. Es evidente que la regeneración es más efectiva a bajas relaciones de presión.

En los ciclos reales de turbinas, numerosas pérdidas reducen la eficiencia por debajo de los valores ideales. Entre las más importantes se cuentan las pérdidas en el compresor, pérdidas mecánicas, ineficiencia de combustible, regeneración no ideal, pérdidas de presión.

En las centrales térmicas de vapor un precalentador de aire extrae energía de los gases de la chimenea para calentar el aire empleado en la combustión. Los regeneradores o intercambiadores de calor empleados en las turbinas de gas son del mismo tipo, esto es, tubular o de placas rotatorias. En los de tipo tubular, que es el más extendido, los gases de escape pasan por el interior de los tubos y el aire a calentar se obliga a pasar laminando la superficie externa de los mismos. El tipo rotatorio puede construirse en forma más compacta y conseguirse fácilmente, una verdadera transmisión de calor a contracorriente. Aunque este último tipo ocupa menos volumen, su complicada construcción limita sus aplicaciones.

El empleo de regeneradores en las turbinas de gas presenta dos problemas: Necesidad de una gran superficie de tubos y aumento de resistencia al paso de los gases.

2.3.-) Ciclo con refinamientos.

Se pueden sobrepasar los límites de eficiencia, añadiendo arreglos a la planta de turbina de gas, los principales refinamientos con los que se logra esto son: La regeneración, enfriamiento intermedio, y recalentamiento.

2.3.1.-) Por regeneración se entiende la transmisión de energía calorífica de los gases de escape al aire comprimido que circula en el compresor y en la cámara de combustión. Se necesita un calentador que se llama regenerador. El aprovechamiento o resultante de los gases del escape representa una reducción en el desperdicio del calor.

2.3.2.-) El enfriamiento intermedio consiste en quitar calor del aire comprimido entre las etapas de compresión. Esto reduce el consumo interno de potencia de la turbina por la planta. Generalmente se emplean enfriadores de -- agua. El objetivo ideal es lograr la compresión isotérmica, pero en realidad lo que se hace es escalonar las presiones lo que consiste en compresiones adiabáticas con la refrigeración correspondiente. El compresor deberá ser ecesariamente compuesto, es decir, deberá tener secciones de baja y secciones de alta presión, encerradas por separado.

2.3.3.-) El recalentamiento es el aumento de temperatura de los gases (fig. No. 6) dilatados parcialmente, quemando más combustible en ellos. Para obtener esto se necesita una turbina compuesta con regeneración asociada, porque

se aumenta la temperatura del escape de la turbina. Este sistema es especialmente bueno para mejorar la eficiencia de las plantas que tienen una relación de presiones altas, pero una temperatura máxima moderada.

Estas mejoras al ciclo sencillo pueden aplicarse por separado o conjuntamente.

El ciclo básico sencillo para la relación de presiones $\frac{P_2}{P_1}$, y temperaturas T_1 y T_3 sería 1 - 2' - 3 - 4' (Fig. N° 6). El área comprendida sería el rendimiento neto de trabajo, mientras que la entrada de calor estaría representada por la combustión a presión constante, 2' - 3.

Con los refinamientos térmicos incorporados, el área de trabajo 1 - 2 - 3 - 4 es mayor, mientras que el efecto de la combustión, 2x-3+ 3a - 3b, puede ser menor. El resultado es más potencia por unidad de gasto, a mayor eficiencia.

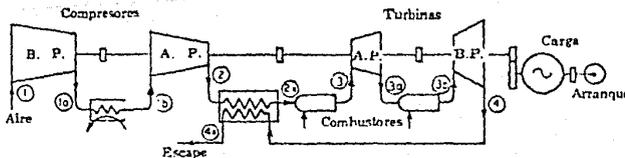


FIGURA No. 6

mente el enfriamiento intermedio mediante cambiadores de calor de superficie.

Recalentamiento.- Si se produce la expansión de trabajo en dos o más etapas de la turbina, puede dividirse la turbina en secciones de bajas y altas presiones, de manera que el gas pueda recalentarse en el intermedio hasta el límite máximo en la cámara de combustión. Debido a las bajas relaciones combustible-aire, hay suficiente oxígeno en los productos para mantener la combustión del recalentador. La porción del ciclo que representa el proceso de este recalentamiento es 3a-3b.

2.4.-) Potencia nominal patrón.- La potencia de una turbina depende de la masa de flujo (kilogramos de aire que fluyen en la unidad de tiempo), y de la carga adiabática. La carga o altura adiabática es una medida de la energía del gas o aire disponible para la expansión a través de la turbina. Esta expansión es análoga a la carga en una rueda de agua y se mide en las mismas unidades, es decir, metros o kilográmetros por kilogramo.

2.5.-) Potencia nominal instalada.-La potencia producida por la máquina con la altitud varía directamente en relación de las presiones atmosféricas absolutas. Así, si una unidad de fuerza de turbina de gas produce 100 Cv al nivel del mar (760 mm de Hg abs.), un día de 26°C, producirá aproximadamente 83Cv a 1525m. de altitud (632mm de Hg abs.)

El funcionamiento de las máquinas de turbina, como el flujo de ex -

tracción de aire de la compresora, la potencia axial y el consumo de combustible, varían directamente con los cambios de presión absoluta ambiente. También es notable que, puesto que la temperatura atmosférica casi siempre disminuye al aumentar la altitud, la potencia utilizable no bajará tan aprisa como la presión barométrica.

2.6.-) Potencia nominal normal.- Los fabricantes de turbinas para aviones normalmente clasifican sus máquinas de turbinas de gas a presión de nivel del mar (760 mm de Hg abs.) a una temperatura de entrada de 15°C, las clasificaciones patrones industriales son a una altitud de 305m (733 mm Hg abs) y una temperatura de entrada de aire de 26°C. Estas clasificaciones están basadas en que no hay pérdidas en la entrada de la compresora ni en la descarga de la turbina, medidas en las bridas de entrada y descarga de la máquina.

La potencia nominal instalada, es la potencia estipulada de la turbina de gas cuando opera en condiciones específicas de temperatura de entrada a la compresora y presión de escape de la turbina. Se mide en el eje de potencia útil de la turbina de gas o en las terminales del generador o se refiere a esas condiciones.

Una curva típica de corrección que puede utilizarse para todas las turbinas de gas a varias altitudes y cero de pérdidas en la entrada de la compresora se muestra como línea gruesa en la fig. 7. Esta curva especial

del factor de corrección está basada en una altitud normal de 305m. Además la gráfica muestra en líneas a rayas, el efecto de las caídas de presión en la entrada de la compresora o en el ducto para una determinada máquina a plena carga.

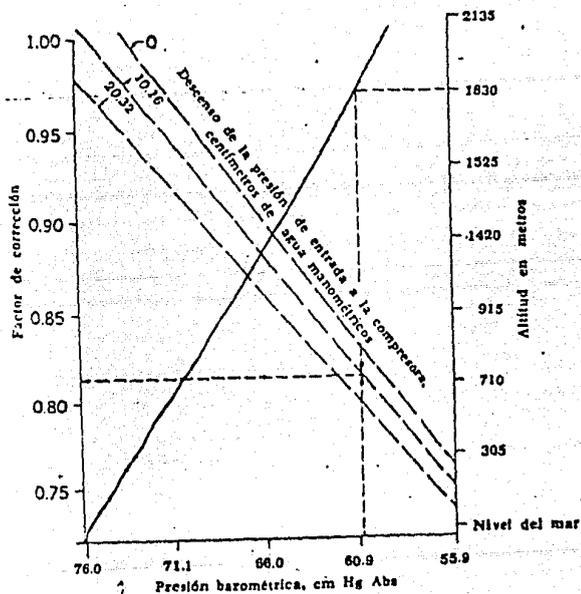
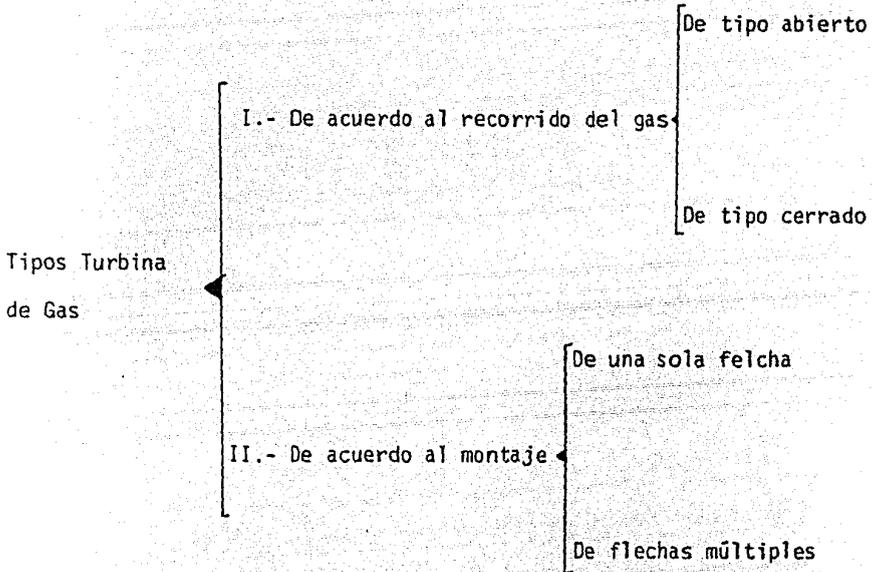


FIGURA No. 7

Curva típica del factor de corrección para determinar la potencia útil de la turbina de gas a varias presiones barométricas (línea continua) y efecto de varios descensos de la presión de entrada a la compresora para una máquina determinada (línea de trazos)

3.- TIPOS DE TURBINAS DE GAS.



3.1.-) De acuerdo al recorrido de gas.

3.1.1.-) De tipo abierto: Todo el fluido de trabajo, (aire y productos de la combustión), sólo pasa una vez a través de la instalación. La mayoría de las turbinas de gas actualmente en servicio son del tipo de ciclo abierto sencillo en las cuales no hay recirculación del fluido de trabajo, dentro de la planta de fuerza ya que la entrada y la salida están abiertas a la atmósfera.

3.1.2.-) De tipo cerrado: El fluido de trabajo vuelve a seguir el ciclo continuamente. El calor procedente de una fuente externa, es transmitido a través de las paredes de un calentador cerrado. El calor se transfiere de una fuente de calor externa al fluido de trabajo del ciclo por la superficie de transferencia de calor. Esto ofrece ventajas de un fluido de trabajo limpio y el uso de una gran variedad de combustibles. Fig. No. 8.

Ventajas:

- a.-) Fluido de trabajo limpio.
- b.-) Regulación de la presión y control de la composición del fluido de trabajo, presión absoluta y densidad elevada del fluido del trabajo.
- c.-) Rendimiento constante, sobre un amplio intervalo de la carga de servicio.

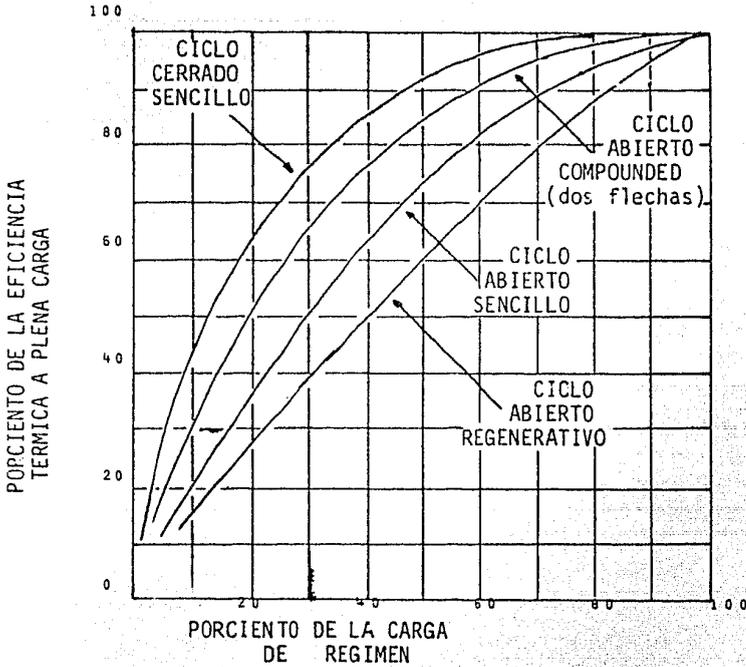


FIGURA No. 8

Eficiencias con cargas parciales de las plantas de fuerza con turbinas de gas.

3.2.-) De acuerdo al montaje.

3.2.1.-) De una sola flecha: Son las más sencillas y en ellas trabajan todos los elementos rotatorios como un conjunto, tienen limitaciones de velocidad de operación constante. Este es el tipo más

conveniente para el funcionamiento a velocidad y carga constante. Si todas las etapas de la turbina están en el mismo eje de la compresora la turbina de gas se llama de "un solo eje" o turbina de eje fijo.

3.2.2.-) De flechas múltiples: Fig. No. 9, puede tener una turbina de producción independiente, instalada en serie o paralelo con una o varias de las turbinas que mueven los compresores. Estas turbinas pueden trabajar a cualquier velocidad deseada.

La principal ventaja con la disposición con varias flechas es el amplio intervalo posible de carga y velocidad.

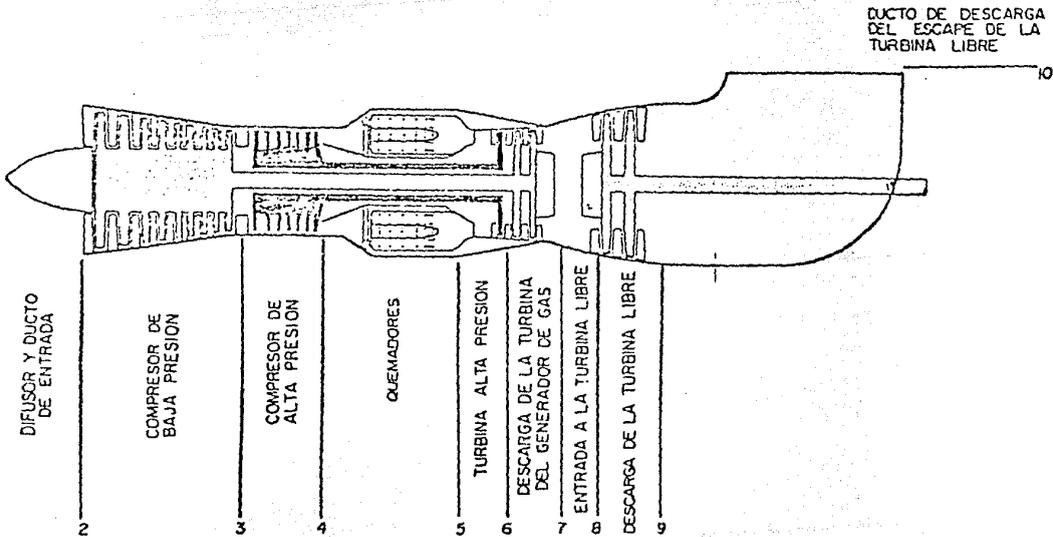
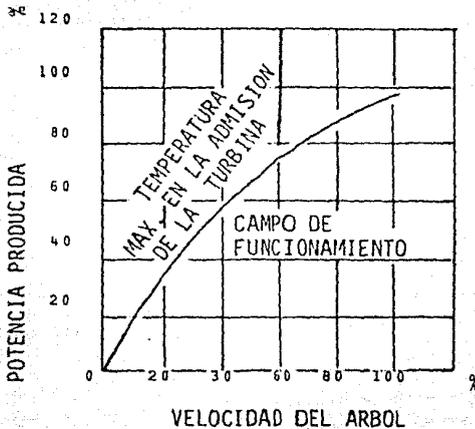


FIGURA No. 9

Funcionamiento de una turbina de gas de dos árboles a varias velocidades y cargas.



F I G U R A No. 10

La turbina de fuerza puede dividirse en dos secciones. La porción de este tipo de máquinas que tiene sólo las etapas de la turbina requeridas para mover la compresora se llama turbina productora de gas o turbina generadora de gas, las etapas de la turbina que suministran la fuerza para la turbina movida se colocan en un eje separado. Este tipo de turbina se llama máquina de dos ejes o de eje dividido, o de turbina libre y se ilustra esquemáticamente en la fig. 11.

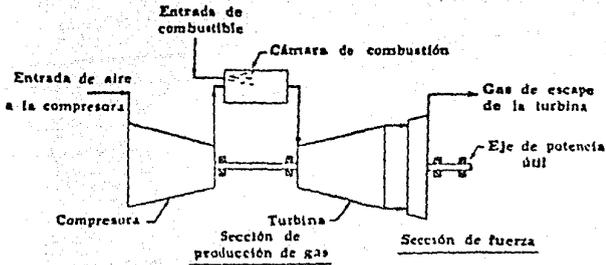


FIGURA No. 11

Las curvas características de funcionamiento para una máquina de dos ejes de ciclo abierto sencillo, incluyendo la potencia máxima producida por la máquina, "Torque" y variaciones en el consumo específico de combustible, para varias velocidades del eje de fuerza útil se muestran en la fig. No. 12.

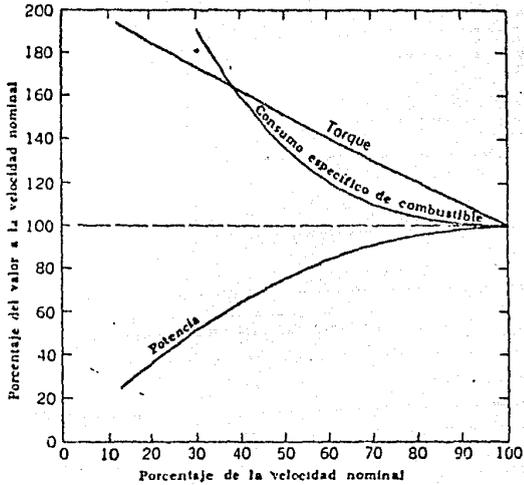


FIGURA No. 12

Curva de características de funcionamiento para una máquina de dos ejes de ciclo abierto sencillo.

4.- ANALISIS DE LOS COMPONENTES DE OPERACION DE LA TURBINA DE GAS.

4.1.-) Elementos fundamentales.

4.1.1.-) El compresor: Es el primer elemento mecánico básico en el ciclo de la turbina de gas. En la actualidad, hay dos tipos de compresores que se usan en las turbinas de gas, son los compresores centrífugos y los de flujo axial.

Los compresores pueden ser de cualquier tipo de alto rendimiento, la energía absorbida por el compresor es de dos a cuatro veces la energía neta producida por la instalación. Se emplean compresores de circulación axial en todas las grandes instalaciones de turbinas de gas a causa de su gran rendimiento y capacidad.

Los compresores centrífugos se usan principalmente en instalaciones de baja relación de presión y de poco flujo, relativamente son más estables que los axiales, pero de menor rendimiento. Hablando en forma general, las turbinas de gas grandes (1000 Cv y mayores) utilizan compresores de varios pasos de flujo axial por su capacidad, para manejar grandes volúmenes de aire con alta eficiencia. Además, los compresores de flujo axial se presentan fácilmente para máquinas de relación de compresión alta.

Las máquinas de turbina de gas pequeñas normalmente utilizan uno o dos compresores centrífugos, aunque algunas utilizan combinaciones de compresores axiales y centrífugos. Los compresores centrífugos tienden a ser más compactos y menos costosos para fabricarse por los métodos establecidos actualmente, que los compresores axiales para las turbinas de gas pequeñas. El compresor centrífugo es menos susceptible a dañarse con partículas extrañas de tamaño grande que pasen por la máquina. Los compresores centrífugos de un solo paso se usan con éxito en muchas turbinas de gas chicas. Los diseños de los impulsores se han perfeccionado hasta el punto de obtener buenas eficiencias con relación de compresión en una sola etapa 6:1.

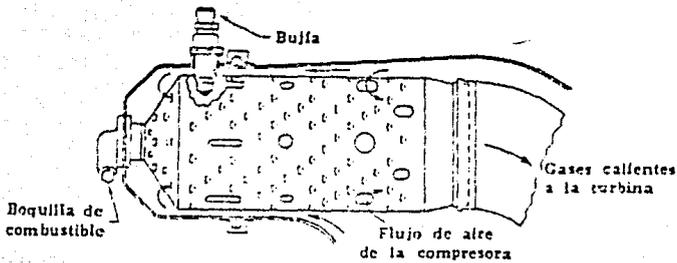
Las turbinas de gas de ciclo sencillo de alta capacidad, sin embargo, requieren relaciones de presiones de compresión mayores que las que se pueden obtener con un impulsor de una sola etapa de compresión. En máquinas de este tipo, se usan dos etapas centrífugas o una etapa centrífuga con uno o más pasos axiales.

4.1.2.-) Cámara de combustión: la cámara de combustión es el segundo elemento básico en el ciclo de la turbina de gas. Debe operar eficientemente en un amplio margen de condiciones ambientales con velocidades de flujo de combustible muy variables, deberá llevar el gas a una temperatura uniforme, controlada con un mínimo de impurezas y una pérdida mínima de presión. En la turbina de gas de tipo abierto

el exceso de aire debe ser regulado para evitar que se enfríe la llama antes de que haya tenido lugar la combustión completa.

Para una combustión completa, se requiere una mezcla estequiométrica de aproximadamente 15 partes de aire (en peso) por una parte de combustible en la zona primaria donde ocurre. Sin embargo, la máquina de turbina de gas requiere aproximadamente 70 a 80 partes de aire (en peso) por una parte de combustible con objeto de enfriar los gases de combustión de aproximadamente 915°C a las temperaturas de entrada permitidas por la turbina.

Puesto que una mezcla diluida es difícil de encender y mantenerla en combustión continuamente, es por eso por lo que se debe obtener una mezcla estequiométrica en lo que se llama la zona primaria de la cámara de combustión, la zona de la cámara en la que se admite aire para enfriar los gases calientes de combustión se conoce como la zona secundaria de la cámara de combustión. La fig. 13 muestra el proceso de combinación de una cámara de combustión de flujo inverso de tipo de lata.



F I G U R A No. 13

Cámara de combustión tipo de lata de flujo inverso.

La eficiencia de combustión se define como la relación de calor real desarrollado durante la combustión, de una cantidad determinada de combustible, que fluye a través de la cámara de combustión. Las eficiencias de combustión del orden de 96 al 99% son comunes en las máquinas de turbina de gas. La baja eficiencia de combustión puede, en parte, atribuirse a una cantidad muy grande de aire primario o secundario que se admite demasiado pronto que puede dar por resultado una combustión incompleta, haciendo que pase a la turbina combustible sin quemar. Cualquier pérdida de eficiencia en la combustión representa una pérdida directa en la eficiencia térmica total de la máquina.

Se usan dos métodos básicos para la inyección de combustible. En un sistema el combustible se inyecta a la cámara de combustión por medio de un atomizador o conjunto de boquillas como niebla fina y se quema en esa forma. En el otro, conocido como el tipo de vaporizador, el combustible se alimenta dentro de un tubo que esta rodeado por gases de combustión. El tubo caliente y algo de aire caliente que fluye dentro de él, evaporan el combustible y la mezcla rica de combustible y aire se descarga en la zona de combustión en donde se mezcla con aire adicional y se quema. El método más común de inyección de combustible líquido es el del conjunto de boquillas o atomizador.

El mismo sistema básico de combustión se utiliza cuando se quemaran combustibles gaseosos. La cámara de combustión que opera en forma satisfactoria con combustibles líquidos generalmente opera sin dificultad con combustibles gaseosos. El sistema de inyección de combustible es la única sección básica que se tiene para cambiar la conversión.

Una boquilla para combustible gaseoso es bastante sencilla comparada con su equivalente para combustible líquido. La punta de la boquilla comprende varios orificios cuyo tamaño y separación producen la disposición necesaria del gas en la cámara de combustión. El requerimiento fundamental es comprimir el gas a algun valor nominal superior a la presión de descarga del compresor de la máquina con objeto de admi -

tir el gas a la cámara.

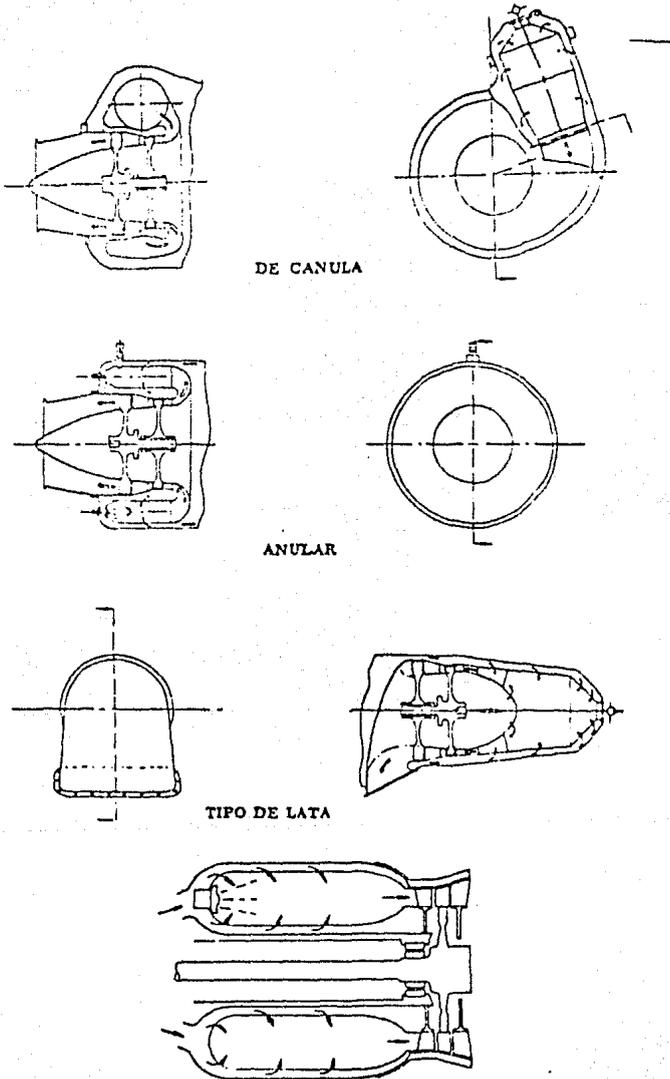
Las turbinas de gas pueden utilizar cámaras sencillas, dobles o múltiples para desempeñar la función de combustión. La selección de esto la imponen en gran parte los requerimientos de espacio de la aplicación y por otra parte, es cuestión únicamente de la preferencia del diseñador. La figura 14, ilustra cuatro tipos de cámara de combustión básicos.

Las turbinas para aviones están normalmente equipadas con las cámaras de tipo multilatas más pequeñas que se pueden colocar alrededor de la periferia de la máquina.

Los problemas más importantes para el diseño de la cámara de combustión, además de la combustión limpia y de la mezcla apropiada de los gases, son la estabilización de la flama; la eliminación de las pulsaciones y el ruido de la pérdida de presión y el mantenimiento regulado con precisión de una temperatura de salida uniforme.

En el combustor se inyecta continuamente combustible y se mezcla en el aire proveniente del compresor. Una vez iniciada la combustión, se desenergiza la bujía. Cerca del 25% del aire que sale del compresor se utiliza para el proceso de combustión el resto se emplea para enfriar las partes metálicas y diluir la temperatura de flama o una tem

peratura de entrada a la turbina aceptable.



FLUJO DE PASO DIRECTO
FIGURA No. 14

Cuatro tipos básicos de cámaras de combustión.

4.1.3.-) La turbina: el tercer elemento básico en la turbina de gas es la extensión de expansión o elemento productor de fuerza de la máquina. Los gases calientes, bajo presión de la cámara de combustión, proporcionan la energía para la turbina, la temperatura de los gases que entran a la turbina varían de aproximadamente 650° a 915°C en las operaciones continuas a plena carga. Esta gama de temperatura será más alta a medida que pase el tiempo, debido a mejoras en los materiales y progreso de las técnicas de diseño. La primera parte de cada paso de la turbina es un conjunto de boquillas. Las boquillas restringen, aceleran (un proceso de expansión) y dirigen el flujo hacia la rueda de la turbina. Después de pasar a través de la boquilla y de entrar al rotor el gas caliente continúa su proceso de expansión a través de los álabes de la rueda de la turbina e imparte fuerza giratoria al eje de la turbina. Aproximadamente dos terceras partes de la fuerza total desarrollada por la turbina se utilizan para mover el compresor y los accesorios de la máquina. La potencia (caballos de fuerza) restantes al eje de la salida de fuerza útil de la máquina.

La turbina de expansión puede ser del tipo de flujo axial o radial. El tipo más ampliamente usado en turbinas de gas pequeñas de baja relación de presión es una turbina de influjo radial de un solo paso en la que los gases fluyen del perímetro de la rueda radialmente a través de la misma y escapan del "ojo" o centro de ella.

Una rueda radial de un solo paso generalmente se adapta mejor a una máquina con relación de presiones de aproximadamente 4.1. Arriba de esta relación se utiliza o una combinación de radial y axial o un conjunto de turbina axial de dos o tres etapas.

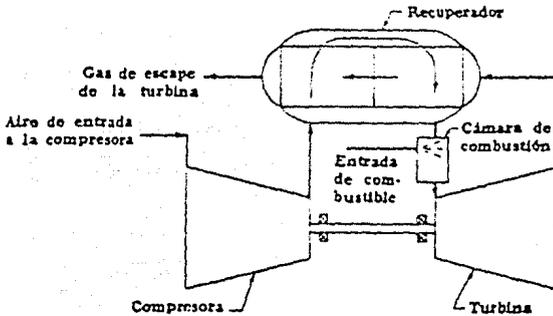
4.1.4.-) El regenerador:

Dispositivo para recuperación de Calor de Escape:

Para aumentar la eficiencia total de máquina, se puede agregar un permutador de calor entre el escape y la descarga del compresor para recobrar algo del calor de escape y reducir así la cantidad de combustible que se requiera para producir una potencia de salida útil determinada. El permutador de calor puede ser de uno o de dos tipos -recuperador o regenerador. En un recuperador, el gas caliente de escape de la turbina fluye por un lado de la superficie que transfiere el calor y el aire de la descarga del compresor que es mas frío y fluye por el otro lado. El regenerador calienta alternadamente una sustancia intermedia con capas de tela de alambre, las primeras de metal finamente corrugado o cerámica porosa en el escape de la turbina, la que a su vez imparte calor al aire de descarga del compresor.

La fig. 15 ilustra esquemáticamente un ciclo de recuperación de calor. En este ciclo se extrae calor de los gases de escape de la turbina y se agrega a la corriente de aire comprimido antes de que entre a la cámara de combustión.

El calor recuperado en el permutador permite reducir la carga de combustible en aproximadamente 25 a 50%, dependiendo de la eficiencia del permutador de calor. El peso y tamaño de los permutadores de calor depende directamente de la eficiencia del permutador de calor.



3. Diagrama esquemático que muestra el ciclo de recuperación de calor de escape de la turbina de gas

F I G U R A No. 15

Los grandes incrementos de peso de los permutadores de calor, para la alta eficiencia de cambio de calor, hacen más atractiva la eficiencia más modesta de otros permutadores de calor para muchas aplicaciones. Para determinada máquina por ejemplo, una reducción en la eficiencia de 85 al 60% aumentaría el consumo específico de combustible aproximadamente 15%, pero el peso del permutador de calor reducirá en el 60%. Las turbinas regenerativas no se usan extensamente en la actualidad excepto en aplicaciones estacionarias grandes de servicio continuo.

5.- ACCESORIOS AUXILIARES.

Los accesorios para turbinas de gas son aquellas partes de la máquina que no intervienen directamente en la producción y manejo de la energía útil de la máquina como: sistemas de combustibles, controles de arranque, controles de aceleración y parada, gobernador, controles de protección, instrumentación y sistemas de lubricación. Ejecutan servicios auxiliares esenciales para la producción, control y manejo de energía útil producida por la máquina. Hasta el ciclo más sencillo de una máquina de turbina de gas requiere el uso de muchos accesorios pequeños y fabricados separadamente. La mayoría de ellos poseen un alto grado de confianza demostrado por un tiempo respetable de desarrollo, pruebas y servicios del campo, sin embargo, tienden a ser mecanismos pequeños y complejos. Esto, junto con el número de accesorios necesarios para cada máquina, requiere que se dé toda la atención a la selección e integración de accesorios para dotar una máquina con la confianza máxima.

5.1.-) Sistemas de combustible.

El sistema de combustible consiste de tubería y conexiones múltiples y en algunos casos, una o más bombas según se requiera para alimentar el combustible a la cámara de combustión a presión suficiente para efectuar una inyección satisfactoria. Los elementos del sistema de control como válvulas de cierre y reguladores, se encontrarán en el sistema de combustión.

5.1.1.-) Sistema de gas combustible:

La presión requerida para inyectar un combustible gaseoso es esencialmente la presión de descarga de la compresora más las caídas de presión en el sistema de control y las conexiones. Un inyector de combustible gaseoso generalmente consiste de un tubo con agujeros; la caída de presión a través de este inyector es muy pequeña. La relación de presiones de la compresora de la máquina determina la presión requerida del combustible, como se ve en la figura 16. La presión de alimentación del gas a la máquina mostrada en la curva superior de la fig. 16 es la que se requerirá en la descarga del compresor de combustible o a la entrada de una válvula reguladora de presión de la máquina en el caso de que la presión de suministro sea suficientemente alta.

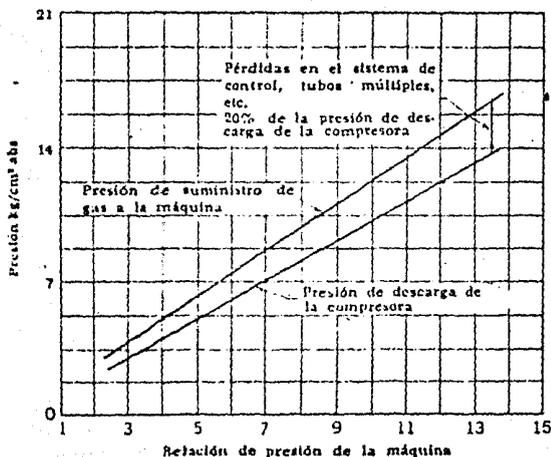


FIGURA No. 16

Varios factores afectan los requerimientos de fuerza de la compresora para un combustible gaseoso. Algunos de ellos son la eficiencia de la compresora, la relación de compresión de la misma, la presión de la alimentación principal de gas y el valor calorífico del combustible.

Los efectos de la eficiencia de la compresora, relación de compresión y presión de la línea principal de alimentación de gas sobre los requerimientos de fuerza de la bomba se muestran en la fig. 17, que se basa en un poder calorífico de 8.899 Kcal/m³.

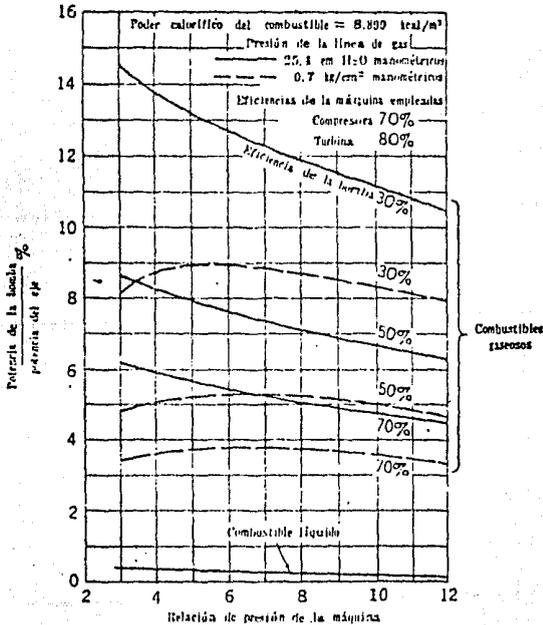
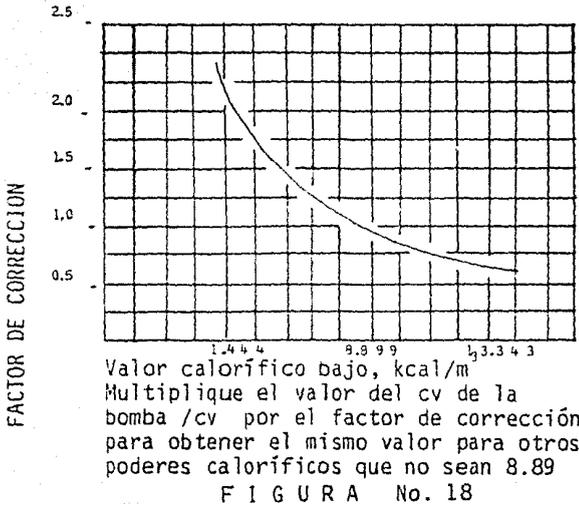


FIGURA No. 17

En la fig. 18, se muestra un factor de corrección para combustibles con otros valores caloríficos.



5.1.2.-) Sistemas de Combustibles Líquidos:

El principal requerimiento para un sistema de combustibles líquidos es que tenga presión suficiente para permitir una caída de presión a través del inyector que sea suficiente para atomizar el combustible. Obviamente, la presión de descarga debe ser mayor que la de la cámara de combustión o no se puede efectuar la inyección. El inyector es generalmente una boquilla atomizadora de rocío continuo.

El requerimiento de presión para atmosferizar varía dependiendo de la viscosidad y la tensión superficial del combustible. Aún cuando algunos sistemas de combustible líquido requieren de 35 a 70 kg/

cm², los requerimientos de fuerza y de la bomba son bajos, como se ve en la curva inferior de la fig. 17. La bomba de combustible con frecuencia es una parte integral del sistema de control.

5.1.3.-) Sistema de combustible dual:

El combustible principal para una máquina de combustible dual es, por lo general, gas natural o algún gas de proceso o excedente, porque estos son los combustibles más baratos. El combustible secundario es generalmente un líquido que se almacena en tanques. El combustible y el sistema de combustión se puede arreglar de manera que sea posible pasar del combustible principal al secundario con carga.

Este sistema de poder cambiar con carga puede ser complejo, consistiendo esencialmente de dos sistemas completos de combustible, teniendo cada uno sus propios dispositivos de control continuamente en operación y una boquilla de combustible combinado que se puede usar para cualquiera de los dos.

Cuando el cambio va a ser automático, debe incluirse en la instalación, un interruptor para percibir la disminución de presión de alimentación del combustible principal y un volumen almacenado de combustible principal en la tubería o en otro dispositivo suficiente para mantener la presión hasta que el combustible secundario sea suministrado a la cámara de combustión.

5.2.-) Controles de arranque:

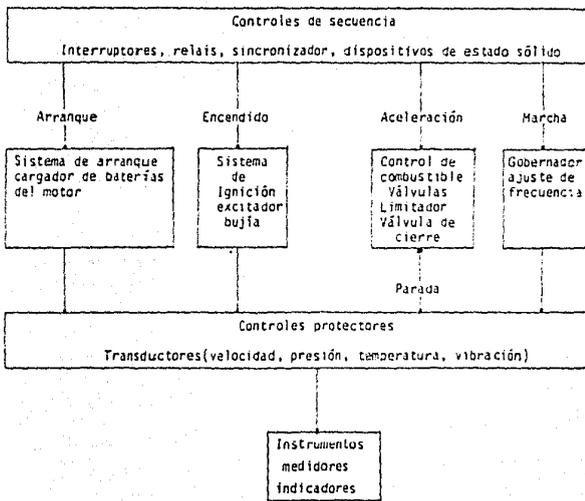
La secuencia de acontecimientos requeridos para arrancar, correr, cargar y parar una turbina de gas se pueden controlar manualmente, pero por lo general, se manejan automáticamente. Una vez que se ha iniciado la rotación y se ha alcanzado velocidad suficiente, se activa el circuito de encendido y se admite combustible a la cámara de combustión para iniciar el proceso. El arrancador sigue ayudando a la máquina, generalmente hasta que alcanza del 30 a 40% de la velocidad total, después de lo cual la máquina puede continuar el arranque con su propia fuerza.

Como regla general, la ignición se continúa hasta que cesa la ayuda del arrancador cuando la máquina es autosuficiente. En el caso de un arranque rápido, del orden de 20 seg. o menos hasta la velocidad de régimen mínimo, es buen procedimiento sostener aproximadamente 5 seg. adicionales sin combustible a la velocidad de encendido o cerca de ella con objeto de purgar la unidad antes de suministrar la ignición.

5.3.-) Controles de aceleración y parada:

La aceleración después del encendido, se controla con un limitador de aceleración que dosifica el combustible para proporcionar una relación de aceleración dentro de los límites de diseño de la turbina. El gobernador de velocidad asume el control al llegar cerca de las condiciones de velocidad total y produce las correcciones de combustible según sea necesario para sostener la velocidad de la turbina durante las variaciones

de carga. Una señal de parada suministrada, ya sea manualmente o por medio de cualquier dispositivo de protección, hará que se cierre la válvula de combustible, parando así la máquina. Los elementos componentes de ese sistema de control elemental se muestran gráficamente en la fig. 19.



F I G U R A No. 19

Cuadro típico del sistema de control de la turbina de gas

5.4.-) Gobernador:

Generalmente, la operación de una máquina de turbina de gas requiere regulación automática de combustible tanto para el arranque como para la operación normal. Ambas funciones pueden desempeñarse con el gobernador o se puede emplear un limitador de aceleración separado para el arran

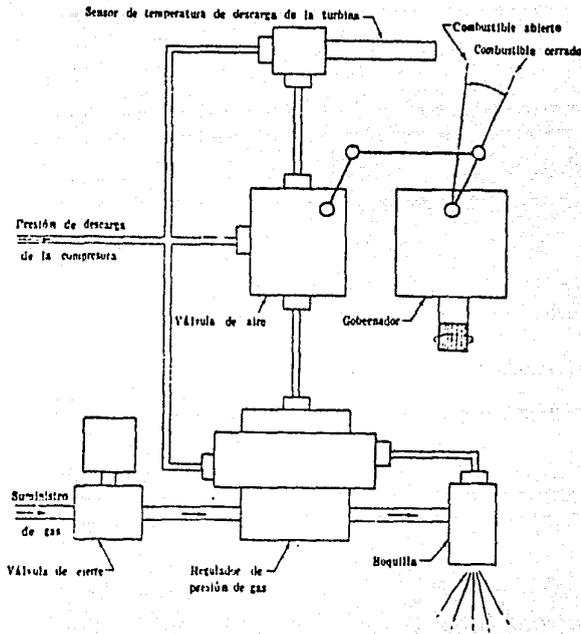
que. Los sistemas de control de combustible varían considerablemente dependiendo de numerosos factores, como el grado de automaticidad deseada, precisión de regulación requerida, características de operación de la máquina en particular, consideraciones ambientales y costos.

Un control típico de combustible o sistema de gobierno se ilustra esquemáticamente en la fig. 20 que presenta, un sistema de control de combustible mínimo para una máquina de turbina que quema gas natural.

La máquina se arranca y acelera a la velocidad gobernada con el flujo de combustible para la aceleración programada según lo indica la fig. 21. El regulador ajusta la presión de la boquilla de gas a una relación fija con la presión de descarga de la compresora de la máquina.

El límite inferior de la presión programada de la boquilla de gas permite que se desacelere la máquina en condiciones en las que no tenga carga pero se mantiene a un nivel suficiente para evitar que se apague la flama en cualquier condición de operación.

Este sistema básico puede alterarse o aumentarse según se requiera. El propio gobernador puede ser de cualquiera de los muchos tipos comerciales que hay en el mercado como el sencillo de disminución de velocidad, el tipo isocrono, o uno sensible a la carga.



F I G U R A No. 20

Sistema típico de control o regulación de combustible

El sistema puede aplicarse a una máquina de uno o de dos ejes.

Cuando se usa con una máquina de dos ejes, se requerirá la adición de un gobernador de la turbina impulsora, para controlar su velocidad, que regule el flujo de combustible.

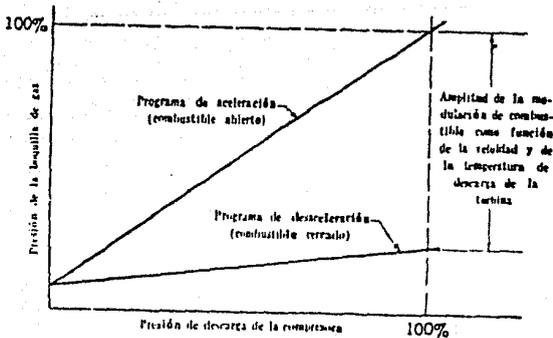


FIGURA No. 21

5.5.-) Controles de protección:

Ciertas condiciones de sobrecarga o desarreglos de las máquinas de turbina de gas se pueden vigilar o advertir para evitar la posible destrucción o daño de la máquina. Para proporcionar esta protección se incluye, generalmente, ciertos dispositivos de protección básicos en todas las máquinas con turbinas de gas. Los límites a los que operan esos controles pueden variar de acuerdo con la aplicación de la máquina. La operación de los dispositivos generalmente produce una parada de la máquina y una indicación de alarma. La práctica común es mantener la indicación de alarma y el control de paro forzoso para evitar que se vuelva a arrancar hasta que se ejecute una nueva excitación deliberada.

Generalmente se suministran los siguientes controles protectores con una máquina.

5.5.1.-) Sobrevelocidad de la máquina:

Este control proporciona un medio para revelar velocidades que se acerquen a los límites de seguridad de la máquina.

5.5.2.-) Temperatura:

La temperatura de entrada de la turbina es la cantidad física para la que se desea protección, pero las temperaturas de escape se miden más fácilmente y se relacionan directamente con las temperaturas de entrada.

5.5.3.-) Baja presión de aceite de lubricación.

5.5.4.-) Alta temperatura del aceite de lubricación.

5.5.5.-) Indicador de flama:

Existen dos condiciones en las que es importante saber que la combustión prosigue normalmente con objeto de evitar daños a la máquina.

5.5.6.-) Vibración:

Cualquier operación anormal o de descompostura que causa un desequilibrio en las partes giratorias de una máquina de turbina o la combustión inestable causaran un nivel de vibración superior al normal de la máquina.

5.5.7.-) Baja presión de combustible:

La presión baja de combustible, ya sea momentáneamente o esporádica, podrá originar operación errática o condiciones peligrosas. Un interruptor operado a presión se incluye generalmente en los controles protectores para la turbina de gas en el caso de que baje la presión de combustible abajo de un nivel seguro.

5.6.-) Instrumentación:

Generalmente se incluye la siguiente instrumentación mínima con una máquina de turbina de gas para utilizarla en la instalación y verificación:

5.6.1.-) Velocidad:

La indicación de velocidad usual de la máquina la suministra un juego indicador de generador y tacómetro que emplea un pequeño magneto permanente movido por la máquina.

5.6.2.-) Temperatura de entrada:

El conocimiento de la temperatura de entrada frecuentemente se usa durante la operación y prueba de una máquina. Es esencial para la operación de aceleración manual.

5.6.3.-) Registrador de sucesos y contador de horas:

El fabricante de máquinas generalmente incluye uno o dos dispositivos para contar el número de arrancadas y las horas totales de operación de la máquina como un auxiliar para establecer los períodos de garantía y para proporcionar un registro seguro para programas de mantenimiento.

5.7.-) Sistemas de lubricación:

La función del sistema de lubricación es lubricar y enfriar las chumaceras y engranes, ya sea que la máquina tenga chumaceras de cojinetes solamente, chumaceras anti-fricción únicamente o una mezcla de los dos. Las máquinas grandes con partes giratorias pesadas en cojinetes de manguitos requieren que las bombas de lubricación se muevan independientemente de la máquina. Esto es para proporcionar la presión total de lubricación desde que se inicia la rotación hasta el reposo absoluto después de parar. Las máquinas más pequeñas, especialmente las que tienen chumaceras anti-fricción, usan una sola bomba de lubricación movida por la máquina. Algunas máquinas grandes usan una combinación de bombas de lubricación movidas por la máquina y otras independientes movidas por motor eléctrico o turbina de vapor. Los depósitos de aceite pueden ser parte integrante de la máquina o ser enteramente separados. Se puede emplear un depósito separado común para varias máquinas. Esta última disposición no se recomienda debido a la posibilidad de algún desperfecto.

6.- COMBUSTIBLES.

Generalmente se usan tres tipos de combustibles para turbinas de gas: Gas natural, gas licuado (Butano o propano) y combustibles líquidos. También se pueden usar combustibles sólidos.

6.1.-) Gas natural:

El gas natural es el combustible ideal en muchos aspectos para la operación de turbinas de gas. No requiere vaporización previa a su combustión como los combustibles líquidos o sólidos. Es limpio y no tiene impurezas que ocasionan depósitos en las aspas, corrosión o erosión. No produce contaminantes del aire o impurezas de gases de escape cuando se quema correctamente.

El gas natural no requiere instalaciones para almacenamiento ni gastos de existencias. Normalmente se quema antes de que se requiera pagarlo y esta disponible en la mayoría de las secciones a precio de competencia.

Sin embargo, el gas natural no se obtiene normalmente de la empresa abastecedora a presiones suficientemente altas para usarse directamente en la turbina. Por lo tanto, generalmente se requiere un elevador de presión del gas y se necesita alguna fuerza para operar este elevador, ya sea directamente del eje de la turbina o de otra fuente. Muchos fabricantes

de turbinas están perfeccionando elevadores de presión de gas integrales para emplear con sus turbinas. Se han usado compresores de gas separados de la industria durante muchos años para otros propósitos.

El principal constituyente del gas natural es el metano con pequeñas cantidades porcentuales de etano y gases menos comunes que forman el resto.

Los análisis químicos del gas natural varían algo dependiendo de la fuente de abastecimiento. Debe suministrarse al fabricante de turbinas un análisis del gas que se va a usar en una aplicación específica. Este análisis se obtiene de la empresa que va a dar servicio de gas. Se pueden considerar otros gases para combustibles de turbinas.

El gas natural generalmente se clasifica y vende por su poder calorífico alto o bruto. La turbina de gas, sin embargo, reconoce solamente el poder calorífico bajo o neto para la producción de fuerza. La diferencia es una función del proceso de combustión que combina hidrógeno, un constituyente de todos los combustibles de hidrocarburos, con oxígeno en el proceso de oxidación para formar agua.

Esta agua se evapora durante la combustión y se desprende con los gases de escape, absorbiendo energía térmica en el proceso de evaporación que no puede producir trabajo, esta es la razón por la que sólo el po

der calorífico neto del gas natural es importante los cálculos de consumo de combustible contra caballos de fuerza. La porción de carbón del combustible se combina con oxígeno sin producir agua y todo el calor producido teóricamente queda disponible para la turbina. La llamada pérdida por hidrógeno tiene promedio de 8% pero puede llegar hasta el 10%.

El gas natural que contiene azufre que no ha sido procesado puede surtirse como combustible para turbinas en operación en campos de gas o petróleo. Puede pedirse al fabricante de turbinas providencias especiales para utilizar este combustible por las propiedades corrosivas del azufre, Un constituyente que no se encuentra generalmente en el gas natural proporcionado por las empresas de servicio.

6.2.-) Gas licuado del petróleo:

Los gases licuados del petróleo como el propano y el butano son excelentes combustibles para usar en turbinas de gas. Sus características de combustión son prácticamente idénticas a las del gas natural. A temperaturas normales el gas licuado cambiará el estado líquido al gaseoso a menos que se mantenga a presión cercana a los 7Kg/cm^2 dependiendo de la composición del combustible. En estado gaseoso el gas licuado es más pesado que el aire y por esta razón deben tomarse precauciones especiales para ventilar o eliminar áreas bajas en las que podrían acumularse escapes de gas. El gas licuado es más denso que el gas natural y contiene más energía térmica por m^3 . Los orificios son más pequeños y los requerimientos de tu-

bería menores de los necesarios para gas natural.

El gas licuado generalmente cuesta más que el gas natural para la misma cantidad de calor, también puede mezclarse con aire con un dispositivo mezclador proporcionador para producir un mezcla que es compatible e intercambiable en el mismo quemador que utiliza gas natural. Las propiedades del gas licuado comercial se enlistan en la Tabla No. 1.

Propiedades y Análisis	Tipo de Gas			
	Propano (Gas Natural)	Propano (Gas de Refinería)	Butano (Gas Natural)	Butano (Gas de Refinería)
Peso específico	1.55	1.77	2.04	2.00
Poder calorífico bruto Kcal/m ³	22763	22283	28565	28334
Poder calorífico neto Kcal/m ³	20983	20610	26349	26118
Kcal brutas por m ³ de aire patrón	956.6	966.4	932.6	944.1
Metros cúbicos de aire requeridos por m ³ de gas	23.8	23.2	30.6	30.0
ANÁLISIS EN PORCENTAJE POR VOLUMEN				
C ₂ H ₆	2.2	2.0	—	—
C ₃ H ₈	97.3	72.9	6.0	5.0
C ₄ H ₁₀	0.5	0.8	{ 70.7 n- 23.3 iso-	{ 50.1 n- 16.5 iso-
C ₃ H ₆	—	24.3	—	—
C ₂ H ₄	—	—	—	28.3

TABLA No. 1

En algunos sistemas de turbinas de gas, el gas licuado puede vaporizarse, controlarse y administrarse como gas sin que se requiera una bomba de combustible. Esto permite que se tenga una condición ideal para

la combustión. A bajas temperaturas es difícil vaporizar el gas licuado y se requiere calor auxiliar.

6.3.-) Combustibles líquidos:

Por mucho margen el mayor número de turbinas de gas actualmente en servicio utilizan combustible líquido. Los combustibles líquidos se usan exclusivamente para alimentar turbinas de gas para servicio de aviación y como pocas excepciones, para uso marino y terrestre móvil.

Hasta ahora, excepto por las especificaciones de aviación, no hay un combustible líquido llamado "Combustible para turbinas de gas". Las turbinas de gas han usado con éxito alcohol, gasolina, petróleo diáfano diesel y aceite pesado residual. Esta versatilidad del uso de combustible es una ventaja que tienen las turbinas de gas sobre las máquinas reciprocantes.

Las turbinas grandes empleadas para fuerza estacionaria han sido diseñadas para quemar combustóleo para reducir el costo del combustible. La experiencia indica que es más económico usar un combustible muy solicitado como el propano o el butano porque la eliminación de los costos de proceso de los aceites residuales y los costos más bajos de mantenimiento compensarán el costo más alto del combustible.

Las instalaciones en perspectiva de turbinas estacionarias pe

queñas que cuentan con servicio normal de entrega de combustible líquido probablemente emplearán petróleo diáfano, para hornos domésticos o combustible diesel para máquina.

Los combustibles líquidos se almacenan fácilmente. Puede almacenarse en tanques de varias formas, con muy poca presión positiva o sin ella, reservas relativamente grandes de combustible para operar turbinas de gas durante muchas horas para uso de aviones y unidades móviles. Se proveen fácilmente grandes reservas para uso de fuerza estacionaria. Sin embargo, la provisión de instalaciones para almacenamiento es costosa y se puede evitar si se cuenta con gas natural a base de un servicio seguro.

6.4.-) Combustibles sólidos:

Los combustibles sólidos, como el carbón, se han usado experimentalmente como combustible para turbinas pero los depósitos de ceniza limitan la vida de la turbina apreciablemente. Sin embargo, se están llevando a cabo trabajos cuantiosos de experimentación desarrollados en este campo por la Oficina de Minas de los Estados Unidos. El equipo que se requiere para utilizar combustible sólido contribuye grandemente a aumentar el costo y la complejidad del sistema, especialmente cuando la energía generada es indirecta. La madera y el carbón de piedra también se han usado así como el agente impulsor sólido de los proyectiles. El combustible nuclear (energía atómica), es una probabilidad para el futuro.

El campo de los combustibles sólidos está tan especializado que se considera que sale del alcance de nuestro estudio.

7.- COMPONENTES DEL SISTEMA.

Las piezas de equipo necesarias para la operación pero que no están incluidas como parte del conjunto de la turbina se llaman componentes del sistema. La selección de estos artículos depende de la aplicación de la máquina y del medio ambiente de la operación. Cuando existan dudas en relación con lo apropiado del equipo se deberá consultar al fabricante de turbinas. En este tema los componentes del sistema se considera que afectan el sistema de entrada de aire o la carga axial de la turbina y se estudian bajo estos encabezados.

7.1.-) Sistema de entrada de aire:

Los sistemas de entrada de aire a las turbinas de gas requieren un considerable esfuerzo de diseño para adaptarse a las necesidades de la turbina. En detalle éstas son las siguientes:

Filtración de aire.

Enfriamiento de aire.

Atenuación del sonido.

Protección anti-congelante.

Protección contra la intemperie.

Limpieza del compresor.

Generalmente, los sistemas de entrada consisten de conductos y cámaras amplias que introducen el aire exterior directamente a la entrada del compresor de la turbina. El sistema puede también contener una o

más de las piezas de equipo que se describen adelante. El aire exterior se trae directamente a la turbina debido a la alta relación de consumo de aire de la turbina de gas y la conveniencia de mantener la temperatura del aire de entrada a un nivel bajo. La depresión de la entrada debe también mantenerse tan baja como sea posible. Una recomendación típica es de 5cms. de agua de depresión en la entrada a la potencia nominal de la máquina.

7.2.-) Filtros de aire de entrada:

La necesidad de filtrar el aire de entrada a la turbina de gas no es en algunos aspectos tan aguda como la filtración del aire de entrada a las máquinas de pistón. Sin embargo, la decisión final sobre un sistema de filtración de aire requiere un estudio de las condiciones en el lugar de la instalación por las características extraordinarias posibles del aire de entrada.

En la tabla No. 2 se resumen los riesgos de ingestión de cuerpos extraños por la turbina de gas y los medios para evitar daños.

La sección de la turbina de gas que sufre el mayor daño debido a la ingestión de partículas extrañas es el compresor. Esto es porque el compresor es la primera pieza del equipo que se encuentra la partícula extraña. La fuerza de choque resultante al entrar en contacto con las partes en movimiento del compresor que giran a gran velocidad puede ocasionar un daño considerable.

Tipo de Cuerpo Extraño	Daño a la Máquina	Prevención
Objetos pequeños, du- ros (grava, granizo)	Hacer muescas, doblar o romper las aspas de la compresora	Tamiz
Abrasivos finamente divididos (arena y polvo)	Erosión de las paletas de la turbina y de la compresora	Filtro de polvo
Objetos grandes que quitan el aire (pája- ros, papeles, trapos)	Estrechamiento y frac- tura de las aspas de la compresora u obs- trucción de los con- ductos del aire	Filtro, inspeccionarlo y limpiarlo periódica- mente
Insectos	Suciedad en la com- presora	Filtro, inspeccionarlo y limpiarlo periódica- mente
Agua pura	Apagado, posible frac- tura de las aspas de la compresora	Lumbreras contra sal- picaduras
Vapor aceroso	Suciedad en la com- presora	Limpieza rutinaria

TABLA No. 2

En instalaciones en las que la turbina usa aire polvoso, se debe pensar en la filtración más esmerada. La investigación ha demostrado que el polvo que arrastra el aire si esta suficientemente concentrado y las partículas son de suficiente tamaño, causará erosión destructiva de los compresores y de las turbinas.

Como regla general contra la erosión por polvo, la entrada

de la turbina se deberá localizar tan lejos como sea posible de las fuentes generadoras de polvo.

Cuando haya polvo arrastrado por el aire en cualquier cantidad, ya sea en forma continua o de tormentas periódicas de polvo, se requerirá un sistema de filtración de aire de entrada.

7.3.-) Enfriamiento del aire de entrada:

La clasificación de potencia útil de la turbina de gas esta basada en cierta masa de aire que fluye con velocidad a través de la máquina. El compresor, que es un dispositivo de volumen constante, tiene el tamaño para manejar el volumen correcto de aire a la temperatura nominal de clasificación, generalmente 15.6° ó 26.6°C . Si se eleva la temperatura de aire de entrada, la masa del flujo de aire a través de la turbina debe disminuir de acuerdo con las leyes de los gases.

La reducción en la masa del aire que fluye se manifestará como reducción de la potencia útil. Al compresor también le estorba una disminución de relación de presión cuando aumenta la temperatura del aire de entrada, favoreciendo así la pérdida de potencia de salida. Lo que es más, la eficiencia térmica de la máquina es una función de relación de la temperatura de salida del quemador a la entrada a la máquina.

Una elevación de temperatura de entrada, por lo tanto, tiene

un efecto desfavorable en el consumo de combustible, así como en la potencia desarrollada.

El enfriamiento puede hacerse por refrigeración mecánica o simplemente por la evaporación de agua. Un enfriador de evaporación de agua consiste de un juego de filtros de aire de área extensa y un arreglo de boquillas para rociar agua sobre la superficie del filtro corriente arriba. Cuando el aire de entrada pasa por las superficies húmedas su temperatura se reducirá porque evapora agua.

7.4.-) Equipo anticongelante:

En condiciones atmosféricas en las que el aire contiene agua sobreenfriada, puede ocurrir la formación de hielo en la entrada de la turbina de gas. El hielo se acumulará cuando el aire que choca en las superficies metálicas está abajo de 4°C . Cuando se deposita una capa de hielo en el fuselamiento de la entrada a la turbina, disminuye el área de aire, ahogando así la máquina y haciendo que se eleve la temperatura de entrada a la turbina. Otro riesgo es que el hielo acumulado puede romperse y los trozos grandes pasen por la máquina, dañando el compresor.

7.5.-) Lumbreras atmosféricas:

Como un detalle de procedimiento general recomendable la boca del ducto de entrada deberá protegerse con lumbreras atmosféricas. Las lum

brenas protegerán contra choque de granizo y de lluvia helada.

8.- APLICACIONES EN LA INDUSTRIA.

8.1.-) Aplicaciones generales.

Además de su empleo en aviación, la turbina de gas se utiliza en grandísimas escalas en las bombas de las largas tuberías destinadas al transporte de productos del petróleo. La propulsión de los ferrocarriles y navíos por turbinas de gas es objeto de una experimentación muy activa, ya se han llevado a cabo varios experimentos con el objeto de utilizar la turbina de gas como motor de camiones pesados; la aplicación mas antigua de la turbina de gas ha sido la generación de fuerza en plantas estacionarias, en donde ha tenido éxito y donde se han logrado también progresos continuos.

La conducción en gran escala que se hace en la actualidad en este País de gas natural, es un magnífico campo de acción para la turbina de gas, que se puede utilizar para mover los compresores de alta velocidad en las estaciones compresoras intermedias que se requieren a lo largo de los gaseoductos. Lo mismo puede decirse con respecto a las estaciones de bombeo de los oleoductos, que antes se habían operado con motores grandes de movimiento recíproco.

El ciclo cerrado de la turbina de gas, puede ser un vehículo adecuado para la planta de fuerza nuclear. A menos de que se encuentre un método práctico para hacer la conversión directa en gran escala de la

radiación nuclear en electricidad cualquier proyecto para la generación eléctrica nuclear debe incluir un ciclo de fuerza para la conversión de la energía térmica en trabajo mecánico. Parece que el ciclo cerrado de la turbina de gas, operando con helio comprimido, puede llenar las necesidades también como las plantas de fuerza de vapor que puedan considerarse adecuadamente para este objeto.

Las máquinas de turbina de gas pueden diseñarse para tener una gran variedad de características de funcionamiento. Tabla No. 3, en este inciso algunas de estas diferencias se describen y se dan ejemplos para ilustrar como se pueden emplear ventajosamente en varias aplicaciones.

- Aunque todas las aplicaciones de las turbinas de gas no se pueden describir o preveer, se espera que los ejemplos que se dan aquí ilustren ciertos principios básicos que se pueden aplicar, para determinar como puede usarse una turbina de gas provechosamente en una aplicación nueva.

En seguida hay una ilustración de varias características típicas de turbinas de gas, junto con la aplicación en la que la propiedad se adapta mejor:

Características	Aplicaciones
Poco peso y tamaño pequeño	Transporte ordinario por carretera para obtener incremento por tonelaje. Vehículos militares para obtener silueta baja
Arranque rápido	Potencia de reserva para operación de emergencia o de demanda máxima, para reponer reservas de máquinas girando
Control automático	Localización alejada de estaciones de bombeo sin atención personal
Facilidad para emplear el calor de salida (con o sin recalentar)	Secadores, hornos y calderas de vapor para calefacción o refrigeración en sistemas totales de energía

TABLA No. 3

8.1.1.-) Principios de aplicación:

La selección de la configuración del motor primario adecuado para una determinada aplicación es muy importante . Muchos de los factores importantes relativos a la selección de turbinas se exponen brevemente en los siguientes párrafos. Hay muchas disposiciones de ciclos más complejos que podrían considerarse, sin embargo son de más interés para el diseñador de turbina y no se estudiarán aquí.

Máquina de turbina de gas de tipo industrial o de tipo modificado de aviación: Hablando en forma general, la turbina industrial se usa en aplicaciones de servicio continuo en el que los requerimientos de potencia son grandes, se necesita larga vida útil y no hay restricciones de tamaño. El tipo compacto se usará generalmente en aplicaciones intermitentes o moderadamente continuas en las que los requerimientos de potencia no son de mas de 10,000 a 12,000 caballos de fuerza y hay ciertas limitaciones de tamaño y/o peso. Un estudio de costo inicial contra costo de mantenimiento y recibo a cambio afectará grandemente la selección para una aplicación dada.

La turbina de un sólo eje comparada con la turbina libre: Hay ciertas aplicaciones en las que cada tipo tiene una ventaja, la turbina de un sólo eje se usa generalmente donde la velocidad no varía considerablemente. La turbina libre se usa generalmente en una aplicación que requiera amplias variaciones de velocidad.

Relación de potencia axial del motor primario y producción de calor: La turbina de gas, al contrario de la máquina de tipo recíproca, es muy adaptable a la recuperación de lo que algunas veces se llama calor residual o de "escape". En una máquina recíproca de ciclo sencillo una porción del calor se pierde como energía en los gases de escape.

8.1.2.-) Aplicaciones Típicas:

Los siguientes ejemplos ilustran algunas ventajas y aplicaciones comunes de las turbinas de gas como motores primarios.

Transporte público en carreteras: El peso de los vehículos de transporte por carretera está limitado por Ley. Por lo tanto, la carga útil de los vehículos puede aumentarse considerablemente empleando una unidad de turbina de gas compacta de peso ligero. Además, una máquina de turbina libre simplificará la transmisión porque la turbina de fuerza funcionaría como un convertidor de torque, reduciendo así el número de engranes de cambio de velocidad requeridos. Empleando un ciclo regenerativo en la turbina de gas, se realizan economías de combustible que se aproximan a las de una máquina recíproca de gasolina o diesel.

Locomotoras: Los ferrocarriles que hacen corridas largas y pesadas sobre terreno escabroso montañoso han sido los usuarios más li-

berales de turbinas de gas para locomotoras. El requerimiento de alto caballaje a baja velocidad para este tipo de trabajo se adapta idealmente a la máquina de turbina libre. Este tipo de locomotora debe tener también dimensiones que estén dentro de las limitaciones de paso libre del ferrocarril. Por lo tanto, si se usa una máquina de tipo recíprocante, el tamaño del radiador del enfriador se convierte en el factor limitante de potencia. Estas propiedades, además de altos factores de carga, han hecho atractiva la turbina de gas para esta aplicación.

Generación de Energía Eléctrica: Las áreas de servicio público y las industriales deberán considerarse por separado en el campo de la generación de energía, porque cada una de ellas tendrá requerimientos diferentes. Una consideración muy importante es si la nueva unidad será un sistema eléctrico independiente o si se anexionará a un sistema más grande ya existente. El sistema independiente deberá mantener su propio control de frecuencia, mientras que la otra unidad tendrá la frecuencia controlada por la línea principal.

El principal requisito para esta última unidad es que se pueda poner en fase antes de "meterse" a la línea principal y que sea capaz de tomar su parte de la carga.

Compresión y Proceso de Gas: La turbina de gas se adapta bien a esta aplicación porque los compresores centrífugos de gas que se

usan en las estaciones de bombeo tienen variaciones de velocidad que se acercan mucho a las de la máquina de turbina. Por lo tanto, se puede utilizar una conexión directa que elimina engranajes innecesarios.

Las turbinas de gas también se usan para impulsar el equipo requerido para la licuefacción del gas natural. La energía térmica de escape puede emplearse para mover unidades adicionales para bombeo y refrigeración.

8.1.3.-) Aplicaciones Adicionales:

Se enlistan y tratan brevemente aplicaciones adicionales de la máquina de turbina de gas con objeto de ilustrar la gran variedad de usos que se han encontrado para este tipo de fuente de energía.

Separación de Aire: En plantas de separación de aire las turbinas de gas mueven compresores centrífugos o axiales que suministran grandes cantidades de aire para el ciclo de separación. Además, el calor de escape se usa para producir vapor, para mover generadores, compresores y refrigeración en proceso.

Industria de Ladrillos: Operando con una unidad turbina-generador. Esta unidad prestaría todo el servicio como planta eléctrica para sus transportes (grúas), máquinas moldeadoras y secadores.

Servicios a Edificios y Plantas: En un Centro Comercial de Arkansas fue la primera instalación de este tipo. Un generador de turbina de gas provee al centro comercial de electricidad y la energía del escape de la turbina se usa para producir vapor de baja presión para calefacción y acondicionamiento de aire.

Industria Química: En las aplicaciones de la industria química, la turbina de gas produce fuerza para compresores y energía eléctrica, así como vapor para el proceso, la máquina de turbina también proporciona gases calientes para regeneración o reformación.

Preparación de Alimentos: El escape de la turbina alimentada con gas natural es bastante limpio para emplearse en la preparación de alimentos y se utiliza para fuerza axial, unidades generadoras y para proporcionar energía de escape para vapor de proceso.

Petróleo y Petroquímica: El proceso Houdry, que requiere grandes cantidades de gas caliente, emplea la porción generadora de gases de ciclo de la turbina. Por este proceso los productos terminados se producen económicamente utilizando completamente el ciclo de la turbina de gas.

Defensa Militar Nacional: Las turbinas de gas que usan gas

natural como combustible proporcionan todos los requerimientos eléctricos y de calentamiento para las estaciones de línea de alarma de la Fuerza Aérea Real Canadiense de Arboles Coníferos.

Una de esas instalaciones emplea una turbina de 1,600 caballos de potencia que mueve un generador para producir hasta 1,100 kilowatts. El escape de la turbina a 482°C, tiene conductos hasta una caldera recuperadora de calor de escape que produce calor para la calefacción.

Compresión de Gas Natural:

- Compresores Booster de Líneas de tuberías (transmisión de gas)
- Para recolección
- Para bombeo automático (gas lift)

Suministro de Grandes Cantidades de Aire de Proceso:

- Síntesis de amoníaco
- Manufactura de ácido nítrico: aire para oxidación de amoníaco.
- Producción en gran escala de oxígeno y nitrógeno.

Empleo de Gases de Desecho para Producir Energía y Aire Comprimido:

- Manufactura de ácido nítrico: gases de desecho de la columna de absorción de ácido a 6 Kg/cm²

- Regeneración de catalizadores; los productos de combustión de la regeneración se expanden en una turbina; se genera aire comprimido y energía eléctrica.

Bombeo de Agua para Inundaciones de Pozos.

9.- REQUERIMIENTOS DE INSTALACION.

Los requerimientos de instalación para máquinas industriales de turbina de gas son tantas y tan variables como el número de aplicaciones. Cada instalación tiene ciertos rasgos que indudablemente serán peculiares de ella, o al menos al tipo de esas instalaciones. Los requerimientos fundamentales comunes a todas las instalaciones industriales de turbinas se tratan en este capítulo.

9.1.-) Montaje de la máquina:

Generalmente, las turbinas de gas industriales las entregan completas, los fabricantes con una base integral que soporta la máquina básica y los diferentes accesorios que requiere cada instalación, como el motor de arranque, accesorios de la caja de engranes, bombas de combustible y de lubricación accionadas por la máquina, bombas auxiliares para -- estos servicios y una caja de engranes reductores si se requiere. En algunos casos la base puede ampliarse para soportar el componente impulsado (bombas, generadores, etc.) La base deberá diseñarse para impedir bolsas de vapor inflamables de combustible o de aceite de lubricación. El ingeniero consultor o el ingeniero arquitecto deberán vigilar esto para tener la seguridad de que el sitio disponible para la instalación esta convenientemente protegido contra riesgos similares. Si las máquinas van a instalarse en una cimentación de fosa de cualquier clase, se deberá proporcionar ventilación forzada a la fosa.

9.2.-) Cimentaciones:

Una de las ventajas de las turbinas de gas industriales es la operación virtualmente libre de vibración de la unidad. Desde el punto de vista de la instalación, esto se traduce en dos claras ventajas:

a) No hay necesidad de proveer aislamiento entre la placa de montaje de la máquina y la cimentación para evitar la transmisión de la vibración (aunque algunos fabricantes recomiendan cojines o montaduras aislantes en algunas instalaciones).

b) No son necesarias cimentaciones masivas capaces de resistir las cargas reciprocantes. Las turbinas de gas se prestan especialmente para instalaciones en azoteas.

Dependiendo del peso del equipo, la inercia de las partes giratorias (W^2R) y las características del equipo conectado (incluyendo las características de parada del generador en condiciones de cortocircuito, cuando ejerce la carga principal), una carga de 1.2 veces el peso muerto del equipo puede ser suficiente para el diseño de la cimentación.

9.3.-) Conductos de entrada y salida:

Los conductos de entrada y salida en la instalación de una turbina de gas industrial dependen en gran parte de los requerimientos especiales de la aplicación.

Los conductos de entrada tendrán que coincidir con el filtro de entrada, enfriador o silenciador que se requiera y con la entrada a la máquina. Mientras que los problemas de expansión térmica en el sistema de entrada no son severos, se deberá instalar una junta de expansión en la entrada de la máquina y tal vez en alguna otra parte, dependiendo de la extensión y de lo complejo del sistema. Los fuelles de expansión del tipo de tela ahulada serán, por lo general, adecuados.

Puesto que una pérdida en la presión de entrada de 1% dará resultado una pérdida de aproximadamente 2.5% en la potencia de la máquina, es importante el diseño cuidadoso del sistema de entrada, especialmente cuando las velocidades en el ducto son mayores, digamos de 33m/seg y la carga dinámica es una fracción importante de la presión total. Cuando se requiera un cambio de dirección a 90° de la corriente de aire producirán una pérdida mínima los recodos con alábes de encauzamiento, aproximadamente 13% de la carga dinámica. Un codo en el que el radio de dobles de la línea central es 3 veces el diámetro del ducto o tubería (es decir un codo de 3 D), dará una pérdida de cerca de 15% de la carga dinámica, y un codo de 2 D. 20%

Se deberán evitar incrementos repentinos en el área total de la sección del ducto, o en cualquier plano longitudinal. Si es necesario descargar el aire de un volumen de velocidad relativamente baja como de la cámara colectora anterior al filtro de entrada, una entrada de boca de cam

para el ducto dará una pérdida mínima. También puede usarse una sección convergente con ángulo comprendido en 30° o una sección convergente de ángulo comprendido en 90° con un fuselamiento de bastante radio a la entrada del ducto. Los conductos de escape pueden llegar a la chimenea como se ilustra en la fig. 22.

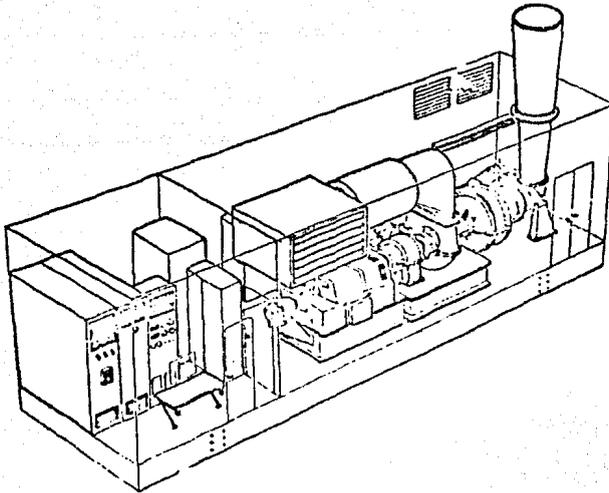


FIGURA No. 22

Instalación en la que los ductos de escape van directamente a la chimenea.

Los conductos de escape de acero dúctil serán adecuados para la mayoría de las instalaciones con gases hasta una temperatura de aproximadamente 482°C , arriba de esta temperatura se deberá considerar el uso

de aceros de baja aleación para reducir al mínimo la corrosión. Las juntas de expansión en los ductos de escape deben absorber expansiones térmicas considerables de los ductos y del extremo caliente de la máquina y están sujetos a grandes esfuerzos. Estos deberán fabricarse con un acero inoxidable adecuado. Cuando se colocan en una sección de alta velocidad del conducto de escape, o cuando la máquina queme un combustible que produzca depósitos que interfieran con la flexión libre de los fuelles, las juntas pueden equiparse con una manga interior. Cuando los conductos están aislados, las juntas de expansión deberán equiparse también con una manga exterior.

Algunas máquinas requieren tubería exterior para conducir aire descargado por el compresor al lado de alta presión de un permutador de calor recuperativo, y para llevar el aire caliente a la entrada del sistema de combustión de la máquina. Estos conductos son generalmente, de tubería de acero comercial de un calibre apropiado para la presión y temperatura. Las curvaturas deberán ser de preferencia de radio largo, y conservar las longitudes tan cortas como sea posible.

Las juntas de expansión de fuelles son un problema especial, debido al efecto de ariete neumático del aire a la presión de descarga del compresor. Deberá haber una sujeción especial para evitar desprendimiento de una sección de tubería entre dos fuelles, y para eliminar las cargas muy fuertes de las cubiertas de la máquina y del recuperador.

Cuando las bridas de la máquina y del recuperador tienen líneas de centro que se interceptan y permiten un trazo de tubería en forma de arco, un arreglo de tres juntas que tengan fuelles de expansión asegurados con pernos en bisagras que resuelven las cargas dinámicas y neumáticas en una tensión de collar de bajo valor y permite el movimiento relativo de las bridas de la máquina y del recuperador en el plano del eje de la tubería.

9.4.-) Sistema de Combustible:

La eliminación de vibración de las líneas de suministro de combustible a una turbina de gas, generalmente no presenta problemas, sin embargo, la instalación deberá apegarse a los códigos locales y a los reglamentos de la NFPA (Asociación Nacional de Protección Contra Incendios).

El diámetro de las líneas dependerá del tipo de combustible que se maneja, las caídas de presión permisibles en las líneas y sus longitudes. Las tablas de la ASA (Asociación Americana de Normas), Z83.1 propuesta, "Normas Americanas para la Instalación de Tuberías y Equipo para Gas en Terrenos Industriales y otros Locales", serán útiles para determinar los tamaños de las tuberías para gas.

La ASA Z83.1 propuesta, proporciona mucha información útil sobre la instalación de tubería y equipo para gas en terrenos industriales y de otra clase.

Los medidores de gas de los abastecedores generalmente, los instalan las compañías que venden gas. Deberá destinarse un área exterior o un espacio interior adecuadamente ventilado, de acuerdo con la compañía vendedora de gas para la instalación de sus medidores.

9.5.-) Compresor de combustible:

La turbina de gas requiere gas natural proporcionado al sistema del quemador a una presión superior a la del aire dentro de la cámara de combustión. La presión efectiva requerida depende del diseño del quemador y del sistema de combustible de la máquina. Los requerimientos de presión de abastecimiento de combustible, por lo tanto, variarán considerablemente según los fabricantes de las máquinas. En general, las presiones varían entre 4.2 y 16.8 kg/cm² manométricos. Cuando no se cuenta con la presión adecuada en la línea de gas para las necesidades de la turbina, deberá instalarse un compresor de combustible.

Los compresores de gas natural se obtienen comercialmente con los fabricantes de compresores de aire. Hay dos tipos generales: Compresores de álabes giratorios y de pistones recíprocos. La selección del compresor para determinada instalación requiere la coordinación estrecha de los fabricantes de la máquina y del compresor. Si el fabricante de la máquina proporciona un impulsor para el compresor, se deberán seguir sus recomendaciones. Cuando no se proporciona un impulsor en la máquina, el

compresor deberá moverse con un impulsor auxiliar. El compresor de combustible requerirá alguna forma de enfriamiento de las chaquetas y si es de varias etapas, enfriamiento entre etapas. El enfriamiento puede ser con agua o aire.

Cuando el compresor de combustible está conectado directamente a la turbina de gas, o se mueve con corriente eléctrica generada por la turbina, se necesita un suministro de aire a presión para arrancar la máquina. El método de suministro de combustible para arranque dependerá de la frecuencia con que se use.

9.6.-) Sistema Exterior de Lubricación:

Una instalación de turbina de gas requerirá alguna clase de enfriador de aceite de la máquina. El fabricante de turbinas proporcionará la información relativa a la velocidad de desprendimiento de calor del aceite de lubricación, de flujo de aceite, la temperatura de salida del aceite, y de la temperatura requerida de entrada a la máquina. Estos datos permitirán la selección de un enfriador de aceite adecuado de los abastecedores comunes. Generalmente, se dispone de un abastecimiento de agua que permite el uso de un enfriador de aceite con agua, si no se dispone de agua de enfriamiento, se puede usar un enfriador de aceite con aire. El movimiento del aire de enfriamiento a través del enfriador de aceite, por lo general se logra mejor con un abanico movido por motor

eléctrico.

Algunas turbinas de gas también requieren una bomba exterior para lubricación movida por motor y la tubería necesaria para permitir la circulación del aceite lubricante antes de arrancar la máquina y durante el tiempo que gira sin carga al pararla. Este sistema auxiliar de lubricación deberá integrarse al sistema normal de lubricación de acuerdo con las instrucciones del constructor de la máquina.

9.7.-) Caja de Engranés de Salida de Potencia:

Una característica inherente de las turbinas de gas es su alta velocidad giratoria. Esta variará de cerca de 10,000 RPM para las máquinas. El fabricante de máquinas proporciona engranajes reductores como parte integral de su máquina para producir velocidades utilizables del eje de potencia útil. Los engranes de la caja de engranes de salida de potencia son del tipo de precisión para alta velocidad. El sistema de lubricación de engranes y chumaceras es una parte del sistema general de lubricación de la máquina. Puesto que es importante ajustar la velocidad de la rueda de la turbina con su carga, la mayoría de los fabricantes de turbinas ofrecen una gran variedad de relaciones de reducción en los engranes de salida. El fabricante puede también proporcionar reducciones fuera de sus ofertas de norma sobre pedido especial.

9.8.-) Equipo para recuperar Calor de Escape:

Una de las características de la turbina de gas es la gran cantidad de calor disponible en el gas de escape. La economía de la mayoría de las instalaciones de turbinas de gas exige que se utilice este calor. El uso al que se destina este calor de escape (calentar agua, producir vapor, calentar aire, y otros), lo determina el tipo de instalación. Las siguientes observaciones, sin embargo, se aplican en general a todos los dispositivos de calor de escape.

La turbina de gas es sensible a la contrapresión de escape. Las especificaciones para cualquier permutador de calor de gases de escape, deben por lo tanto, establecer la caída de presión permisible del lado de los gases calientes. Un valor conveniente para esta caída de presión está entre 7.62 cm. y 12.7 cm. de agua. Cuando es necesario suministrar calor adicional a la caldera con fuego directo, puede ser necesario operar con una caída de presión más alta. Las recomendaciones del fabricante de la turbina determinarán el límite superior de presión.

9.9.-) Línea de Desvío de Salida y Reguladores de Tiro:

Los sistemas de recuperación de calor de escape deben permitir variaciones en el suministro de calor. Un medio de producir esto, es un ducto de desvío del escape con un regulador de paso adecuado para regular el flujo. Así el escape de la máquina tiene dos rutas paralelas a la at -

mósfera; una ruta va a través del dispositivo recuperador de calor y la otra directamente a la atmósfera por el ducto de desvío. La cantidad de gas caliente que pasa por el dispositivo recuperador de calor se ordena con una válvula reguladora instalada en el ducto de desvío. Se emplea un sistema de control para modular la válvula reguladora de desvío, de acuerdo con la temperatura del producto calentado.

9.10.-) Sistema de Agua:

El agua no se requiere para la operación de una turbina de gas por separado, pero con frecuencia se necesita para el equipo asociado a ella, como un enfriador evaporativo de aire de entrada, enfriador de aceite lubricante, interenfriador del compresor de gas o para la caldera de calor residual. La caldera requerirá sus propias bombas de alimentación, pero el equipo restante puede abastecerse de las líneas principales de suministro. La tubería deberá ajustarse a ASA B31.1.

9.11.-) Atenuación del Sonido de Entrada:

Una de las características más notables de una turbina de gas en operación es el fuerte sonido de alta frecuencia que emana de la entrada al compresor. El sonido es muy molesto para el oído humano y en la mayoría de las instalaciones debe eliminarse. Afortunadamente el sonido de alta frecuencia es sumamente direccional y puede absorberse fácilmente. Los sistemas de atenuación de sonido de entrada utilizan estas características

ticas. El sistema deberá eliminar cualquier recorrido en línea recta desde el origen del sonido (entrada al compresor), hasta el oído del observador. Si los conductos de entrada ya tienen una o más curvas, se satisface este requisito. Si la entrada es un ducto derecho directo, entonces se requerirán mamparas en el ducto y fuera de la boca del mismo. Las paredes del ducto y todas las superficies de las mamparas que "ven" al compresor deberán cubrirse con un material que absorba el ruido. El material deberá fijarse a las superficies del ducto con broches o pasadores mecánicos apropiados, además de un adhesivo para evitar que se afloje y posteriormente se introduzca el material al compresor.

La atenuación del ruido de escape de la turbina de gas se debe proporcionar en el lugar de la instalación para satisfacer los requerimientos de restricción del ruido. El ruido del escape es de baja frecuencia, alrededor de 300 ciclos por segundo y se puede describir como un ruido constante. El equipo para recuperar el calor de escape funciona muy bien como amortiguador del ruido de escape. Comúnmente la instalación del equipo de recuperación de calor, como calderas de calor residual o permutadores de calor de gas de escape a aire, resolverán el problema del ruido de escape.

Cuando no se instala equipo recuperador de calor, la atenuación del ruido de escape puede lograrse con silenciadores apropiados o con ductos de escape con placas desviadoras, empleando técnicas de absor

ción de sonidos que satisfagan los requerimientos de protección contra incendios de la localidad.

9.12.-) Aislamiento Térmico:

El aislamiento térmico de las cubiertas del sistema de combustión y de la turbina, ductos de escape, conductos de permutador de calor y de las calderas es necesario para protección del personal y evitar el excesivo desprendimiento de calor en el edificio. Exceptuando las conexiones de la caja de humo de la chimenea, reduce las pérdidas del sistema e incrementa la eficiencia de la operación.

El aislamiento térmico también es eficiente para reducir la transmisión del sonido. Se deberá prestar especial atención al aislamiento de las cubiertas de la máquina con objeto de que no se dificulte el quitar las partes componentes, para su inspección. En las secciones de conductos de baja velocidad, el aislamiento térmico puede instalarse en el interior, de preferencia a la instalación en el exterior del ducto para producir absorción de ruidos de alta frecuencia que de otra manera serían emitidos por la chimenea.

En el interior de los edificios calentados, el aislamiento del sistema de entrada evitará la condensación y formación de escarcha.

9.13.-) Ventilación:

La ventilación de las plantas de fuerza de turbinas de gas se requerirá para disipar el calor radiado del equipo de los conductos. Esto puede requerir hasta unos 10 cambios de aire por hora. Las superficies calientes dentro del edificio normalmente estarán aisladas para proporcionar una temperatura exterior de 65°C o menos y el desprendimiento de calor se puede calcular con las fórmulas normales. El desprendimiento de calor de una turbina de gas con longitudes cortas de ductos puede ser pequeño como de 0.75 kcal/cv/hr. El desprendimiento de calor de una turbina de gas conectada a una caldera de calor residual o un recuperador situado dentro del edificio puede ser de 75 Kcal/cv/hr, y se requerirá la capacidad apropiada al cambio de aire. También se debe tomar en cuenta la carga conectada. Un generador tiene una eficiencia a plena carga de cerca del 96% y el 4% restante de energía de entrada se convierte en calor. Si el generador es autoenfriado con el aire del edificio, el calor despedido aumenta 25 Kcal/cv/hr, adicionales a la carga térmica.

9.14.-) Accesibilidad:

Se debe proporcionar espacio para el acceso a una turbina de gas para su mantenimiento. Esto debe incluir espacio libre para sacarlas cuando se retiren y un lugar para colocarlas mientras se continúa con el trabajo. Este problema lo agravarán los conductos y tuberías elevados y se simplificará con instalaciones elevadoras adecuadas.

Mientras que pueda requerirse una abertura moderadamente grande para pasar una turbina de gas a su posición de montaje, nunca deberá necesitarse reponer totalmente la unidad en servicio. Los pasillos y entradas permanentes solo deben ser lo suficientemente grandes para que pase la pieza más grande. En el caso de conjuntos de generador eléctrico movido por turbinas de gas, es probable que las piezas del generador sean más grandes y pesadas que las de la turbina.

9.15.-) Servicios Eléctricos:

Siempre se requiere servicio eléctrico para encender una turbina de gas y generalmente también para instrumentación, control y arranque. El suministro puede venir de una empresa de servicio público, baterías, un generador auxiliar independiente, un generador movido por turbina de gas, y con mayor frecuencia de una combinación de éstos. La selección depende de muchos factores como el costo y la confiabilidad.

10.- CONDICIONES Y CARACTERISTICAS DE OPERACION:

Estimación de la utilidad, las principales partidas que se deben considerar en un análisis económico de una instalación de turbinas de gas, son:

Costo de las instalaciones de la planta

Período de amortización

Interés sobre la inversión

Valor de rescate de la planta

Costos de mantenimiento

Costos del personal de operación

Impuestos

Seguros

Abastecimiento misceláneos

Cuando el análisis de costos de propiedad y operación de una planta de fuerza de turbina de gas se ha completado, es entonces necesario compararlo con el costo de los servicios públicos que se comprarían para varias formas de energía producida por la planta. Si esta comparación indica una situación económica favorable para la energía generada con la instalación comparada con la compra de la energía requerida por la planta, entonces se debe considerar seriamente la instalación del equipo de la planta con turbina de gas.

10.1.-) Requerimientos de Equipo:

Generalmente, los edificios industriales y comerciales del tipo de aquellos en que se piensa instalar turbinas de gas, debe tener requerimientos fuertes de energía eléctrica y calorífica en varias formas. Para producir las formas de energía requeridas usando un sistema de turbina de gas, es necesario proporcionar generadores eléctricos y equipo recuperador de calor. En la mayoría de estas plantas, los generadores eléctricos producirán energía de 60 ciclos; sin embargo, la energía de alta frecuencia (420 ciclos por segundo y más alta), tiene calras ventajas en ciertas aplicaciones. Estas ventajas son menor peso y menos espacio para una determinada potencia útil. A medida que se generaliza el uso de energía de alta frecuencia, es muy probable que la generación en el sitio proporcionará el único medio económico de producir esta forma de energía.

Deberá hacerse un estudio de los requerimientos eléctricos de la planta para determinar la carga eléctrica total conectada, la demanda eléctrica máxima probable, el consumo de fuerza eléctrica diario, mensual y anual, y lo más importante para un análisis económico preciso, una gráfica del perfil de la carga.

Con frecuencia es posible eliminar una o dos cargas eléctricas fuertes sustituyendo los motores primarios por un tipo sin motor. Con la sustitución de ese equipo es posible conseguir un mejoramiento de los factores de carga de toda la planta.

Cuando se han considerado debidamente los factores que influyen en la demanda de fuerza, se debe pensar en los requerimientos eléctricos totales de la planta. Es obvio que si se piensa en la generación en el lugar, la planta debe tener suficiente capacidad para satisfacer todas las demandas que se le impongan durante toda su vida útil. Prácticamente en todas las instalaciones, se requerirá la compra de equipo para satisfacer la demanda máxima de la planta con una unidad generadora adicional, por lo menos, para repuesto en caso de parada no programada del generador.

10.2.-) Costos y Cargos de Inversión:

Cuando se compararán los méritos relativos de los requerimientos de generación de energía en el sitio contra la compra de esa energía de las empresas de servicio público, es necesario determinar los cargos anuales que se derivan de la inversión adicional "neta" requerida para la generación de energía en el lugar. En algunos casos, el costo de algunos artículos vinculados con el uso de la energía comparada puede deducirse de la inversión atribuida a la generación de energía en el lugar. Algunos de estos artículos son transformadores, bóvedas del transformador, servicios subterráneos de energía y los cargos de conexión de fuerza eléctrica.

Los diferentes componentes del sistema de energía deben amortizarse de acuerdo con las pláticas de contabilidad que siga el posible comprador, prestando especial atención a las prácticas permitidas por la

Ley Federal de Impuestos. Como regla general, el flujo de los fondos generado por un sistema de energía será de gran magnitud. En una situación de este tipo, es conveniente desde el punto de vista del propietario depreciar el equipo de la planta tan rápido como sea posible. Se cuenta con ta blas que indican el período normal de depreciación para varios tipos de equipo que podrían utilizarse en sistemas de energía con turbina de gas.

11.- MANTENIMIENTO FUNDAMENTAL.

Planeación del mantenimiento de la turbina de gas para trabajo pesado.

11.1.-) Introducción

La turbina de gas requiere de un propio período de inspección, reparación y reemplazamiento de partes para obtener seguridad y un óptimo aprovechamiento de la máquina.

Este tema describe la planeación y los requerimientos para el mantenimiento de la Turbina de Gas.

Las distintas formas de inspección determinan un mantenimiento definido y reglamentado al ser presentado en un programa planeado con anticipación.

11.2.-) Mantenimiento Teórico:

El diseño de la turbina de gas para trabajo pesado, está basado en la teoría de poder resistir este trabajo.

El concepto de diseño de trabajo de la carcasa y en la turbina, se ha desarrollado gradualmente por la turbina de vapor y consecuentemente, la mejor construcción de los componentes de la turbina de gas están

diseñados a satisfacer las normas establecidas para la turbina de vapor industrial; por lo tanto ambas turbinas de gas y vapor tienen requerimientos similares de mantenimiento. Las siguientes características están diseñadas para facilitar el mantenimiento de la turbina de gas en un lugar o sitio determinado:

- Toda la carcaza esta dividida en el centro de la línea horizontal. La parte superior puede ser levantada individualmente para dar acceso a las piezas internas.
- Con la parte media superior de la cubierta (carcaza) del compresor le -
vantada, todos los álabes del estator pueden ser deslizados circunferen -
cialmente hacia afuera de la carcaza para reemplazamiento o inspección.
- Con la parte media superior de la carcaza de la turbina levantada, cada mitad de la tobera ensamblada puede ser removida para inspección, repa -
ración sin remover el rotor. En algunas unidades la parte media supe -
rior de la tobera está levantada con la cápsula de la turbina, además permite inspeccionar y/o remover las paletas.
- Todos los álabes de la turbina son diseñados y construidos para ensam -
blarse de tal manera que puedan ser reemplazados sin remover o desbalan -
cear el rotor. Normalmente, debe balancearse el rotor después de reem -
plazar algunas partes.

- Todos los cojinetes de la carcaza y forros son divididos en el centro de la línea horizontal así que ellos pueden ser inspeccionados y reemplazados, cuando sea necesario, la parte media inferior del forro del cojinete puede ser removida sin mover el rotor.
- Todos los sellos y el eje son separados de la carcaza principal y pueden ser fácilmente removidos y reemplazados.
- La mayoría de los accesorios incluyendo el filtro y enfriadores, están separados del ensamble, así es fácilmente accesible para inspección o mantenimiento. Estos también pueden ser reemplazados individualmente cuando sea necesario.

El inyector de combustible y las cámaras de combustión pueden ser removidos para inspección, mantenimiento o reemplazamiento sin mover o levantar la carcaza.

11.3.-) Requisitos de Mantenimiento:

Las principales partes de la turbina de gas industrial, cuando son comparadas con las de la turbinas de vapor, son asociadas con el proceso de combustión y las partes expuestas a los gases calientes de descarga del sistema de combustión. Ellos incluyen los forros de combustión, vainas de transición, toberas y paletas, y son en general referidos como las

partes de la zona caliente de los gases. El diseño básico y los programas de mantenimiento para el trabajo de la turbina de gas esta orientado hacia:

- Períodos extensos de operación entre cada mantenimiento.
- Mantenimiento en un sitio o lugar.
- Disponibilidad o fácil uso de mano de obra.

En resumen, el mantenimiento de la turbina de gas, el dispositivo de control, el equipo de medición de combustible y otros auxiliares de la estación también requieren servicio.

El equipo de la estación variará con cada aplicación; por ejemplo, para que no haya un descuido en la estación operada a control remoto, tendrá más equipo de monitoreo y controles que una instalación de turbina de gas controlada por el operador.

Los requisitos de la inspección y reparación, establecen un patrón de inspección indicado para disminuir el trabajo e incrementar la magnitud del reacondicionamiento y después repetir el ciclo. Estas inspecciones estan diseñadas para optimizar los costos de mantenimiento mientras se mantiene la máxima disponibilidad y seguridad.

11.4.-) Tipos de inspecciones:

Los tipos de inspecciones pueden ser ampliamente clasificados como "Preventiva, operacional y de desmonte", la inspección operacional es usada como indicador de la condición general del equipo y como una guía para planear el programa de mantenimiento de desmonte.

La inspección operacional es ejecutada durante la puesta en marcha y también cuando la unidad esta funcionando. La inspección de operación indica la condición general de la turbina de gas y sus equipos asociados.

La inspección de desmonte o desarme se lleva a cabo mientras la unidad está parada e incluye la combustión y la zona de gas caliente, y una mayor inspección de reacondicionamiento.

Estas inspecciones requieren desmonte de la turbina, dependiendo del grado de daño sufrido por ésta. Se ilustra en la fig. 23. Los tipos de inspecciones por demonte.

TIPOS DE INSPECCION

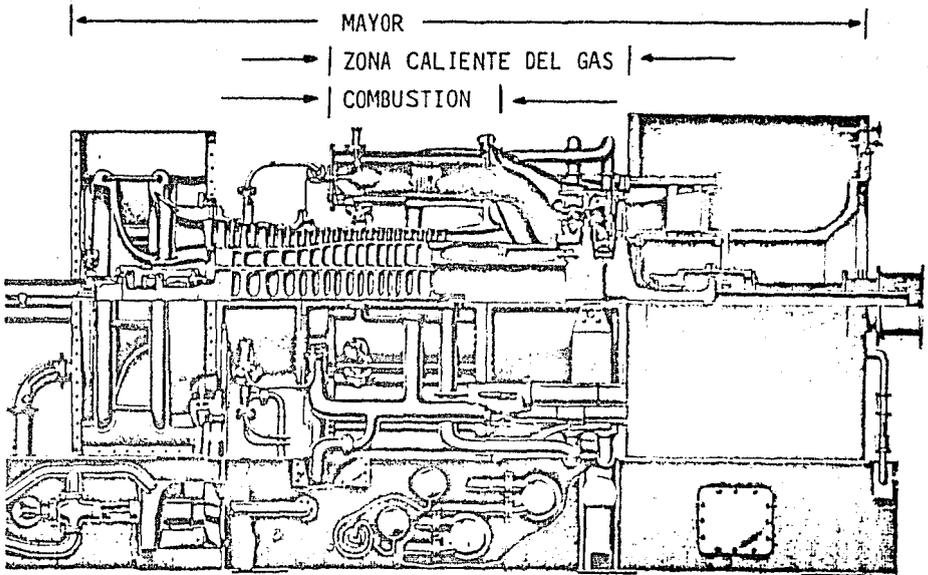


FIGURA No. 23

11.4.1.-) Mantenimiento preventivo:

La inspección preventiva pertenece particularmente a la turbina de gas usada en servicio. Este mantenimiento incluye el servicio rutinario del sistema de la batería, cambio de filtros, chequeo de aceite y niveles de agua, limpieza del revelador y chequeo de la calibración. Este servicio puede ser ejecutado sin interrupción de la turbina. Un examen periódico funcionando la turbina es una parte esencial del mantenimiento preventivo.

Cada turbina es abastecida con un manual de mantenimiento que contiene la información y dibujos necesarios para ejecutar estos chequeos periódicos.

Los dibujos más útiles, esquemas y elementos están especificados en el manual de servicio. Estas instrucciones dan los límites de operación, características y secuencia de todos los dispositivos de control. Esta información deberá ser usada regularmente para la operación y por el personal de mantenimiento. El cuidado para la mejor operación de mantenimiento y tendrá un efecto significativo en la reducción del costo de mantenimiento y mantiene su alta seguridad.

Un resumen describe los pasos múltiples de los sistemas individuales de la tubería, como son orificios, presiones en las válvulas, interruptores, y otros componentes.

Los elementos eléctricos ligados junto al sistema individual, puede variar desde un relevador, hasta varios cientos de contactos eléctricos y hasta una estación a control remoto.

Los dibujos del control de circuito eléctrico (elementales) son los más usados cuando se investigan las fallas del control automático.

11.4.2.-) Inspección de la turbina en marcha:

Este tipo de inspecciones consiste por lo general en continuas observaciones hechas cuando la unidad está en operación. La falta de personal, y el continuo trabajo de la máquina probablemente serán observados una vez a la semana, en una estación con personal es observada diariamente

registrándose pocos cambios al día.

Se deberá preparar un buen programa de mantenimiento con la información acerca del inicio de operación de la turbina de gas. Los datos de operación tabla No. 4 deberán ser registrados para permitir una evaluación del equipo utilizado y como un requisito del mantenimiento para el tiempo de operación.

Esta lista es solamente mínima y otros parámetros deberán ser usados cuando se requiera. Los datos de operación tomados dan una buena referencia para investigación de fallas futuras y determinan problemas potenciales de área. Este servirá como base para la eficiencia del mantenimiento del trabajo planeado y materiales requeridos para subsecuentes períodos de interrupción.

TABLA No. 4

DATOS DE INSPECCION DE MANEJO

- Carga de trabajo contra temperatura de escape
- Vibración
- Flujo de combustible y presión
- Control de la temperatura de escape
- Variación de la temperatura de escape
- Tiempo de arranque

En general la relación entre carga y escape de temperatura deberá ser observada y comparada previamente con los datos registrados.

La temperatura ambiente y condiciones barométricas tendrán algunos efectos encima del nivel de la temperatura absoluta. La alta temperatura de salida puede ser un indicador del deterioro de las partes internas, o el compresor del flujo axial está sucio. Esto también puede ser indicador para incrementar la potencia requerida para el funcionamiento del equipo.

La pérdida de potencia resulta por el deterioro de partes o averías que pueden requerir el desmonte de la turbina para renovar la potencia, la baja del funcionamiento debida a la suciedad del compresor de flujo axial puede ser renovada con la limpieza del compresor en marcha. Esto se realiza inyectando a presión un abrasivo suave, como la cáscara de nuez molida en la corriente de aire a la entrada del compresor.

Una acertada limpieza reducirá la temperatura de escape para un mejor funcionamiento e incrementa la presión de descarga del compresor. Si es necesario limpiar frecuentemente el compresor, las causas de suciedad deberán ser determinadas y corregidas; los cuidados deberán ser sobre la unidad de recuperación de calor para prevenir una concentración potencial de material de combustible en el sistema de escape de la turbina.

El nivel de vibración de la unidad deberá ser observado y registrado, el menor cambio ocurrirá cuando cambien las condiciones de operación. De cualquier manera, cambios largos o continuos incrementarán la dirección dando indicaciones para la acción correctiva.

En el sistema de combustible, deberá ser observado por lo general el flujo de combustible contra la relación de carga. La presión del combustible a través del sistema debiera ser monitoreado, los cambios en la presión del combustible pueden indicar que el paso del inyector esta tapado o los elementos de medición estan dañados o fuera de calibración.

Probablemente la función mas importante sea observada en la temperatura de escape del sistema y el recorrido de la temperatura en el sistema. La rutina de verificación de la operación y calibración de este recorrido son minimizadas en las partes de la zona caliente.

La variación de la temperatura de escape deberá ser regulada, un incremento en la temperatura indica una extensión del deterioro de la combustión o problemas en la distribución del combustible. Si el problema no es corregido, la vida de las partes es reducida.

El arranque es también una excelente referencia contra el cual los parámetros de operación subsecuente pueden ser comparados y evaluados.

Una curva de los parámetros de arranque de velocidad, señal de combustible, temperatura de escape, la secuencia del trabajo crítica, contra el tiempo de arranque inicial dará una buena indicación de la condición del sistema de control. Las desviaciones de las condiciones normales ayudan a la localización exacta del problema inminente, cambios en la calibración o daños en los componentes.

11.4.3.-) Inspección por Desmonte:

11.4.3.1.-) Inspección de Combustión:

La inspección de combustión es un desarme relativamente corto en la interrupción de la línea ensamblada de combustión, piezas de transición, inyector de combustible, tubos de fuego cruzado (tubos que atraviesan la zona caliente), retenes, conexión de las bujías, detectores de flama y protectores de radiación del combustor.

Esta inspección se concentra en los forros de combustión y en el inyector de combustible, la cual nos dá un criterio para ver las piezas que requieren reemplazo o reparación para seguir el programa de mantenimiento. El mantenimiento apropiado de los artículos descritos en la Tabla 5 contribuirán a aumentar el tiempo de vida de las partes, en la carcasa y paletas (álabes) de la turbina. Esto también es recomendable para cualquier inspección visual o borescópica de la primera etapa de -

la tobera y paletas, para que sean hechas las reparaciones a su debido tiempo.

Los aislantes e inyectores de combustible serán removidos para limpieza o reemplazados por nuevos y los forros serán reparados. Este procedimiento minimiza el tiempo y el cambio de forros e inyectores de combustible para poder ser reparados y limpiados cuando esto sea necesario.

Es recomendable tener un juego de herramientas para que el armado completo de los aislantes, las piezas de transición, tubos de fuego cruzado, inyectores de combustible, juntas y otros objetos de escaso valor, sean mantenidos en su sitio. Estos pueden ser normalmente instalados en unas cuantas horas y su seguridad es estable contra el tiempo prolongando fuera de servicio.

La fig. 23, ilustra la sección de la unidad que es desarmada para una inspección de combustión.

TABLA No. 5

ALCANCE DEL TRABAJO DE INSPECCION POR COMBUSTION.

Paso 1.- Remover la tubería de gas, inyectores de combustible, bujías y detectores de flama.

Paso 2.- Remover la cubierta de la combustión, los aislantes (forros) de combustión y tubos de fuego cruzado (atravesados).

PARTE	ACCION	INSPECCION POR:
Inyector del combustible	Desarmar puntos (puntas)	Desgaste y erosión de los barrenos.
Cubierta de la combustión y forros	Limpieza	Puntos calientes, abolladuras, combustión, desgaste en los sellos de los muelles, grietas en las soldaduras, desgaste en el collarín de los tubos cruzados.
Tubos cruzados	Limpieza	Combustión, puntos calientes en la sujeción del collarín.
Bujías	Limpieza	Electrodos para combustión, separación de los electrodos, libertad del mecanismo del pistón.

Requisitos para una inspección de combustión típica

- Las piezas de transición, y los tubos cruzados, deberán ser inspeccionados e identificados (marcados).
- Al inspeccionar cada tubo de fuego cruzado, forros (aislantes) y retenes serán indicando las conclusiones.
- Inspeccionar las cámaras de combustión por escombros y residuos.
- Inspeccionar la placa de radiación para soldar las grietas.
- Cualquiera de las inspecciones, visuales o borescópicas serán dirigidas a los bordes del primer escalón de la tobera y en la primera etapa de los álabes de la turbina será hecha durante la inspección de combustión para marcar el progreso del uso y el deterioro de esas partes. Esta inspección ayudará a establecer el programa para la inspección de la zona caliente.
- Inspeccionar los inyectores de combustible para la conexión de las tapas, erosión de los agujeros de las tapas, seguridad de los alambres de las tapas y anotar las conclusiones.
- Inspeccionar el ensamble de la bujía que este bien unida, checar las condiciones de los electrodos y los aisladores. Asegurar que el tapón de la bujía este bien soldado a la biela del émbolo.
- Después que la inspección es completada y la unidad es regresada a servicio, los aislantes removidos pueden ser inspeccionados y reparados, es necesario hacerlo con personal competente en el ramo o un servicio califica

30. Los inyectores de combustible removidos pueden ser limpiados en el mismo lugar.

11.4.3.2.-) Inspección de la zona caliente:

La inspección de la zona caliente tabla No. 6, incluye la inspección visual de la tobera de la turbina y paletas de ésta. La parte media superior de la coraza debe ser removida para esta inspección. Para las unidades en operación continua, las inspecciones de combustión y los intervalos en la zona caliente pueden ser modificados después del primer año de operación en base de la experiencia.

Este primer año de inspección, también puede ser usado como una base para intervalos futuros de mantenimiento. Para una mínima inspección de la zona caliente todas las piezas de transición y el primer escalón de la tobera deben ser removidos, el segundo escalón de la tobera y las paletas de la turbina deberán ser inspeccionadas visualmente, mientras permanezcan en la unidad. La fig. 23 muestra los componentes involucrados en la inspección de la zona caliente. Es recomendable que las piezas que sean requeridas, estén antes en el sitio de la inspección de la zona caliente para minimizar tiempo. Para realizar esto con más eficiencia, es recomendable que los inyectores de combustible, aislantes de combustión, piezas de transición y el primer escalón de la turbina sean reemplazados inmediatamente sobre la conclusión de la inspección visual. Las partes removidas pueden ser inspeccionadas por un servicio calificado

y regresar al almacén para la próxima inspección.

T A B L A No. 6

Mantenimiento de Inspección. Trabajo de inspección de la zona caliente.

Paso 1.- Lo mismo que la inspección de combustión.

Paso 2.- Remover la parte media superior del envolvente de la combustión y la carcasa de la turbina y el diafragma interior.

Paso 3.- Remover la primera etapa de la tobera y todas las piezas de transición.

LUGAR O SITIO	ACCION	INSPECCIONAR
Primera etapa en la Tobera	Impurezas del aire como polvo, se adhieren a las paredes a baja presión.	Erosión, corrosión, grietas, inclinación del borde de salida, obstrucción de los bordes calientes.
Primera y segunda etapa de las Paletas (álabes)	Impurezas del aire como polvo, se adhiere a las paredes a baja presión.	Daño por objetos extraños, erosión, corrosión y grietas visuales.

T A B L A No. 6

(Continuación..)

LUGAR O SITIO	ACCION	INSPECCIONAR:
Segunda etapa de la Tobera	Impurezas del aire como polvo, se adhiere a las <u>pare</u> des a baja presión.	Daño por objetos extraños, erosión, corrosión, libertad de operación (Area variable de la tobera.
Pieza de Transición	Impurezas del aire como polvo, se adhiere a las <u>pare</u> des a baja presión	Inspección por abolladura en el punto caliente, grietas cerradas, sellos desgastados, desgaste en los puntos de la línea de introducción.

Requerimientos de inspección de la zona caliente.

- Inspeccionar y registrar la condición de la primera y segunda etapa de las paletas (álabes). Si esto es lo que determina que las paletas deben ser removidas, las instrucciones siguientes para remover paletas son:
- Inspeccionar y registrar la condición de la primera etapa de la tobera y segunda etapa.
- Inspeccionar y registrar la condición de las juntas de empaque.
- Si el empaque muestra señales de desgastamiento, en la junta del perno de la parte superior de la segunda etapa, así como en la junta de la parte media inferior y en el ensamble de la tobera están las paredes ásperas, éstas se comparan con los diámetros horizontales y verticales de las juntas. Si la junta está más afuera de los límites de 2.5 mm., entonces será enviada al taller de reparación.
- Checar y reemplazar algún termopar defectuoso.
- Inspeccionar visualmente las paletas de la turbina y realizar la limpieza de las puntas de los álabes. Inspeccionar el disco de los álabes que pudiera estar tapado y deteriorado por desgaste.
- Revisar el envolvente de la combustión y observar la condición de las paletas del compresor de flujo axial.

- Revisar el interior y observar las condiciones adelante de la sección del compresor.

11.4.3.3.-) Inspección Mayor:

La inspección mayor será establecida cada 30 mil horas o más dependiendo la carga utilizada de trabajo y requerimientos de operación.

El trabajo (Tabla No. 7) de la inspección mayor, así como el de combustión y el de la inspección de la zona caliente, incluye el poner completamente abierta la turbina en la parte media horizontal. Junto con las inspecciones anteriores serán ejecutados los siguientes artículos:

- Remover los álabes de la turbina y aplicar pruebas no destructivas a las paletas y a la cola de milano.
- Inspeccionar el forro del cojinete, las tapas y el eje del árbol.
- Checar el compresor de flujo axial con líquido penetrante, así como en el interior de las paletas.
- Checar con líquido penetrante la tobera.

La primera etapa de la tobera es expuesta a la descarga directa de los procesos de combustión y sujeta a las altas temperaturas en los metales. Normalmente puede ser reparada varias veces para extender

su vida. La decisión de reparar o reemplazar es hecha en cada inspección de la zona caliente, las inspecciones precisas ayudarán a determinar el rango de uso, por lo tanto permiten hacer predicciones con más exactitud y hacer el adecuado plan para la siguiente inspección.

El completo mantenimiento y las guías de inspección han sido desarrolladas por fabricantes y son aprovechadas con los manuales de asistencia en los avances de la ejecución de cada una de las inspecciones descritas.

T A B L A No. 7

Mantenimiento de Inspección Mayor:

Paso 1.- Lo mismo que la inspección de combustible y zona caliente.

Paso 2.- Remover la suciedad de la parte media superior de la carcaza y recorrer los cojinetes.

Paso 3.- Remover ambos rotores.

PARTE	ACCION	INSPECCION POR:
- Cojinete: Junta para retén de aceite, junta para retén de aire, aislantes (forros), tacones de empuje axial.	Limpieza	Grasa, averías, grietas, deterioros de metal de los cojinetes.
- Rotor: en las paletas	Limpieza manual	Daños de objetos extraños, erosión, corrosión, grietas y grasa.
- Paletas de la turbina.	Remover la parte del rotor y limpiar las impurezas.	Daños de objetos extraños, erosión, corrosión, grietas.
- Disco de la turbina	Limpiar dentro del área de cola de milano.	Grietas dentro de la cola de milano.
- Eje del árbol y ajuste a la obturación	Limpieza	Rayadura, uso, cierre hermético.
- Estator del compresor.	Limpieza	Daños por objetos extraños, erosión, suciedad, corrosión.

11.5.-) Factores de operación que afectan el mantenimiento:

Los siguientes factores tienen una gran influencia para preservar la vida de la máquina.

- Tipo de combustible
- Frecuencia de arranque
- Carga del ciclo
- Medio ambiente
- Prácticas de mantenimiento

Estos factores son discutidos en los siguientes párrafos.

11.5.1.-) Tipo de Combustible:

El efecto del tipo de combustible, en la vida de las partes, está asociado con la energía radiante en los procesos de combustión y potencia de atomización de los combustibles líquidos.

Por lo tanto, el gas natural, el cual tiene menor nivel de energía radiante, producirá mayor vida a las partes, así el combustible Diesel también.

El uso de petróleo residual crudo, con alta energía radiante y más dificultad de atomización dará como resultado la disminución en la vida de las partes.

El combustible contaminado, también afectará el intervalo de mantenimiento. Esto es particularmente cierto para líquidos de combustible, en el cual la suciedad dará como resultado un acelerado reemplazamiento de bombas, elementos de medición e inyectores. Los elementos corrosivos, también reducen la vida de la zona caliente de los gases.

La contaminación en el sistema de combustible puede corroer o erosionar las válvulas de control e inyectores. Los hidrocarburos líquidos en el combustible del gas serán eliminados para asegurar una satisfactoria operación y un menor costo. La limpieza del combustible beneficiará el resultado, reduciendo el mantenimiento y extendiendo la vida de las partes.

11.5.2.-) Frecuencia de Arranque:

Cada parada y arranque de la turbina de gas afecta a las partes de la zona caliente del ciclo térmico; el sistema de control de la turbina de gas es diseñado y ajustado para resistir un mínimo efecto. De cualquier modo, una turbina de gas con frecuentes arranques y paradas afectará en la vida de las partes y éstas serán más cortas que una unidad similar en base a la carga y el continuo trabajo. En general, para unidades en servicio la utilidad de carga y los efectos de arranque son despreciables, para turbinas en servicio generalmente mayor de 100 horas de operación.

11.5.3.-) Cargas de ciclos:

El ciclo de carga de la turbina de gas, y el continuo trabajo al que es sometida, tendrán un efecto pequeño en la vida de las partes de ésta y no se requieren frecuentes y continuos cambios. El efecto de los continuos y frecuentes cambios de carga sobre la unidad, será similar al efecto de frecuentes paradas y arranques.

11.5.4.-) Ambiente:

La condición del aire en el interior de la turbina de gas, puede tener efecto significativo en el mantenimiento de ésta, si éste es abrasivo o corrosivo, en el caso del abrasivo en el aire tal como la arena de desierto y tormentas, deberá de tenerse precaución en el mantenimiento de los filtros de entrada del equipo. Si la turbina de gas opera en una atmósfera corrosiva, tal como el ambiente marino y depósitos de tierra, deberá de tenerse precaución en el interior del arreglo y la aplicación de los materiales correctos y forros de protección.

11.5.5.-) Prácticas de mantenimiento:

La información acerca de la condición de las partes es basada en estimaciones únicas y variará en las máquinas y en las condiciones de operación.

La estimación puede ser usada en la planeación de un progra-

ma de mantenimiento, de cualquier manera, haciendo los ajustes necesarios a los datos de operación, éstos son acumulados para una aplicación específica, los cuales serán usados para un siguiente programa de trabajo.

Un auxilio en la reducción de los costos de mantenimiento de la turbina de gas es debido a la inspección por medio del borescopio.

La turbina de gas tiene unos barrenos, dentro del maquinado y afuera de la carcasa en posiciones estratégicas, lo cual permite al borescopio, examinar las partes críticas dentro de la zona caliente.

Para apoyar este mantenimiento se han publicado descripciones técnicas para la inspección por medio del borescopio, unido a la utilización de grabaciones de video, tal como:

- Video grabaciones.
- Diapositivas, foto impresa, películas.
- Criterio a seguir.
- Recomendación de la frecuencia de las inspecciones.
- Libros o manuales para localizaciones específicas en cada modelo donde el borescopio puede ser utilizado.

En el campo de las turbinas de gas los ingenieros han sido capacitados para usar los equipos para la inspección por medio del borescopio y reportar e interpretar los resultados. Estos servicios pueden ser obtenidos con los fabricantes de turbinas de gas.

La inspección borescópica no producirá el mismo efecto que produciría la inspección manual o física de las piezas y de las pruebas no destructivas, al menos el hacer uso de este instrumento puede reducir los costos de mantenimiento. Será aconsejable hacer uso de este equipo de vez en cuando o en determinado momento.

Además, la observación o inspección anticipada, a la zona caliente puede ser de ayuda para establecer el reemplazo de piezas que requieran ser sustituidas.

Partes de la Zona Caliente Visibles en el Borescopio.

(Tabla 8 y Fig. 24)

- Extremo del inyector de gasolina
- Aislante de la cámara de combustión
- Piezas de transición
- Primera etapa de la tobera (10%)
- Primera etapa de las paletas
- Segunda etapa de la tobera

- Segunda etapa de las paletas

T A B L A No. 8

Area de Inspección Boroscópica.

Localización	*MS 5001	*MS7001 y 9001
Cubierta del compresor	Trigésima etapa del rotor y estator	Etapa 1, 12 y 17 del rotor y estator
Inyector de combustible y envolvente de combustión	Forros y piezas de transición primera etapa de la arista principal de la tobera.	Forros y piezas de transición primera etapa de la tobera en la arista principal.
Cubierta de la turbina.	1.- Primera etapa de la tobera en el borde de salida y primera etapa de la paleta de la arista principal.	1.- Primera etapa del borde de salida Primera etapa de la arista principal.

2.- Primera etapa de la paleta del borde de salida.

3.- Segunda etapa del borde de salida en la tobera Segun da etapa de la pale ta de la arista principal

2.- Primera etapa del borde principal y segunda etapa del borde principal de la tobera.

3.- Segunda etapa de la to bera en el borde de salida y Segunda etapa de paletas en el borde principal.

4.- Segunda etapa de la pa leta del borde de salida y tercera etapa de la tobera en la parte principal.

*Los modelos MS 5001, MS 7001 y 9001 pertenecen a una serie de turbinas de gas de la General Electric, las cuales son utilizados como ejemplo.

- A - 13° segmento del compresor
- B - 1er segmento, en el borde de los álabes principales de la turbina
- C - 1er segmento siguiendo el borde del ábabe
- D - 2° segmento, en los bordes de los álabes

- Acceso a la inspección primaria normal
- ⊙ Acceso a la inspección secundaria

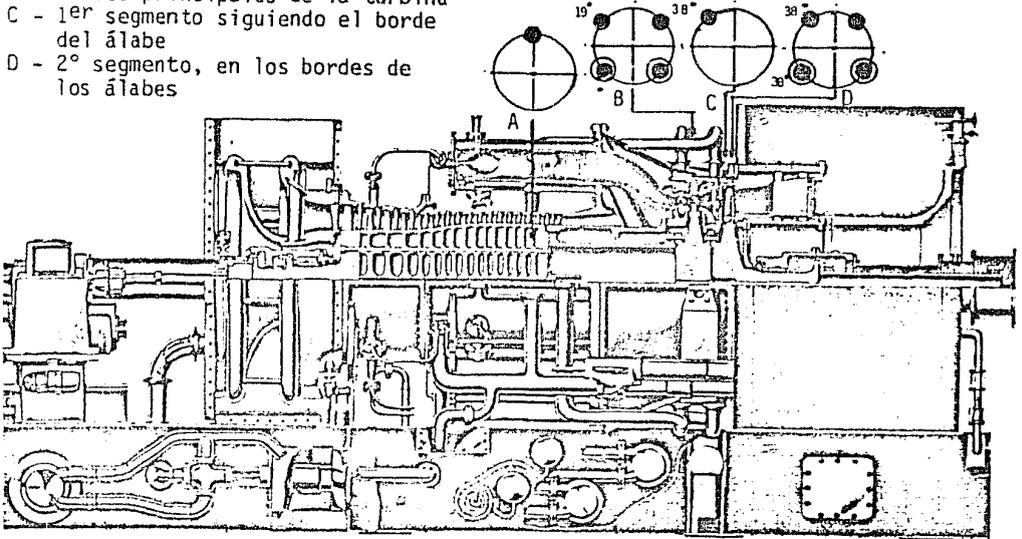


FIGURA No. 24

11.6.-) Intervalos de Inspección:

Basada en una extensa variedad de aplicaciones de la turbina de gas para trabajo pesado en todo el mundo, se han desarrollado criterios para ser usados en los intervalos de inspección como una guía a seguir. La tabla No. 9 enlista los intervalos de inspección para gas y combustibles destilados.

Debe considerarse la inspección, al inicio de la zona de combustión y se recomienda asegurarse de las indicaciones del sistema de operación.

Los intervalos específicos están basados en la experiencia

obtenida, con varios tipos de combustible, medio ambiente de operación, carga de servicio y las propias prácticas de mantenimiento.

De cualquier modo, con la experiencia, el mantenimiento debería tomar la ventaja de la flexibilidad del sistema para ajustar los intervalos de mantenimiento, aprovechar la mano de obra y factores similares.

T A B L A No. 9

Mantenimiento de Inspección.

TIPO DE INSPECCION	TIPO DE COMBUSTIBLE	INSPECCION POR INTERVALOS (HORAS)		
		MS 5001	MS 7001	MS 9001
Combustión	Gas	8-10,000	3-8,000	8,000
	Destilado	6-10,000	3-8,000	3-8,000
	Pesado	1,500	1,500	1,500
Zona Caliente	Gas	16-20,000	20-24,000	20-24,000
	Destilado	12-16,000	16-24,000	16-24,000
	Pesado	6,000	10-14,000	10-14,000
Mayor	Gas	32-40,000	40-48,000	40-48,000
	Destilado	24-32,000	32-48,000	32-48,000
	Pesado	18-22,500	20-28,000	20-28,000

Varias plantas de turbina de gas deberán tener un almacén de partes, al tener organizadas estas piezas se aprovecha minimizando el tiempo de turno, alrededor de una reparación mayor.

La inspección mayor ha sido frecuentemente completada en 10 días o menos bajo estas condiciones. La planeación del programa de mantenimiento anticipa las necesidades de disponer o tener el equipo adecuado para un mejor aprovechamiento del sistema, da una seguridad y disminución en los costos.

La dirección técnica es aprovechada para ayudar al plan de trabajo del mantenimiento que reducirá el tiempo y costo de labor.

Aprovechando esta planeación al reemplazar las partes que pudieran ser necesitadas, se alargaría el tiempo de trabajo de la máquina, proyectando cuáles tareas pueden ser completadas simultáneamente y cuáles pueden ser secuenciales. Las técnicas de planeación pueden reducir el costo de mantenimiento para la optimización del funcionamiento del equipo y del personal requerido.

Es difícil de estimar el número de horas-hombre requeridas para cada inspección, primeramente por la experiencia de productividad y condiciones de trabajo que existen en los diferentes países del mundo. Dependerá del uso de obreros calificados, necesariamente que tengan expe-

riencia en la turbina de gas. Puede hacerse una estimación, como se muestra en la tabla No. 10.

T A B L A N o . 10
 MAINTENIMIENTO POR INSPECCIONES
 REQUISITOS HORAS-HOMBRE

TIPO DE INSPECCION	SERIE DE MODELO	HORAS-HOMBRE	PROMEDIO DE OBRE-ROS.	8 HORAS POR TUR NO.
Combustión	3,000	72	3	3
	5,000	160	4	5
	7,000	384	6	8
	9,000	384	6	8
Zona Caliente	3,000	288	6	6
	5,000	480	6	10
	7,000	1120	7	20
	9,000	1120	7	20
Mayor	3,000	768	8	12
	5,000	1280	8	20
	7,000	2560	8	40
	9,000	2560	8	40

En estas estimaciones (tabla No. 11), se asume que no hay retrasos en la reparación de partes, y que no incluyen técnicas de dirección o supervisión de trabajo. La planeación de un buen mantenimiento, para minimizar el tiempo de máquina fuera de servicio, es tener las partes de reemplazamiento a la mano. Las partes cambiadas pueden ser reparadas alargando su tiempo de vida.

T A B L A No. 11
MANTENIMIENTO POR INSPECCIONES
REQUERIMIENTO HORAS-HOMBRE

SUPOSICIONES

- Mano de obra - no supervisada
- Tiempo de no reparación - Únicamente reemplazamiento.
- Todas las partes aprovechadas.
- Todas las herramientas necesarias aprovechadas.
- Cuadrilla de obreros con promedio de experiencia en el área.
- Inspección que ha sido planeada.

CONCLUSIONES

El presente trabajo da un panorama general de las ventajas del uso y aprovechamiento de las turbinas de gas, en él podemos ver la importancia que tiene la obtención o producción de energía.

Las aplicaciones de la turbina de gas, tanto en la industria así como en la aviación, tal y como se plantea en el inciso de aplicaciones industriales, se ha ido incrementando con el tiempo.

Aunque la instalación de una turbina de gas es compleja, comparada con la turbina de vapor viene a ser relativamente más fácil, debido a sus componentes auxiliares y sus accesorios.

Las turbinas de gas han sido estudiadas a lo largo del tiempo en que han sido utilizadas y solamente en años recientes se ha logrado construir plantas de rendimiento y costos aceptables. Uno de los principales problemas para el desarrollo de la turbina de gas ha sido que su eficiencia aprovechable sea menos del 40%, ya que más de la mitad de la energía que produce es consumida internamente para mover sus componentes, por lo que para aumentar la eficiencia de la turbina, ésta debe de contar con equipo adicional como se ha visto en los capítulos anteriores, consistente en regeneradores, cambiadores de calor, etc.

La turbina de gas a la larga también es muy ventajosa para la obtención y aprovechamiento de energía; lo mismo que las turbinas de

vapor, la turbina de gas en el proceso total constituye un ejemplo típico de flujo constante; la diferencia primordial consiste en que se emplea aire, el cual es un gas relativamente perfecto en lugar de vapor u otro medio considerable.

Se ha visto que la eficiencia que podemos obtener en una turbina de gas, las cuales utilizan compresores centrífugos, resulta demasiado baja, mejorándose con compresores centrífugos de múltiples pasos, los compresores axiales producen relaciones de compresión mucho mayores, además de ser más compactos.

Como un motor, la turbina de gas posee la mayoría de las cualidades de otras máquinas, y muchas ventajas propias. El encendido directo, baja relación de peso-potencia (caballos de fuerza), carencia de vibración, son ventajas notables que no tienen otras máquinas de combustible existentes en la actualidad.

El funcionamiento o la puesta en marcha de la turbina de gas es de gran importancia para la vida de trabajo que se pueda obtener de la misma.

Los controles de operación, así como los instrumentos de medición deben y tienen una gran importancia para la operación de la turbina de gas, los cuales dan facilidad y confiabilidad. El operador vigila comparativamente pocos instrumentos, ajustando a determinadas condicio-

nes y a las que se requiere para que trabaje, el control de combustible hace el resto.

El control de combustible mantiene una velocidad constante en la turbina con cambios normales de carga o condiciones variantes de entrada.

No todas las instalaciones de turbinas de gas tienen la misma instrumentación y control, esta depende en sí de la instalación en particular, por ejemplo, una turbina de gas que opera con combustible líquido, no requiere la misma instrumentación que una que opera con gas.

Es práctica normal de operación tomar lecturas de muchos de estos instrumentos a intervalos periódicos, esto puede hacerse cada hora o cada tres horas según sea recomendado en el control de operación de la turbina de gas. Con los valores obtenidos se elabora una gráfica de manera que se pueda comparar con valores normales de operación ya conocidos (Día Estándar Internacional) proporcionados por los fabricantes.

Uno de los mayores cuidados que se deben de tener son en lo que respecta a las vibraciones anormales de una turbina, es una indicación de que algo anda mal. Si la vibración anormal no se detecta o no se toman medidas correctivas a tiempo, puede haber deterioración rápida debido a desbalanceo con sus consecuencias correspondientes; desgastes muy fuertes, deformaciones y fallas de partes mecánicas.

El conocimiento de cómo opera una turbina de gas es un requisito fundamental para el personal de operación y mantenimiento; si quiere efectuar sus labores en forma eficiente y segura.

B I B L I O G R A F I A

- Centrales Eléctricas, Teoría y Práctica de las Plantas Generadoras Eléctricas Estacionarias.
Frederick, T. Morse
Cap. 7 Pág. 283 Editorial C.E.C.S.A.
- Máquinas de Combustión (Motores y turbinas de gas).
Fritz, A. Schmidt
Cap. B Pág. 229 Editorial Labor, S.A.
- Energía Mediante Vapor, Aire o Gas.
W.H. Severns, H.E. Degler, J.C. Miles
Cap. XV Pag. 392 Editorial Reverté, S.A.
- Ingeniería de Proyectos para Plantas de Proceso.
H.F. Rase y M.H. Barrow
Cap. 16 Pág. 401
- Primer Seminario de Ingeniería, Turbinas de Gas.
Petróleos Mexicanos (PEMEX)
Capítulo: Turbinas de gas.
- Teoría de los Motores de Reacción, Proceso y Características.
B.S. Steckin
Cap. IV Pág. 100 Editorial Dossat, S.A.
- Generator Drive, Gas Turbine Mod. MS-5001
General Electric, 1975

- Heavy-Duty Gas Turbine

Maintenance planning and scheduling. N° MSOA-7911

E.F. Reaves

General Electric Co., 1979

- Componentes y Ciclos de la Turbina de Gas

P.B. Garner

Industrial Gas Turbines, AiResearch Manufacturing Company, Phoenix,
Arizona.

- Accesorios de Turbinas de Gas.

James R. Phillips

Solar, a Division of International Harvester Company, San Diego, Cali-
fornia.

- Combustibles

R.L. Beardsley

Washington Natural Gas Company, Seattle, Washington

- Componentes del Sistema.

Leonard O. Mjolsnes

The Boeing Company, Seattle, Washington.

- Requerimientos de Instalación.

Eric A. Wyeth

Division of Hawker Siddeley Canada, Ltd. Toronto, Ontario Canada.

- Aplicaciones

Robert P. Atkinson y A.H. Williams

Allison Division, General Motors Corporation Indianapolis

Indiana y Sistemas de Energía, Thompson Ramo Wooldridge, Inc. Cleveland,
Ohio.